

Основні властивості металів

Закінчивши вивчення цього навчального елемента, студент вмітиме:

1. назначити способи виготовлення металевих виробів в залежності від властивостей металів;
2. робити висновки про придатність тих чи інших металів і сплавів для виготовлення деталей.

Прикладна наука, що вивчає у взаємозв'язку склад, будову та властивості металів і сплавів, встановлює залежність будови і властивостей від методів виробництва та обробки металів і сплавів, а також зміну їх під впливом механічних, термічних та інших зовнішніх дій на метали називається металознавство.

Властивість (*property, quality*) – це сукупність характеристик металів і сплавів від яких залежить придатність виготовлення деталей та конструкцій. Одні з них легкі (магній, алюміній, титан), інші важкі (свинець). Олово, свинець - метали, які легко плавляться, а для розплаву заліза або платини необхідно витратити багато енергії. Міцність є одним з головних факторів при виробленні металу для виготовлення деталей, але не всі однаково міцні. Розрізняють фізичні, хімічні, механічні та технологічні властивості металів:



А) Фізичні властивості металів проявляються при дії фізичних явищ, які діючи на метал, не змінюють його складу. Наприклад, при нагріванні метал розплавляється, але його склад залишається попереднім.

Густина (solidity, strength) – величина, яка дорівнює відношенню маси металу до займаного ним об'єму. Наприклад, густина заліза дорівнює 7800 кг/м³, алюмінію 2700 кг/м³, свинцю 11300 кг/м³.



Кольором називається здатність металів відбивати світлові промені, що на них попадають. Промені світла, відбиті від різних металів, діють на органи зору по-різному, що створює відчуття того чи іншого кольору. Наприклад, мідь має рожево-червоний колір, алюміній – білий.

Теплопровідністю (heat/thermal conductivity) називають здатність металів проводити тепло. Чим більша теплопровідність, тим швидше тепло поширюється по металу при його нагріванні і віддається ним при охолодженні. Високу теплопровідність мають мідь та алюміній. Залізо, сталь, чавун проводять тепло в 4-6 разів гірше, ніж мідь.

Теплоємність (thermal/heat capacity) визначає кількість тепла, необхідного для нагрівання металу на 10. Низьку теплоємність мають платина і свинець. Теплоємність сталі і чавуну майже в 4 рази вище теплоємності свинцю.

Плавлення (melting) – це процес переходу металу з твердого стану в рідкий. Метали із високою температурою плавлення вважають тугоплавкими (вольфрам, хром, платина), а метали з низькою температурою плавлення належать до легкоплавких (олово, свинець). Наприклад, температура плавлення заліза-15390, міді-1083, олова-2319, вуглецевої сталі - 1420-1520 0С.

Теплове (термічне) розширення означає здатність металу, що нагрівається, збільшувати свої розміри.

Електропровідністю називають здатність металу проводити електричний струм. Хорошими провідниками струму є срібло, мідь, алюміній. Деякі метали і сплави (ніхром) чинять електричному струму великий опір.

Б) Хімічні властивості. Це – здатність металів і сплавів взаємодіяти з навколишнім середовищем, вступати в хімічні сполучення, розчинятися, кородувати, чинити опір дії агресивних середовищ. Найбільш важливі з них – це окислення на повітрі, кислотостійкість, лугостійкість, жароміцність.



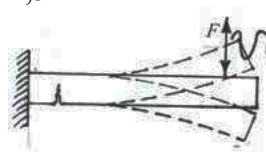
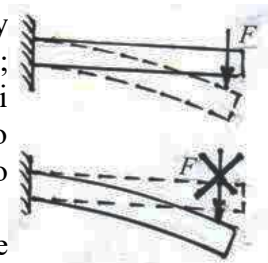
В) Механічні властивості пов'язані з поняттям про навантаження, деформацію та напруження. Від механічних властивостей металу залежить його поведінка при деформації і руйнуванні під дією зовнішніх сил конструкцій чи деталей.

Цим властивостям буде детально розглянуто далі, бо саме їм приділена основна увага в цьому розділі.

Міцність (durability) – це властивість металів, не руйнуючись, чинити опір дії прикладених зовнішніх сил. Міцність металів характеризується умовною величиною – межею міцності. Межею міцності є навантаження, яке прикладене до зразка в момент розриву, віднесене до площі поперечного перерізу зразка:



Пружність (resilience) - здатність металів змінювати свою форму під дією зовнішніх сил і відновлювати її після припинення дії цих сил; Відношення навантаження, при якому зразок починає мати залишкові подовження, до площини його поперечного перерізу називається межею пружності. Наприклад, межа пружності сталі до 300; міді 25; свинцю 2,5МПа.



Пластичність (plasticity) - здатність металів, не руйнуючись, змінювати під дією зовнішніх сил свою форму, після припинення дії сил. Сталь у значній мірі пластична, а при нагріванні її пластичність зростає. Цю властивість використовують при одержанні виробів шляхом прокату та кування.

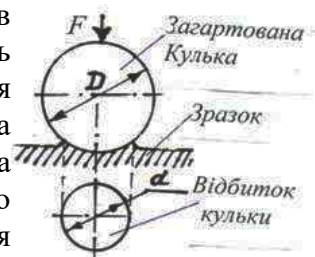
Втомлюваність (tiredness) – зміна механічних і фізичних властивостей матеріалів під дією сил, циклічно змінюються під час напружень та деформацій. В умовах дії таких навантажень в працюючих деталях утворюються і розвиваються тріщини, які приводять до повного руйнування деталей. Подібні руйнування небезпечні тим, що можуть проходити під дією напруг значно менших границь міцності і текучості.

Крихкість (fragile) – властивість металу руйнуватись відразу після дії прикладених до нього сил, не показуючи жодних ознак деформації (чавун).

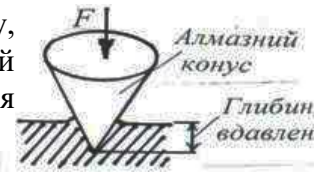


Твердість (hardness) – здатність металу чинити опір вдавненню в нього іншого, більш твердого матеріалу. Чавун і сталь мають високу твердість, свинець – низьку. Для перевірки твердості металів існує три методи випробування, названих за іменами їх винахідників - Бринеля, Роквелла, Віккерса:

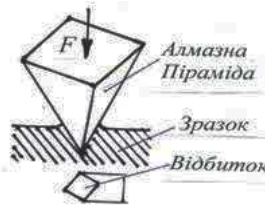
- випробування за способом Бринеля полягає в тому, що в поверхню зразка металу, під певним навантаженням, вдавлюють сталеву загартовану кульку діаметром 2,5; 5,0; 10 мм. Після вдавлювання зразка на поверхні лишається відбиток кульки. За допомогою спеціального мікроскопа вимірюється діаметр відбитка, а відтак визначається число твердості НВ: відношення прикладеного до кульки навантаження до площини поверхні відбитка називається числом твердості за Бринелем НВ. Числа твердості за Бринелем НВ для вуглецевої сталі – 1300-2800, міді – 300. свинець – 30-80 МПа,



- випробування зразка за способом Роквела (HR) полягає у тому, що за допомогою преса в поверхню зразка вдавлюють алмазний конус з кутом при вершині 120°. Твердість визначається глибиною вдавнення конуса,

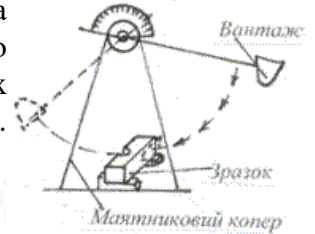


- випробування за способом Віккерса (HV) застосовують для вимірювання твердості на термічно оброблених металах. В зразок металу за вдавлюють правильну чотиригранну алмазну піраміду з кутом при вершині 136°.



невеликих ділянках допомогою преса піраміду з кутом при

Ударна в'язкість – здатність металів не руйнуватись при дії на них ударних навантажень. Ударна в'язкість визначається за допомогою маятничового копра. Зразок стандартної форми встановлюють в опорах і руйнують падаючим з висоти вантажем.



