

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Український державний університет  
науки і технологій**

---

Кафедра «МТОМ»

*В авторській редакції*

## **ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ**

Навчально-методичні рекомендації  
до практичних занять та лабораторних робіт

*Електронне видання*

ДНІПРО  
2025

УДК 621.793/.795(076.5)

I 62

Упорядники:

*Н. Е. Погребна, Т. В. Котова*

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми

132 (G8) «Матеріалознавство»

Протокол № 2 від 03.09.2025 р.

I 62            Інженерія поверхні : навчально-методичні рекомендації до практичних занять та лабораторних робіт / упоряд. Н. Е. Погребна, Т. В. Котова ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 68 с.

Навчально-методичні рекомендації призначені для використання студентами безвідривної форми навчання спеціальності 132 «Матеріалознавство» під час виконання практичних занять та лабораторних робіт з дисципліни «Інженерія поверхні».

Навчально-методичні рекомендації містять матеріал для забезпечення навичок, необхідних для засвоєння значної кількості технологій, за допомогою яких можливо отримати нові структури, хімічний склад та механічні властивості поверхневих шарів деталей та виробів

Лл. 32. Табл. 5. Бібліогр.: 9 назв.

©Погребна Н. Е. та ін., укладання, 2025

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

	ЗМІСТ	стор.
1	<i>Практична робота № 1</i> Класифікаційні ознаки поверхонь руйнування Макроструктурний та мікроструктурний аналіз поверхні деталей	4
2	<i>Практична робота № 2</i> Структури дифузійно зміцнених шарів	37
3	<i>Практична робота № 3</i> Характер дифузійних процесів при поверхневому насиченні металевих поверхонь деталей	44
4	<i>Практична робота № 4</i> Вивчення поверхневих шарів реальних деталей	49
5	<i>Практична робота № 5</i> Структура поверхні конструкційних сталей, дифузійна металізація сталі – борування.	54
6	<i>Практична робота № 6</i> Вивчення мікроструктури поверхонь виробів після ХТО. Дифузійна металізація – хромування.	58
7	<i>Лабораторна робота № 1</i> Вимір твердості за Роквеллом та Брінеллем	60
8	<i>Лабораторна робота № 2</i> Вимір мікротвердості на приладі ПМТ-3	65
	Література	67

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

### Класифікаційні ознаки поверхонь руйнування

#### Макроструктурний та мікроструктурний аналіз поверхні деталей

##### *Основні види та класифікаційні ознаки поверхонь руйнування*

Одна з найважливіших властивостей металевих конструкційних матеріалів – їх міцність, тобто здатність чинити опір дії зовнішніх навантажень і руйнувань. Руйнування – процес утворення та поширення тріщин, що призводить до часткового або повного розділення твердого тіла (матеріалу, елемента конструкції, зразка) на частини. Розрізняють *первиннутріщину* – таку, що поширюється з осередка руйнування та утворює поверхню зламу; *вторинну* – що поширюється з окремих центрів руйнування поперечно до площини руйнування; *магістральну* – що призводить до повного розділення на частини твердого тіла, деталі, зразка. Утворення тріщини (несуцільності) та подальше її просування у твердому тілі з утворенням поверхонь руйнування (зламів) залежить від кристалічної будови та фазово-структурного стану металу, умов навантаження та деформації, впливу робочого середовища, концентраторів напружень та деяких інших чинників.

Доцільно відзначити, що більшість технічних металевих матеріалів полікристалічні та складаються з великої кількості кристалів (зерен), кристалічні ґратки яких розорієнтовані за кристалографічними напрямками на кути до кількох десятків градусів. Тому межі між зернами називають *великокутовими*. Кожне зерно складається з фрагментів – субзерен, розорієнтованих одне від одного на один або кілька градусів. Межі між ними називають *малюкутовими*. Межі зерен мають порушення закономірності розташування атомів, скупчення дислокацій, домішкові атоми та інші дефекти структури. Всередині зерен також відбуваються порушення регулярності розташування атомів у кристалічній ґратці – крайові та гвинтові

дислокації, вакансії, домішкові та міжвузлові атоми (рис. 1.1). Вони створюють локальні напруження та викривлення кристалічної ґратки металу.

Більшість реальних сплавів є багатофазовими матеріалами. Різні фази утворюються в процесі охолодження розплаву або внаслідок термічної обробки. Якщо кристалічна ґратка металу містить домішкових атомів більше, ніж їх може розчинитись до певної температури, то з такого пересиченого твердого розчину виділяються частинки різного ступеня дисперсності – *фази виділення*. Когерентні фази характеризує спряженість їх кристалічної ґратки з ґраткою основного металу (матриці). Некогерентні виділення утворюють з основним металом міжфазні межі. Найчастіше місцем утворення фаз виділення слугують межі зерен. Виділення фаз на межах зерен можуть утворювати суцільні оболонки або розташовуватись у цих місцях переривчасто. Тугоплавкі фази (тверді частинки в розплаві) в процесі кристалізації та утворення зеренної структури розміщуються в ній довільно (безсистемно) [1].

Руйнування матеріалів, позбавлених дефектів кристалічної структури, зумовлює розрив зв'язків між атомами, що відбувається за двома основними елементарними схемами. Перша – реалізується, коли поверхня розділу утворюється внаслідок розриву атомних зв'язків, розміщених перпендикулярно до поверхні руйнування. Такий процес порушення суцільності називають *відривом* (рис. 1.2, а). За другою схемою розрив зв'язків між атомами відбувається вздовж поверхні руйнування, що утворюється під дією прикладених сил у площині руйнування або паралельних з нею площинах. Тобто процес руйнування зумовлюється зсувом однієї частини кристала паралельно іншій уздовж *площини зсуву* (з найщільнішим пакуванням атомів), де опір зсуву найменший (рис. 1.2, б).

Окрім ковзання, процес руйнування може реалізуватись також через зсув однієї частини кристала у положення, симетричне відносно другої частини кристала по площині, яку називають *площиною двійникування*. При

цьому утворюється двійників прошарок, кристалічна ґратка якого є дзеркальним відображенням ґратки іншої частини кристала (рис. 1.2, в).

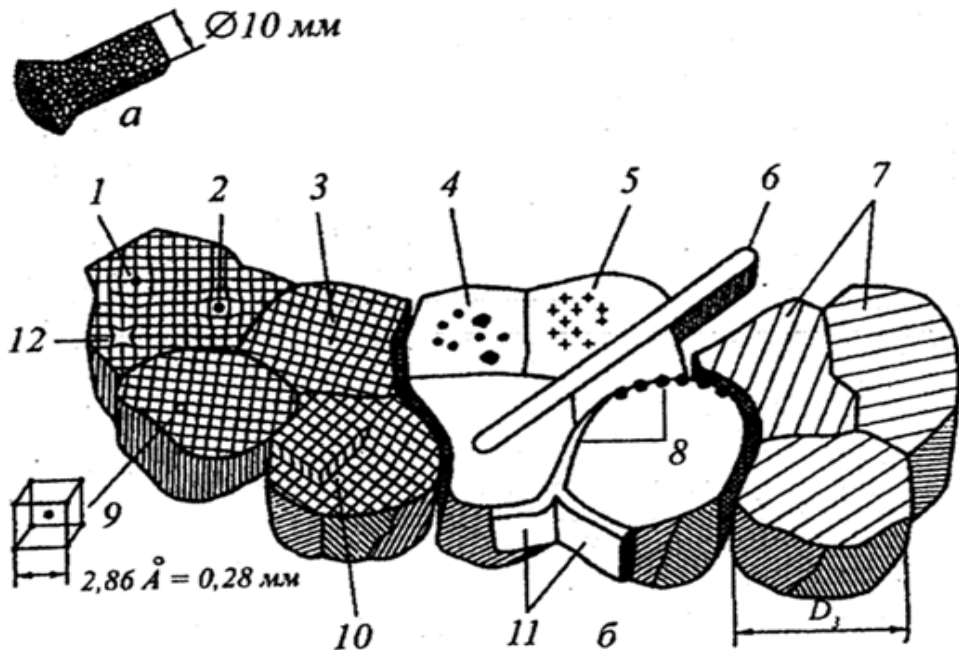


Рис. 1.1. Схематичне зображення структури полікристалічного металевго сплаву [1]: а – металографічний шліф (на площі 1 мм<sup>2</sup> – декілька сотень зерен; б – структура металу (схема); 1,2 – домішкові (чужорідні) атоми заміщення та проникнення, відповідно; 3 – крайова дислокація; 4 – некогерентні виділення; 5 – когерентні виділення; 6 – тугоплавкі домішкові вкраплення; 7 – лінії ковзання; 8 – виділення вздовж меж зерен; 9 – елементарна коміррка α-заліза; 10 – гвинтова дислокація; 11 – плівкові виділення вздовж меж зерен; 12 – вакансія; D<sub>з</sub> – діаметр зерна (наприклад, 50 мкм = 50000 нм = = 500000 Å)

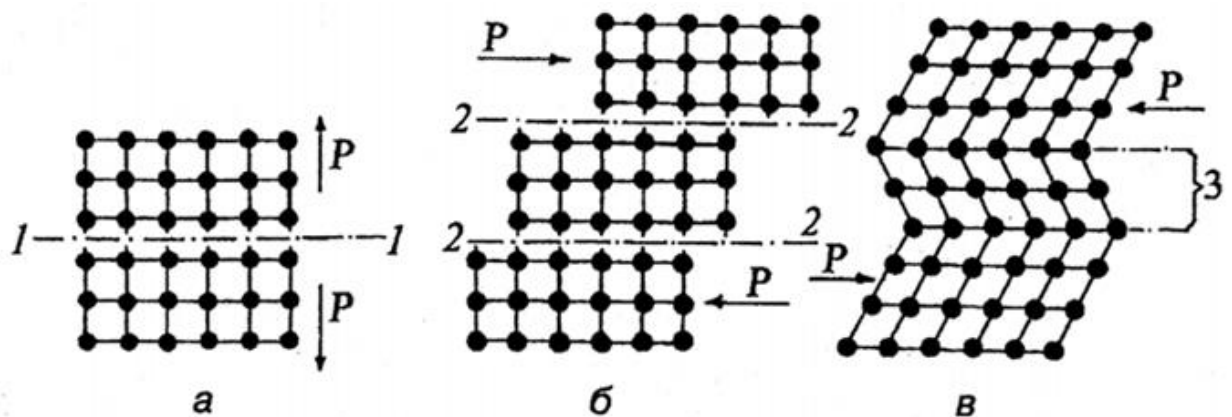


Рис. 1.2. Основні схеми розриву атомних зв'язків під час руйнування твердого тіла: а – відрив; б – зсув; в – двійникування; 1 – лінія розриву; 2 – площина ковзання; 3 – двійниковий прошарок

У реальних матеріалах, що мають елементарні точкові та лінійні дефекти кристалічної ґратки, а також об'ємно-поверхневі дефекти, пов'язані з неомогенністю будови полікристалічних металів і сплавів, незалежно від

природи первинного чинника, відповідального за руйнування, процеси поширення та розкриття тріщини, незважаючи на різноманітність комбінацій навантаження, зводяться до розглянутих основних схем (рис. 1.3).

У залежності від схеми розподілу зусиль, що прикладаються до елементів конструкцій, виробів та зразків і призводять до руйнування, розрізняють навантаження розтягуванням, згином, стискуванням, крученням та ін. Ці види навантажень покладено в основу видів лабораторних випробувань спеціальних зразків для визначення механічних властивостей та несучої здатності конструкційних металевих матеріалів.

Багатофакторний вплив структурних, фазових і силових чинників на процеси деформації, зародження та розвиток тріщин зумовлює реалізацію тих або інших механізмів руйнування металевих матеріалів з утворенням зламів відповідної будови [1].

### *Класифікація основних видів зламів*

Вид зламу є критерієм оцінювання якості металу та засобом діагностики руйнування металевих виробів і конструкцій.

Відомий зручний для практики (досить умовний) поділ зламів на крихкі та в'язкі. Основна ознака такого поділу – ступінь макропластичної деформації, що супроводжує руйнування. У сучасній системі класифікації зламів використано декілька класифікаційних ознак і враховано, окрім ступеня пластичної деформації, мікромеханізм руйнування, характер силової дії (тип навантаження), енергію руйнування, геометрію зламів та ін. Таку класифікацію основних видів поверхонь руйнування (зламів) металів показано на рис. 1.4. Аналіз зламів за запропонованими в класифікації основними ознаками дозволяє досить повно та достовірно охарактеризувати процес руйнування матеріалів.

Відповідно до чинної класифікації за ступенем пластичної деформації, мікромеханізмом та енергією руйнування злами поділяють на крихкі, квазікрихкі та в'язкі.

1. *Крихкий злам* – утворюється внаслідок відколу та поширення тріщини у певних кристалографічних площинах або вздовж меж зерен без помітних ознак макропластичної деформації (відносне звуження площі поперечного перерізу зразка не більше 1,5 %) з малою умовною роботою руйнування ( $A \leq 5$  Дж).

2. *Квазікрихкий злам* – поряд з ознаками крихкого руйнування має ознаки локальної пластичної деформації (відносне звуження площі поперечного перерізу зразка під час його руйнування не більше 15 %) з умовною роботою руйнування ( $A = 5 \dots 20$  Дж).

3. *В'язкий злам* – утворюється внаслідок локальної пластичної деформації, появи, росту та об'єднання мікропорожнин, які формують характерний ямковий мікрорельєф (відносне звуження площі поперечного перерізу під час руйнування зразка більше 15 %) з умовною роботою руйнування ( $A > 20$  Дж).

За характером силової дії злами поділяють на три основні групи.

1. *Злами короткочасного однократного статичного та динамічного навантаження*. Їх утворення характеризується монотонною зміною навантаження, відсутністю періоду постійного навантаження або його малим значенням у порівнянні із загальною тривалістю навантаження. Злами такого типу утворюються під час експлуатації деталей або руйнування зразків на випробувальних машинах із застосуванням простих видів навантаження – розтягу, стиснення, згину, кручення.

2. *Злами тривалого статичного навантаження*. Утворюються такі злами за умови, коли період незмінного (постійного) навантаження є сумірним з періодом процесу розвитку пошкоджень, що призводять до руйнування. При цьому суттєвий вплив чинять температурна та дія активних (корозійних) робочих середовищ. З урахуванням цього в межах групи зламів, що розглядається, слід розрізняти такі:

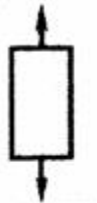

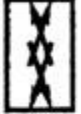
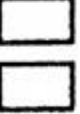

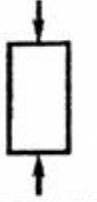
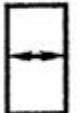

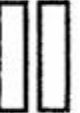
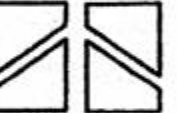
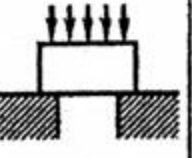

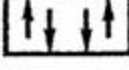

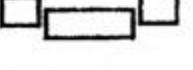

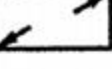
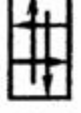


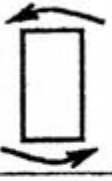




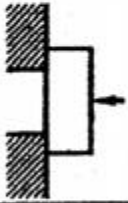









Спосіб навантаження		Напруження		Вид навантаження	
		$\sigma_{\max}$	$\tau_{\max}$	Відрив	Зріз
Розтягування					
Стискування					
Зріз					
Кручення					
Чистий згин					
Згин з періодичною силою					
Втискування					

Рис. 1.3. Схема початкових напрямів в'язкого та крихкого руйнування за різних видів короточасного навантаження (показано напрями максимального видовження) [1]



– *злами сповільненого руйнування* утворюються від тривалої дії статичного навантаження за нормальних температур без впливу корозійного середовища. Таке руйнування може бути наслідком дії постійних зовнішніх навантажень або залишкових напружень. Часто спостерігається у загартованих сталях, що не пройшли пом'якшувального відпуску, а також після технологічних операцій, які сприяють наводнюванню.

– *злами повзучості* утворюються внаслідок тривалої дії статичного навантаження та високих температур за умов повзучості.

– *злами корозії під напруженням* (корозійного розтріскування) утворюються під час руйнування твердого тіла (зразка) внаслідок тривалого статичного навантаження за нормальних температур у разі одночасного впливу статичного навантаження та корозійного середовища.

3. *Злами втомного руйнування (злами втоми)*. Утворюються внаслідок виникнення та розвитку втомної тріщини під дією періодичного та багаторазового змінювання навантаження в широкому інтервалі температур без впливу корозійного середовища. У свою чергу їх поділяють на злами багатоциклового (власне втомні) та малоциклового навантажень в інтервалі температур.

За впливом корозійного середовища розрізняють *корозійно-втомний злам*, що утворюється в широкому інтервалі температур за умов періодичного багаторазового змінювання навантаження та впливу корозійного середовища. Під час багаторазового змінювання навантаження внаслідок періодичної зміни температури утворюється *термовтомний злам*.

Досліджувані поверхні зламів не завжди дозволяють однозначно судити про характер силової дії. Так, наприклад, малоциклові злами втоми можуть бути зовнішньо схожими з власне втомними зламами або зі зламами короткочасного одноразового навантаження. Проте, виконуючи фактографічний аналіз, потрібно насамперед враховувати характер силової дії.

Чинна система класифікації зламів передбачає використання й інших класифікаційних ознак руйнування за:

- мікромеханізмом руйнування;
- мікрогеометрією поверхні руйнування;
- орієнтацією поверхні руйнування до осі зразка або деталі;
- станом поверхні, блиском, кольором;
- зв'язком з елементами структури матеріалу.

Питання класифікації зламів за цими й іншими ознаками, що характеризують макро- та мікроскопічні аспекти руйнування, розглянуто далі у відповідних розділах [1].

### *Контрольні питання*

1. Що таке фрактографія; які основні напрями досліджень і можливості методу?
2. Охарактеризуйте основні види та механізми руйнування.
3. Чим розрізняються первинна, вторинна та магістральна тріщини?
4. Що таке злам?
5. Що таке крихке руйнування? Критерії його оцінювання.
6. Чим характеризується в'язке руйнування? Критерії його оцінювання.
7. Наведіть характеристику квазікрихкого руйнування.
8. Назвіть основні класифікаційні ознаки зламів.
9. На які основні три групи поділяють злами в залежності від характеру силової дії?
10. Чим розрізняються однократне статичне та динамічне навантаження?
11. Яка відмінність між методами макроскопічної та мікроскопічної фрактографії?
12. Як розрізняють основні групи зламів циклічного навантаження?
13. Чим відрізняються малоциклове навантаження від багатоциклового?
14. Як класифікують злами в залежності від енергії руйнування?
15. Як класифікують злами в залежності від ступеня пластичної деформації?

