

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни

«Теорія ливарних сплавів»

для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»
освітньої програми «Обладнання та технології
ливарного виробництва»
усіх форм навчання
Частина 1

2019

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Теорія ливарних сплавів» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Обладнання та технології ливарного виробництва» усіх форм навчання. Частина 1 / Укл.: Г.А.Бялік, В.І.Гонтаренко, Я.А.Василевська. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 89 с.

Укладачі: Г.А.Бялік, доцент, канд. техн. наук
В.І.Гонтаренко, професор, канд. техн. наук
Я.А.Василевська, асистент

Рецензент: Е.І.Цивірко, професор, д-р техн. наук

Відповідальний
за випуск: В.В.Луньов, професор, д-р техн. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
«Машини і технологія
ливарного виробництва»

Протокол № 10
від 14 червня 2019р.

Рекомендовано до видання
НМК Інженерно-фізичного
факультету

Протокол № 10
від 24 червня 2019р.

ЗМІСТ

Частина 1	
ВСТУП	5
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СПЛАВИ	6
1.1 Основні визначення	6
1.2 Виникнення та історія розвитку сплавів	8
1.3 Сучасні тенденції розвитку сплавів	13
2 ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ ТА ЇХ	
ВИЗНАЧЕННЯ	18
2.1 Механічні властивості	18
2.2 Зразки для випробувань на розтягнення та їх виготовлення	19
2.3 Визначення міцності і пластичних властивостей	22
2.4 Визначення твердості	28
2.5 Динамічні випробування	32
2.6 Визначення густини ливарних сплавів	36
3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РУЙНАЦІЇ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ	38
3.1 Теоретична міцність сплавів	38
3.2 Дислокації як основний чинник розбіжності між теоретичною та	
реальною міцністю металів і сплавів	40
3.3 Руйнація як процес виникнення та розповсюдження тріщини ..	42
3.4 Крихка руйнація ливарних сплавів	44
3.5 В'язкість руйнації та її визначення	46
3.6 В'язка руйнація	52
3.7 Втоплена руйнація	53
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ РУЙНАЦІЇ	
ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ	57
4.1 Макрофрактографія	57
4.2 Мікрофрактографія	63
5 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ТА	
ПЛАСТИЧНОСТІ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ	72
5.1 Два основні методи підвищення міцності ливарних сплавів	72
5.2 Структура ливарних сплавів як складна ієрархічна система	74
5.3. Зміцнення ливарних сплавів на атомному рівні	74
5.4 Зміцнення сплавів на рівні мезоструктури	80
5.5 Зміцнення ливарних сплавів на рівні субструктури	82

5.6 Зміцнення ливарних сплавів на рівні мікроструктури.....	83
5.7 Комбінації основних механізмів зміцнення	85
ЛІТЕРАТУРА.....	89
Частина 2	

ВСТУП

Прогрес сучасного машинобудування тісно пов'язаний з розвитком його основної заготівельної бази – ливарного виробництва. За допомогою ливарних процесів можна одержати заготовки і навіть готові деталі, які неможливо виготовити будь-яким іншим методом, або це економічно недоцільно.

Вимоги до ливарних сплавів постійно підвищуються, тому виникає потреба в створенні нових сплавів і удосконаленні існуючих. Основна мета дисципліни «Теорія ливарних сплавів» полягає в опануванні методикою створення нових і підвищення якісних показників існуючих ливарних сплавів.

В процесі вивчення цієї дисципліни вирішуються такі задачі:

- визначення основних якісних показників ливарних сплавів;
- вивчення основних механізмів і методів дослідження руйнації ливарних сплавів;
- дослідження методів підвищення основних механічних властивостей ливарних сплавів;
- вивчення основних методів розробки ливарних сплавів із заданими властивостями.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СПЛАВИ

Під словом «сплав» розуміють тіло, одержане через сумісне плавлення двох або більше металів, або металів і неметалів. Сплав можна визначити, як тіло металевої природи, яке складається з двох, або більше компонентів і відповідає вимогам певних технічних документів щодо складу.

Слово «метал» – давньогрецького походження і означає земляні роботи, рудник, розкопки, копалини. Пізніше це слово перейшло у латинську мову, а потім через Німеччину і Польщу – в українську і російську мови.

З точки зору хімії метали – це елементи, які займають певну гаузу у періодичній системі Д.І.Менделєєва.

З точки зору фізики метали – це прості тіла металевої природи, які характеризуються високою тепло- і електропровідністю, специфічним металевим блиском. Ці властивості обумовлені наявністю у кристалічній ґратці металів великої кількості вільних електронів. До металів відносяться понад 80 елементів періодичної системи Д.І.Менделєєва.

З точки зору металургії метали – це прості технічні тіла металевої природи, які відповідають певним, оформленим відповідними документами вимогам щодо вмісту домішок.

За засобами виробництва сплави розділяються на ті, що виробляються сплавленням і іншими методами. Також сплави розділяються за вихідними матеріалами, які використовуються для їх виробництва. Класифікація сплавів за цими ознаками наведена на рис. 1.1.

1.1 Основні визначення

Сплави складаються з компонентів. Під компонентами розуміють усі хімічні елементи, що містяться у складі сплаву і впливають на його властивості. Компоненти, що утворюють сплав підрозділяються на такі види (рис. 1.2.):

– основа – найбільший за вмістом компонент, що визначає основні властивості сплаву. Звичайно у сплавах буває одна основа, іноді дві (наприклад, свинцево-олов'яних бронзах), а в окремих випадках – три (легкоплавкі евтектичні сплави);

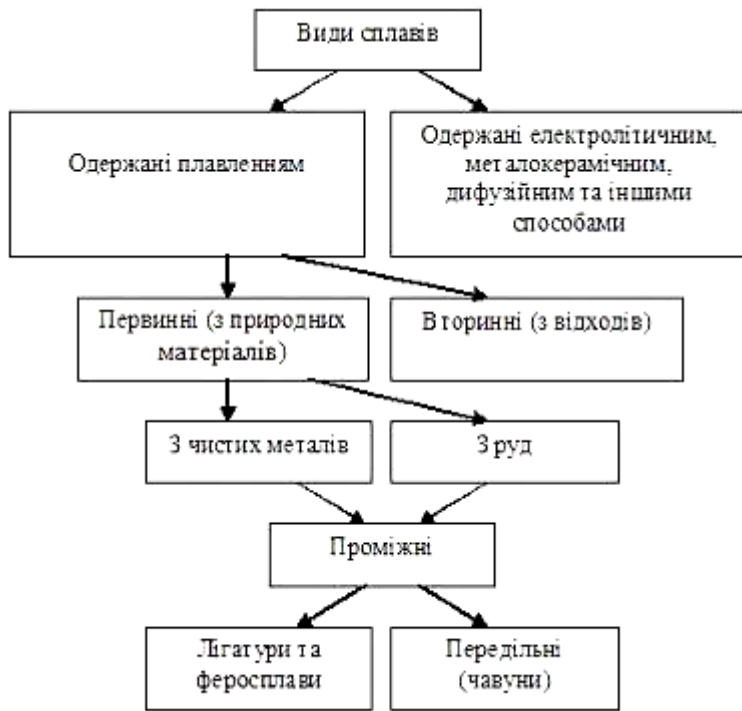


Рисунок 1.1 – Класифікація сплавів за вихідними матеріалами і засобами виробництва