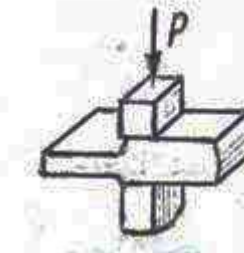
Г) Технологічні

властивості визначають здатність металів отримувати ту чи іншу обробку. До властивостей металів належать: обробка рідкотекучістю, усадка, зварюваність.

Ковкість (*malleable*) називається руйнуючись, приймати потрібну форму під сталю у нагрітому стані має хорошу ковкість.

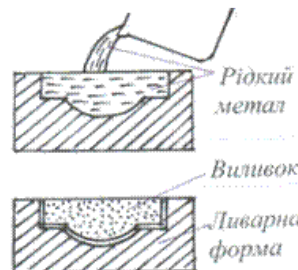
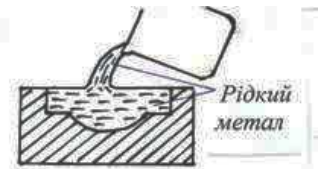
Рідко текучістю (*seldom-fluidity*) називається здатність розплавлених металів заповнювати ливарні форми. Високу рідкотекучість має сірий чавун, низьку – мідь.

Усадкою (*shrinkage*) називається здатність розплавлених металів зменшувати охолодженні. Ця властивість має значення в Моделі виливків виготовляють з урахуванням розмірів ніж розміри виливка. Крім того, утворення тріщин у виливках. Найменшу чавун, цинкові і алюмінієві сплави.



технологічних різанням, ковкість,

здатність металів, не дією зовнішніх сил.



свій об'єм при ливарній справі. усадки, тобто більших усадка призводить до усадки мають сірий

Обробка різанням – це здатність металів піддаватися дії різальних інструментів. Зважаючи на меншу твердість, деякі кольорові метали легше обробляти різанням, ніж чорні



Зварюваність називається здатність металів міцно з'єднуватися шляхом з'єднання. Добре зварюються сталі з низьким Чавун і сплави кольорових металів складніше.



розплавлення місця вмістом вуглецю. зварюються значно

Механічні властивості металів:

Міцність – здатність металів опиратися появі залишкових деформацій та руйнуванню під дією зовнішніх сил.

Показники міцності:

σ_B , МПа (МН/м^2) – **межа міцності** – напруження, що відповідає найбільшому навантаженню, при якому зразок не руйнується;

σ_T , МПа – **межа текучості** – найменше напруження, при якому зразок деформується без помітного збільшення навантаження.

Пружність – здатність металів відновлювати свою форму після припинення дії зовнішніх сил, що спричинили зміну форми.

Показники пружності:

$\sigma_{пр}$ ($\sigma_{0,05}$) – **межа пружності**, МПа;

E – **модуль пружності**, МПа.

Пластичність – здатність металу деформуватися без руйнування під дією зовнішніх сил та зберігати нову форму після припинення дії сил.

Показники пластичності:

δ , % – **відносне видовження** ;

ψ , % – **відносне звуження** .

Твердість – здатність металу чинити опір проникненню в нього іншого твердішого тіла.

Показники твердості:

число твердості HB – за **Брінеллем** ,

HRA, HRB, HRC – за **Роквеллом** ,

HV – за **Віккерсом** .

В'язкість – здатність матеріалу поглинати механічну енергію за динамічних навантажень за рахунок пластичної деформації.

Показник в'язкості – ударна в'язкість KCU, KCV, KCT, Дж/м²

Втомленість – процес поступового накопичення пошкоджень, що призводять до зміни властивостей, утворення тріщин та руйнування зразка під дією циклічних навантажень.

Методи випробування механічних властивостей металів

Механічні властивості металів (міцність, пружність, пластичність, в'язкість), як і інші властивості, є вихідними даними при проектуванні та створенні різних машин, механізмів і споруд.

Методи визначення механічних властивостей металів поділяють на такі групи:

- статичні, коли навантаження зростає повільно і плавно (випробування на розтяг, стиск, згин, крутіння, твердість);
- динамічні, коли навантаження зростає з великою швидкістю (випробування на ударний згин);
- циклічні, коли навантаження багаторазово змінюється (випробування на втому);
- технологічні — для оцінки поведінки металу при обробці тиском (випробування на згин, перегин, видавлювання).

Випробування на розтяг (ГОСТ 1497—84) проводяться на стандартних зразках круглого або прямокутного перерізу. При розтязі зразок деформується під дією навантаження, яке плавно зростає до моменту його розривання. Під час випробування зразка знімають діаграму розтягу (рис. 1, а), яка фіксує залежність між силою P , що діє на зразок, і викликаною нею деформацією Δl (Δl — абсолютне видовження).

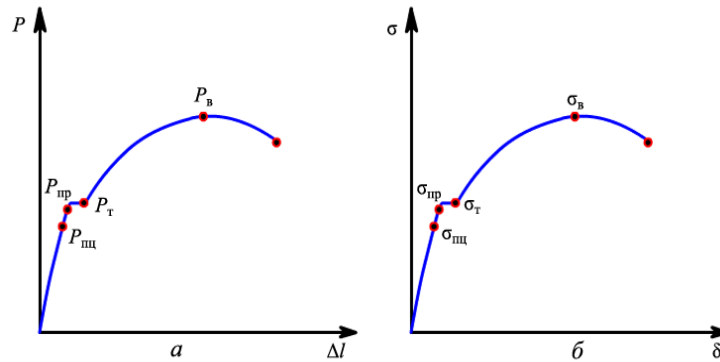


Рис. 1. Діаграма розтягу низьковуглецевої сталі (а) і залежність між напруженням і відносним видовженням (б)

В'язкість (внутрішнє тертя) — здатність металу поглинати енергію зовнішніх сил при пластичній деформації і руйнуванні (визначають величиною дотичної сили, прикладеної до одиниці площі шару металу, який підлягає зсуву).

Пластичність — здатність твердих тіл необернено деформуватися під дією зовнішніх сил.

При випробуванні на розтяг визначають:

- σ_b — границю міцності, МН/м² (кг/мм²):

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0},$$

де P_b — найбільше навантаження; F_0 — початкова площа перерізу зразка;

- $\sigma_{пц}$ — границю пропорційності, МН/м² (кг/мм²):

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0},$$

де $P_{пц}$ — навантаження, що відповідає границі пропорційності;

- $\sigma_{пр}$ — границю пружності, МН/м² (кг/мм²):

$$\sigma_{пр} = \frac{P_{пр}}{F_0},$$

де $P_{пр}$ — навантаження, що відповідає границі пружності (при $\sigma_{пр}$ залишкова деформація відповідає 0,05—0,005 % початкової довжини);

- σ_m — границю плинності, МН/м² (кг/мм²):

$$\sigma_m = \frac{P_m}{F_0},$$

де P_m — навантаження, що відповідає границі плинності, Н;

δ — відносне видовження, %,

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%,$$

де l_0 — довжина зразка до розривання, м; l_1 — довжина зразка після розривання, м;

ψ — відносне звуження, %:

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0},$$

де F_0 — площа перерізу до розривання, м²; F_1 — площа перерізу після розривання, м².

Випробування на твердість. Твердість — це опір матеріалу проникненню в нього іншого, твердішого тіла. З усіх видів механічного випробування визначення твердості є найпоширенішим.

Випробовування за Брінеллем (ГОСТ 9012—83) проводяться шляхом вдавлювання в метал сталевої кульки. У результаті на поверхні металу утворюється сферичний відбиток (рис. 2, а). Твердість за Брінеллем визначається за формулою

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} 10^{-6}, \text{ МПа},$$

де P — навантаження на метал, Н; D — діаметр кульки, м; d — діаметр відбитка, м. Чим твердіший метал, тим менша площа відбитка.