### *Макрофрактографічні характеристики зламів*

Макроскопічне дослідження (макрофрактографія) – перша стадія аналізу поверхонь руйнування. Це, передусім, вивчення будови зламу неозброєним оком у натуральному масштабі або із застосуванням невеликих збільшень (до 50 крат), що дозволяє одержати загальну (інтегральну) картину процесу руйнування. Дослідження зламу зруйнованої деталі або спеціального зразка починають з візуального огляду. Потім докладно вивчають особливості його рельєфу за допомогою оптичних засобів (лупи, біноклярного мікроскопа) за невеликих збільшень. При цьому звертають увагу на важливі особливості та деталі будови макрозламу, а також на додаткові зовнішні чинники руйнування – забруднення певних ділянок зламу, ознаки механічних пошкоджень, окиснення тощо. Одночасно з цим роблять висновок про доцільність очищення або спеціальної обробки поверхні зламу. Зазвичай для фактографічних досліджень використовують свіжоутворені поверхні руйнування без механічних пошкоджень рельєфу, слідів окиснення та бруду. В разі потреби злами іноді очищують м'якою гумкою або промивають у розчинниках (табл. 1.1). Після промивання злам просушують у потоці теплого повітря. Застосовувати реактиви, які можуть розчинювати метал, слід дуже обережно, оскільки це може призвести до спотворення рельєфу зламів. Тому очищення зламів без крайньої потреби небажане, особливо в разі діагностики експлуатаційних пошкоджень деталей; їх очищують лише після ретельного вивчення у недоторканому вигляді [1].

Для проведення макрофрактографічного аналізу вдаються також до фотографування зламів з невеликим збільшенням за допомогою фотоапаратів, фотоприставок або спеціальних оптичних приладів із можливістю змінювання кута освітлення, оснащених довгофокусними об'єктивами. Характеристики об'єктивів для фотографування макрозламів наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.1. Способи очищення зламів [1]

Спосіб очищення	Реактив	Операція
Промивання	Розчинники РДВ і Р5, бензин, етиловий спирт	Багатократне занурення у розчинник, протирання волосяною щіткою. Промивання у бензині та спирті
Очищення за допомогою ультразвукових коливань	0,2 %-вий розчин $CCl_4$ або розчин гексаметилентетраміну у 20 %-вій $HCl$	Очищення в розчинах в ультразвукових ваннах (тривалість обробки визначають у залежності від ступеня забруднення зламу)
Видалення шару	20 %-вий розчин $H_2SO_4$ , сповільнювач ЧМ	Занурення зламу в розчин і сповільнювач з подальшим візуальним контролем
Видалення шару оксидів з поверхні зламів алюмінію та його сплавів	10 %-вий розчин $NaOH$ або $KOH$	Промивання розчином лугу

Таблиця 1.2. Характеристики об'єктивів для фотографування макрозламів [1]

Фокусна відстань, мм	Лінійне збільшення
152	1–3
72	3–10
40	10–20
32	20–30

Примітка. Використовують також об'єктиви з фокусними відстанями 158, 63, 42, 16 мм

Злами кристалічної будови краще фотографувати в затемненому полі, оскільки яскраві віддзеркалювання світла зменшують чіткість зображення а знімках. Збільшення обирають з урахуванням стану поверхні (глибини рельєфу) та габаритів зразка. Використання вищих збільшень призводить до зменшення глибини різкості на фотографічних зображеннях макрозламів. Зазвичай чітку картину зламів залізовуглецевих сплавів забезпечує збільшення їх до 10 крат, а кольорових сплавів (їх рельєф більш шорсткий) – до 5 крат. Фотографувати окремі ділянки зламів можна і на значніших збільшеннях (до 15–20 крат). Користуючись оптичними приладами для макроаналізу зламів, слід поступово переходити до підвищених збільшень.

У межах макроскопічного дослідження злами оцінюють і класифікують за такими основними ознаками: орієнтацією поверхні руйнування, мікрогеометрією зламу, ступенем пластичної деформації, станом поверхні, блиском, кольором.

### *Злами одноразового навантаження*

В залежності від характеру навантаження, напруженого стану, дії нормальних і дотичних напружень, що спричиняють руйнування, утворюються злами з різною орієнтацією поверхні розділу.

Класифікуючи злами за *орієнтацією поверхні руйнування*, їх поділяють на прямі, косі та прямі зі скосами (чашеподібні).

*Прямим* називають злам, поверхня якого зорієнтована нормально до осі зразка або деталі, тобто перпендикулярно до напрямку найбільших зусиль розтягування (рис. 1.5, а). Така орієнтація зламу є характерною ознакою макрокрихкого руйнування.

Прямий злам зі скосами утворюється в процесі випробування на розтяг циліндричних і призматичних зразків із гладкою поверхнею. Складається із двох зон: центральної, перпендикулярної до напрямку максимальних напружень розтягу, та периферійної, розташованої під кутом  $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$  до основної поверхні руйнування (рис. 1.5, б). Такий злам часто утворюється під час випробувань конструкційних легованих сталей. Формування “чаші” зламу пов’язане з утворенням шийки внаслідок деформації зразка під час розтягування, що зумовлює виникнення значних осьових і бічних напружень у центральній частині зразка. Саме тут розпочинається руйнування, що спочатку поширюється у площині, зорієнтованій нормально до осі зразка. Внаслідок змінювання напружено-деформованого стану в міру наближення тріщини до поверхні зразка вона змінює свій напрямок у бік максимальних дотичних напружень з утворенням бокових скосів. Іноді кінцева стадія руйнування під час розтягування супроводжується утворенням “чаші” на обох зустрічних половинках зразка (рис. 1.5, в).

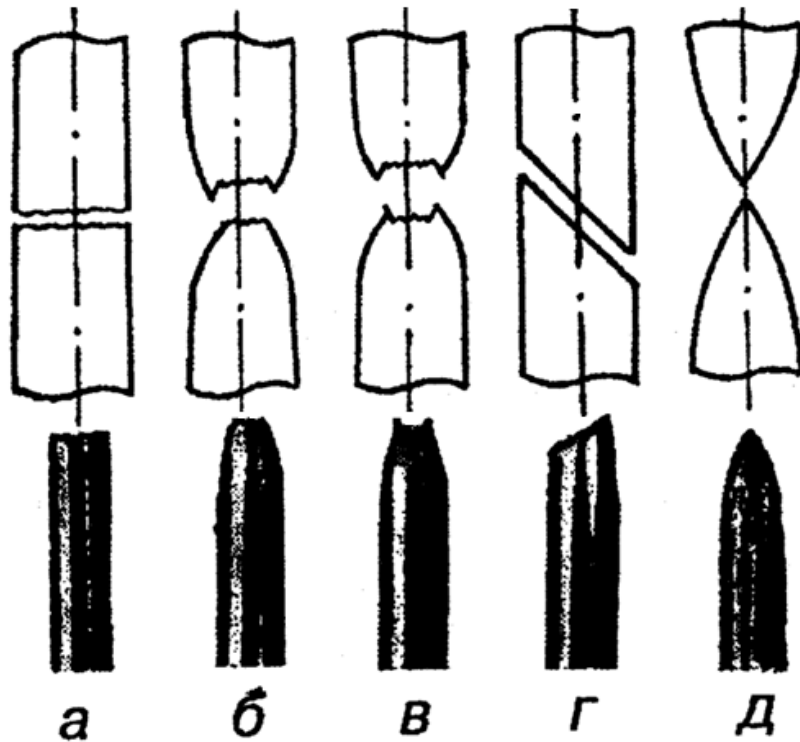


Рис.1.5. Характерні види орієнтації поверхні макрозламів під час розтягування: а – злам; б – прямий зі скосами типу “чаша-конус”; в – прямий зі скосами типу “подвійна чаша”; г – косий; д – конічний

Косий злам (рис. 1.5, г) спричиняється зрізом у площині максимальних дотичних напружень. Поверхня такого зламу зорієнтована нахилом (під кутом) до осі зразка або деталі. Найчастіше спостерігається під час руйнування анізотропних матеріалів з обмеженою пластичністю та низьким опором руйнуванню зрізом, наприклад, магнієвих і алюмінієвих деформованих сплавів.

Наявність бічних скосів уздовж країв зламу (“чаші”), як і косий злам, є ознакою макров’язкого руйнування. Зі збільшенням зони пластичної деформації, що супроводжує руйнування, розміри скосів збільшуються.

У разі максимальної реалізації пластичності матеріалу в зоні руйнування під час розтягування можуть утворюватись *конічні злами* (рис. 1.5, д) характерні для дуже пластичних матеріалів (свинцю, чистого алюмінію, електролітичної міді тощо).

Злами тривалого статичного одноразового навантаження за кімнатної температури утворюють характерні поверхні, перпендикулярні до максимальних напружень розтягу, типові для макрокрихкого руйнування.

Дуже крихкі матеріали можуть піддаватись сповільненому руйнуванню навіть під дією стискувальних напружень з утворенням зламу, орієнтованого перпендикулярно до лінії максимальних поперечних деформацій [1].

Оцінка макрозламів за *геометричними ознаками поверхні* руйнування передбачає їх класифікацію на однорідні та неоднорідні, а також зірчасті, шевронні, шиферні злами та складної форми.

Однорідний злам має морфологічно однакову поверхню без будь-яких розрізнявальних зон. Спостерігається досить рідко, наприклад, унаслідок руйнування крихких матеріалів, вуглецевих сталей за різних температур.

Для більшості зламів характерна неоднорідність будови, наявність геометричних зон з різним макрорельєфом, макроорієнтованістю, кристалічністю, шорсткістю тощо. Такі злами класифікують як *неоднорідні*.

Неоднорідність будови зламів може бути зумовлена двома основними причинами:

- неоднорідністю досліджуваного матеріалу за хімічним складом, структурою та властивостями;
- особливостями процесу руйнування, пов'язаними з вихідною неоднорідністю напруженого та деформованого стану або його змінами.

Так, у випадку одноразового згину на зламах спостерігають різні за станом поверхні зони (кристалічної або волокнистої будови в центральній частині зразка та тоншої дисперсної волокнистої будови на бічних кромках зрізу (скосах, утяжинах)). *Утяжина* зламу характеризує рівень максимальної деформації ударного зразка вздовж бічних площин, паралельних напрямку навантаження під час випробування (вимірюють у міліметрах). Неоднорідність будови зламів (рис. 1.6) виявляється також у наявності зони *стабільного розвитку тріщини* та зони швидкого руйнування – *долому*.

Для поверхонь неоднорідних зламів гладких циліндричних зразків під час випробувань на розтяг характерне формування трьох основних зон (рис. 1.7) – волокнистої, радіальної та зони зрізу.

Злами, що мають лише одну зону (однорідні), утворюються за умови дуже високої крихкості або в'язкості. На більшості ж поверхонь зламу розрізняють дві або всі три зони, які можуть розміщуватись за одною з таких послідовностей відносно центра зразка:

- волокниста зона та зона зрізу;
- волокниста, радіальна зона та зона зрізу;
- радіальна зона та зона зрізу.

*Волокниста зона* відповідає повільному росту тріщини. Вона розміщується у центральній частині зламу й оточує осередок руйнування, який зазвичай знаходиться на осі розтягу або поряд з нею. Ця зона може складатись з випадково розміщених волокон або із серії тонких кругових борозенок, перпендикулярних до напрямку поширення тріщини – від осередка до периферії зразка. Волокна типові для заліза промислової чистоти та звичайних вуглецевих сталей. Борозенки частіше спостерігаються у зламах низьколегованих сталей, титанових сплавів та інших матеріалів промислової чистоти.

*Осередок руйнування*, що відповідає макроскопічному місцю зародження руйнування, розміщений за цією схемою навантаження в центрі волокнистої зони. Його можна розрізнити за несучільністю – часто за вкрапленнями або їх скупченням. В окремих випадках осередок руйнування спостерігається під час руйнування високо пластичних матеріалів у вершині конуса за невеликих збільшень (близько  $\times 5$ ).

*Радіальна зона* формується під час переходу тріщини від повільного росту до швидкого або нестабільного її поширення. За таких умов утворюються радіальні рубці, які збігаються із загальним напрямком просування тріщини. Такі радіальні рубці (промені) починаються або від периферії волокнистої зони, або, якщо її немає (повністю нестабільний розвиток тріщини), – від самого осередка руйнування. Іноді радіальна зона може становити поверхню зламу без макроскопічних деталей, що свідчить про надзвичайну крихкість матеріалу.

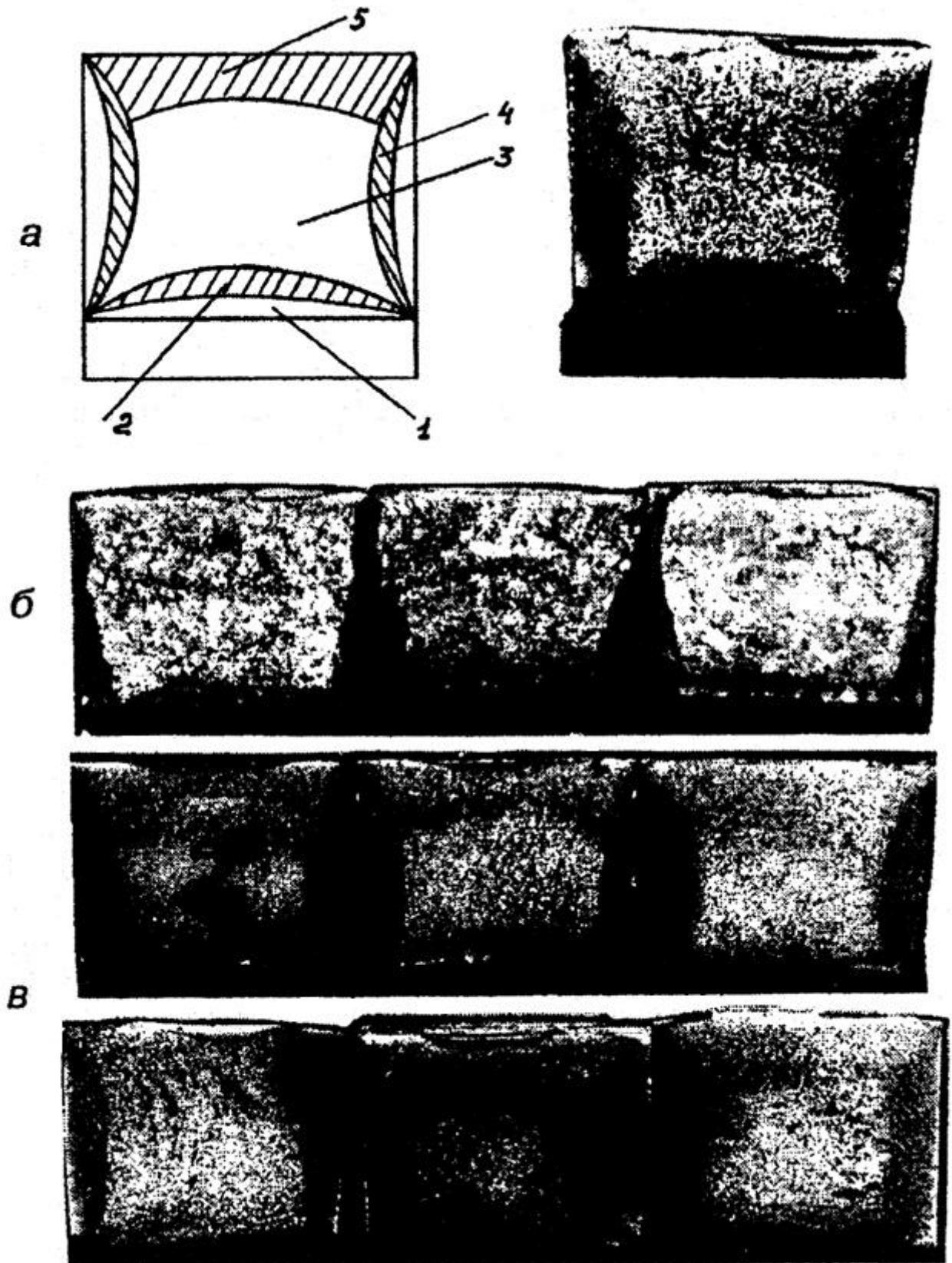


Рис. 1.6. Схема елементів будови макрозламу зразка ударного згину (а), вид зламів кристалічної (б) та волокнистої (в) будови:  
 1 – зона зародження тріщини; 2 – зона стабільного росту тріщини;  
 3 – зона долому; 4 – бічні скоси; 5 – зона поширення тріщини

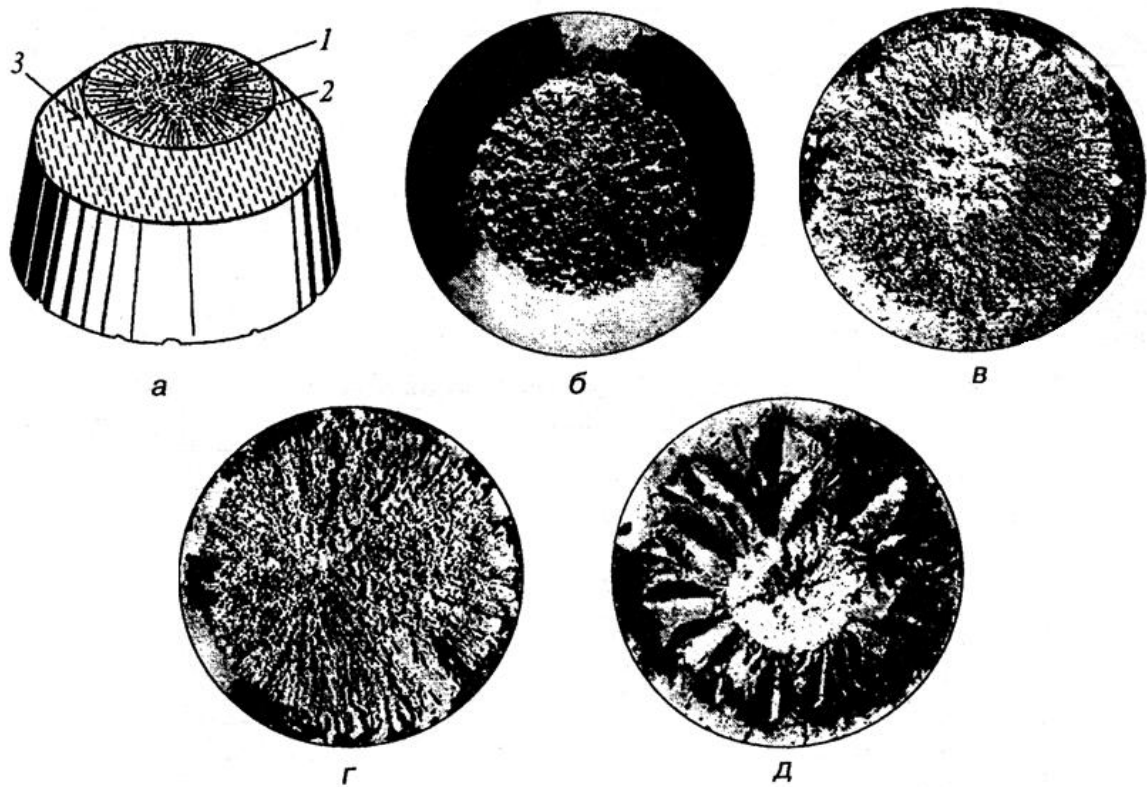


Рис. 1.7. Схематичне зображення (а) та макробудова зламів (б, в, г, д), що утворюються під час розтягування гладкого циліндричного зразка,  $\times 12$ ;  
1 – волокниста зона; 2 – радіальна зона; 3 – зона зрізу

Система радіальних рубців на поверхні руйнування циліндричних зразків, що формується за умов розтягу матеріалу зі зниженою пластичністю у поперечному напрямі/напрямку відносно напряму/напрямку розтягу у вигляді зірки з похилими радіальними ділянками, утворює злам, який класифікують як зірчастий (рис. 1.7, д). Ці рубці можуть бути тонкими, грубими, викривленими в залежності від складу, структури та умов руйнування матеріалу. Утворення зірчастого макрорельєфу зламів пов'язують із виникненням у центрі зразка фокуса руйнування та зі зміною об'ємно-напруженого стану на першій стадії руйнування (формування шийки), за якого кільцеві об'ємні напруження стають майже однаковими з осьовими.