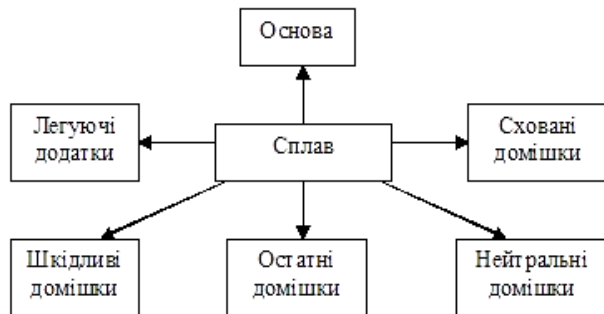


Рисунок 1.2 – Види компонентів сплаву

– легуючі добавки – компоненти, що навмисно вводять в сплав з метою керування його властивостями. Б.Б.Гуляєв відносить до легуючих добавок модифікатори, проте це є дискусійним питанням;

– шкідливі домішки, що знижують рівень властивостей сплаву. Вміст їх в сплаві обмежується. Шкідливі домішки потрапляють до складу сплаву з руди, полива, вогнетривких матеріалів, оточуючої атмосфери;

– остатні домішки, що переходять до сплаву при переплавленні відходів. Ці домішки інколи можуть бути корисними, але їх вміст обмежується з метою зобов'язати використовувати відходи тільки тих сплавів, що містять ці компоненти в якості легуючих добавок;

– нейтральні домішки – ті, що суттєво не впливають на властивості сплавів та не контролюються;

– приховані домішки – невеликі кількості елементів, що впливають на властивості сплавів, але важко піддаються контролю і тому їх наявна кількість не контролюється (сполуки кисню, деякі гази).

1.2 Виникнення та історія розвитку сплавів

Для одержання сплаву необхідно мати принаймні два компоненти: основу і легуючий добавок, обидва у вигляді елементів. Тому виробництву сплавів передувало одержання металів в елементарному вигляді.

Першим елементом, що отримала людина був вуглець. У чистому вигляді цей елемент може бути одержано при спаленні деревини.

Першими металами, що знайшла людина в самородному вигляді були золото та мідь. На рисунку 1.3 наведено вигляд невеликих самородків золота.

Приблизно 2000 років тому людство було знайоме з 7 металами: золотом, міддю, оловом, свинцем, сріблом, залізом, ртуттю. Це були самородні або легко відновлювані елементи. В середні віка було знайдено цинк, миш'як, сурму, вісмут. В XVIII сторіччі було одержано 20 елементів, в XIX сторіччі – 51 елемент. В XX сторіччі були відкриті останні стабільні елементи (таблиця 1.1).

Найбільшу практичну зацікавленість являє собою не відкриття елементів, а освоєння їх промислового виробництва. Зараз промисловість виробляє 90 елементів, тобто близько 90 відсотків від усіх відомих елементів.

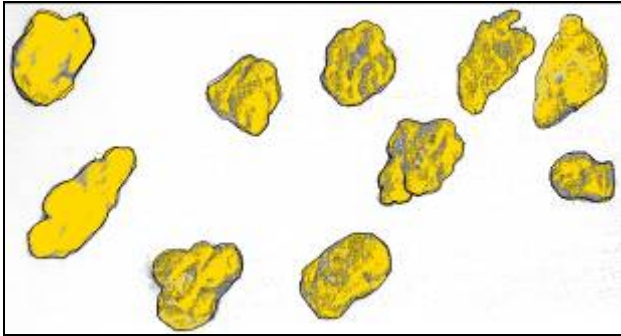


Рисунок 1.3 – Дрібні самородки золота

Таблиця 1.1 – Данні відкриття хімічних елементів

Елемент	Дата відкриття	Елемент	Дата відкриття
Вуглець	Відомі з глибокої давнини	Бор	1808
Сірка		Магній	1808
Золото		Йод	1811
Срібло		Літій	1817
Мідь		Кадмій	1817
Свинець		Селен	1817
Олово		Кремній	1823
Цинк		Алюміній	1825
Стибій	1669	Бром	1826
Кобальт	1735	Торій	1828
Платина	1748	Ванадій	1830
Нікель	1751	Лантан	1839
Водень	1766	Ербій	1843
Фтор	1771	Тербій	1843
Азот	1772	Рутеній	1844
Кисень	1774	Рубідій	1861
Барій	1774	Талій	1861
Марганець	1774	Цезій	1861
Хлор	1774	Індій	1863
Молібден	1778	Гелій	1868
Вольфрам	1781	Галій	1875
Телур	1782	Ітербій	1878

Продовження таблиці 1.1

Елемент	Дата відкриття	Елемент	Дата відкриття
Цирконій	1789	Скандій	1879
Уран	1789	Самарій	1879
Стронцій	1790	Гольмій	1879
Ітрій	1794	Тулій	1879
Титан	1795	Празеодим	1885
Хром	1797	Неодим	1885
Берилій	1798	Германій	1886
Ніобій	1801	Гадоліній	1886
Тантал	1802	Диспрозій	1886
Паладій	1803	Аргон	1894
Церій	1803	Неон	1898
Осмій	1804	Криптон	1898
Іридій	1804	Ксенон	1898
Родій	1804	Полоній	1898
Калій	1807	Радій	1898
Натрій	1807	Радон	1898
Кальцій	1808	Актиній	1899
Європій	1901	Технецій	1937
Лютецій	1907	Францій	1939
Гафній	1923	Астат	1940
Реній	1925	Плутоній	1940

Перші відомі людині метали як конструкційні матеріали використовувались в чистому вигляді відносно недовго тому, що їх міцність була невеликою.

Першою основою для сплавів була мідь. Її знаходили у самородному стані у вигляді шматків різноманітної форми і розмірів. Згідно археологічним дослідженням старовинні металурги володіли методами виплавки міді з деяких руд. Оскільки мідь легко відновлюється, виплавка її з руд може бути виконана в примітивних печах.

Першим сплавом на мідній основі була бронза. Вона була одержана при сумісному плавленні міді і олова.

Взагалі перші сплави були відкриті випадково, тому можна сказати, що невідомим майстрам, які це зробили, поталанило. Але не випадково слова «поталанило» і «талант» мають одне коріння. Первісні

майстри були у першу чергу талановитими дослідниками, Пізніше історія науки і техніки неодноразово доводила, що навіть випадково таланило саме талановитим дослідникам.

Другою основою для сплавів було золото. Як метал, золото почали використовувати раніше міді, але оскільки воно використовувалось головним чином для прикрас, сплави золота почали виготовляти значно пізніше мідних. Першим сплавом золота був електрум. Він використовувався для виробництва монет у першому тисячоріччі до нашої ери.