Діаметр кульки і навантаження встановлюють залежно від металу, який досліджують, його твердості та товщини. При випробуванні сталі та чавуну вибирають $D = 10$ мм і $P = 30$ кН (3000 кгс), при випробуванні міді та її сплавів $D = 10$ мм і $P = 10$ кН (1000 кгс), а при випробуванні дуже м'яких металів (Al, бабітів та ін.) $D = 10$ мм і $P = 2,5$ кН (250 кгс). При випробуванні зразків товщиною менше 6 мм вибирають кульки з меншим діаметром — 5 і 2,5 мм. На практиці користуються таблицею переведення площі відбитка у число твердості.

Метод Брінелля не рекомендовано застосовувати для металів твердістю понад $H 450$ (4500 МПа), оскільки кулька може деформуватися, що спотворить результати випробувань.

Випробування за Роквеллом (ГОСТ 9013—83). Здійснюють шляхом вдавлювання в метал алмазного конуса ($\alpha = 120^\circ$) або сталевої кульки ($D = 1,588$ мм або $1/16''$, рис. 2, б). Прилад Роквелла має три шкали — В, С і А. Алмазний конус застосовують для випробування твердих матеріалів (шкали С і А), а кульку — для випробування м'яких матеріалів (шкала В). Конус і кульку вдавлюють двома послідовними навантаженнями: попереднє P_0 і загальне P :

$$P = P_0 + P_1,$$

де P_1 — основне навантаження.

Попереднє навантаження $P_0 = 100$ Н (10 кгс). Основне навантаження складає 900 Н (90 кгс) для шкали В; 1400 Н (140 кгс) для шкали С і 500 Н (50 кгс) для шкали А.

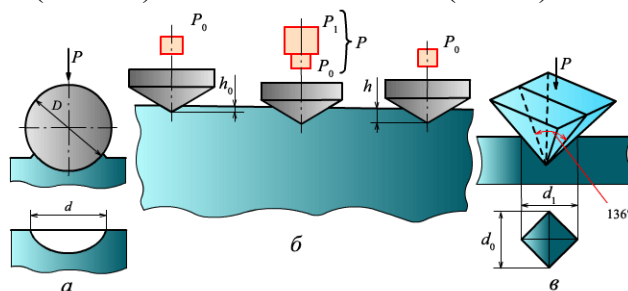


Рис. 2. Схема визначення твердості:

а — за Брінеллем; б — за Роквеллом; в — за Віккерсом

Твердість за Роквеллом вимірюють в умовних одиницях. За одиницю твердості приймають величину, що відповідає осьовому переміщенню наконечника на відстань 0,002 мм. Твердість за Роквеллом обчислюють у такий спосіб:

$$HR = 100 - e \text{ (шкали А і С); } HR = 130 - e \text{ (шкала В).}$$

Величину e визначають за формулою:

$$e = \frac{h - h_0}{0,002},$$

де h — глибина проникнення в метал наконечника під дією загального навантаження P ($P = P_0 + P_1$); h_0 — глибина проникнення наконечника під дією попереднього навантаження P_0 .

Залежно від шкали твердість за Роквеллом позначають HRB , HRC , HRA .

Випробування за Віккерсом (ГОСТ 2999—83). В основу методу покладено вдавлювання в поверхню (шліфовану чи навіть поліровану), що підлягає випробуванню, чотиригранної алмазної піраміди ($\alpha = 136^\circ$) (рис. 2, в). Метод використовують для визначення твердості деталей малої товщини і тонких поверхневих шарів, які мають високу твердість.

Твердість за Віккерсом:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} 10^{-6}, \text{ МПа},$$

де P — навантаження на піраміду, Н; d — середнє арифметичне двох діагоналей відбитка, виміряних після зняття навантаження, м.

Число твердості за Віккерсом визначають за спеціальними таблицями по діагоналі відбитка d . При вимірюванні твердості застосовують навантаження від 10 до 500 Н.

Мікротвердість (ГОСТ 9450—84). Принцип визначення мікротвердості такий самий, що і за Віккерсом, згідно зі співвідношенням:

$$H = 1,854 \frac{P}{d^2} 10^{-6}$$

Метод застосовують для визначення мікротвердості виробів дрібних розмірів і окремих складових сплавів. Прилад для вимірювання мікротвердості — це механізм вдавлювання алмазної піраміди та металографічний мікроскоп. Зразки для вимірювань мають бути підготовані так само ретельно, як мікрошліфи.

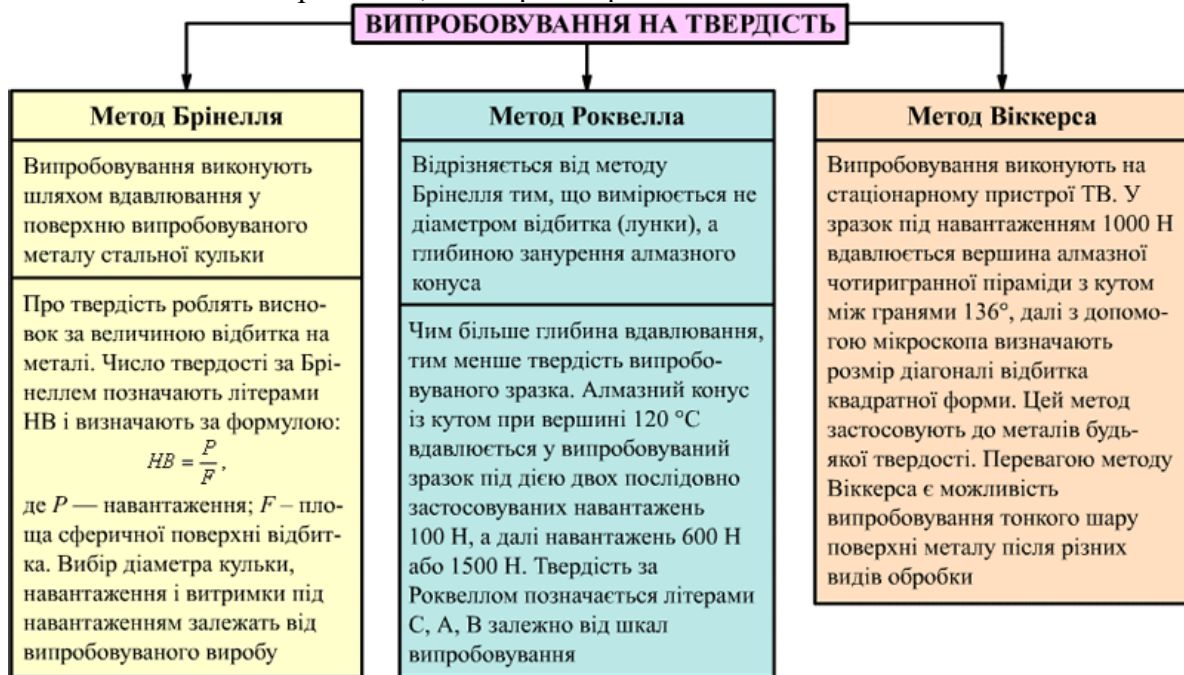


Рис. 3. Випробовування на твердість

Випробовування на ударну в'язкість.

Для випробовування на удар виготовляють спеціальні зразки з надрізом, які потім руйнують на маятниковому копрі (рис. 4). Загальний запас енергії маятника витратиться на руйнування зразка і на підйом маятника після його руйнування. Тому якщо із загального запасу енергії маятника вилучити частину, яка припадає на підйом (зліт) після руйнування зразка, дістанемо роботу руйнування зразка:

$$K = P(h_1 - h_2)$$

або

$$K = Pl(\cos \beta - \cos \alpha), \text{ Дж (кг}\cdot\text{м)},$$

де P — маса маятника, Н (кг); h_1 — висота підйому центра маси маятника до удару, м; h_2 — висота зльоту маятника після удару, м; l — довжина маятника, м; α, β — кути підйому маятника відповідно до руйнування зразка і після нього.