*Зона зрізу* має вигляд рівної кільцеподібної ділянки зламу, суміжної з вільною поверхнею зразка. Її розмір залежить від умов напруженого стану та властивостей металу. Можливі такі варіанти її утворення та розташування на макроповерхні руйнування:

- зона зрізу;
- волокниста зона, що переходить у зону зрізу;
- волокниста зона, що переходить у радіальну (далі переходить у зону зрізу);
- радіальна зона, що переходить у зону зрізу.

Кожен з наведених варіантів макрозламу можна одержати, використовуючи зразки певного діаметра та відповідного напруженого стану. Ширина зони зрізу зазвичай майже не змінюється, але значно змінюється її частка (у відсотках) відносно загальної площі зразка.

Під час випробування гладких зразків може не бути зони зрізу лише в разі переходу в зону зрізу від радіальної зони (обмежені випадки) та тільки за умови дуже крихкого стану металу. У разі випробування на розтяг зразків з кільцевим надрізом (рис. 1.8) макрозлам не має зони зрізу і складається з радіальної, волокнистої зони та зони долому в центрі зразка.

Наявність надрізів або спеціально наведених тріщин істотно впливає на розміщення, напрямки розвитку тріщини та послідовність розміщення зон у макрорельєфі зламів.

Для формування виду макрорельєфу зламу важливі також розміри та форма зразків для випробувань або деталей руйнування. Від них залежить напружений стан зразка, співвідношення зон зламу (у квадратних, прямокутних і циліндричних зразках) та їх форма. Так, наприклад, у прямокутних зразках волокниста зона може бути еліптичною за формою з більшою віссю, паралельною довгим сторонам прямокутника. У зламах прямокутних зразків (деталей) тонких перерізів ця зона може істотно змінюватись (скорочуватись) або в разі реалізації плосконапруженого стану зовсім зникати (рис. 1.9).

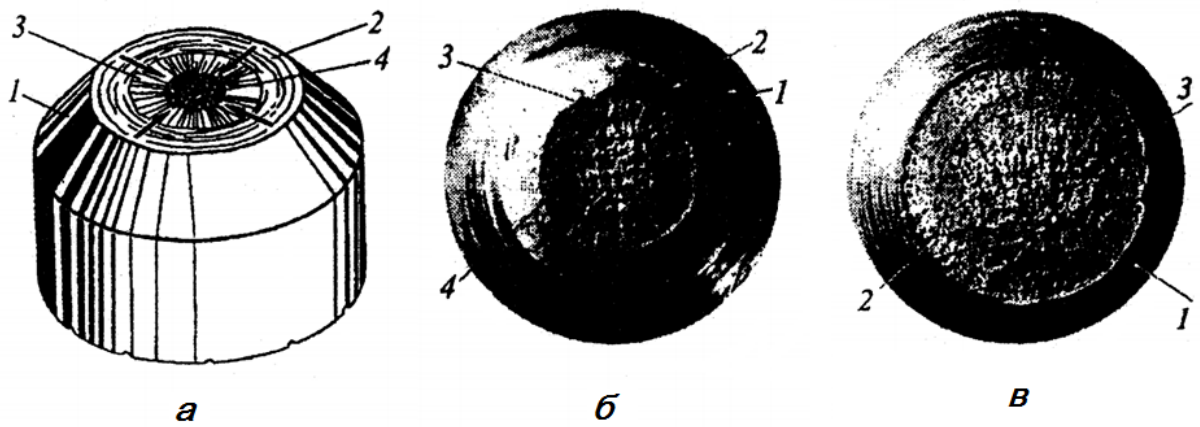


Рис. 1.8. Схема будови (а) та вид зламів циліндричних зразків з кільцевим надрізом радіусом 2,54 мм (б) і 0,254 мм (в),  $\times 8$ ;  
1 – надріз; 2 – волокниста зона; 3 – радіальна зона; 4 – зона долому

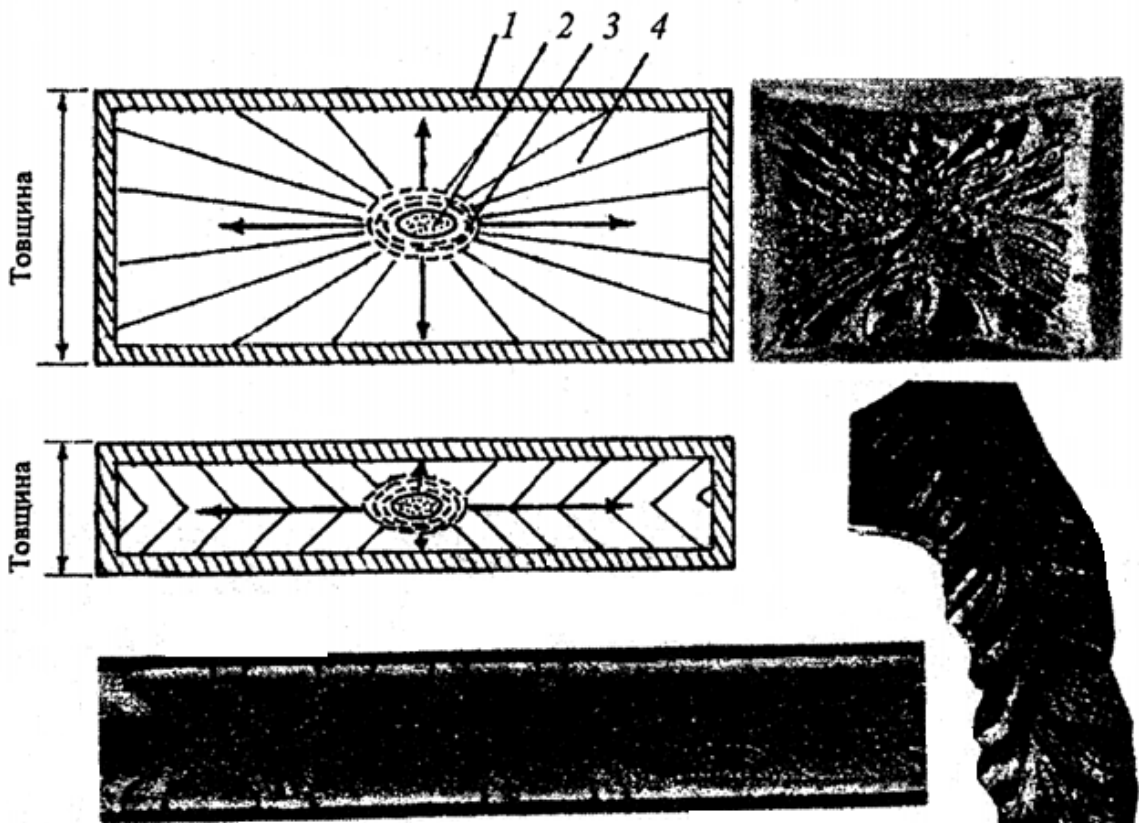


Рис. 1.9. Вплив товщини прямокутних зразків на формування структурних зон макрозламів і елементів шевронного візерунка:  
1 – зона зрізу; 2 – осередок руйнування; 3 – волокниста зона;  
4 – радіальна зона (шевронний візерунок)

Під час руйнування розтягом зі згином зразків і деталей прямокутного перерізу утворюється злам, рельєф якого являє собою систему сходинок у вигляді “ялинки” або шеврона, вершини яких зорієнтовані до зони початку руйнування (рис. 1.9). *Шевронний злам* є ознакою невеликої пластичної

деформації під час руйнування. Утворення шевронних зламів пов'язують з нестабільним, відносно швидким, розвитком тріщини, незбігом напрямку поширення тріщини та найкоротшої відстані від фронту тріщини до вільної поверхні зразка. Коли ці напрямки збігаються, утворюються прямі радіальні рубці (у циліндричних зразках). У разі їх збігу у плоских прямокутних зразках радіальні рубці втрачають прямолінійність і орієнтуються в напрямку найближчої вільної поверхні. Шевронний макрорельєф спостерігається на змішаних (квазікрихких) зламах і майже не помітний на кристалічних.

Окрім розмірів і форми зразків (деталей), на будову макрозламів значно впливає структура металу та анізотропія його механічних властивостей, що обумовлено технологічними особливостями виробництва, ліквіацією, рядковістю структури, великою кількістю неметалевих вкраплень, підвищеним вмістом газів ( $H_2, CO$ ) тощо. Зазначені причини зумовлюють формування зламу з груборозшарованим (деревоподібним) рельєфом, який утворюється внаслідок відривання груп однаково зорієнтованих волокон (рис. 1.10). Такий вид зламу класифікують як *шиферний* (шаруватий) та розглядають як ознаку структурної неоднорідності та анізотропії металу. Інколи поверхня шиферного зламу може мати дрібнозернисту будову, суцільність якої порушується смугами та сходинками.

Злам, що фактографічно не має подібності з фігурами певної геометричної форми, класифікують як *злам складної форми*.

На поверхні зламів дуже крихких матеріалів іноді спостерігають специфічні нерівності у вигляді однієї або кількох концентричних ліній навколо центра руйнування (рис. 1.11). Їх формування є наслідком взаємодії фронту поширення тріщини з фронтом пружної хвилі, утвореної внаслідок відбиття її від дефекту або перешкоди розвитку руйнування. Такі лінії називають *лініями Вальнера*. Вони можуть перетинатись між собою, на відміну від утомних борозенок, які ніколи не перетинаються в межах однієї площини поверхні зламу (плато, тераси).

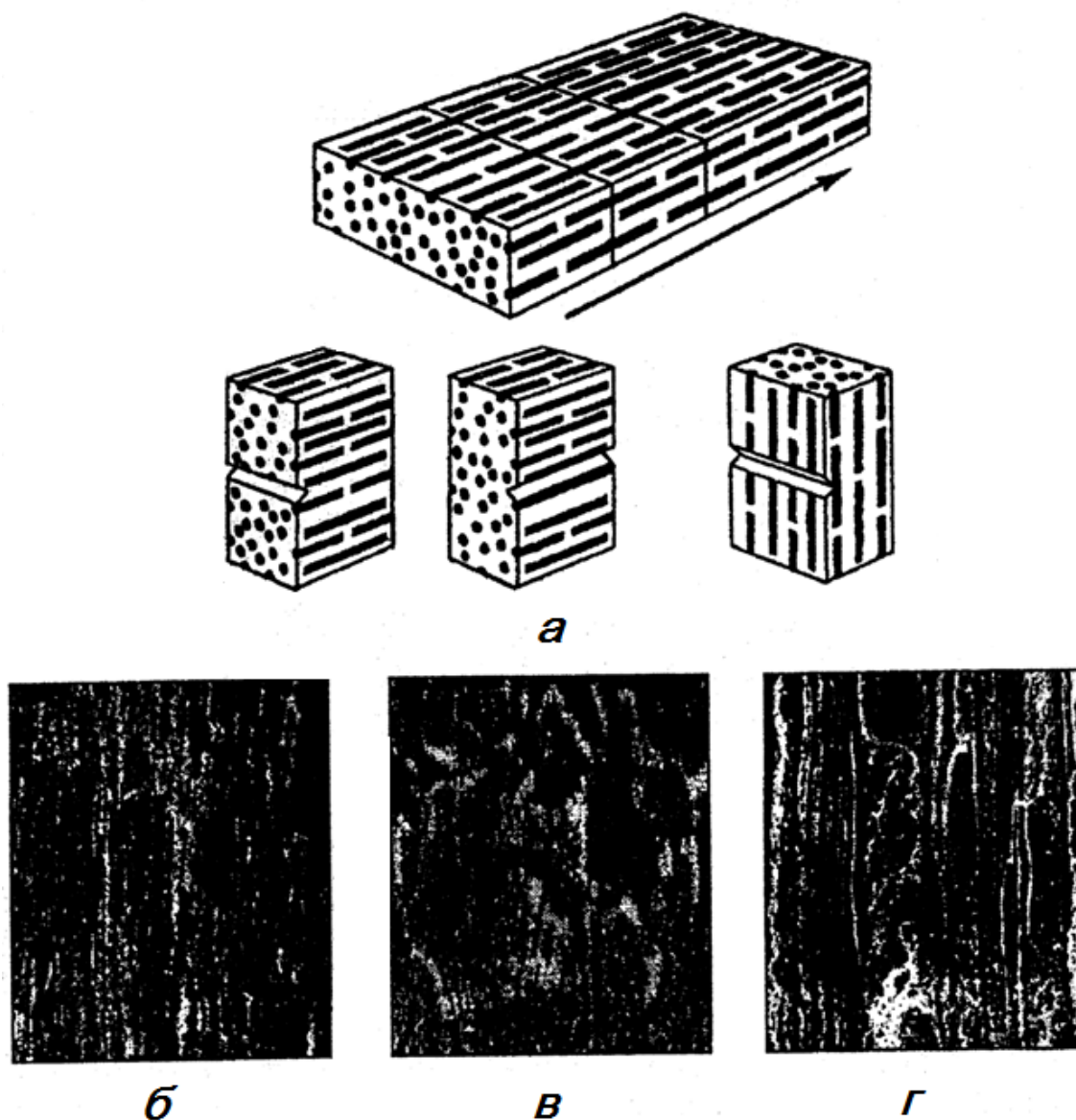


Рис. 1.10. Схема утворення (а) та вигляд шиферного зламу за різного збільшення (б, в, г); б –  $\times 3$ ; в –  $\times 10$ ; г – 150 РЕМ [1]

Макрозлами класифікують також за станом поверхні руйнування, блиском і кольором.

Так, злам, що утворюється за умов руйнування з малою пластичною деформацією з формуванням на поверхні руйнування розорієнтованих блискучих ділянок (фасеток) з металічним блиском, класифікують як *кристалічний*. В залежності від розміру (дисперсності) фасеток розрізняють *грубокристалічні* та *тонкокристалічні* злами (рис. 1.12).

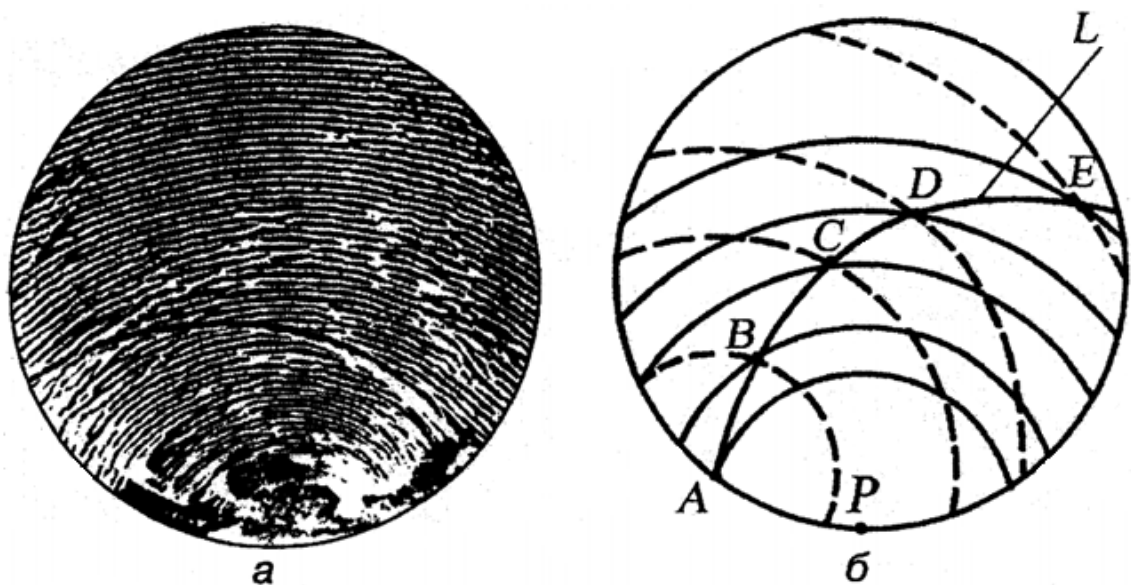


Рис. 1.11. Лінії Вальнера у зламi скла (а) та схема їх утворення (б):  
 L– лінія Вальнера; P– осередок руйнування; A– дефект на поверхні скляного стрижня;  
 B, C, D, E – точки перетину фронту руйнування з фронтом пружної хвилі

Кристалічний злам може утворюватись під час руйнування вздовж меж зерен (міжзеренний або інтеркристалітний) або вздовж кристалографічних площин зерен (внутрішньозеренний або транскристалітний). Це зумовлює значну здатність до віддзеркалення світла, надаючи кристалічним зламам характерного металічного блиску.

На кристалічних мак розламах утяжин немає або вони дуже малі, що свідчить про незначну пластичну деформацію під час руйнування металу. За значних збільшень на поверхні кристалічного зламу спостерігають фасетки відколу, квазівідколу або інтеркристалітного руйнування.