Перше залізо, яке потрапило до рук людини, було метеоритного походження. Взагалі падіння метеориту супроводжується яскравим світлом, на це звертала увагу людина. На місці падіння метеоритів утворювались досить специфічні кратери (рис. 1.4). Вірогідно, в цих кратерах і знаходили шматки заліза різних розмірів, які були придатні для виготовлення певних виробів (рис. 1.5).



Рисунок 1.4 – Кратер, що утворився після падіння метеориту

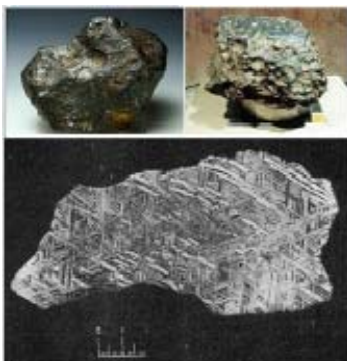


Рисунок 1.5 – Залізний метеорит

Потім залізо почали виробляти з так званих болотних руд у вигляді криці. Перші сплави заліза з вуглецем – сталі – були одержані дифузійним методом у стародавньому Римі.

Перший рідкий сплав заліза – чавун був одержаний в Європі лише у XIV сторіччі. Одержання рідкої сталі вперше було реалізовано за допомогою так званого тигельного процесу лише у 1740 році, але масове виробництво рідкої сталі пов'язане з розробкою бесемерівського (1854) і мартенівського (1864) процесів.

Вперше досліди по легуванню сталі окрім вуглецю іншими додатками проводив П.П.Аносов на початку XIX сторіччя, але розповсюдження цей процес набув в кінці XIX і на початку XX сторіччя. Зі спеціальних сталей, одержаних в перший період цих досліджень, слід Відмітити зносостійку сталь Гадфільда (1872р.) і швидкоріжучу сталь Тейлора (1906р.).

Промислове виробництво алюмінію почалось у 1854 році. Перші сплави алюмінію з кремнієм, цинком, міддю були запатентовані в кінці XIX сторіччя. В великих кількостях виробництво сплавів алюмінію почалося з дюралюмінію (1909 р.) і силумінів (1920 р.).

Сплави на основі магнію були розроблені і знайшли практичне використання тільки починаючи з 20 – 30 років двадцятого сторіччя. Титан був відкритий відносно давно (у 1795 році) але він довго не використовувався як конструкційний матеріал у зв'язку з його крихкістю. Тільки в 40 роках двадцятого сторіччя були відкриті і розроблені засоби його рафінування, що дозволило одержати метал необхідної якості. Негайно почалися роботи по створенню сплавів на основі титану.

Останні 20 років розробляються сплави на основі тугоплавких та рідких металів: жароміцні, жаростійкі, корозійностійкі та інші.

Зараз в сплавах використовується десь близько 70 елементів. Характер їх використання суттєво різниться.

Найбільш широко як основа використовується залізо. Це основа так званих «чорних» сплавів.

Поширені як основи для кольорових сплавів 8 елементів: алюміній, свинець, мідь, цинк, нікель, олово, магній, титан.

Використовуються як основи, але у відносно невеликих кількостях, а також як легуючі добавки 12 елементів: кобальт, цирконій, молибден, вольфрам, стронцій, вісмут, срібло, золото, уран, плутоній, хром, марганець.

Використовуються як основи сплавів у дуже малих кількостях і як легуючі добавки 20 елементів: паладій, платина, галій, германій, індій, ніобій, талій, берилій, рубідій, кремній, сурма, цезій, іридій, ртуть, торій, тантал, кадмій, ванадій, селен, телур.

Використовуються як легуючі добавки або контрольовані домішки 22 елементи: літій, бор, вуглець, азот, кисень, натрій, фосфор, сірка, калій, кальцій, рутеній, барій, лантан, церій, гафній, осмій, водень, миш'як, нептуній, ітрій.

Не входять в состав сплавів, але використовуються в промисловості 17 елементів: гелій, неон, аргон, криптон, ксенон, радон, хлор, фтор, бром, йод, празеодим, неодим, самарій, гадоліній, тербій, диспрозій.

1.3 Сучасні тенденції розвитку сплавів

Як правило, сплави виникають, використовуються, розвиваються, потім їх виробництво припиняється. Але є винятки. До так званих «вічних» сплавів можна віднести бронзу для виготовлення дзвонів (60 % міді і 40 % олова). Цей сплав відомий більше 1000 років. До речі, виготовлення його мальовничо зобразив Ф.Шіллер у вірші «Пісня про дзвін». До цієї категорії сплавів відноситься сталь Гадфільда (у вітчизняному стандарті 110Г13Л). В двадцятому сторіччі кількість сплавів, які створюються, зростала більше у порівнянні з кількістю сплавів, виробництво яких припинилось.

Зростання кількості сплавів обумовлюється такими основними факторами:

- швидким підвищенням параметрів техніки (робочих температур, швидкостей, тисків, агресивних середовищ, потужностей, зосереджених в одному агрегаті). Все це потребує підвищення рівня властивостей сплавів;

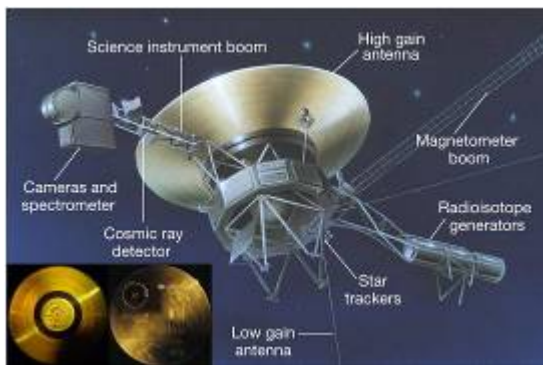
- ускладненням машин, приладів і об'єднання в їх вузлах різноманітних функцій, що потребує збігу суперечливих властивостей;

- виникненням принципово нових галузей техніки (космічна, напівпровідникова, атомна, лазерна та інші), які потребують нових сплавів, що в попередній час не існували. В якості прикладу можна навести сплав нікелю і титану нітінол, який володіє ефектом пам'яті. З цього сплаву робляться антени космічних апаратів. У складеному вигляді ці антени розміщуються у відносно невеликих габаритних розмі-

рах ракети-носія під час виводу на орбіту або міжпланетну траєкторію штучного супутника Землі, або автоматичної міжпланетної станції. Після виводу у космос ця складена конструкція під дією сонячного випромінювання нагрівається і, завдяки ефекту пам'яті, приймає початкову форму (рис. 1.6).



а



б

Рисунок 1.6 – Автоматичні міжпланетні станції Галілей (а) і Вояджер (б)

Нові сплави не стільки замінюють старі у традиційних галузях, скільки захоплюють нові галузі використання. Якщо простежити глобальні зміни у розвитку сплавів за останній час, можна виділити такі тенденції:

- загальне зростання кількості як вироблених так і використовуваних сплавів. Зараз їх використовується близько 10000;
- до недавнього часу кількість сплавів подвоювалась кожні 10–15 років. Ця тенденція може бути представлена експоненціальною залежністю:

$$y = k \cdot e^{a\tau}, \quad (1.1)$$

де y – кількість сплавів;

τ – час, роки;

y, a – коефіцієнти, що характеризують конкретну групу сплавів.