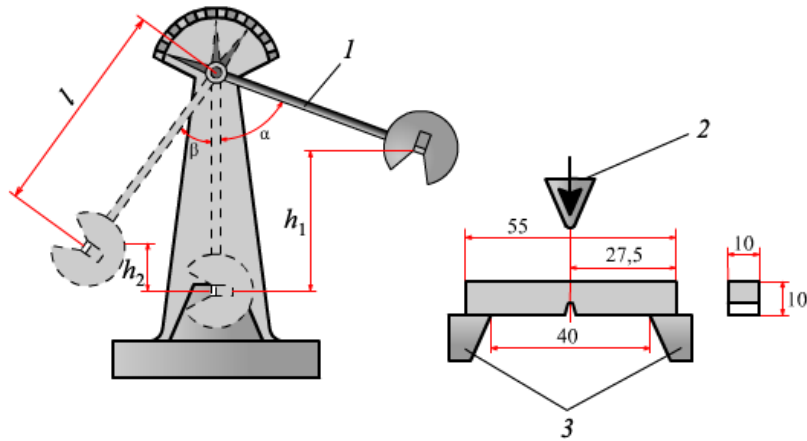


Рис. 4. Випробовування на ударну в'язкість:
1 — маятник; 2 — ніж маятника; 3 — опори

Ударну в'язкість, тобто роботу, витрачену на руйнування зразка і віднесену до поперечного перерізу зразка у місці надрізу, визначають за формулою:

$$K_C = \frac{K}{F}, \text{ МДж/м}^2 \text{ (кг} \cdot \text{м/см}^2\text{)},$$

де F — площа поперечного перерізу в місці надрізу зразка, м^2 (см^2).

Для визначення K_C користуються спеціальними таблицями, в яких для кожного кута β зазначена величина роботи удару K . При цьому $F = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Для позначення ударної в'язкості додають і третю букву, що вказує на вид надрізу на зразку: U , V , T . Запис $K_C U$ означає ударну в'язкість зразка з U -подібним надрізом, $K_C V$ — з V -подібним надрізом, а $K_C T$ — із тріщиною (рис. 5).

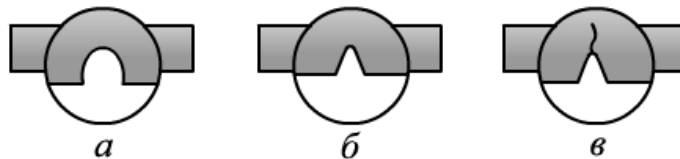


Рис. 5. Види надрізів на зразках для випробування на ударну в'язкість:

a — U -подібний надріз ($K_C U$); b — V -подібний надріз ($K_C V$); v — надріз із тріщиною ($K_C T$)

Випробування на утомлюваність (ГОСТ 2860—84). Руйнування металу під дією повторних або знакозмінних напружень називають *утомлюваністю металу*. При руйнуванні металу внаслідок втоми на повітрі злом складається з двох зон: перша зона має гладку притерту поверхню (зона втоми), друга — зона долому, в крихких металів вона має грубокристалічну будову, а у в'язких — волокнисту.

При випробуванні на втому визначають границю втоми (витривалості), тобто те найбільше напруження, яке може витримати метал (зразок) без руйнування задане число циклів. Найпоширенішим методом випробування на втому є випробування на згин при обертанні (рис. 6).

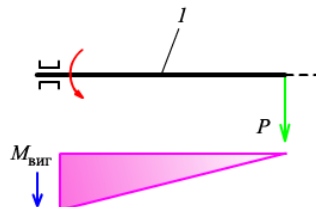


Рис. 6. Схема випробування на згин при обертанні:

l — зразок; P — навантаження; $M_{\text{виг}}$ — вигинаючий момент

Застосовують такі основні види технологічних випробувань (проб).

Проба на згин (рис. 7) у холодному та гарячому станах — для визначення здатності металу витримувати заданий загин; розміри зразків — довжина $l = 5a + 150$ мм, ширина $b = 2a$ (але не менш ніж 10 мм), де a — товщина матеріалу.

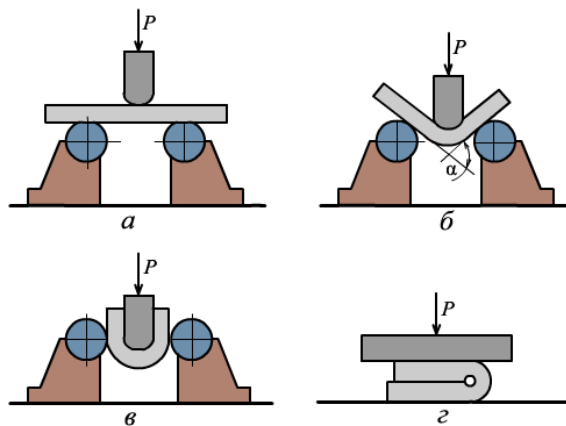


Рис. 7. Технологічна проба на згин:

a — зразок до випробовування; *б* — загин до певного кута; *в* — загин до паралельності сторін; *г* — загин до стикання сторін

Проба на перегин передбачає оцінку здатності металу витримувати повторний згин і застосовується для дроту та прутків діаметром 0,8—7 мм зі смугового та листового матеріалу товщиною до 55 мм. Зразки згинають перемінно праворуч та ліворуч на 90° з рівномірною — близько 60 перегинів за хвилину — швидкістю до руйнування зразка.

Проба на видавлювання (рис. 8) — для визначення здатності металу до холодного штампування та витягання тонкого листового матеріалу. Полягає у продавлюванні пуансоном листового матеріалу, затиснутого між матрицею та затискачем. Характеристикою пластичності металу є глибина видавлювання ямки, що відповідає появі першої тріщини.

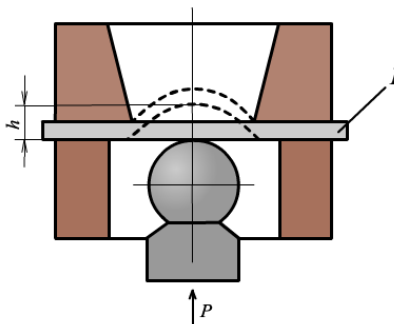


Рис. 8. Випробовування на видавлювання:

l — лист; *h* — міра здатності матеріалу до витягу

Проба на навивання дроту діаметром $d \leq 6$ мм. Випробовування полягає у навиванні 5—6 щільно прилеглих по гвинтовій лінії витків на циліндр заданого діаметра. Здійснюється тільки в холодному стані. Дріт після навивань не повинен мати пошкоджень.

Проба на іскру використовується при необхідності визначення марки сталі за відсутністю спеціального обладнання та маркування.

Властивості матеріалів

Матеріали володіють певним набором властивостей. Розрізняють фізичні, хімічні, механічні, технологічні та експлуатаційні властивості матеріалів, які зумовлюють їх застосування в тій чи іншій галузі промисловості.

До основних **фізичним** властивостям відносяться щільність, електро- і теплопровідність, намагніченість, температура плавлення, температурні коефіцієнти лінійного і об'ємного розширення та ін.

До **механічним** властивостям матеріалу відносяться міцність, пластичність, твердість, повзучість, ударна в'язкість, втома, зносостійкість.

Міцність - здатність твердого тіла пручатися деформації або руйнуванню під дією статичних або динамічних навантажень.

Твердість - здатність матеріалу чинити опір впровадженню в нього іншого, який не одержує залишкової деформації, тіла.

Пластичність - здатність матеріалу отримувати залишкове (залишається після видалення навантаження) зміна форми і розмірів без руйнування. Характеристикою пластичності є відносне подовження і звуження випробуваного зразка.

Ударна в'язкість - це міцність при динамічних навантаженнях, Дж / м²:

$$K_C = \frac{A}{F}$$

де A - робота, витрачена на руйнування зразка; F - площа зразка в місці надрізу.