Сталі з кристалічним зламом за нормальних температур експлуатації мають нижчу ударну в'язкість у порівнянні з такою ж сталлю з волокнистою будовою зламу. Підвищенню крихкості сталі відповідає більший розмір зерна в зламi.

Різновидом грубокристалічного зламу є *нафталіновий* злам (рис. 1.12, н). Це злам з однорідною поверхнею розділення, яке проходить уздовж кристалографічних площин грубозернистого аустеніту та не має явних ознак макропластичної деформації. Фасетки у зламi мають характерний селективний блиск, що змінюється в залежності від кута освітлення та

нагадує блиск нафталіну. Такий вид зламу утворюється в інструментальних, головним чином швидкорізальних, сталях, у результаті повторних нагрівань без проміжного відпалювання або гарячого деформування зі значними (близькими до критичних) ступенями обтискування перегрітих сталей. Формуванню нафталінового зламу відповідає підвищена крихкість і значне (у кілька разів) зниження стійкості інструменту. Нафталіновий злам – це майже невинуватий дефект, зумовлений порушенням технологічних режимів термічної та гарячої механічної обробки.

*Каменеподібний* (бутовий) злам (рис. 1.12, п) має цілком або частково міжзеренну горбкувату грубозернисту будову без металічного блиску, а зерна обмежені криволінійною поверхнею, що нагадує оплавлену поверхню грубого каменя (буту).

Розрізняють каменеподібні злами:

– первинний – утворюється під час руйнування виливків або заготовок, що не піддаються термічному обробленню вище верхньої критичної температури крихкості;

– стійкий вторинний – утворюється під час руйнування перегрітої або литої, а потім термічно обробленої сталі.

Утворення каменеподібного зламу зумовлено значним зниженням механічних властивостей, особливо ударної в'язкості та пластичності сталі. Загальною причиною формування каменеподібного зламу сталей вважають виділення надлишкових, обмежено розчинних у  $\gamma$ -фазі частинок (сульфідів, нітридів, карбідів, боридів) або оплавлення евтектик у зернограничних об'ємах.

Первинний каменеподібний злам можна виправити короткочасним нагріванням сталі до 1050 – 1110 °С, під час якого відбувається рекристалізація аустеніту. Виправлення стійкого каменеподібного зламу пов'язано з проведенням тривалих обробок за високих температур (типу гомогенізаційного відпалу) у поєднанні з інтенсивною деформацією. Виправлення вторинного стійкого каменеподібного зламу може бути

рекомендовано лише для випадків незначного перегріву, що не супроводжується значним зниженням механічних властивостей.

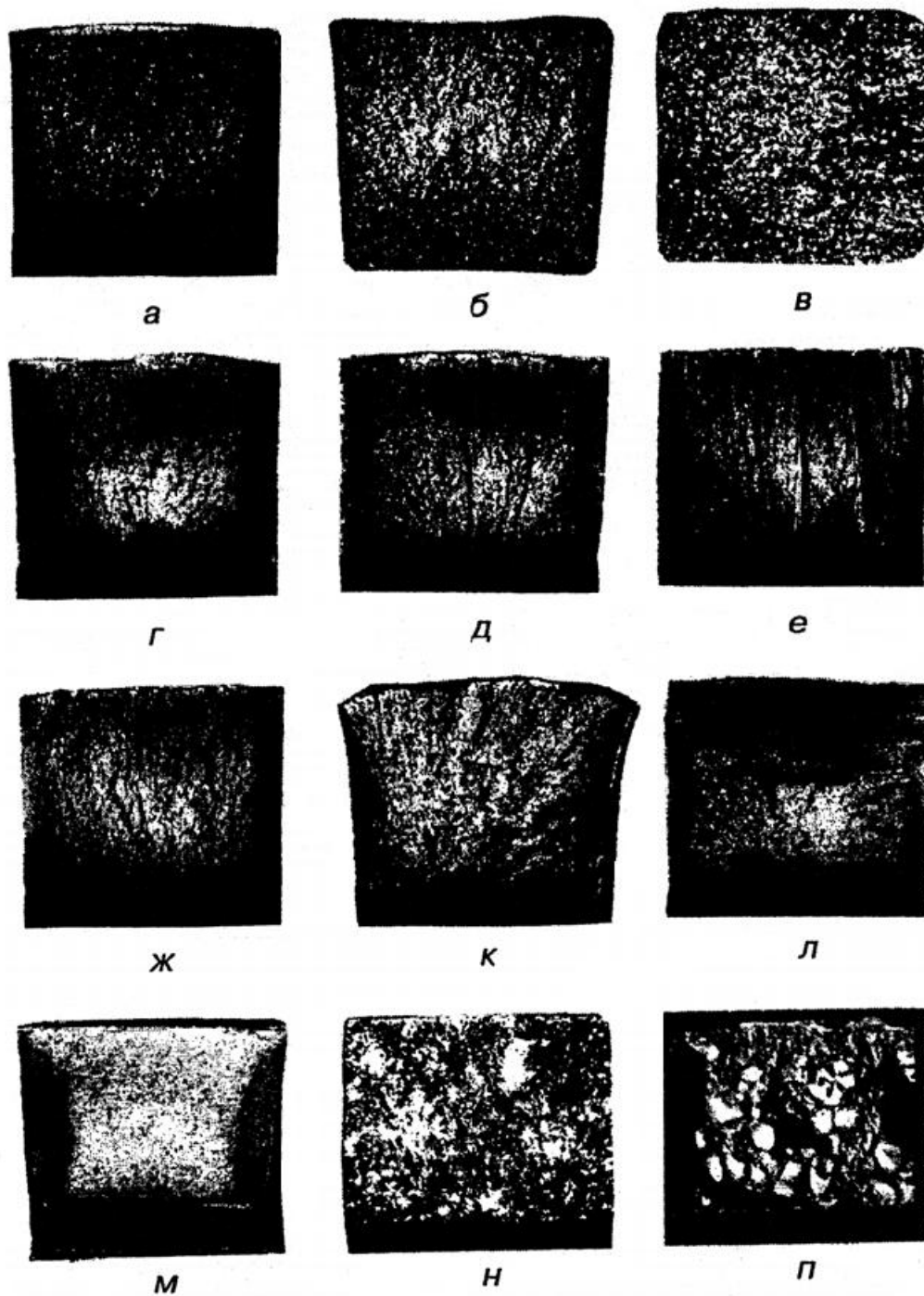


Рис. 1.12. Види макрозламів зразків для випробування на ударний згин:  
а, б, в – кристалічний; г, д – волокнистий; е, ж – волокнисто-смугастий;  
к – волокнисто-лускуватий; л – шиферний; м – фарфороподібний;  
н – нафталіновий; п – каменеподібний

Різновидом каменеподібного зламу уздовж меж стовпчастих первинних зерен аустеніту є *жердиноподібний* злам, який характерний для ливарних сталей.

Кристалічні злами дрібнозернистої будови спостерігають під час руйнування високоміцних низько відпущених конструкційних литих і деформованих сталей із дрібнозернистою структурою за підвищеного вмісту вуглецю.

Поверхня дрібнозернистих зламів – матова, без ознак пластичної деформації та без металічного блиску. Кристалічну будову таких зламів візуально розрізнити важко. Ділянки дрібнокристалічного (прихованокристалічного) зламу часто спостерігають на тлі зламу волокнистої будови.

Класифікуючи дрібнокристалічні макрозлами однократного навантаження, розрізняють *фарфороподібний* (порцеляновий) злам із гладкою матовою (майже непомітною) кристалічною будовою, подібною до поверхні зламу порцеляни, а також *оксамитовий* із гладкою поверхнею без кристалічного блиску, який нагадує оксамит.

Сталі з дрібнокристалічною будовою зламів характеризують знижена пластичність і ударна в'язкість за високого рівня показників міцності.

Злам у вигляді однорідної поверхні (подібно до будови волокна), утворений за механізмом в'язкого внутрішньозеренного руйнування з очевидними ознаками пластичної деформації в межах всієї поверхні зламу, класифікують як *волокнистий*. Такий злам має однорідну поверхню внутрішньозеренного в'язкого руйнування зі значною пластичною деформацією. При цьому деформується майже кожне зерно, що прилягає до поверхні розділення зразка.

Назва “волокнистий злам” умовна, оскільки зі збільшенням понад 30 – 50 крат у волокнистому зламі спостерігається ямковий мікрорельєф.

Утворення макрозламів волокнистої будови характерне для руйнування в'язких литих і деформованих металевих матеріалів. Так, сталі з волокнистим

зламом мають найвищі показники ударної в'язкості, пластичності та холодостійкості за однакових значень порога розтяжної міцності у порівнянні зі сталями з іншою будовою макрозламу. Поверхня руйнування типової волокнистої будови не має металічного блиску, темно-сірого кольору. На бічних ділянках зламу часто наявні утяжини, розмір яких збільшується із підвищенням в'язкості металу.

Окрім розглянутого основного виду волокнистого зламу розрізняють також сухий волокнистий та неоднорідно-волокнистий злами.

Сухий волокнистий злам характеризує матова світло-сіра поверхня в'язкого внутрішньозеренного руйнування з меншим проявом ознак пластичної деформації. Утворюється він під час руйнування переважно високоміцних конструкційних сталей. Величина утяжин зразків незначна. Під час формування сухого волокнистого зламу забезпечується належна конструкційна міцність низько відпущеної сталі. Сталі з таким зломом мають дещо меншу пластичність у порівнянні зі сталями після високого відпуску з волокнистою будовою зламів.

*Неоднорідно-волокнистий злам* – різновид волокнистого зламу. Його характеризує неоднорідна поверхня в'язкого руйнування з волокнистим макрорельєфом і явними ознаками пластичної деформації. Неоднорідний волокнистий злам утворюється переважно у деформованих сталях із макронеоднорідною структурою. В залежності від розміщення поверхні зламу відносно напрямку деформації сталі неоднорідно-волокнисті злами поділяють на волокнисто-смугасті та волокнисто-лускуваті.

*Волокнисто-смугастий злам* (рис. 1.12, е, ж) утворюється під час руйнування металу в площині, паралельній напрямку деформації та перпендикулярній до поверхні деформації (поперечна проба). Його характеризує шаруватість рельєфу у вигляді паралельно зорієнтованих волокон різної довжини, які закінчуються уступами. Це пов'язано зі структурною неоднорідністю заздалегідь деформованого матеріалу

(наприклад, прокаткою) і є ознакою анізотропії механічних властивостей. Волокнисто-смугастих злам – ознака одного з недоліків сталі – шиферності.

Руйнування металу вздовж перпендикулярної до напрямку площини деформації (поздовжня проба) на поверхні зламу спричиняє вириви у волокнах, виступи та западини з гладкими стінками, паралельними напрямку деформації.

*Волокнисто-лускуватий злам* (рис. 1.12, к, л) утворюється під час руйнування металів вздовж площини, паралельної площині деформації (вертикальна проба). На поверхні зламу спостерігають лусочки з гладкою рівною поверхнею, видовжені у напрямку деформації.

Неоднорідно-волокнистим зламам на макрошліфах відповідають структури з наявністю смуг ліквідаційного походження, які розрізняються за механічними властивостями.

Утворення неоднорідно-волокнистого зламу в деформованій сталі пов'язують з неоднорідністю вихідної литої сталі, зокрема підвищеним вмістом вкраплень сульфідів у міждендритних ділянках з дендритною ліквідацією. У сталях зі зниженим вмістом сірки утворення такого зламу може бути зумовлено розвинутою первинною дендритною структурою, ліквідацією фосфору та інших шкідливих домішок. Неоднорідно-волокнистий злам типовий для високо відпущених сталей відкритої виплавки. Неоднорідність зменшують модифікуванням сталі, вакуум-рафінувальним переплавленням тощо. За виробничих умов деформовану сталь, що утворює неоднорідний волокнистий злам, не можна виправити. Поява цього виду зламу супроводжується підвищенням анізотропії механічних властивостей, особливо ударної в'язкості

Розрізняють також злами з однорідним матовим полиском – *матовий злам* і злами, поверхня яких має характерний металічний блиск – *блискучий злам*.

Одна з характерних ознак зламів, пов'язаних зі структурою, умовами випробування та, головним чином, легуванням сталей, – їх відмінність за

кольором. Злам певного кольорового забарвлення або кольорового відблиску (сірого, чорного, синього тощо) називають кольоровим. Вуглецеві сталі мають сріблястий злам, нікелеві – специфічне світло-жовте забарвлення, хромисті – світло-сіре. Марганець надає зламу сталі характерне тьмяне, сіре забарвлення. У складнолегованих сталях переважний вплив на колір зламу мають марганець і нікель.

У залежності від зв'язку з елементами структури матеріалу поверхні зламів бувають внутрішньозеренного, міжзеренного та міжсубзеренного руйнування.

*Внутрішньозеренний* (транскристалітний) злам утворюється внаслідок поширення магістральної та інших тріщин через тіло зерна металу.

*Міжзеренний* (інтеркристалітний) злам утворюється внаслідок поширення магістральної та інших тріщин уздовж меж зерен.

*Міжсубзеренний* злам утворюється під час поширення магістральної та інших тріщин уздовж меж субзерен [1].

### *Злами циклічного навантаження*

Будова зламів циклічного навантаження (зламів втоми) характеризується значною різноманітністю та залежить від значення та виду навантаження, температури, структури та властивостей матеріалу, навколишнього середовища тощо.

Злами втоми класифікують за такими ознаками:

- характером прикладеного навантаження (розтяг, стиснення, одnobічний або двобічний згин, кручення);
- тривалістю навантаження (малоциклова та багатоциклова втоми);
- станом поверхні (наявність концентраторів напружень і зміцнених шарів);
- умовами навантаження (звичайна, корозійна, термічна втоми за високих температур).

Розрізняють також втомні злами в інтервалі короткочасної та обмеженої довговічності, а також злами за рівнем напружень, близьких до порога втоми.

На типових зламах втоми добре спостерігається неоднорідність їх будови. Поверхня втомного руйнування розміщується перпендикулярно до напрямку максимального видовження. Щодо елементів конструкцій з різними надрізами, то тут можливі локальні відхилення орієнтації зламу. Поверхня втомних зламів не має ділянок макропластичної деформації та (за винятком зламів короткочасної довговічності) подібна до зламів крихкого руйнування. Проте вона вирізняється певними макроскопічними ознаками, специфічною будовою, існуванням характерних зон. При цьому розрізняють осередок руйнування, зони втомного руйнування та долому.

*Осередок руйнування* – відносно невелика ділянка макрозламу, що відповідає місцю зародження руйнування, включаючи фокус зламу (мікроскопічне місце зародження тріщини). Від осередку руйнування починаються мікротріщини, які, об'єднуючись, дають початок магістральній тріщині втоми. Осередки руйнування розміщуються переважно на поверхні деталі чи зразка у місцях концентрації напружень або різних дефектів (рис. 1.13). Це можуть бути, наприклад, неметалеві вкраплення, тріщини гартування, наслідки обробки різанням тощо. За наявності кількох дефектів або за високої концентрації напружень можливе зародження тріщини з кількох осередків руйнування.

У зоні розвитку втомної тріщини розрізняють: ділянки біля осередку руйнування та ділянки власне втомного руйнування, а також зону прискореного розвитку тріщини перед остаточним руйнуванням (доломом). *Зона біля осередку* блискуча, характеризується дрібнозернистою структурою та малою шорсткістю. Із неї зі збільшенням кількості циклів навантаження тріщини розвиваються послідовно вглиб матеріалу, утворюючи ділянку *власне втомного руйнування*. Остання характеризується дисперсністю будови, гладкою матовою поверхнею, на якій

зосереджуються втомні лінії. Втомні лінії – це геометрично чіткий слід фронту втомної тріщини, яка розходить концентрично від осередку руйнування, утвореного внаслідок зміни напруженого стану у вершині тріщини, що розвивається. Такі лінії є макроскопічною ознакою втомного руйнування. Їх утворення зумовлено зупинкою фронту або зниженням швидкості розповсюдження тріщини. Регулярність розміщення втомної лінії пов'язують з періодичністю зміни умов навантаження. У місцях розташування лінії втоми спостерігається зміцнення металу.

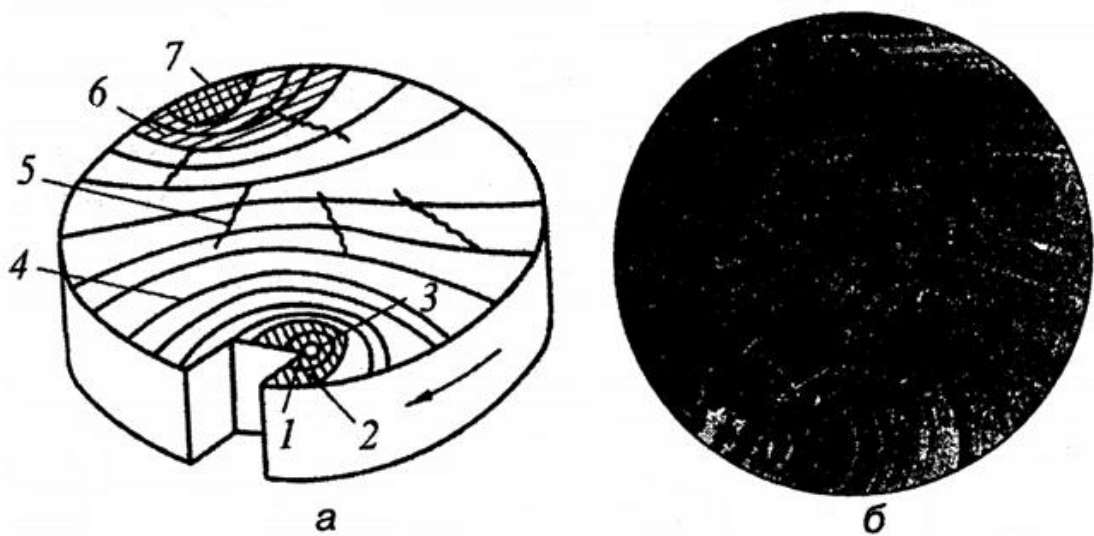


Рис. 1.13. Схема (а) будови втомного макрозламу (б): 1 – осередок; 2 – зона біля осередку; 3 – первинні сходишки скиду; 4 – лінії втоми; 5 – вторинні сходишки скиду; 6 – перехідна зона; 7 – зона долому

Ділянку зламу, на якій спостерігається збільшення відстані між втомними лініями у напрямку поширення тріщини. Називають *зоною прискореного розвитку втомної тріщини*. Вона відбиває перехід від зони власне втомного руйнування до *зони долому* та має більш шорсткий рельєф у відповідності до зростання швидкості розвитку тріщини. Це супроводжується також зростанням кількості та глибини вторинних тріщин з утворенням досить великих сходинок скиду, а також локальним відхиленням напрямку руйнуванням.