Але безмежне збільшення кількості сплавів при збільшенні часу за цією залежністю приводить до нісенітничі. Тому Прайсом була запропонована так звана логістична крива, що віддзеркалює збільшення кількості сплавів від часу:

$$y = b / [1 + (k/b) \cdot e^{-a\tau}], \quad (1.2)$$

де k, a, b – коефіцієнти, що характеризують конкретні сплави.

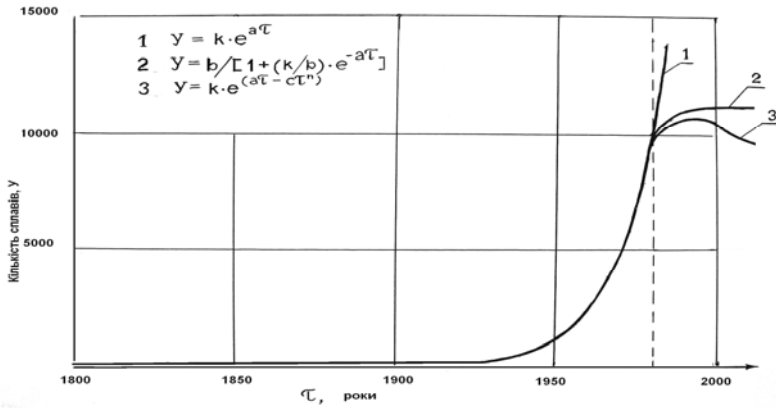
На початковій стадії логістичної кривої збільшення кількості сплавів підпорядковується закону, близькому до експоненціального, потім відбувається перегин і її значення асимптотичне наближується до деякої межі.

Одним з варіантів, що віддзеркалює закон залежності кількості сплавів від часу, можна вважати таку залежність:

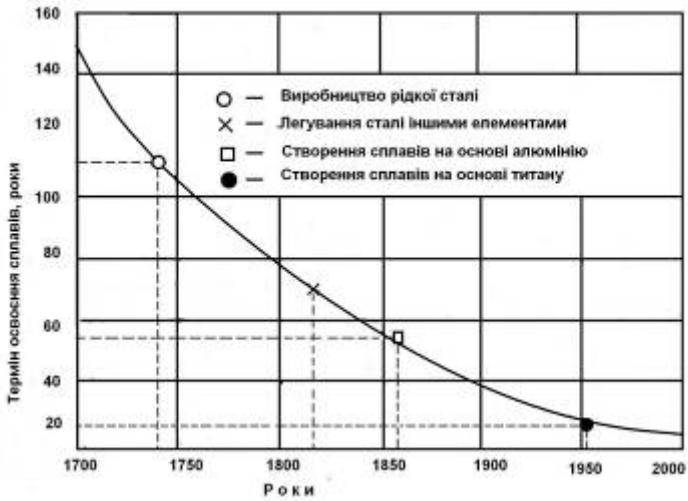
$$y = k \cdot e^{(a\tau - c\tau^n)}, \quad (1.3)$$

де c, n – деякі постійні.

Графічно рівняння (1.1), (1.2), (1.3) наведені на рисунку 1.7, а.



а



б

а – залежність кількості розроблюваних сплавів від часу;
 б – залежність терміну розробки сплаву від часу виникнення реальної ідеї.

Рисунок 1.7 – Основні тенденції розвитку сплавів

Останні дві залежності (див. рис. 7.1,а) підтверджуються на початку ХХІ сторіччя. Це пояснюється ускладненням досягнення більш високих властивостей сплавів і відсіюванням сплавів з близькими властивостями в зв'язку з їх уніфікацією.

Існує певна залежність терміну розробки нового сплаву як винаходу від появи ідеї до її практичної реалізації. Якщо ідея будь-яких технічних пристроїв звичайно виникає «на папері», ідея створення нового сплаву повинна мати деяку матеріальну основу. Це може бути новий хімічний елемент, який має певні властивості, придатні для основи майбутнього сплаву, дослідна технологія одержання сплаву, визначення деяких властивостей металу майбутньої основи, рафінованому від шкідливих домішок.

Вперше залежність терміну реалізації винаходу від часу виникнення ідеї побудував відомий радянський авіаконструктор Р.Л.Бартіні. Згідно цій залежності ідеї, що виникли, наприклад, у 1700 році, не могли реалізуватися раніше, ніж через 135 років, термін реалізації ідей, що виникли в 1750 і 1800 роках, були реалізовані через 90 і 60 років відповідно.

Терміни розробки ливарних сплавів повністю відповідають цій залежності (рис. 1.7,б). Так, масове виробництво рідкої сталі було реалізовано через 104 роки після відкриття тигельної плавки. Сплави на основі алюмінію були виготовлені через 35 років після того, як була одержана достатня кількість відносно чистого алюмінію. На розробку титанових сплавів пішло від 3 до 5 років після одержання високо чистого титану. В наш час термін створення нового сплаву не повинен перевищувати декількох місяців.

В третьому тисячоріччі термін створення нових сплавів буде скорочуватись до тижнів, днів і, мабуть, годин. Вірогідно, це пов'язане з появою нових методів як теоретичної розробки нових сплавів, так і їх практичного виготовлення на основі комп'ютерних технологій.

2 ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ ТА ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

2.1 Механічні властивості

Механічні властивості – найважливіші якісні показники ливарних сплавів. До механічних властивостей відносяться межа міцності, межа текучості, межа пропорційності, відносне подовження, відносне звуження, твердість, ударна в'язкість, модуль пружності.

Міцність – це опір сплаву деформації і руйнації.

Пружність – здібність сплаву відновлювати форму і об'єм після припинення дії зовнішніх сил, які викликали деформацію.

Пластичність – це здібність сплаву під дією зовнішніх сил відмінювати без руйнації форму і розміри і зберігати остатню деформацію після припинення дії цих сил. Твердість – це опір сплаву локальній пластичній деформації, яка виникає після заглиблення в нього більш твердого тіла, наприклад, індентора при випробуванні.

Механічні властивості визначаються за допомогою механічних випробувань. Механічні випробування – це визначення механічних властивостей сплавів різними засобами.

За характером зміни протягом часу діючого навантаження розрізняють:

- статичні випробування (на розтягнення, стиснення, згин, твердість, кручення);
- динамічні випробування – визначення ударної в'язкості;
- циклічні випробування – визначення втомленої міцності;
- довготермінові високотемпературні випробування (повзучість, довготермінова міцність, релаксація).

Механічні випробування здійснюють при високих і низьких температурах, в агресивних середовищах, а також в інших умовах.