Повзучість - властивість матеріалу повільно деформуватися під дією постійно розтягує навантаження, яка створює напругу нижче межі пружності даного матеріалу.

Втома матеріалу - властивість поступового накопичення пошкоджень в матеріалі під дією циклічних навантажень, що призводять до утворення тріщин і руйнування. Властивість матеріалів опиратися втоми називається **витривалість** опором втоми). Опір втоми характеризується межею витривалості.

Межа витривалості це найбільше напруження, яке матеріал може витримати без ознак руйнування після заданого числа навантажень знакозмінним вигином або іншим видом деформації при закріпленні випробуваного зразка одним кінцем.

Одним з показників опору втоми є **живучість** під якою розуміють довговічність деталі від моменту зародження перших макроскопічної тріщини втоми розміром 0,5-1,0 мм до остаточного руйнування.

Технологічні властивості характеризуються здатністю матеріалу здобувати задану форму під дією різних факторів (температури, тиску та ін.), Піддаватися механічній обробці, з'єднуватися різними методами (зварюванням, склеюванням) і т.д. Звідси випливає, що вони мають важливе значення при виборі способу виготовлення деталей, так як повинні забезпечити можливо меншу трудомісткість конструкцій.

До технологічних властивостей матеріалів відносяться ливарні властивості (рідкотекучість, усадка, схильність до ліквіації), зварюваність і оброблюваність ріжучим інструментом.

Рідкотекучість здатність розплавленого матеріалу заповнювати ливарну форму.

Усадка - зменшення лінійних розмірів (обсягу) залитого в форму матеріалу в процесі охолодження виливки.

Ліквіація - сегрегація, неоднорідність хімічного складу сплаву, що виникає при його кристалізації.

Здатність до спікання - міцність зчеплення частинок в результаті термічної обробки пресованих заготовок.

Здатність до пресування здатність порошку ущільнюватися під дією зовнішнього навантаження і забезпечувати високу міцність зчеплення частинок після пресування.

Зварюваність - здатність матеріалу давати міцне нероз'ємне з'єднання при нагріванні зварювальних кромки до температури плавлення або сказу і додатки певного тиску (ударів або стиснення).

Здатність деформуватися (ковкість) - здатність матеріалу приймати необхідну форму під дією зовнішнього навантаження без руйнування і при найменшому опорі.

Прогартуваність - здатність металу сприймати загартування на деяку глибину від поверхні.

Здатність піддаватися обробці - здатність матеріалу піддаватися обробці різанням. Критеріями оброблюваності є режими різання і якість поверхневого шару.

До експлуатаційних відносяться властивості матеріалу, що безпосередньо впливають на показники, що характеризують цільове призначення виробу.

Корозійна стійкість - опір матеріалу дії агресивних середовищ (кислотних, лужних і т.п.).

Холодостійкість - здатність матеріалу зберігати необхідні пластичні властивості при низьких робочих температурах.

Жароміцність - здатність матеріалу зберігати необхідні механічні властивості при високих робочих температурах.

Жаростійкість - здатність матеріалу чинити опір окисленню в газовому середовищі при високих температурах.

Зношуваність - властивість матеріалу змінювати розміри, форму, руйнувати поверхневий шар або змінювати стан його поверхні внаслідок залишкової деформації від постійно діючих навантажень при терті сполучених поверхонь.

Зносостійкість - здатність матеріалу чинити опір зношуванню, що оцінюється величиною зворотною швидкості зношування.

Твердість – це здатність матеріалу чинити опір проникненню в його поверхню стандартного тіла (індентора), що не деформується при випробуванні.

Широке застосування пояснюється тим, що не вимагається спеціальні зразки.

Це неруйнуючий метод контролю. Основний метод оцінки якості при термічній обробці виробу. Про твердість судять або по глибині проникнення індентора (метод Роквелла), або по величині відбитка від вдавлювання (методи Брінелля, Віккерса, мікротвердості).

У всіх випадках відбувається пластична деформація матеріалу. Чим більше опір матеріалу пластичній деформації, тим вище твердість.

Від твердості значною мірою залежить міцність деталі і стійкість поверхні її до спрацювання. На твердість випробовують усі відповідальні деталі. Для двигунів внутрішнього згоряння випробовують поршні, поршневі пальці, шатуни, шатунні болти, колінчасті вали, клапани та інші деталі.

На практиці найпоширенішими є такі методи визначення твердості металів: вдавлювання сталевий кульки (метод Брінелля); Вдавлювання алмазного конуса (метод Роквелла); Вдавлювання алмазної піраміди (метод Віккерса). Схеми випробувань представлені на рис. 1.

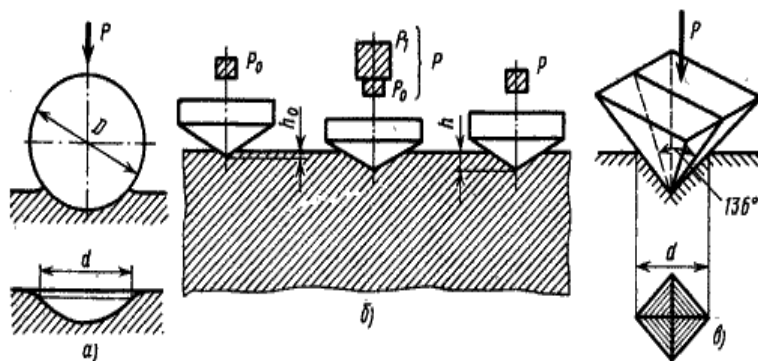


Рис. 1. Схеми визначення твердості: а – за Брінеллем; б – за Роквеллом; в – за Віккерсом

1. Твердість за Брінеллем (ГОСТ 9012)

Випробування проводять на твердомірі Брінелля (рис. 1 а)

Як індентор використовується сталеві загартована кулька діаметром D 2,5; 5; 10 мм, залежно від товщини виробу.

Навантаження P, залежно від діаметра кульки і твердості, що виміряється: для термічно обробленої сталі і чавуна – $P = 30D^2$, литої бронзи і латуні – $P = 10D^2$, алюмінія і інших дуже м'яких металів – $P = 2,5D^2$.

Тривалість витримки τ : для сталі і чавуна – 10 с, для латуні і бронзи – 30 с.

Отриманий відбиток вимірюється в двох напрямках за допомогою лупи Брінелля.

Для випробування твердості металів за цим методом застосовують прилад типу ТШ (твердомір кульковий). До нього додаються загартовані кульки з легованої сталі таких діаметрів: 2,5; 5; 10 мм (табл. 1).

Таблиця 1

Вибір діаметра кульки і навантажень залежно від товщини зразка

Товщина зразка, мм	Діаметр кульки, мм	Навантаження, Н		
		30D ² для сталі й чавуну	10D ² для латуні й бронзи	2,5D ² для м'яких матеріалів
Понад 6	10	30 000	10 000	2500
Від 6 до 3	5	7500	2500	625
Менше ніж 2,5	2,5	1875	625	156

За методом Брінелля випробовують незагартовані вироби (твердість яких не перевищує 450 НВ), оскільки при випробуванні матеріалів з більшою твердістю сталеву кульку при вдавлюванні деформуватиметься і результати досліду будуть неправильними (неточними). Схему вдавлювання зображено на рис. .

Унаслідок вдавлювання на поверхні зразка утворюється заглибина — відбиток з діаметром D , мм.

Діаметр відбитка вимірюють бінокулярним мікроскопом МПБ-2 (рис.). Цей мікроскоп застосовують для вимірювання відбитків при випробуванні кульками діаметром 5 і 10 мм. Мікроскоп МПБ-2 вимірює відбиток з точністю до 0,05 мм (див. рис.), оптична система збільшує його в 24 рази. Для вимірювання відбитків, зроблених кулькою діаметром 2,5 мм, слід застосовувати мікроскоп з точністю вимірювання до 0,01 мм.