Заключну (швидку) стадію руйнування, пов'язану зі зменшенням перерізу зразка в разі збільшення тріщини, характеризує *зона долому*. У

крихких матеріалах вона має здебільшого кристалічну будову, у в'язких – волокнисту.

На макробудову втомних зламів істотно впливає наявність концентраторів напружень на поверхні зразків, вид і рівень номінальних напружень циклічних навантажень, а також макродефектів структури.

Вплив цих чинників на макробудову втомних зламів з урахуванням виду та циклічного навантаження, форми зразків і концентраторів напружень (надрізів) схематично показано на рис. 1.14.

Одна з характерних макроскопічних особливостей втомних зламів – це наявність так званого *храпового рельєфу* у вигляді серії маленьких сходинок на зовнішніх поверхнях зразків або деталей (рис. 1.15). У зламах втоми він є результатом одночасного утворення кількох втомних тріщин. Храповий рельєф виникає внаслідок високих напружень, наявності концентраторів напружень (корозійних пітингів або шліфувальних підпалин).

Аналізуючи злами, під час випробування зразків (наприклад, на ударний згин) із втомною тріщиною, розрізняють зону стартового розвитку тріщини та зону витягування.

*Зона стартового розвитку тріщини* (початкова зона зламу), що формується за фронтом заздалегідь наведеної тріщини, передуючи крихкому руйнуванню, охоплює зону витягування та зону в'язкого (ямкового) руйнування.

*Зона витягування* – це ділянка зламу в перехідній зоні, обмежена з одного боку фронтом наперед наведеної втомної тріщини, а з другого – зоною крихкого або в'язкого руйнування [1].

#### *Контрольні питання*

16. За якими ознаками класифікують злами під час макроаналізу?
17. Як розрізняють злами за орієнтацією поверхні руйнування?
18. Як класифікують макрозлами за станом поверхні, блиском, кольором?

Високе номінальне напруження			Низьке номінальне напруження			Вид навантаження
Гладкий зразок	М'який надріз	Гострий надріз	Гладкий зразок	М'який надріз	Гострий надріз	
						Розтягування (стискування) 
						Односторонній згин 
						Двосторонній згин 
						Кручення зі згином 
						Кручення

Рис. 1.14. Схеми будови втомних макрозламів зразків за різних видів навантаження (зони долому заштриховано) [1]

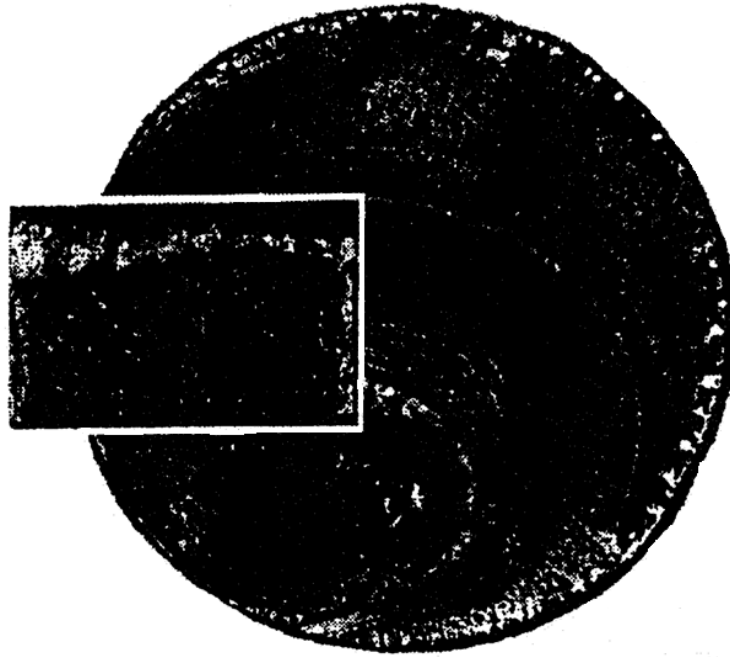


Рис. 1.15. Храповий рельєф у макрозламах втомного руйнування

19. Як класифікують злами відносно ступеня пластичної деформації?
20. Які геометричні параметри характеризують макрозлам зразка після випробування на ударний згин?
21. Які структурні зони зламів утворюються від руйнування ударних зразків?
22. Що таке зона стабільного росту тріщини?
23. Які існують особливості зон долому та бічних скосів?
24. Чим характеризується розміщення структурних зон макрозламів циліндричних зразків (гладких і з надрізом) у разі розтягування?
25. Назвіть основні елементи макробудови втомного зламу.
26. Що таке осередок руйнування, зони стабільного та прискореного росту втомної тріщини?
27. Чим відрізняються лінії втоми від лінії Вальнера?
28. Як розрізнити шиферний та шевронний злами?
29. Що таке храповий рельєф?
30. За яких умов утворюється радіальна зона у макрозламів циліндричних зразків?
31. Як визначити осередок руйнування за характером будови шевронного зламу?
32. Що є причиною утворення шиферного зламу?
33. Які причини утворення каменеподібного зламу?
34. Ознакою яких механізмів руйнування можуть бути волокнистий та кристалічний злами?
35. Чим розрізняються транскристалітний та інтеркристалітний злами?

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

### Структури дифузійнозмцнених шарів

Зміцнення поверхневих шарів виробів, що полягає у використанні недорогого та недефіцитного сплаву як базового матеріалу з наступною хіміко-термічною обробкою його поверхні, набуло значного поширення. Основні переваги хіміко-термічної технології – можливість ефективної зміни властивостей поверхневого шару за рахунок його хімічного складу, створення бажаного поєднання властивостей поверхні та серцевини виробу. Це досягається дифузійним насиченням поверхневого шару будь-яким елементом в атомарному стані, що може розчинятися в базовому матеріалі. Обробка забезпечує підвищення рівня зносостійкості деталей машин головним чином через збільшення твердості та поверхневого шару, а виникнення в ньому високих залишкових напружень стиску сприяє підвищенню опору втомі. Окремі види хіміко-термічної обробки підвищують стійкість до корозії як за нормальних, так і за високих температур [4].

Промислові підприємства з успіхом використовують різні дифузійні методи нанесення зносостійких покриттів в залежності від умов тертя: цементацію, азотування, сумісне насичення вуглецем і азотом, борування, хромування та інші види одно- та багатоконпонентної дифузійної металізації.

*Цементація* – процес насичення поверхні сталей та сплавів вуглецем для отримання високої поверхневої твердості, зносостійкості, втомної міцності тощо.

У залежності від умов експлуатації виробу глибину дифузійного шару обирають у межах 0,1 – 0,3 мм для невеликих і 0,5 – 2,0 мм для середніх за розмірами деталей. Цементації підлягають вуглецеві та леговані сталі з вмістом вуглецю 0,10 – 0,35 %.

Розрізняють такі методи цементації: 1) насичення з твердих карбюраторів; 2) насичення з газових середовищ; 3) рідинну цементацію.

Температура процесу в залежності від методу цементації становить 880 – 1000 °С.

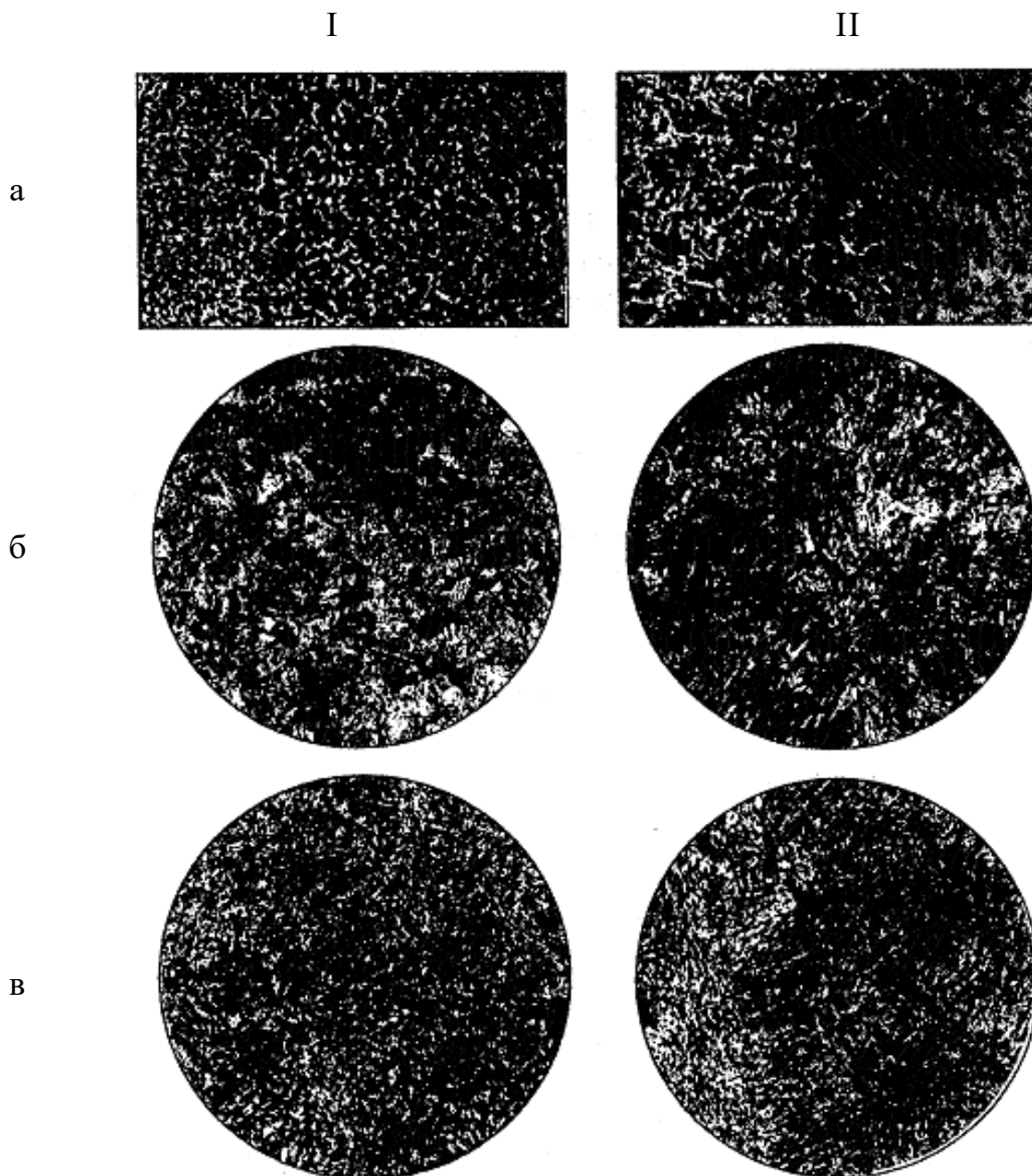


Рис. 2.1. Мікроструктури цементованих сталей 25ХГСТФЮ (I) і 25ХГСТФБ (II): а – дифузійний шар після цементації ( $\times 100$ ); б – дифузійний шар після гартування та низького відпуску ( $\times 400$ ); в – серцевина цементованих сталей після гартування та відпуску ( $\times 400$ )

Структура цементованого шару вуглецевих сталей складається з трьох зон: заевтектоїдної (перліт + вторинний цементит), евтектоїдної (перліт), доевтектоїдної (перліт + ферит). Концентрація вуглецю в

поверхневому шарі становить 0,8 – 1,1 % (рис. 2.1). У процесі цементації легованих сталей утворюється двофазний шар із карбідів (на поверхні) та аустеніту (під ним). Концентрація вуглецю на поверхні досягає 1,8 – 2,0 %.

Технічною глибиною цементованого шару зазвичай вважають суму заевтектоїдної, евтектоїдної та половину перехідної (доевтектоїдної) зон, а інколи – частину шару зі структурою (після гартування): мартенсит (95 % + залишковий аустеніт). Поверхнева твердість різних сталей після цементації та термічної обробки досягає 60 – 65 HRC. Цементация істотно підвищує зносостійкість сталей, якщо цементований шар має структуру голкоподібного або скритокристалічного мартенситу з дрібними глобулами карбідів і невеликою кількістю залишкового аустеніту.

Вважається, що підвищення втомної міцності сталі після цементації зумовлено збільшенням значень міцності, плинності та твердості дифузійного шару, а також впливом стискальних напружень першого роду. Границя втоми істотно підвищується зі збільшенням глибини цементованого шару, досягаючи максимуму за оптимальних товщин 0,4 – 0,7 мм, а зі збільшенням товщини шару знижується циклічна міцність.

*Азотування* – процес поверхневого насичення азотом. У результаті азотування поверхня металу набуває високої твердості (HV 1300) зі збереженням її за довготривалих нагрівань до температур 500 – 600 °С; великих стискальних напружень, що підвищують опір утомі, високу зносостійкість, корозійну стійкість вуглецевих і низьколегованих сталей, та характеризується незначними деформаціями.

Недоліками процесу азотування слід вважати дуже велику тривалість процесу насичення, а також зниження корозійної стійкості та жаростійкості неіржавіючих, кислотостійких і жароміцних сталей [5].

Азотування широко використовують у різних галузях промисловості. Якщо раніше азотували тільки спеціальні сталі із вмістом алюмінію (38ХМЮА, 35ХЮА), то натеper цьому виду хіміко-термічної обробки

підлягають також вуглецеві, низьколеговані, аустенітні та неіржавіючі теплостійкі сталі, а також сталі з титаном, високоміцний магнієвий чавун, чавун, легований алюмінієм.

Як насичувальне азотвмісне середовище використовують очищений від масла та осушений аміак за робочого тиску 0,25 – 0,35 МПа. Насичення відбувається за відносно низьких температур (520 – 620 °С). Азотування проводять методами газового азотування, азотування в рідкому середовищі, азотування в жевріючому розряді.

Після азотування та повільного охолодження до кімнатної температури фази в дифузійному шарі розміщуються в такому порядку від поверхні:

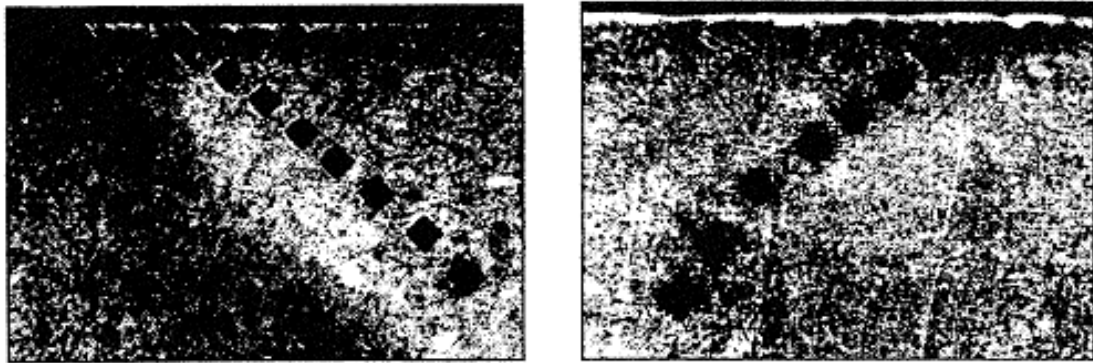
$$\zeta > (\varepsilon + \gamma) > \gamma' + (\alpha + \gamma) > \alpha + \gamma'_{\text{надл}} > \text{серцевина},$$

де  $\alpha$ -фаза – азотистий ферит – твердий розчин азоту в залізі (кількість азоту в ньому значною мірою залежить від температури: за температури 590 °С – 0,10 %, за 200 °С – 0,004 %);  $\gamma'$ -фаза, що існує за концентрації азоту 5,30 – 5,75 % і відповідає нітриду  $\text{Fe}_4\text{N}$ ;  $\varepsilon$ -фаза, що існує за різних температур в інтервалі концентрацій азоту 4,35 – 11,00 %;  $\zeta$ -фаза, що утворюється за вмісту в шарі не менше 11,1 % і відповідає нітриду  $\text{Fe}_2\text{N}$ .

Підвищення твердості азотованих шарів зумовлюється отриманням дисперсних нітрідів і істотно залежить від температури насичення. Сталі із вмістом термостійких нітрідів (Al, Cr, Mo) відзначаються вищою твердістю покриттів (7 – 12 ГПа) порівняно з конструкційними матеріалами (4 – 7 ГПа – леговані; 1,8 – 2,3 ГПа – вуглецеві.).

Мікроструктуру сталі ШХ15 наведено на рис.2,а, мікроструктуру сталі 65Г – на рис. 2.2,б. Твердість більш легованої сталі ШХ15 вища, ніж сталі 65Г.

Азотування широко використовується для підвищення функціональних властивостей тугоплавких металів.



а

б

Рис. 2.2. Мікроструктура азотованого шару сталі ШХ15 (а) та сталі 65Г (б),  $\times 400$

Фазовий склад продуктів азотування титану залежить здебільшого від температури та складу насичувального середовища. Дифузійна зона, що утворюється після азотування в середовищі азоту в інтервалі температур  $900 - 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , складається з двох шарів: нітриду титану  $\text{TiN}$  та  $\alpha$ -фази. Металографічним способом нітридний шар можна визначити тільки після насичення за температури понад  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  у вигляді світлої щільної (що не травиться) кірки, а за температур нижче  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  плівку  $\text{TiN}$  виявляють рентгенографічним методом та за зміною кольору зразка. Шар  $\alpha$ -фази можна спостерігати під мікроскопом уже після азотування за температури  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  у вигляді світлої смужки, що відділена від шару нітриду із зовнішнього боку та від основи – із внутрішнього. Із підвищенням температури азотування ( $1400 - 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) між шаром  $\text{TiN}$  і  $\alpha$ -твердого розчину зростає шар нітриду  $\epsilon$ , утворений під час охолодження зразків від температури насичення. Межі всіх трьох шарів однакові (рис. 2.3, а).

Покриття на ванадії після азотування в середовищі азоту високої чистоти складається з одного шару  $\text{VN}$  аж до температури азотування  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Зі зміною температури азотування змінюється характер зчеплення шару з основою; в інтервалі температур  $800 - 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  шар росте фронтально, утворюючи рівну лінію розділу з основою, з підвищенням температури насичення поверхня розділу стає дедалі розвиненішою, шар окремими клинами вростає в основу (рис. 2.3, б). Після азотування за температур  $1500 -$

1600 °С покриття складається уже з двох шарів: зовнішнього VN і внутрішнього V<sub>3</sub>N.

Нітридні покриття на ніобії тантала за різних температур азотування мають два шари: зовнішній MeN і внутрішній Me<sub>2</sub>N.