Випробування на розтягнення використовують для сплавів на основі заліза, кольорових металів та їх сплавів. Стандарт встановлює методи статичних випробувань на розтягнення для визначення межі пружності, пропорційності, текучості, тимчасового опору, дійсного опору розриву, відносного подовження і відносного звуження після руйнації зразків.

При випробуванні на розтягнення прийняті такі позначення та визначення:

- робоча довжина l_0 , мм – частина довжини зразка до розтягнення, на якій визначається подовження;
- кінцева розрахункова довжина l_k , мм – довжина розрахункової після розриву зразка;
- початковий діаметр робочої частини зразка до випробування, d_0 , мм;
- найменший діаметр зразка після його руйнації d_k , мм;
- початкова площа пересічення робочої частини зразка до випробування, F_0 , мм²;
- найменша площа пересічення зразку після його руйнації, F_k , мм².
- розтягуюче навантаження, P , Н, (КН) – навантаження, що діє на зразок під час випробування;
- умовне нормальне напруження σ , МПа – напруження, що визначається відношенням навантаження P до початкової площини пересічення зразку F_0 ;
- дійсне нормальне напруження, S , МПа – напруження, що визначається відношенням навантаження P до дійсної під час випробувань площини пересічення зразку;
- абсолютне подовження δ , мм.

2.2 Зразки для випробувань на розтягнення та їх виготовлення

Найчастіше для випробувань на розтягнення використовуються циліндричні зразки (рис. 2.1).

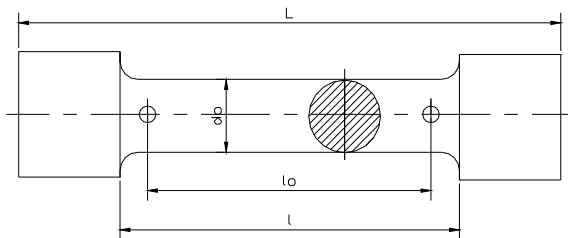


Рисунок 2.1 – Циліндричний зразок для випробувань на розтягнення

Використовують короткі пропорційні зразки і довгі пропорційні зразки. Вони розрізняються співвідношенням розрахункової початкової довжини і початкового діаметру:

$l/d_0 = 5$ – короткий пропорційний зразок;

$l/d_0 = 10$ – довгий пропорційний зразок.

Робоча довжина l циліндричних зразків повинна складати від $1 + 0,5d_0$ до $1 + 2d_0$.

Стандартні розміри циліндричних зразків для випробувань на розтягнення наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Пропорційні циліндричні зразки

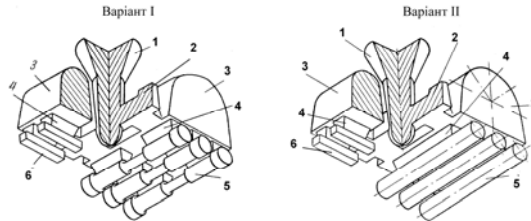
Номер зразка	Робоча частина зразка, мм				
	короткі			довгі	
	d	l	l	l	l
1	25	125	150	200	275
2	20	100	120	200	220
3	15	75	90	150	165
4	10	50	60	100	110
5	8	40	48	80	88
6	6	30	36	60	66
7	5	25	30	50	55
8	4	20	24	40	44
9	3	15	18	30	33

Для визначення механічних властивостей ливарних сплавів найбільш доцільно використовувати литі зразки, розміри яких максимально наближені до стандартних, тобто мають мінімальні припуски на механічну обробку.

Загальний вигляд виливків литих зразків наведений на рис. 2.2. Комплект зразків складається з 3 розривних і 5 ударних зразків.

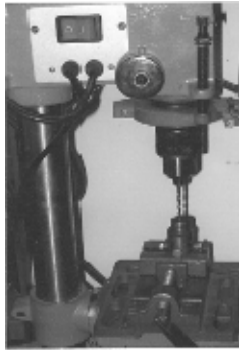
Короткі пропорційні зразки № 5 можна виготовити з литих заготовок для ударних зразків. Це значно знижує витрати сплавів на виготовлення зразків. Спочатку за допомогою спеціального кондуктора на свердильному верстаті виконуються центрувальні отвори на торцях заготовки (рис. 2.3,а). Потім на токарному верстаті заготовка закріплюється в спеціальній оправці і обточується фігурним різцем, який фор-

мує робочу поверхню і галтелі (рис. 2.3,б). На цьому ж верстаті за допомогою шліфувального пристосування виконується фінішна обробка зразка (рис. 2.3,в).

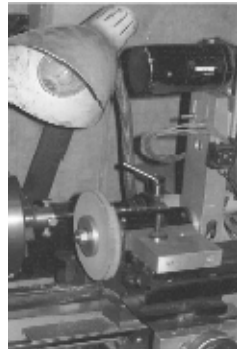


1 – стояк; 2 – шлаковловлювач; 3 – закриті прибутки; 4 – живильник; 5 - зразки для випробувань на розтягнення; 6 – зразки для випробувань на ударний згин (ударну в'язкість)

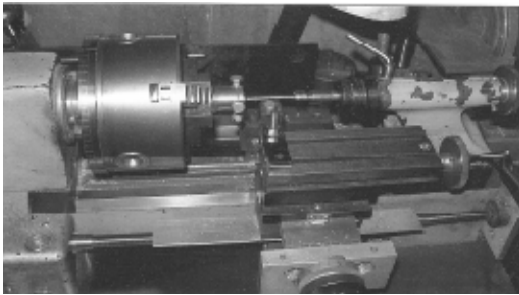
Рисунок 2.2 – Виливки зразків для механічних випробувань



а



б



в

а – центрівка; б – шліфування; в – обробка на токарному верстаті;.

Рисунок 2.3 – Виготовлення циліндричного зразка

2.3 Визначення міцності і пластичних властивостей

Випробування на розтягнення виконується на спеціальних випробувальних машинах. В залежності від методу навантаження машини бувають з механічним приводом, в яких деформація зразка здійснюється гвинтовою передачею, і з гідравлічним приводом, в яких деформація здійснюється переміщенням толока гідравлічного циліндра (рис. 2.4).