Твердість на приладі ТП-2 визначають у такій послідовності: користуючись табл., вибрати відповідний режим випробування — діаметр D навантаження P Кульки і тривалість витримки T ; Встановити відповідно до навантаження тягарі на підвіску; закріпити кулькотримач з відповідним діаметром кульки; покласти зразок на предметний столик, підвести його до зіткнення з кулькою і ввімкнути прилад; після зняття зразка виміряти мікроскопом МПБ-2 (або лупою зі шкалою поділок десятих міліметра); розрахувати число твердості за Брінеллем як відношення прикладеного навантаження P до сферичної поверхні відбитка F :

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Стандартними умовами є $D = 10$ мм; $P = 3000$ кгс; $\tau = 10$ с. В цьому випадку твердість за Брінеллем позначається НВ 250.

Таблиця 2

Числа твердості за НВ

Діаметр відбитка, мм	Число твердості при навантаженні P , Н			Діаметр відбитка, мм	Число твердості при навантаженні P , Н		
	30D ²	10D ²	2,5D ²		30D ²	10D ²	2,5D ²
2,90	4440	—	—	3,30	3400	1140	384
2,95	4300	—	—	3,35	3320	1100	276
3,00	4150	—	346	3,40	3210	1070	267
3,05	4010	—	334	3,45	3110	1040	259
3,10	3880	1290	323	3,50	3020	1010	252
3,15	3750	1250	313	3,55	2930	977	245
3,20	3630	1210	303	3,60	2860	950	237
3,25	3520	1170	293	3,65	2770	923	231

Залежність між діаметром відбитка і числом твердості за Брінеллем (діаметри відбитка подано для кульки діаметром 10 мм) наведено в табл. 2.

Для визначення числа твердості НВ при випробуванні кулькою діаметром 5 мм діаметр відбитка потрібно помножити на 2, а при випробуванні кулькою діаметром 2,5 мм — на 4, а потім знайти в таблиці 2 відповідну твердість.

2. Метод Роквелла ГОСТ 9013

Заснований на вдавлюванні в поверхню наконечника під певним навантаженням (рис. 1,6).

Індентор для м'яких матеріалів (до НВ 230) — сталеву кульку діаметром $\varnothing 1,6$ мм, для більш твердих матеріалів — конус алмазний.

Навантаження здійснюється в два етапи. Спочатку прикладається попереднє навантаження P_0 (10 кгс) для щільного зіткнення наконечника із зразком. Потім прикладається основне навантаження P_1 , протягом деякого часу діє загальне робоче навантаження P . Після зняття основного навантаження визначають значення твердості по глибині залишкового вдавлювання наконечника h під навантаженням P_0 .

Метод Роквелла. Цей метод застосовують для визначення твердості загартованих сталей та інших матеріалів, які мають високу твердість >450 HB.

За методом Роквелла твердість визначають вдавлюванням твердосплав або наконечника з алмазним конусом із кутом при вершині 120° або зі сталеву кулькою діаметром 1,59 мм. Кулькою користуються при випробуванні м'яких сталей (до 220 HB) при навантаженні 981 Н (100 кгс). Зразок кладуть на стіл твердоміра і обертанням гайки з трьома ручками піднімають його до дотику з алмазним конусом або сталеву кулькою. Обертання гайки продовжують до утворення тиску на зразок 98 Н (10 кгс) — попереднє навантаження, що показує маленька стрілка на циферблаті індикатора (шкала твердості), тобто маленька стрілка має зупинитися навпроти точки (вертикально). При цьому велика стрілка має стати майже вертикально. Обертаючи барабан встановити «0» шкали навпроти кінця великої стрілки. Циферблат має дві шкали: червону «В» — для випробування кулькою і чорну «С» і «А» — для випробування відповідно твердосплавом і алмазним конусом. Шкалою «В» користуються при вимірюванні твердості м'яких металів з твердістю 60...230 HB (незагартовані сталі, кольорові метали та їхні сплави); шкалою «С» при вимірюванні 230...700 HB (загартованих сталей) і шкалою «А» — з твердістю понад 700 HB (після хіміко-термічної обробки і твердих сплавів).

Ввімкнути електродвигун, повернувши ручку тумблера вгору. Після цього вимкнути механізм навантаження плавним коротким натисканням на клавішу. Простежити за відхиленням великої стрілки, а після її зупинення прочитати число твердості на відповідній шкалі.

Позначення твердості записують так: 35 HRB — випробування кулькою; 42 HRC — випробування конусом із твердого сплаву; 84 HRA — випробування алмазним конусом.

Залежно від природи матеріалу використовують три шкали твердості (таблиця 3).

Таблиця 3

Шкали для визначення твердості за Роквеллом

Шкала	Обозначение	Индентор	Нагрузка, кг			Область применения
			P_0	P_1	P_2	
A	HRA	Алмазный конус < 1200	10	50	60	Для особо твёрдых материалов
B	HRB	Стальной закаленный шарик $\varnothing 1/16"$	10	90	100	Для относительно мягких материалов
C	HRC	Алмазный конус < 1200	10	140	150	Для относительно твёрдых материалов

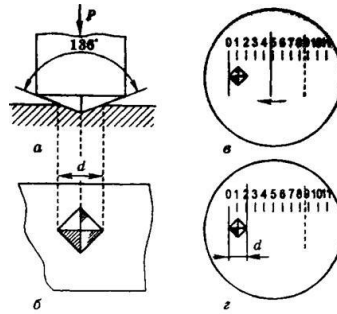
На твердість за Роквеллом випробовують шийки колінчастих валів, поршневі пальці, інструменти, тверді сплави (на різцях) та інші деталі.

3. Метод Віккерса

Твердість визначається за величиною відбитка (рис. 1 в).

Як індентор використовується алмазна чотирихгранна піраміда з кутом при вершині 136° .

Метод Віккерса застосовують для визначення твердості твердих металів і сплавів, а також надто малих деталей і тонких поверхневих шарів після цементації, азотування, ціанування тощо.



Метод Віккерса полягає в тому, що алмазний наконечник, який має форму правильної чотиригранної піраміди, вдавлюють у зразок (деталь) під дією навантаження F (P). Потім вимірюють діагональ відбитка d , який залишається після зняття навантаження. Навантаження F (P) може змінюватися від 9,8 (1) до 980 Н.

Твердість розраховується як відношення прикладеного навантаження P до площі поверхні відбитка F :

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

Навантаження P складає 5...100 кгс. Діагональ відбитка d вимірюється за допомогою мікроскопа, встановленого на приладі.

Число твердості за Віккерсом (HV) визначають за спеціальними таблицями, в яких наведено значення діагоналі d відбитка, визначене в міліметрах.

Перевага даного способу в тому, що можна виміряти твердість будь-яких матеріалів, тонкі вироби, поверхневі шари. Висока точність і чутливість методу.

Спосіб мікротвердості – для визначення твердості окремих структурних складових і фаз сплаву, дуже тонких поверхневих шарів (соті частки міліметра).

Аналогічний способу Віккерса. Індентор – піраміда малих розмірів, навантаження при вдавлюванні P складають 5...500 кгс

$$H_{200} = 1,854 \frac{P}{d^2}$$

Методи дослідження структури металів

Дослідження структури металів

Термічний метод призначений для визначення критичних точок, тобто тих температур, за яких у сплаві відбуваються будь-які перетворення. Критичні точки визначають термоелектричним пірометром, що складається з двох частин: термопари та гальванометра. Сутність методу: нерознімне з'єднання термопари занурюють у розплавлений метал для реєстрації початку або кінця кристалізації або у спеціально просвердлений отвір у зразку, що досліджується, і через певні проміжки часу (зазвичай через 15—30 с) знімають показання гальванометра. На підставі отриманих результатів будують криві, відкладаючи на осі абсцис час, а на осі ординат — температуру (рис. 1.).