Якщо азотування ніобію провадити в середовищі азоту високої 1300 °С. В інтервалі температур 1300 – 1600 °С дуже чітко вирізняються два нітридні шари білого кольору (рис. 2.3, в). Рентгенографічно виявлено, що в разі азотування ніобію до 1300 °С мононітрид має гексагональну ґратку, а вище 1300 °С – кубічну. Хоч металографічно нітридні шари на ніобії виявляються тільки за температури 1300 °С, але за допомогою високотемпературної рентгенографії установлено, що вони утворюються за температури 800 °С.

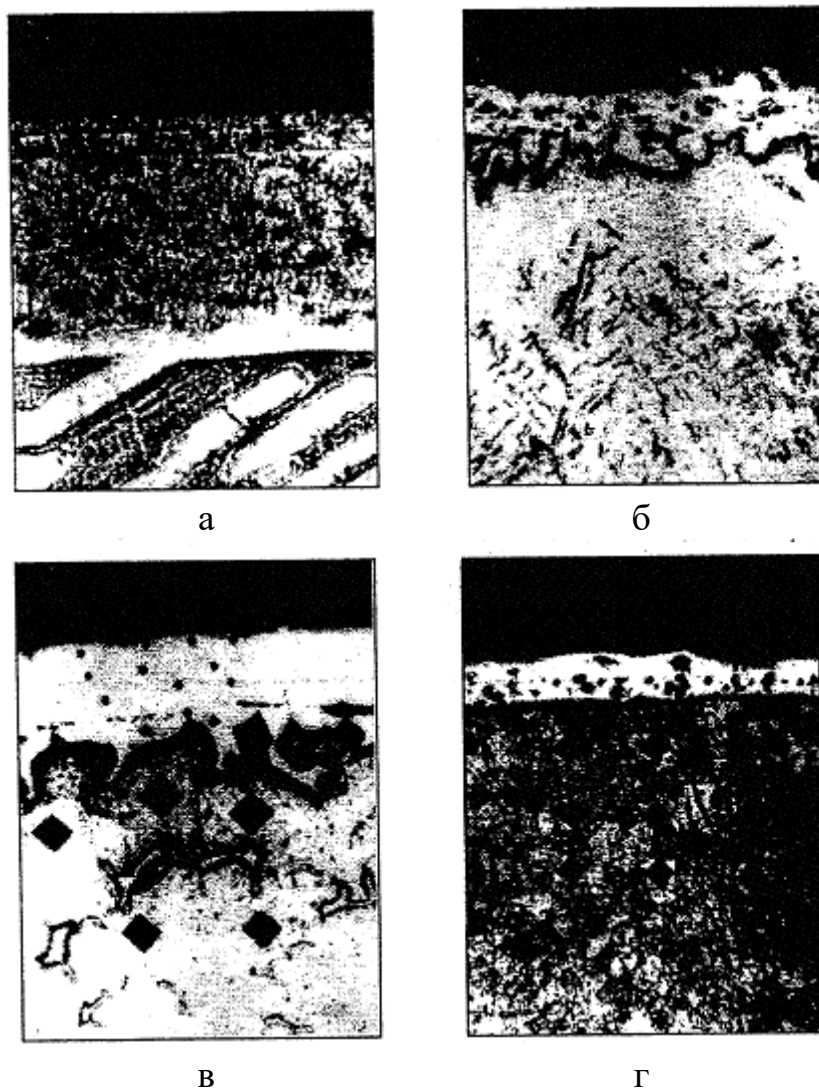


Рис. 2.3. Мікроструктури нітридних покриттів на різних металах: а – титан (× 120); б – ванадій (× 260); в – ніобій (× 340); г – молібден (× 260)

На хромі та молібдені шар нітриду металографічно виявляється, починаючи з 1100 °С (для хрому) та 900 °С (для молібдену) та складається з фази  $Me_2N$ . На вольфрамі ні за якої температури азотування нітридний шар не можна виявити металографічно, його появу та зростання фіксують лише за допомогою високотемпературної рентгенографії. Нітридні шари на хромі та молібдені зростають фронтально й утворюють рівну лінію розділу нітрид – основа (рис. 2.3, г).

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

### **Характер дифузійних процесів при поверхневому насиченні металевих поверхонь деталей**

#### *Структурна недосконалість в реальних кристалах*

Відповідно до сучасних поглядів на будову металу, істотна відмінність теоретичної і фізичної міцності пояснюється наявністю структурної недосконалості (дефектів) кристалів.

Структурні дефекти чинять істотний вплив на зміцнення і руйнування металу при обробці.

Структурна недосконалість в кристалах виникає в результаті кристалізації металу, термічної обробки, пластичної деформації та ін.

Структурні недосконалості (дефекти) кристалу за геометричною ознакою поділяють на 4 групи:

- точкові;
- лінійні;
- поверхневі (плоскі);
- об'ємні.

Точкові дефекти за своїми розмірами порівнюються з розмірами атома. У чистих кристалах можливі два типи точкових дефектів (рис. 3.1):

- вакансії;
- міжвузельні атоми.

*Вакансії* утворюються при видаленні атома з вузла решіток, а *міжвузельний атом* при введенні атома в міжвузельний простір.

Утворення вакансій і міжвузельних атомів пов'язане з тим, що атоми, які коливаються біля положення рівноваги, можуть під впливом привнесеної ззовні енергії виходити з положення рівноваги, утворюючи після себе у вузлі кристалічної решітки порожнину (вакансію) і, відповідно, міжвузельний атом. Велика кількість вакансій і міжвузельних атомів може бути збільшена різким охолодженням металу, пластичною деформацією, опроміненням

високоенергетичними променями, магнітним полем та ін.

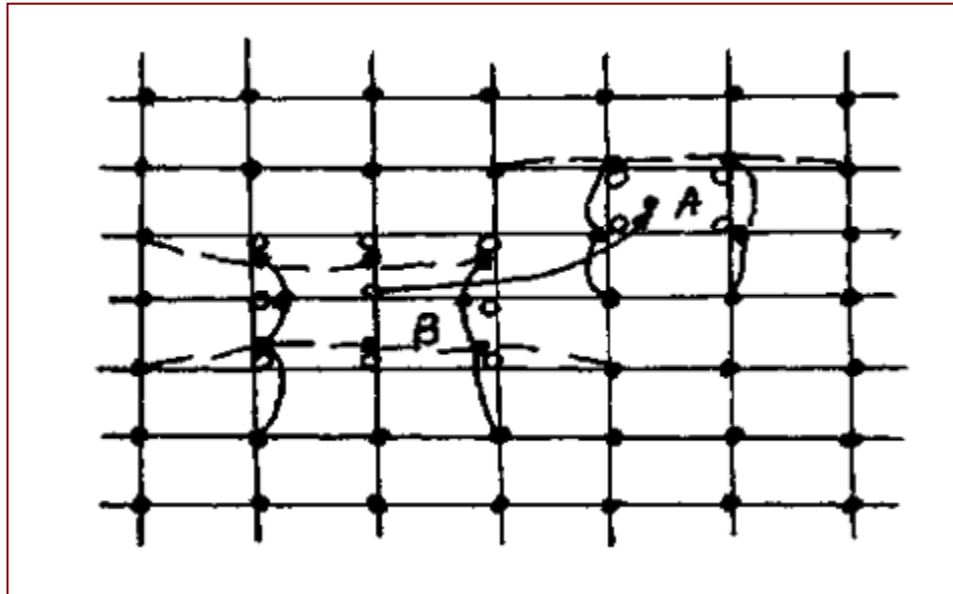


Рис. 3.1. Точкові дефекти в площині простих кубічних решіток : А - дислокований атом; В - вакансії

Наприклад, кількість точкових дефектів в кристалах при пластичній деформації можна визначити за залежністю:

$$n/N = (10^{-5} \div 10^{-6}) \epsilon, \quad (3.1)$$

де:

$n$  – граничне число рівноважних точкових дефектів;

$N$  – загальне число атомів;

$\epsilon$  – деформація, %.

Як точкові дефекти чистих металів можна також розглядати домішкові атоми заміщення і впровадження (рис. 3.2).

Усі точкові дефекти утворюють локальні викривлення кристалічної решітки, підвищуючи тим самим енергію, що залежить від розміру введених атомів і відстані між ними.

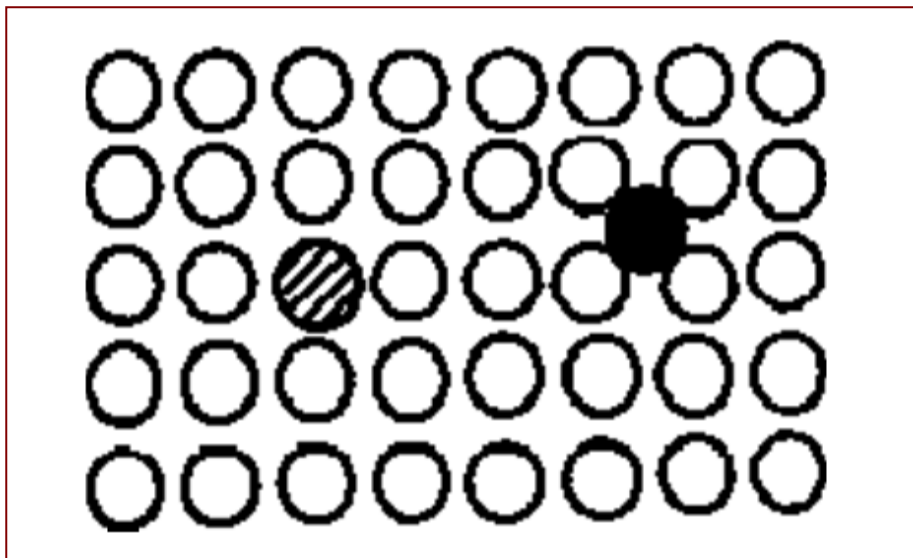


Рис. 3.2. Точкові дефекти в площині простих кубічних ґраток:  
 ● - домішкові атоми впровадження; ● - атоми заміщення

*Лінійні дефекти* кристалічної решітки мають розміри, близькі до атомних в двох вимірах і значну протяжність в третьому. До цього виду дефектів відносяться дислокації, найпростішими з яких є крайові і гвинтові.

На рис.3.3 показана модель крайової дислокації на прикладі простого кубічного кристалу. Вона утворюється шляхом впровадження в кристал зайвої площини атомів ABCD, що називається *екстраплощиною*. Межа екстраплощини – лінія CD – є крайовою дислокацією. Екстраплощина діє як клин, створюючи сильне викривлення кристалічної решітки, особливо в районі атомів, розташованих на лінії дислокації CD.

Якщо екстраплощина розташована зверху дислокації, то дислокацію називають позитивною і позначають знаком  $\perp$ . Дислокація є негативною, якщо екстраплощина розташована під нею. В цьому випадку вона позначається знаком  $\top$  [6].

Гвинтова дислокація (рис.3.4) утворюється при зсуві частини кристалу, розділеного площиною ABCD, відносно іншої у напрямку АВ.

Лінія DC є гвинтовою дислокацією. Залежно від напрямку руху дислокації бувають правого і лівого обертання.

До *лінійних* відносять змішані дислокації, в яких містяться частини у

вигляді крайової і гвинтової дислокації.

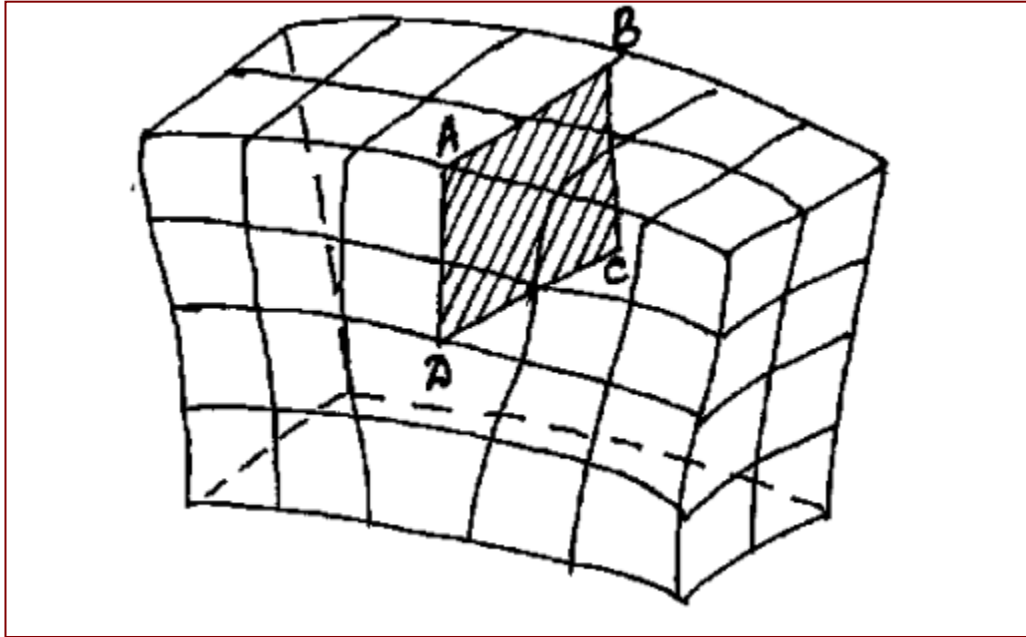


Рис. 3.3 Модель позитивної крайової дислокації

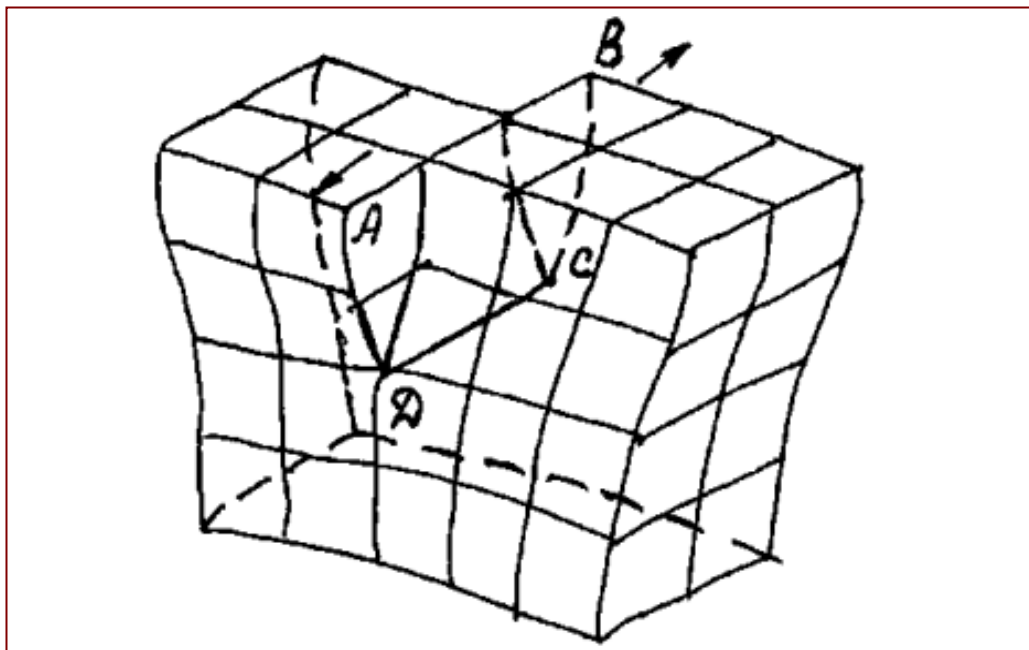


Рис. 3.4 Модель гвинтової дислокації

*Поверхневі дислокації*— це дефекти, що мають значну протяжність в двох напрямках. До них відносяться границі між субзернами, зернами, міжфазні границі, дефекти упаковки кристалічної решітки, скупчення дислокацій в одній площині та ін.

*Об'ємні дефекти* мають протяжність в усіх трьох вимірах. До цих дефектів відноситься сукупність точкових, лінійних і поверхневих дефектів,

які призводять до викривлення кристалічної решітки у великих об'ємах кристалу.

Крім того, до об'ємних дефектів відносять наявність фаз, дисперсних виділень, різних включень, а також нерівномірність розподілу напруги і деформацій в макрооб'ємах.

Наявність дефектів кристалічної решітки викликає її викривлення. Мірою викривленої решітки є вектор Бюргерса, що характеризує енергію дислокації і сили, що діють на неї. Цей відрізок замикає контур Бюргерса.

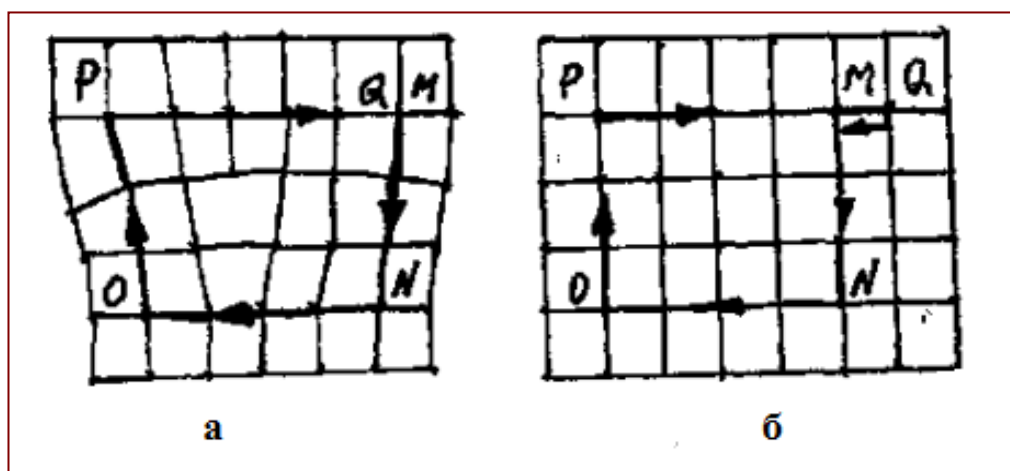


Рис.3.5. Контур Бюргерса, що включає дислокації (а); той же контур в досконалому кристалі (б)

Поняття про вектор і контур Бюргерса дає рисунок 3.5.

Вектор, який необхідно ввести в досконалий кристал для того, щоб замкнути контур Бюргерса (на рис. 3.5, б – це відрізок MQ), і є вектором Бюргерса.

Розрізняють одиничні, часткові і супердислокації, вектор Бюргерса яких, відповідно, дорівнює міжатомній відстані, менше або більше її. У реальному кристалі, як правило, є присутніми усі види дислокацій.