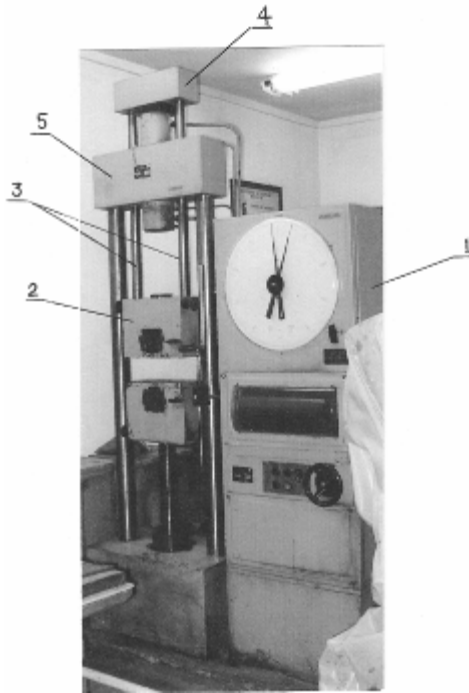
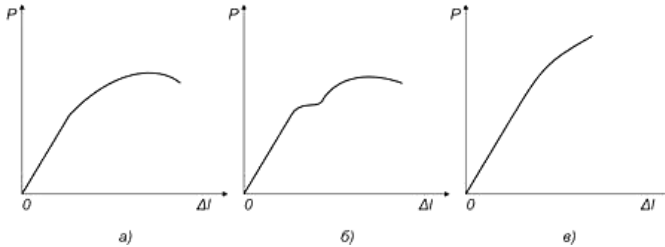


Рисунок 2.4 – Машина Р 10 для випробувань на розтягнення

Розривні машини звичайно бувають з вертикальним розташуванням зразка. Навантаження на зразок передається за допомогою захватів 2. Для зменшення ексцентричності прикладання навантаження використовують самоцентруючі кульові опори 3 і спеціальні аксіатори (4, 5). Навантаження вимірюють за допомогою силувимірювальних приладів 1.

За допомогою спеціальних пристроїв здійснюється запис діаграм в координатах «навантаження – деформація». Типові діаграми розтягнення наведені на рис. 2.5.



а – діаграма більшості металів і сплавів в пластичному стані з поступовим переходом в пластичну область (леговані сталі, мідь, бронза); б – діаграма деяких сплавів і металів в пластичному стані зі стрибкоподібним переходом у пластичну область у вигляді «зуба» або площадки текучості (низько вуглецеві сталі, латуні, деякі відпалені марганцевисті і алюмінієві бронзи; в – діаграма металів і сплавів, які знаходяться в крихкому стані при розтягненні (загартовані і низьковідпущені сталі, чавун, силумін).

Рисунок 2.5 – Типові діаграми розтягнення

Для одержання питомих механічних властивостей сплавів, що не залежать від розмірів зразків, діаграма розтягнення будується в координатах «розтягуюче напруження σ – відносне подовження δ »:

$$\sigma = P / F_0; \quad \varepsilon = \Delta l / l_0, \quad (2.1)$$

де P – навантаження;

F_0 – вихідна площа пересічення зразка;

ε – абсолютне подовження;

l_0 – розрахункова довжина зразка до випробувань.

Діаграма $\sigma - \varepsilon$ відрізняється від діаграми $P - \Delta l$ тільки масштабом, тому механічні властивості найчастіше визначають за первинною діаграмою $P - \Delta l$ (рис. 2.6). На рисунку показані суміщені діаграми з поступовим і різким переходом в пластичну зону.

Опір початковим пластичним деформаціям, що виникають при переході з пружної області в пружно-пластичну і відрізняються за відхиленням від лінійної залежності, характеризують такі показники.

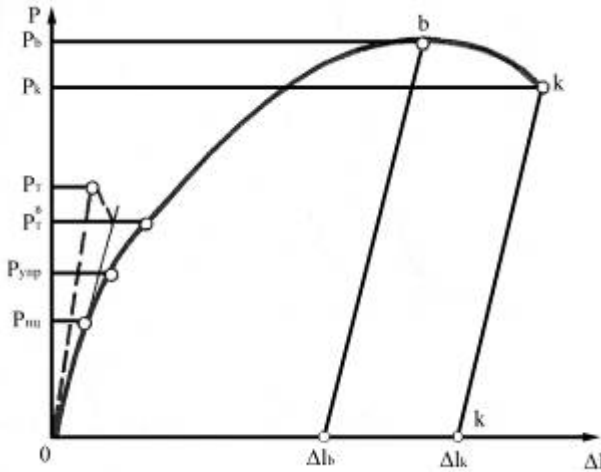


Рисунок 2.6 – Характерні ділянки і точки діаграми розтягнення

Межа пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$ – умовне напруження, що відповідає відхиленню від закону Гука, що задається певним допуском, наприклад, збільшенням тангенсу куту нахилу кривій деформації до вісі напружень на 25 % або 50 % :

$$\sigma_{\text{пц}} = P_{\text{пц}} / F_0, \quad (2.2)$$

де $P_{\text{пц}}$ – навантаження при межі пропорційності.

Межа пружності $\sigma_{\text{пр}}$ – умовне напруження, яке відповідає з'явленню залишкових деформацій заданої величини (0,05 %):

$$\sigma_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} / F_0, \quad (2.3)$$

де $P_{\text{пр}}$ – навантаження на межі пружності.

Межа текучості (фізична) $\sigma_{\text{т}}$ – умовне напруження, що відповідає найменшому навантаженню «площини текучості», коли деформація зразка відбувається без збільшення навантаження:

$$\sigma_T = P_T / F_0, \quad (2.4)$$

де P_T – навантаження при межі текучості.

Межа текучості (умовна) $\sigma_{0,2}$ – умовне напруження, при якому остатня деформація дорівнює 0,2 %:

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0, \quad (2.5)$$

де $P_{0,2}$ – навантаження при умовній межі текучості.

Опір значним пластичним деформаціям металів і сплавів характеризується **межею міцності** (тимчасовим опором) σ_B :

$$\sigma_B = P_B / F_0, \quad (2.6)$$

де P_B – максимальне навантаження, досягнення якого практично співпадає з початком утворення шийки в зразку з пластичного матеріалу (перехід від рівномірної деформації всієї робочої частини зразка до зосередженій деформації в одному пересіченні).

Пластичність металів і сплавів характеризують наступні величини.

Відносне подовження δ – відношення збільшення довжини зразка після розриву до початкової розрахункової довжини:

$$\delta = [(l_k - l_0) / l_0] \cdot 100\%. \quad (2.7)$$

Відносне звуження (при розриві) ψ – відношення найбільшого в місці розриву зменшення пересічення зразка до початкового пересічення:

$$\psi = (F_0 - F_k) / F_0, \quad (2.8)$$

де F_k – площа поперечного пересічення зразка в місці розриву.

Відносне звуження ψ як більш локальна характеристика краще оцінює в'язкість металів при руйнації, аніж відносне подовження.

При дослідженнях іноді використовують діаграми дійсних напружень. Дійсне напруження S обчислюють поділенням діючого в певний момент навантаження P на площину поперечного пересічення зразка в той же час.

Абсцисою діаграми дійсних напружень часто приймають відносне звуження, що вимірюється і підраховується відповідно до кожного моменту навантаження.

На рис. 2.7 наведено діаграму дійсних напружень $S - \psi$ для металу, що утворює шийку при розтягненні і для порівняння діаграма. На цих діаграмах видно, що зі збільшенням деформації дійсні напруження безперервно зростають до моменту руйнації зразка і у пластичних матеріалів максимальне навантаження, за яким розраховується σ_B не відповідає моменту руйнації. Таким чином, σ_B у пластичних матеріалів (більшість сталей ці деяких кольорових сплавів) є характеристикою пластичної деформації, а у крихких матеріалів (чавуни, силуміні і їм подібні) – характеристикою опору руйнації.