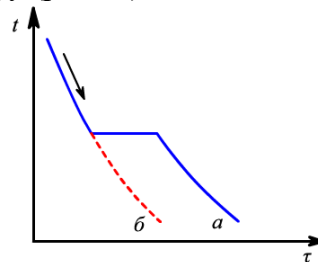


Рис. 1. Криві охолодження сплавів за наявності фазового перетворення (а) і за його відсутності (б)

Дилатометричний метод застосовують для визначення критичних точок у сплаві. Базується на об'ємних змінах, що відбуваються при нагріванні чи охолодженні. Практично спостерігають зміну не об'єму, а довжини нагрітого чи охолодженого зразка.

Магнітна дефектоскопія. Метод застосовують для виявлення дефектів, які порушують суцільність феромагнітних металів (сталі, чавуни), дрібних поверхневих і внутрішніх тріщин, раковин і т. п., а також для контролю за якістю термічної обробки. Для цього застосовують магнітні порошки (сухий метод) (рис. 2) або магнітні суспензії, що осідають на границях дефекту (рис. 3). Для виявлення дефектів існують спеціальні прилади — дефектоскопи (рис. 4).



Рис. 2. Осад магнітного порошку на гартівних тріщинах у сталевій деталі, які не можна побачити оком



Рис. 3. Осад магнітної суспензії на виявлених дефектах



Рис. 4. Універсальний магнітний дефектоскоп з електронним керуванням. Контрольована деталь (вал), установлена в бабках дефектоскопа

Люмінесцентний метод. Люмінесценцією називають холодне світіння речовини (тобто без нагрівання до високої температури), зумовлене різними причинами: освітленням речовини, проходженням у ній електричного струму (у газах і парі), хімічними процесами.

На здатності деяких органічних сполук флуоресценціювати, тобто світитися під дією ультрафіолетових променів, ґрунтується люмінесцентний метод виявлення дефектів. Проте за цим методом можна знаходити лише відкриті поверхневі дефекти типу мікротріщин. Порівняно з магнітним він дозволяє контролювати магнітні й немагнітні матеріали (алюміній, пластмаси тощо). Практично контроль люмінесцентним методом здійснюють у такий спосіб: деталь ретельно очищують і занурюють у ванну з флуоресцентним розчином (суміш трансформаторного мастила, гасу та спеціального зелено-золотистого порошку) і витримують у ньому 10—15 хв. Розчин проникає у мікротріщини. Потім розчин зливають з поверхні, деталь висушують і опромінюють ультрафіолетовим світлом, виявляючи місця світіння. Джерелом ультрафіолетових променів є ртутно-кварцова лампа з алюмінієвим відбивачем і світлофільтром (затримує промені видимого світла і пропускає ультрафіолетові промені) (рис. 5).



Рис. 5. Дефекти, виявлені люмінесцентним методом

Ультразвуковий метод. Дефекти у виробках можна визначити також за допомогою звуку. Наприклад, якщо стукати нігтем по чашці, тарілці, то за звуком легко можна встановити наявність або відсутність у них тріщин; стукаючи молотком по бандажу колеса вагона за звуком визначають, є в ньому дефект чи ні. Проте за звуком, який сприймає людське вухо, можна визначити лише дефекти великих розмірів. Пояснюється це тим, що людське вухо чує звуки, що утворюються тілами з частотою від 16 до 20 тисяч коливань за секунду. Якщо тіло коливається з більшою частотою, то такий звук вухо не сприймає. Нечутні звуки називають *ультразвуковими*.

За допомогою ультразвуку можна виявити дуже малі дефекти (розміром 1—2 мм), розташовані досить глибоко (на відстані кількох метрів від поверхні). Це пояснюється надто великою частотою ультразвуку (сотні тисяч і навіть мільйони коливань з секунду). Чим більша частота, тим менша довжина звукової хвилі і тим менший дефект можна виявити. Приклад з водяною хвилею: якщо камінь у воді більший від довжини хвилі, то хвиля, вдаряючись об камінь, відкочується назад, а якщо менший, то хвилі його огинають і йдуть далі, ніби й не зустрічали на своєму шляху ніякої перешкоди. Аналогічно до водяних поводять себе й звукові хвилі. Якщо довжина такої хвилі велика, то й відбивається вона від великої перешкоди. Цей метод базується на відбитті звукових хвиль від дефекту, розташованого всередині металу. Ультразвуковий метод винайшов у 1928 р. професор С. Я. Соколов. Для отримання дуже високої частоти ультразвукових коливань використовують кварцову пластину, крізь яку пропускають змінний струм. Унаслідок коливань кварцової пластини у повітрі утворюються звукові хвилі, які спрямовують на поверхню досліджуваної деталі. Хвилі, що відбиваються від дефекту, повертаються на поверхню й утворюють ультразвукову луну, яка також уловлюється кварцовою пластинною. Ультразвукова луна збуджує на металевих пластинах, між якими розташована кварцова пластинка, електричний струм, який підсилюється і вимірюється приладом. Ультразвук надсилають у деталь не безперервно, а періодично. Час між надсиланням ультразвуку і поверненням його назад і є критерієм оцінки глибини залягання дефекту.

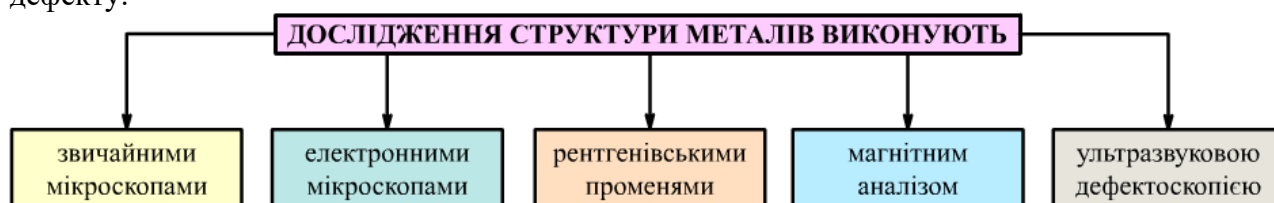


Рис. 1. Загальні відомості про методи дослідження структури металів

Структурні методи дослідження

Макроструктурний аналіз передбачає вивчення макроструктури металу, тобто будови металу, яку можна спостерігати без збільшення або при невеликому збільшенні за допомогою лупи (від 2 до 30 разів). Дозволяє встановити розміри та форму кристалів, знаходити дефекти литва та термообробки (раковини, шлакові включення, тріщини тощо). Макроструктуру досліджують безпосередньо на поверхні деталі, у зламі або на спеціальному зразку (темплеті) після шліфування і травлення відповідним розчином. Протравлювач по-різному розчиняє різні структурні складові та розтравлює дефекти, що й видно на поверхні темплету.

Мікроскопічний аналіз. Застосовують для вивчення будови металу при збільшенні від 50 до 2000 разів за допомогою спеціального металографічного мікроскопа. Вперше для дослідження структури його застосував П. П. Аносов.

Мікроскопічний аналіз слугує для визначення форми та розмірів кристалічних зерен, з яких складається сплав; змін внутрішньої будови металу під впливом різних видів обробки (термічної та хіміко-термічної), а також після зовнішньої механічної дії на сплав; хімічного складу деяких структурних складових; для виявлення мікротріщин та неметалевих включень.

Мікроструктурні дослідження мають велике значення, оскільки механічні властивості металу певною мірою залежать від структури. Для дослідження мікрошліфів застосовують оптичні металомікроскопи. Оптичну схему металографічного мікроскопа зображено на рис. 1.29. Промені від освітлювача 1, що заломлюються призмою 2, проходять крізь об'єктив 3, відбиваються від мікрошліфа 4, знову проходять через об'єктив 3, далі через призму 5 і

окуляр 6. Оптична схема збільшення мікроскопа дорівнює добутку металографічного мікроскопа збільшень об'єктива й окуляра.