Щільність дислокацій  $\rho$  – це сумарна довжина  $L_{\Sigma}$  усіх дислокаційних ліній, віднесена до об'єму  $V, \text{см}^2$ .

$$\rho = L_{\Sigma} / V. \quad (3.2)$$

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

### Вивчення поверхневих шарів реальних деталей

#### *Параметри стану поверхневого шару деталей машин*

Поверхневий шар деталі – це шар, структура, фазовий і хімічний склад якого відрізняються від основного матеріалу, з якого зроблена деталь.

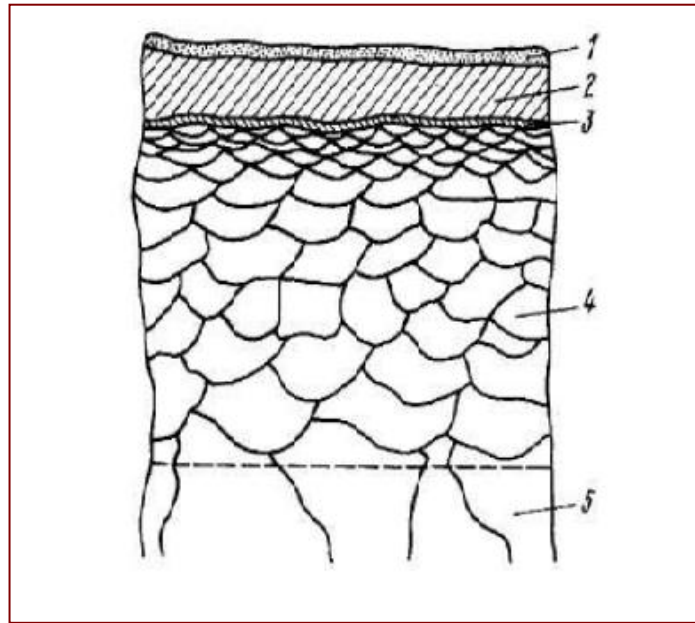


Рис. 4.1. Схема поверхневого шару деталі

У поверхневому шарі можна виділити наступні основні зони (рис.4.1):

1. адсорбованих з довкілля молекул і атомів органічних і неорганічних речовин; товщина шару  $1 \div 0,001$  мкм;
2. продуктів хімічної взаємодії металу з довкіллям (зазвичай оксидів); товщина шару 1-10 мкм;
3. границя – завтовшки декілька міжатомних відстаней, що має іншу, ніж в об'ємі, кристалічну і електронну структуру;
4. зі зміненими параметрами в порівнянні з основним металом;
5. зі структурою, фазовим і хімічним складом, який виникає при виготовленні деталі і змінюється в процесі експлуатації.

Товщина і стан вказаних шарів поверхневого шару можуть змінюватися залежно від складу матеріалу, методу обробки, умов експлуатації. Оцінка цього стану здійснюється методами хімічного,

фізичного і механічного аналізу. Різноманіття параметрів стану поверхневого шару і методів їх оцінки не дозволяє виділити єдиний параметр, що визначає якість поверхневого шару. На практиці стан поверхневого шару оцінюється набором одиничних або комплексних властивостей, які оцінюють якість поверхневого шару.

Ці параметри характеризують:

- геометричні параметри нерівностей поверхні;
- фізичний стан;
- хімічний склад;
- механічний стан.

Геометричні параметри нерівностей поверхні оцінюються параметрами шорсткості, регулярних мікрорельєфів, хвилястості.

Шорсткість поверхні – це сукупність нерівностей з відносно малими кроками. Приблизне відношення висоти нерівностей до кроку менше 50.

Хвилястість поверхні – це сукупність нерівностей, що мають крок більший, ніж базова довжина, яка використовується для виміру шорсткості. Відношення висоти до кроку більше 50 і менше 1000.

Регулярні мікрорельєфи – це нерівності, які, на відміну від шорсткості і хвилястості, є однаковими за формою, розмірами і взаємним розташуванням.

Регулярний мікрорельєф отримують обробкою різанням або поверхневою пластичною деформацією роликками, кульками, алмазами [8].

Фізичний стан поверхневого шару деталей в технології зміцнення найчастіше характеризується параметрами структури і фазового складу.

Структура – це характеристика металу, залежна від методів вивчення його будови. Виділяють наступні типи структур:

- кристалічна;
- субструктура;
- мікроструктура;

Кристалічна структура. Метали є кристалами з тривимірною періодичністю. Основою кристалічної структури є тримірні ґрати, в просторі

якої розташовуються атоми. Залежно від характеру розташування атомів в кристалічних ґратах структури чистих металів розділяються на ряд типів (рис.4.2).

Субструктура. У реальному металі кристалічна структура має безліч дефектів, які значною мірою визначають його властивості. Сукупність дефектів решітки їх просторовий розподіл в кристалі називається субструктурою.

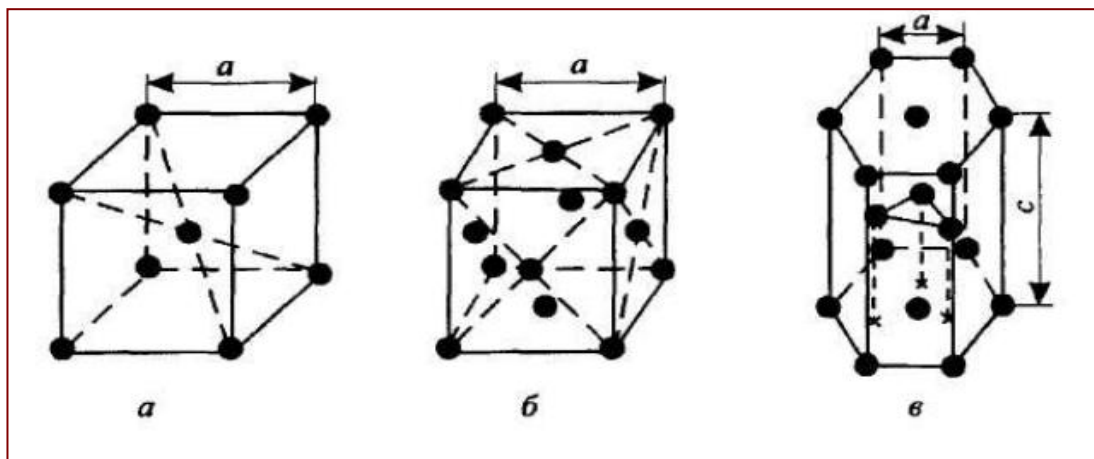


Рис.4.2. Типи кристалічної структури :

а - об'ємноцентрована кубічна; б – гранецентрована кубічна;  
в – гексагональна щільноупакована

Кристали можуть утворювати більші фрагменти – кристаліти, блоки, зерна, фрагменти, полігони. Розмір субмікрозерна складає:  $10^{-2} \dots 10^{-5}$  см.

Мікроструктура – це структура, яка визначається за допомогою металографічних мікроскопів. Цей аналіз дозволяє визначити наявність, кількість і форму структурних складових сплаву.

Розмір субзерна:  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  см.

Макроструктура – це структура, яка визначається неозброєним оком або при невеликих збільшеннях. За допомогою макроаналізу визначають тріщини, неметалеві включення, домішки та ін.

*Фізичний стан* характеризується числом і концентрацією фаз, розподілом фаз по поверхневому шару, об'ємом сплаву та ін.

Дослідження фізичного стану здійснюється експериментальними

методами фізики твердого тіла: дифракційними і мікроскопічними методами.

*Хімічний склад* характеризується елементним складом сплаву і фаз, концентрацією елементів в об'ємі фаз, сплаву та ін.

Дослідження хімічного складу поверхневого шару дозволяють оцінити адсорбцію із зовнішнього середовища молекул і атомів органічних і неорганічних речовин, дифузійні процеси, процеси окислення і інші, що відбуваються при обробці металів.

*Механічний стан* металу визначається наступними параметрами:

- опором деформації: межа пружності, межа пропорційності, межа плинності, межа міцності, твердість та ін.;
- пластичністю: відносне подовження, відносне звуження, ударна в'язкість і інші, встановлені спеціальними випробуваннями зразків.

Наприклад, в процесі пластичної деформації, яка завжди супроводжує механічну обробку, усі характеристики механічного стану поверхневого шару змінюються: показники опору деформації збільшуються, а показники пластичності зменшуються. Це явище називають *деформаційним зміцненням* [9].

У інженерній практиці деформаційне зміцнення поверхневого шару визначають виміром твердості  $H$  або мікротвердості. Для цього твердість вимірюють на поверхні металу і усередині металу (за допомогою пошарового травлення). В результаті встановлюють товщину зміцненого шару  $h_n$  і міру деформаційного зміцнення  $\delta_n$ :

$$\delta_n = (H_{\text{обр}} - H_{\text{иск}}) / H_{\text{иск}} \quad (4.1)$$

де  $H_{\text{обр}}$  і  $H_{\text{иск}}$  – відповідно твердість (мікротвердість) металу після і до обробки.

Важливою характеристикою стану поверхневого шару є *залишкова напруга*.

*Залишкова напруга* – це пружна напруга, яка залишилася в деталі після обробки. Залежно від об'єму тіла, в яких розраховують залишкову напругу,

умовно поділяються на залишкову напругу:

- першого роду, урівноважені в макрооб'ємах тіла;
- другого роду, урівноважені в межах розміру зерен;
- третього роду, урівноважені в межах декількох міжатомних відстаней.

Залежно від характеру і інтенсивності фізико-механічних процесів, що відбуваються при обробці, залишкова напруга може мати різний знак:

(+) – розтягування;

(-) – стискання.

Умова рівноваги вимагає, щоб в об'ємі деталі сума проєкцій усіх сил дорівнювала нулю. Тому в деталі є область із стискаючою та розтягуючою залишковою напругою.

У інженерній практиці залишкову напругу першого роду прийнято представляти у вигляді проєкції на осі заданої системи координат. Наприклад, для тіла обертання використовують поняття осьових  $\sigma_x^\circ$ , окружних (тангенціальних)  $\sigma_t^\circ$ ; і радіальних  $\sigma_r^\circ$  залишкових напруг.

Узагальнено можна сказати, що залишкова напруга першого роду є результатом нерівномірних пластичних деформацій різних шарів деталі (викривлення деталі) [9].

Залишкова напруга чинить істотний вплив на міцність і довговічність деталей машин і конструкцій. Залишкова стискаюча напруга, що виникає в поверхневому шарі, підвищує циклічну міцність деталей, оскільки вона звільняє поверхневі шари від напруги, яка викликана навантаженнями і, навпаки, розтягуюча залишкова напруга зменшує міцність деталей внаслідок підвищення напруженості поверхневого шару.

**Структура поверхні конструкційних сталей, дифузійна металізація сталі  
– борування**

*Борування* являє собою насичення з різних середовищ, що містять бор, за наявності якого в залежності від умов насичення утворюються боридні шари, які відрізняються за своєю будовою. Їх можна поділити на чотири основні типи.

1. Насичення заліза і сталі в активних насичувальних середовищах (у розплаві бору і карбиду бору в процесі електролізного та газового борування). Такий шар складається здебільшого з боридів  $\text{FeB}$  (16,23 % В) і  $\text{Fe}_2\text{B}$  (8,83 % В), причому  $\text{FeB}$  утворюється на поверхні,  $\text{Fe}_2\text{B}$  – під ним.

2. Борування поблизу лінії солідусу з утворенням у структурі борованого шару евтектики. Будова евтектики істотно залежить від температури насичення. Бориди в цьому шарі рівномірно розташовані у в'язкій основі.

3. Короткочасне борування поблизу лінії солідусу в спеціальній обмазці з використанням індукційного нагріву. Будова та фазовий склад шару специфічні (через особливі умови дифузії бору).

4. Насичення в малоактивних насичувальних середовищах (порошках фероборалу, феробору, аморфного бору). Складається такий шар здебільшого зі складного  $\alpha$ -твердого розчину (розчину бору, алюмінію та силіцію в залізі). Із поверхні шару та на межу з основним металом за достатньої тривалості часу насичення утворюються світлі вкраплення високої твердості.

Будова боридних шарів істотно залежить від складу насичувального середовища. У разі насичення заліза і сталі з порошку  $\text{B}_4\text{C}$  та аморфного бору за температур 950 – 1000 °С утворюються боридні шари характерної голчастої будови (рис. 5.1), які складаються з боридів  $\text{FeB}$  і  $\text{Fe}_2\text{B}$  з мікротвердістю відповідно 19200 – 20600 і 13500 – 14200 МПа. За вищих температур насичення (1100 і 1200 °С) сталей в структурі шару утворюється

евтектика, будова якої істотно залежить від температури насичення (рис. 5.2). За температури 1100 °С евтектика являє собою тверді дрібні вкраплення боридів і карбоборидів, розділені м'якою складовою у вигляді світлих округлих вкраплень на світлому фоні (рис. 5.2, а). Твердість такого шару – 8000 – 9000 МПа. За температури 1200 °С ділянки евтектики з явно вираженою дендритною будовою кристалів розділені темними округленими вкрапленнями перліту твердістю 3000 – 3500 МПа, а твердість евтектичних ділянок знижується до 7500 МПа (рис. 5.2,б).

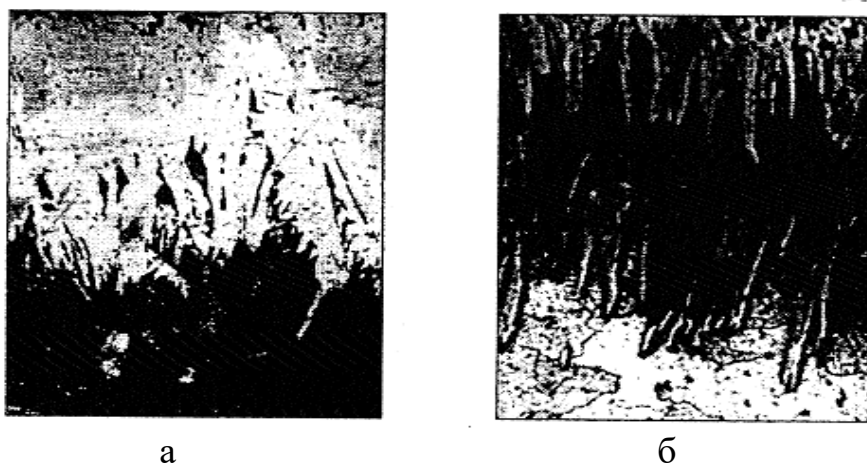


Рис. 5.1. Структура двофазного боридного шару на сталі 45 (насичення з порошку  $V_4C$  за температури 1000 °С протягом 3 год),  $\times 300$

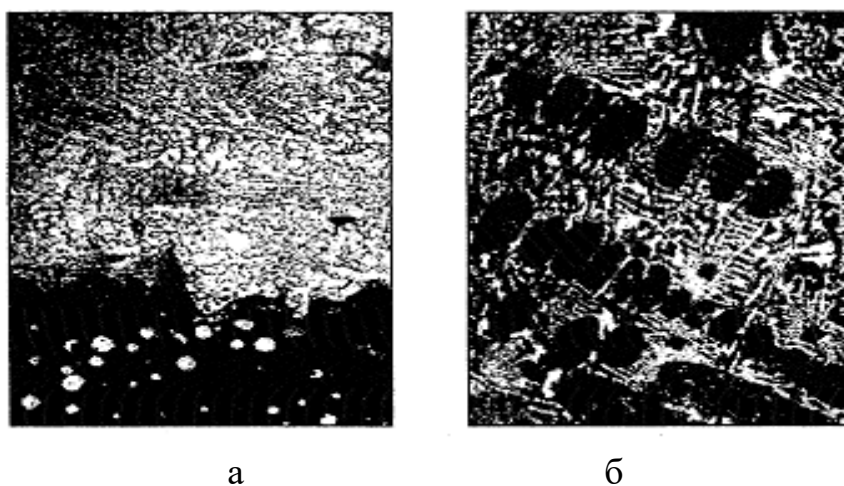


Рис. 5.2. Зміна будови евтектики борованого шару в залежності від температури насичення (сталь 45, тривалість процесу – 8 год): а – температура 1100 °С; б – температура 1200 °С,  $\times 320$

За високих температур насичення під дифузійним шаром формуються округлі вкраплення цементиту з твердістю близько 8500 МПа, що

утворюються в результаті витіснення вуглецю з поверхні. За високих температур насичення може переважати дифузія бору на межах зерен (рис. 5.3).

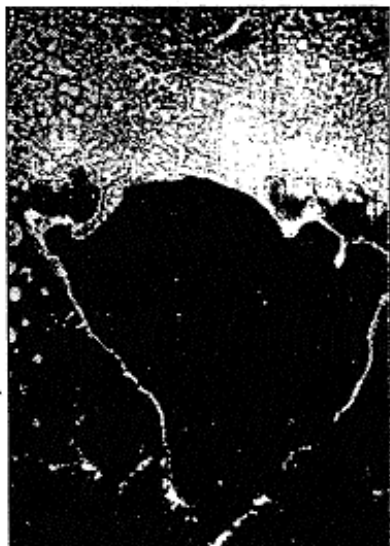


Рис. 5.3. Дифузія бору вздовж меж зерен сталі 45,  $\times 200$

У разі насичення сталі з порошків малоактивних насичувальних середовищ (феробору та фероборалу) дифузійні шари дуже відрізняються від уже розглянутих. Утворюється дифузійний шар, що слабо травиться та має невисоку твердість, основою якого є  $\alpha$ -твердий розчин.

Для виявлення фазового складу борованого шару використовують також кольорове травлення в реактиві такого складу: 0,8 г пікринової кислоти, 20 г їдкого натру та 50 мл води.

Травлення провадять за температури 45 – 48 °С протягом 30 с. Після травлення фаза FeB забарвлюється в коричневий або темно-ліловий колір, а фаза – у жовтий. Якщо температура травлення вища, фаза FeB стає світлою, а фаза Fe<sub>2</sub>B залишається жовтою або світло-коричневою. Основна структура не проявляється.

Структури, виявлені кольоровим травленням, можна навіть фотографувати з використанням звичайних фотоматеріалів (рис. 5.4). Для цього режим травлення підбирають так, щоб фази в дифузійному шарі забарвлювалися а кольори, що контрастно сприймаються емульсією чорно-білих плівок [4].

Кольорове травлення дозволяє замірювати глибину суцільного шару бориду FeB, загальну глибину проникнення цього бориду, загальну глибину борованого шару та глибину суцільного шару обох боридів (рис. 5.5).