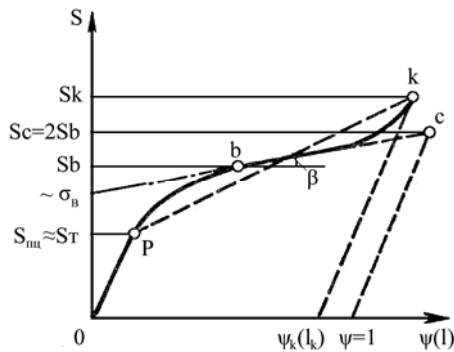


Рисунок 2.7 – Діаграма дійсних напружень при розтягненні

Для пластичних металів і сплавів опору руйнації гладкого зразку при розтягненні відповідає дійсне напруження в момент руйнації S_k :

$$S_k = P_k / F_k, \quad (2.9)$$

де P_k – навантаження в момент руйнації;

F_k – площа пересічення в місці руйнації.

При наявності площадки текучості межа текучості виявляється за допомогою діаграми розтягнення досить легко. Але при її відсутності умовна межа текучості визначається таким чином. Розраховують остатнє подовження, виходячи з робочої довжини зразку. Знайдену величину збільшують пропорційно масштабу діаграми і відрізок Ok , що відповідає відносному подовженню 0,2 % відкладають по осі X праворуч від точки O , при цьому початкова криволінійна частина діаграми виключається (див. рис. 2.7). З точки k проводиться пряма kl , паралельна прямій Os . Точка пересічення P з кривою розтягнення визначає висоту ординати, а саме навантаження $P_{0,2}$ відповідає межі текучості при заданому допуску на величину остатнього подовження (рис. 2.8).

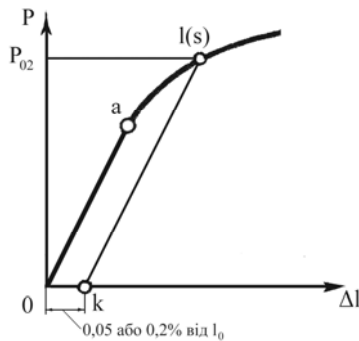


Рисунок 2.8 – Визначення умовної межі текучості

Модуль нормальної пружності визначається відношенням заданого збільшення напруження до середнього збільшення відносної деформації в пружній області. Збільшення деформації вимірюють тензометрами. Існують механічні та електричні тензометри. Механічні тензометри різних систем складаються з комбінації важелів із різними пристроями для відліку та реєстрації. Електричні тензометри дозволяють дистанційно вимірювати статичні та динамічні деформації в складних умовах (в агресивних середовищах, при високих або низьких температурах). При відсутності тензометрів збільшення деформації можна приблизно оцінити за діаграмою розтягнення. Модуль пружності визначається за наступними формулами:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad G = \frac{\tau}{\varepsilon}, \quad (2.10)$$

де σ і τ – напруження при розтягненні і зсуві відповідно;
 ε – деформація.

2.4 Визначення твердості

Під твердістю розуміють властивість матеріалу чинити опір під час місцевої контактної дії пластичній деформації або крихкій руйнації в поверхневому шарі в певних умовах випробувань. Цей опір виникає при втіленні в матеріал більш твердого тіла – індентора.

Індентор уявляє собою тверде, малоздібне до деформації тіло (алмаз, твердий сплав, загартована сталь) певної геометричної форми (куля, піраміда, конус), що вдавлюється в поверхню зразка або виробу.

Існують три основні методи визначення твердості: за Брінелем, Роквелом та Вікерсом.

Визначення твердості за Брінелем здійснюється вдавленням у поверхню зразку або виробу сталевोї загартованої кульки.

Число одиниць твердості за Брінелем оцінюється, як відношення навантаження P , під дією якого кулька заглиблюється в матеріал, до площини поверхні відбитка в матеріалі після зняття навантаження:

$$HB = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (2.11)$$

де P – навантаження;

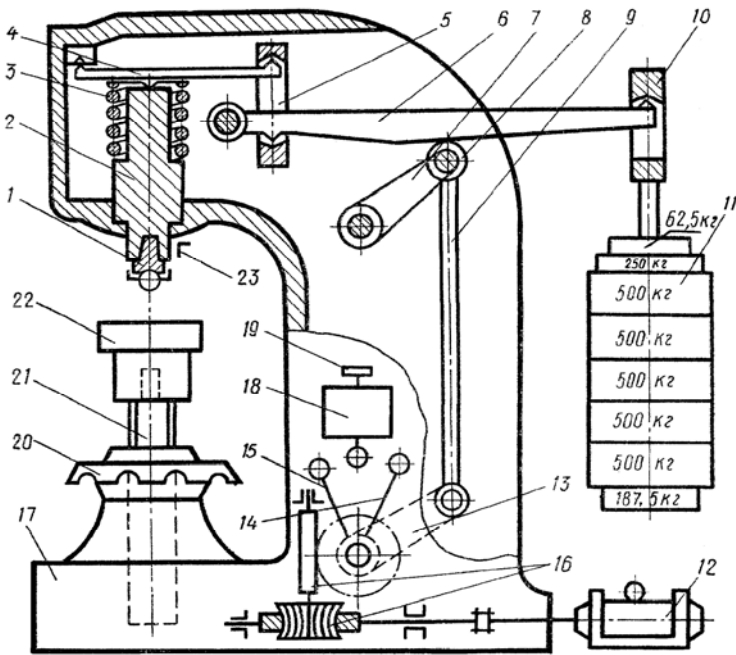
D, d – діаметри відповідно кульки та відбитка, мм.

Методом Брінеля здійснюється вимірювання твердості чорних та кольорових сплавів в межах від 8 до 450 HB. Індентор у вигляді кульки з карбіду вольфраму дозволяє збільшити діапазон вимірювань до 745 HB.

Сталеві кульки мають діаметр 10,5 та 2,5 мм, твердість їх має складати не менше ніж 850 HB.

Твердість за Брінелем вимірюють на спеціальних приладах – стаціонарних і переносних. Найчастіше використовують стандартні стаціо-

нарні прилади типу ТШ. Прилад Брінеля з механічним приводом наведено на рис. 2.9.

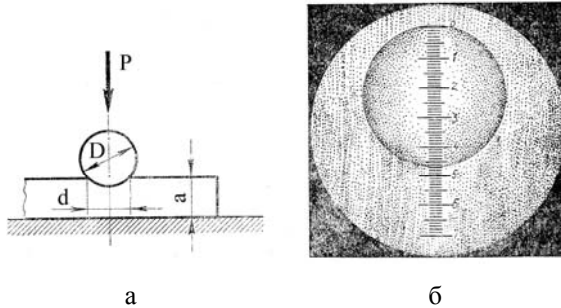


1 – індентор; 2- шпindelь; 3 – пружина; 4 – малий вантажний важіль; 5 – серга; 6 – великий вантажний важіль; 7 – хитний важіль; 8 – опорний ролик; 9 – шток; 10 – підвіска для вантажів; 11 – вантажі; 12 – електродвигун; 13 – кривошип; 14 – нерухомий упор автоматичного вимикача; 15 – рухомий упор автоматичного вимикача; 16 – черв'ячний редуктор; 17 – станина; 18 – перемикач; 19 – пускова кнопка; 20 – маховик з гайкою; 21 – підйомний гвинт; 22 – опора для плоских зразків; 23 – нерухомий упор.