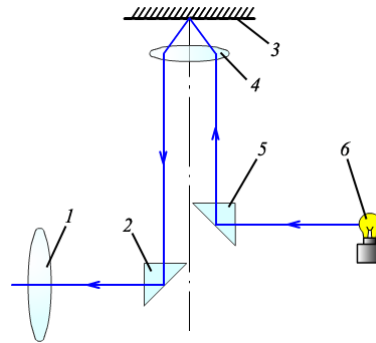


Рис. 6. Оптична схема металографічного мікроскопа:
1 — окуляр; 2, 5 — призма; 3 — мікрошліф; 4 — об'єктив; 6 — освітлювач



Рис. 7. Методи дослідження структури металів

Електронна мікроскопія. Дослідження структури металів і сплавів за допомогою електронного мікроскопа називають *електронною мікроскопією*. В електронному мікроскопі джерело світла замінено джерелом електронів, які виходять з електронної гармати, а скляні лінзи замінені електромагнітними лінзами. Електронна гармата являє собою вольфрамову спіраль, нагріту до високої температури (катод). За анод править пластинка з отвором посередині. Між спіраллю й анодом, що знаходяться на невеликій відстані, створюється потужне електричне поле, необхідне для прискорення руху електронів. Прискорені електрони проходять крізь отвір анода і прямують до об'єкта. Залежно від методу дослідження існує кілька конструкцій електронних мікроскопів:

- просвітлювальні, у яких потік електронів проходить через об'єкт; зображення є наслідком різного розсіювання електронів на об'єкті;
- відбивальні, коли зображення утворюється відбитими від поверхні об'єкта електронами;
- емісійні, у яких зображення утворюється від поверхні, що світиться, під дією електронів;
- растрові, де зображення утворюється за рахунок емісії електронів, що випромінюються з поверхні, на яку падає і безперервно переміщується потік первинних електронів.

Найпоширенішими є просвітлювальні електронні мікроскопи, в яких об'єкт досліджують в електронних променях. З огляду на це предмет дослідження має бути дуже тонким. При дослідженні звичайних мікрошліфів на електронному мікроскопі застосовують переважно метод реплік (оксидних, лакових, кварцових, вугільних), що відтворюють рельєф поверхні мікрошліфа і пропускають електронні промені. Крізь різні ділянки об'єкта проходить різна кількість електронів (менша від грубих і щільних ділянок і більша від тонких і нещільних). Це спричиняє контрастність зображення, тобто відображення будови предмета, що досліджується. Просвітлювальні електронні мікроскопи дають збільшення в 400 тисяч разів.

Принцип дії електронного мікроскопа показаний на рис. 8 електрони, що вилітають з великою швидкістю з гармати 1, проходять крізь отвір анода і прямують до конденсорної

лінзи 2, що збирає їх у пучок на оберті дослідження 3. Далі об'єктивна лінза 4, змінюючи напрям потоку електронів, що розсіюються окремими елементами об'єкта, дає першу ступінь збільшення 5 (проміжне зображення). Остаточне збільшення 7 отримують після проходження електронних променів через проєкційну лінзу 6. Воно дорівнює добутку збільшень об'єктивної та проєкційної лінз.

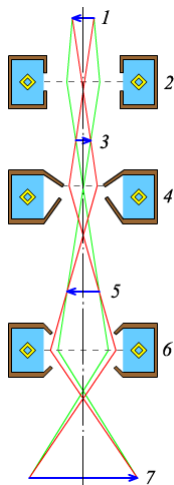


Рис. 8. Принципова схема електронного мікроскопа:

1 — об'єкт дослідження; 2 — конденсорна лінза; 3 — оберт дослідження; 4 — об'єктивна лінза; 5 — проміжне зображення; 6 — проєкційна лінза; 7 — остаточне збільшення

Метод радіоактивних ізотопів. Ізотопами називають атоми з тотожними хімічними властивостями, проте різною атомною масою. Метод радіоактивних ізотопів полягає в тому, що атоми введених у метал радіоактивних ізотопів зазнають радіоактивного перетворення, яке супроводжується радіоактивним випромінюванням, яке легко виявити. Атоми радіоактивних ізотопів виділяються з безлічі атомів, тобто вони наче мічені, тому цей метод ще називають методом мічених атомів, який дає змогу контролювати процеси, що відбуваються в металах при їх виготовленні й обробці, наприклад розподіл атомів під час кристалізації металу.

Для вивчення процесу розміщення елементів у сплав вводять радіоактивний ізотоп елемента, розподіл якого у сплаві й досліджують. З готового сплаву виготовляють мікрошліф і приводять його у контакт з емульсією фотопластинки (фотоплівки). Випромінювання ізотопа діє на фотопластинку, як і світло. Так отримують мікрорадіограму, яку розглядають під мікроскопом.

Рентгеноструктурний аналіз і рентгенівська дефектоскопія. Рентгеноструктурний аналіз застосовують для дослідження внутрішньої будови кристалів, їх орієнтування і визначення внутрішніх напружень (викривлення ґратки). Рентгенівські промені — це електромагнітні хвилі дуже малої довжини. Порівняно з довжиною світлових хвиль рентгенівські хвилі у 10 тисяч разів коротші.

Рентгенівський аналіз заснований на відбиванні рентгенівських променів від атомів кристалічної ґратки і на інтерференції рентгенівських променів, тобто здатності їх підсилювати, послаблювати або взагалі гасити один одного. Для дослідження монокристалів використовують рентгенівські трубки, які дають пучок променів з різною довжиною хвиль, так зване біле рентгенівське випромінювання. Полікристалічні метали і сплави досліджують у променях з певною довжиною хвилі — монохроматичних променях. Тому аноди електронних трубок виготовляють з хрому, заліза, міді, молібдену або кобальту.

Одним із методів рентгеноструктурного аналізу полікристалічних металів та сплавів є *метод порошків* (рис. 9). При цьому рентгенівські промені із трубки 1 спрямовують на дрібний порошок (розміром до 1 мм) металу, який знаходиться у тонкій (діаметром 1 мм) целулоїдній трубці 2. Відбиті від порошку рентгенівські промені фіксують на фоточутливу плівку 3. Отримують рентгенограму, яку потім розшифровують. Рентгенівські промені можуть тією чи іншою мірою проникати крізь будь-яке тіло, хоча інтенсивність їх проникнення буде різною, оскільки частково поглинаються і розсіюються самим тілом. На цій властивості й базується метод контролю деталей просвічуванням, тобто *рентгенівська*

дефектоскопія (рис. 10). Сучасною потужною рентгенівською апаратурою можна просвічувати зразки сталі товщиною до 300 мм, зразки алюмінію — до 600 мм.

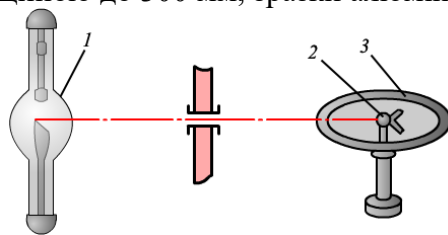


Рис. 9. Принцип рентгеноструктурного аналізу на фотоплівці при просвічуванні:
1 — рентгенівська трубка; 2 — зразок; 3 — рентгенівська плівка

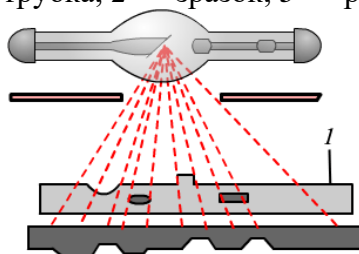


Рис. 10. Схема отримання проекції виробу методом порошків:
1 — зразок



Рис.11. Переносний рентгенівський апарат

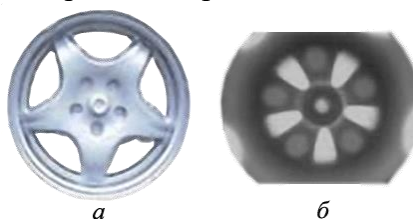


Рис. 12. Колісний диск (а) та його рентгенівський знімок (б)