Рис. 5.4. Мікроструктура борованого шару, виявлена кольоровим травленням,  $\times 200$

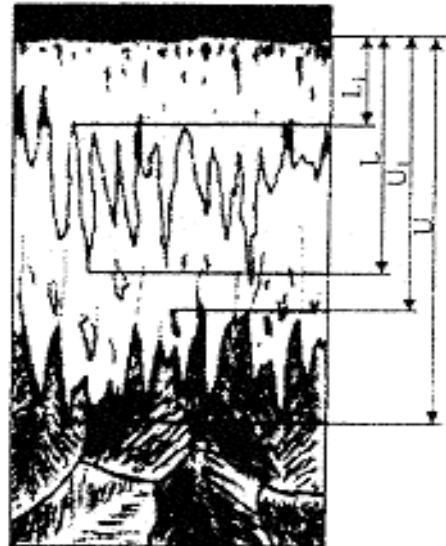


Рис. 5.5. Схема вимірювання борованого шару після кольорового травлення

Співвідношення фаз у дифузійному шарі визначають за формулою

$$FeB = \frac{1/2(L + L_1)}{1/2(U + U_1)} \cdot 100,$$

де  $L$  – загальна глибина бориду  $FeB$ ;  $L_1$ – глибина суцільного шару бориду  $FeB$ ;  $U$ – загальна глибина борованого шару;  $U_1$ – глибина суцільного шару боридів.

На співвідношення боридів істотно впливають легуючі елементи. Так, нікель, марганець, хром, молібден і вольфрам збільшують кількість бориду  $FeB$  у борованому шарі, а мідь і алюміній – зменшують. Найсильніше збільшують кількість бориду  $FeB$  у борованому шарі молібден і вольфрам. Із підвищенням температури борування їх дія посилюється. Різко знижує вміст фази  $FeB$  у дифузійному шарі мідь. Уведення алюмінію до 0,53 % майже не впливає на фазовий склад борованого шару. Збільшення надалі вмісту алюмінію в сталі знижує вміст  $FeB$  у шарі. З підвищенням температури насичення дія міді та алюмінію знижується. За температури борування  $850\text{ }^\circ\text{C}$  нікель, марганець і хром майже однаково впливають на підвищення вмісту в дифузійному шарі бориду  $FeB$ . Із підвищенням температури насичення дія хрому активізується, а нікелю та марганцю знижується.

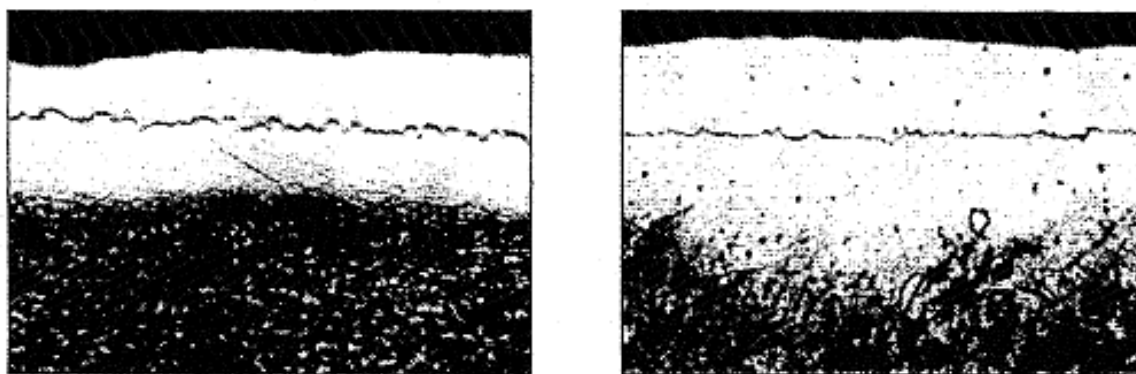
**Вивчення мікроструктури поверхонь виробів після ХТО. Дифузійна металізація – хромування**

*Дифузійна металізація сталі*

*Дифузійне хромування* – один із прогресивних технологічних процесів хіміко-термічної обробки, що дозволяє одержувати матеріал зі спеціальними фізико-механічними властивостями та водночас скорочувати витрати дорогих і важкооброблюваних сталей через використання більш економних вуглецевих сталей.

Дифузійне хромування проводять такими чотирма методами: твердим, парофазним, газовим і рідинним. Різновид парофазового методу – неконтактне хромування у вакуумі (вакуумтермодифузійне хромування). Як металізатор у цьому випадку використовують ферохром (або хром), що переходить за високої температури в сублімовану фазу [4].

Структури сталей 3Х2В8Ф і ДН37 після хромування у вакуумі показано на рис. 6.1. Металографічний аналіз хромованого шару виявляє суцільну структуру, що не травиться, глибиною до 15 мкм. За зоною карбідного шару із  $Cr_{23}C_6$  і  $Cr_7C_3$  розміщується зона, що не травиться через вищий, ніж і основі, вміст хрому. Мікротвердість шару становить 15000 МПа і більше. Вміст хрому на поверхні – 70 %.



а

б

Рис. 6.1. Мікроструктура хромованих сталей ( $\times 500$ ):  
а – сталі 3Х2В8Ф; б – сталі 5ХНВ

На фазовий склад і товщину хромованих покриттів істотно впливають легуючі елементи в сталі. Збільшення товщини дифузійного шару на сталях, легуваних Ti, V, Nb, Mn, пояснюється зв'язуванням цими елементами вуглецю в карбідну фазу, що зумовлює дифузію хрому в безвуглецевому сплаві. Проте легування сталі Ti, Ni, Nb (ці елементи звужують  $\gamma$ -область) уможлиблює переважання дифузії хрому в  $\alpha$ -фазі, оскільки швидкість її перебігу більша, ніж у  $\gamma$ -фазі [8].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

### Вимір твердості за Роквеллом та Брінеллем

#### *Вимір твердості втисканням сталеві кульки (метод Брінелля)*

Випробування по Брінеллю регламентовані ДСТУ 9012-59. Сталева загартована кулька діаметром  $D$  (10; 5 або 2,5 мм) вдавлюється у випробовуваний зразок силою  $P$  (3000; 1000 або 750 кгс). В результаті на поверхні зразка залишається відбиток у формі кульового сегменту діаметром  $d$  (рис.1, а). Діаметр відбитку буде тим менше, чим твердіше матеріал. Число твердості по Брінеллю ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ) обчислюють за формулою  $HV = P/F$ , де  $P$  - навантаження, що діє на кульку, кгс;  $F$  - площа поверхні відбитку,  $\text{мм}^2$ .

Якщо площу поверхні відбитку виразити через діаметр кульки і діаметр відбитку, то формула для визначення твердості по Брінеллю набере вигляду (3.19):

$$HV = \frac{2P}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (1)$$

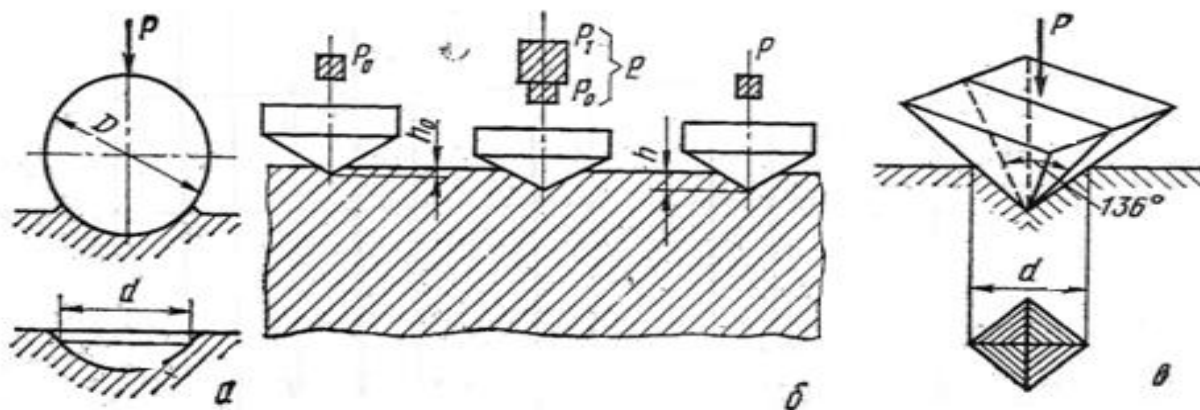


Рис. 1 - Схеми виміру твердості : а - за Брінеллем; б - за Роквеллом;  
в - за Віккерсом

Діаметр відбитку  $d$ , виміряний за допомогою вимірювальної лупи або відлікового мікроскопа, служить мірою твердості. Погрішність вимірювального приладу не повинна перевищувати  $\pm 0,01$  мм на одне найменше ділення шкали  $\pm 0,02$  мм на всю довжину шкали. У деяких випробувальних приладах кульовий відбиток проектується на матове скло з масштабом, щоб діаметр відбитку був швидко виміряний. Його вимірюють в двох взаємно перпендикулярних напрямках і визначають як середнє арифметичне з двох вимірів.

Для того, щоб не здійснювати тривалі та складні обчислення твердості за наведеною формулою, на практиці користуються даними таблиці, за якими відповідно до умов випробування та діаметра відбитку визначають число твердості за Брінеллем. В таблиці вказано співвідношення між числами твердості, отриманими за різними методами [3].

При вимірюванні твердості за Брінеллем діаметр кульки  $D$ , величину навантаження  $P$ , тривалість витримки під навантаженням і мінімальну товщину  $H$  дослідженого зразка вибирають згідно із таблицею 1.

Твердість досліджених матеріалів не повинна перевищувати HB450; при більшій твердості матеріалу сталеву кульку при втискуванні деформується і результат отримується невірним.

Відстань від центру відбитку до краю зразка має бути не менше, ніж  $2,5d$ , а відстань між центрами двох сусідніх відбитків має бути не менше  $4d$ . При вимірюванні твердості на зразках або деталях з криволінійною поверхнею довжина і ширина підготовленої плоскої поверхні має бути не менше, ніж в два рази більше діаметру кульки.

Діаметри відбитків  $d$  мають знаходитись в межах  $0,2D < d < 0,6D$ .

При вимірі твердості кулькою діаметром  $D=10$  мм під навантаженням  $P=3000$  кгс з витримкою  $\tau=10$ с перед числом твердості за Брінеллем вказують символ HB, наприклад, HB400. За інших умов вимірювання позначення HB доповнюється індексом, що вказує на умови вимірювання в наступному порядку: діаметр кульки, навантаження і

тривалість витримки. Наприклад HB 5/250/30-200 означає число твердості за Брінеллем 200 при випробуванні кулькою діаметром 5 мм під навантаженням 250 кгс впродовж 30 с.

Таблиця 1 - Рекомендовані параметри для виміру твердості за Брінеллем

HB	H, мм	P/D <sup>2</sup>	D, мм	P, кгс	$\tau$ , с
Чорні метали					
140-150	6-3	30	10	3000	10
	4-2	30	5	750	10
< 140	<2	30	2,5	187,5	10
	>6	10	10	1000	10
	6-3	10	5	250	10
	<3	10	2,5	62,5	10
Кольорові метали					
<130	6-3	30	10	3000	30
	4-2	30	5	750	30
	<2	30	2,5	187,5	30
35-130	9-3	10	10	1000	30
	6-3	10	5	250	30
	<3	10	2,5	62,5	30
8-35	>6	2,5	10	250	60
	6-3	2,5	5	62,5	60
	<3	2,5	2,5	15,5	60

### *Вимір твердості за Роквеллом*

Вимірювання твердості за Роквеллом регламентовані ДСТУ 9013-59. Відповідно до цього методу випробування на твердість здійснюють шляхом втискання в зразок сталеві кульки діаметром  $D=1,58$  мм(1/16") або алмазного конуса з кутом  $120^\circ$ . Величина твердості визначається різницею між глибиною западин, що отримуються на дослідженому зразку від втискання алмазного конуса або сталеві кульки під двома навантаженнями певної величини: більшою  $P_1$  - основною і меншою  $P_0$  – попередньою (рис. 1, б). Попереднє навантаження складає 10 кгс, а загальна (попередня плюс основна) - при втисканні сталеві кульки складає 100 кгс (шкала В), а при втисканні алмазного конусу - 150 (шкала С) або 60 кгс (шкала А).

Твердість за Роквеллом визначається в умовних одиницях. За одиницю твердості прийнята величина, що відповідає осьовому переміщенню наконечника на 0,002 мм. Числа твердості за Роквеллом виражаються наступними формулами:  $HR = 100 - e$  (при вимірі по шкалах А і С);  $HR = 130 - e$  (при вимірі за шкалою В) [3].

Величина  $e$  визначається за наступною формулою:

$$e = (h - h_0) / 0,002 \quad (2)$$

де  $h_0$  - глибина впровадження наконечника у досліджений зразок під дією попереднього навантаження  $P_0$ ;

$h$  - глибина впровадження наконечника у досліджений зразок під дією загального навантаження  $P$ , визначена після зняття основного навантаження  $P$ , із залишенням попереднього навантаження  $P_0$ .

Сталеву кульку (шкала В) використовують для визначення твердості не загартованої сталі, латуні, бронзи та інших не твердих матеріалів, алмазний конус - для визначення твердості термічно обробленої, у тому числі загартованої сталі (шкала С) і твердих сплавів (шкала А). До чисел твердості, отриманих в результаті вимірювання за цими шкалами, додають позначення шкали (наприклад, HRC60, HRB90, HRA70). Величина навантаження, межі вимірювання в одиницях твердості за Роквеллом та відповідні наближені значення твердості за Віккерсом для шкал А, В і С представлені в таблиці 2.

Мінімальна товщина дослідженого зразка залежно від очікуваної твердості за Роквеллом наведена в таблиці 3.

Таблиця 2 - Шкали твердості, тип індентору, межі вимірів і співвідношення між числами твердості за Роквеллом та Віккерсом

Позначення		Тип індентора	Навантаження, кгс	Границі вимірювання в одиницях твердості за Роквеллом	Відповідні наближені значення чисел твердості за Віккерсом
Шкали	Чисел твердості				
A	HRA	Алмазний конус	$P_0 = 10; P_1 = 50; P = 60$	70-85	390-900
C	HRC	Алмазний конус	$P_0 = 10; P_1 = 140;$ $P = 150$	20-67	240-900
B	HRB	Сталева кулька діаметром 1,588 мм.	$P_0 = 10; P_1 = 90; P = 100$	25-100	60-240

Таблиця 3 - Мінімально допустима товщина зразків при визначенні твердості за Роквеллом

Назва шкали	Число твердості за Роквеллом	Мінімальна товщина зразку, мм
A	70	0,7
	80	0,5
	90	0,4
B	25	2,0
	30	1,9
	40	1,7
	50	1,5
	60	1,3
	70	1,2
	80	1,0
	90	0,8
	100	0,7
C	20	1,5
	30	1,3
	40	1,2
	50	1,0
	60	0,8
	67	0,7

Відстань між центрами сусідніх відбитків або відстань від центру відбитку до краю зразка має бути не менше 3 мм.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Вимір мікротвердості на приладі ПМТ-3

Вимір мікротвердості регламентований ДСТУ 9450-76. Випробування здійснюють шляхом вдавлювання алмазної піраміди з кутом при вершині  $136^\circ$  під дією навантаження  $P$ , прикладеного впродовж певного часу; після зняття навантаження вимірюють діагоналі  $d$  квадратного відбитку, що залишився на поверхні зразка. При випробуванні на мікротвердість застосовують одне з наступних навантажень: 0,005; 0,01; 0,02; Д05; 0,1; 0,2; 0,5 кгс. Число твердості обчислюють за тією ж формулою, що і при визначенні твердості методом Віккерса. При позначенні перед числом твердості пишуть символ  $H$  з індексом, що вказує величину навантаження в грам - силах, наприклад -  $H_{50}$ -300 кгс/мм<sup>2</sup>. Розмірність твердості не вказують в тих випадках, коли це не викликає неясності.

Цим методом можна визначити не лише твердість тонких поверхневих шарів, але і твердість окремих структурних складових і фаз сплавів. Зазвичай мікротвердість визначають на приладі ПМТ- 3. Зразки для виміру мікротвердості готують так само, як і для мікродосліджування (шліфування, полірування, а в необхідних випадках і травлення). Щоб уникнути наклепу тонкого поверхневого шару рекомендується здійснювати електролітичне полірування.

Величину навантаження при однорідному матеріалі вибирають, виходячи з його товщини: мінімальна товщина зразка або шару має бути більше довжини діагоналі відбитку в 1,5 разу. На протилежній стороні зразка після випробування не повинно бути помітних слідів деформації. Відстань від центру відбитку до краю зразка має бути не менше подвійної довжини, діагоналі відбитку більшого розміру.



Рис. 2. Мікротвердомір ПМТ-3

Величину навантаження при неоднорідному матеріалі вибирають залежно від завдання випробування. Якщо необхідно оцінити середню твердість матеріалу, то величина діагоналі відбитку має бути значно більше розмірів структурних складових матеріалу. Випробування в різних ділянках такого матеріалу повинні давати однакові результати. Якщо завданням випробування є оцінка твердості окремих структурних складових сплаву, то розмір діагоналі відбитку має бути досить малий в порівнянні з дослідженим кристалітом; при цьому кристаліт може розглядатися як зразок [3].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бялік О.М., Кондратюк С.Є., Кіндрачук М.В., Черненко В.С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія: Підручник. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2006. 328 с.
2. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. 91 с.
3. Погребна Н. Е., Котова Т. В., Ковзель М. А. Механічні випробування металів (частина I): Навчальний посібник. Дніпро: Український державний університет науки і технологій, 2023. 67 с.
4. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Механічна стабільність матеріалів: Навчальний посібник. Дніпро: НМетАУ, 2021. 111 с.
5. Лузан С.О. Інженерія поверхні. Конспект лекцій. – Харків «ХП», 2013. 168 с.
6. Ющенко К.А. та ін. Інженерія поверхні: Підручник / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж – Київ: Наукова думка, 2007. 559 с.
7. Матеріали різного призначення, їх обробка та властивості: Навч. посіб. Для студентів ВНЗ / С.С. Дяченко та ін.: ХНАДУ Харків, 2016. 347 с.
8. Сплави на основі заліза. Підручник / В.І. Мазур, В.З. Куцова, О.А. Носко, М.А. Ковзель – Дн-ськ: НМетАУ, 2013. 500 с.
9. Матеріалознавство. Підручник / Є.Г. Афтанділянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько // Київ: Вища освіта, 2012. 548 с.

Навчально-методичне видання

**Погребна** Наталія Емілівна,  
**Котова** Тетяна Володимирівна

## **ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ**

Навчально-методичні рекомендації  
до практичних занять та лабораторних робіт

Електронне видання

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 80 від 30.10.2025)

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка Н. Е. Погребна

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 3,95. Обл.-вид. арк. 4,0.

Зам. № 123.

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

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