Рисунок 2.9 – Прилад ТШ з механічним приводом

Схема випробування металів і сплавів за Брінелем наведена на рисунку 2.10.

Діаметр відбитка вимірюють за допомогою спеціального мікроскопа МПБ-2. Окулярна шкала цього мікроскопа має шкалу з поділками через 0,05 мм.



а – схема одержання відбитку;
б – вимірювання відбитка за шкалою окуляра мікроскопа.

Рисунок 2.10 – Схема випробувань металів і сплавів за Брінелем

Для вимірювання діаметра відбитку з потрібною точністю поверхня зразка повинна бути плоскою, чистою та гладкою, щоб краї відбитку були досить чіткими. Випробування за Брінелем достеменне, якщо розміри відбитку не виходять за межі співвідношення:

$$0,2 \cdot D < d < 0,6 \cdot D \quad (2.12)$$

Визначення твердості за Роквелом. Метод полягає в тому, що в поверхню зразка вдавляють алмазний конусний індентор (шкали А, С, D), або сталевий сферичний індентор (шкали В, Е, F, G, Y, К) під дією двох послідовних навантажень: попереднього $P_0 = 88,07$ Н та основного P_1 (для шкали С, $P_1 = 1373$ Н). Загальне навантаження $P = P_0 + P_1$ (для шкали С, $P = 1471$ Н). Значення твердості за Роквелом є умовна величина і визначається як різниця глибин, на які зміщується індентор під дією попереднього та основного навантажень (рис. 2.11).

Твердість за Роквелом визначається за формулою:

$$HR = \frac{K(h_1 - h_0)}{0,2}, \quad (2.13)$$

де K – коефіцієнт, що для алмазного конуса дорівнює 0,2; для сферичного індентора – 0,26;

h_0 і h_1 – заглиблення індентора під дією попереднього та основного навантажень.

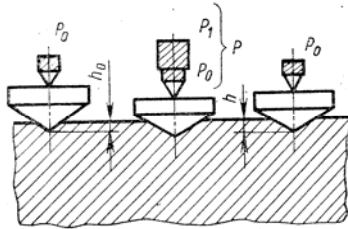
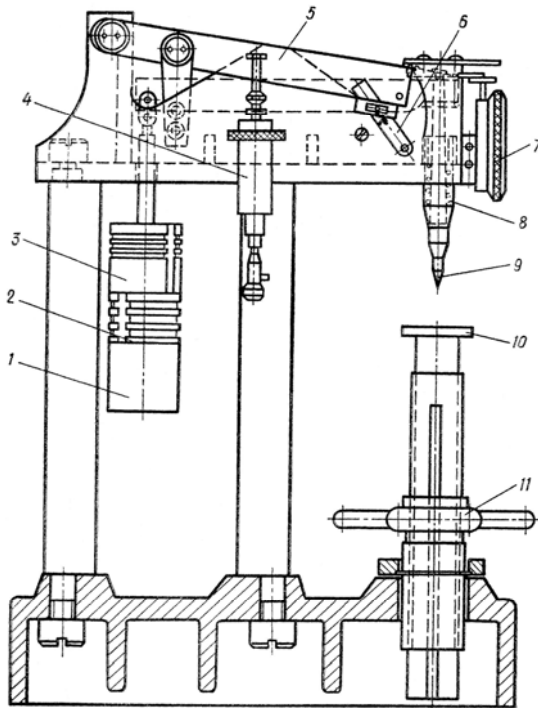


Рисунок 2.11 – Схема визначення твердості за Роквелом

Твердість за Роквелом визначається на приладі ТК. Схема цього приладу наведена на рис. 2.12.



1, 2, 3 – набір вантажів; 4 – амортизатор; 5 – важіль; 6 – важіль з рукояткою; 7 – індикатор; 8 – пружина; 9 – індентор; 10 – підставка для зразків; 11 – маховик.

Рисунок 2.12 – Прилад ТК-2М для визначення твердості за Роквелом

Визначення твердості за Вікерсом виконується вдавненням у зразок чотиригранної алмазної піраміди із кутом між гранями при вершині 136° . Твердість визначається як відношення навантаження до площини поверхні відбитка за формулою:

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2 \cdot P \cdot \sin 68^\circ}{d^2} = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad (2.14)$$

де P – навантаження;

d – діагональ відбитка (рис. 2.13).

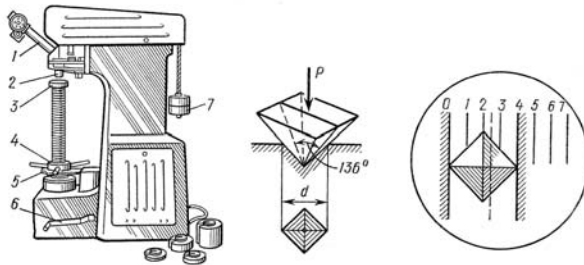


Рисунок 2.13 – Схема випробування твердості за Вікерсом

При випробуванні використовується навантаження 50 Н, 100 Н, 200 Н, 300 Н, 500 Н та 1000 Н. Можливість застосування малих навантажень 50 Н та 100 Н дозволяє визначати твердість деталей невеликої товщини, або тонких поверхневих шарів (наприклад, після хіміко-термічної обробки).

Для металів і сплавів твердістю до $HV = 450$, значення твердості за Брінелем та Вікерсом практично збігаються.

Вимірювання діагоналі відбитка виконується за допомогою мікроскопа при збільшенні $\times 100$. Твердість за Вікерсом визначається на приладах ТП. Мікроскоп є складовою частиною приладу ТП.

2.5 Динамічні випробування

Механічні властивості зразків, визначені за умов повільного підвищення навантаження, часто не відповідають дійсним умовам експлуатації реальних деталей, коли навантаження збільшується дуже швидко.

У випадку, коли деталі машин і механізмів в процесі експлуатації витримують ударні навантаження, сплави, що призначені для виготовлення таких деталей, випробовуються динамічним навантаженням. Справа в тому, що деякі сплави із досить великими статичними механічними властивостями руйнуються при відносно малих динамічних навантаженнях. На рис. 2.14 наведені діаграми розтягнення при статичному та динамічному навантаженні. Якщо їх порівняти, то можна відмітити, що динамічне навантаження впливає, в першу чергу, на початкову частину діаграми.

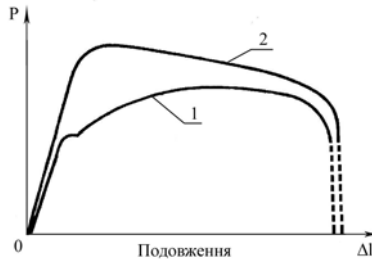


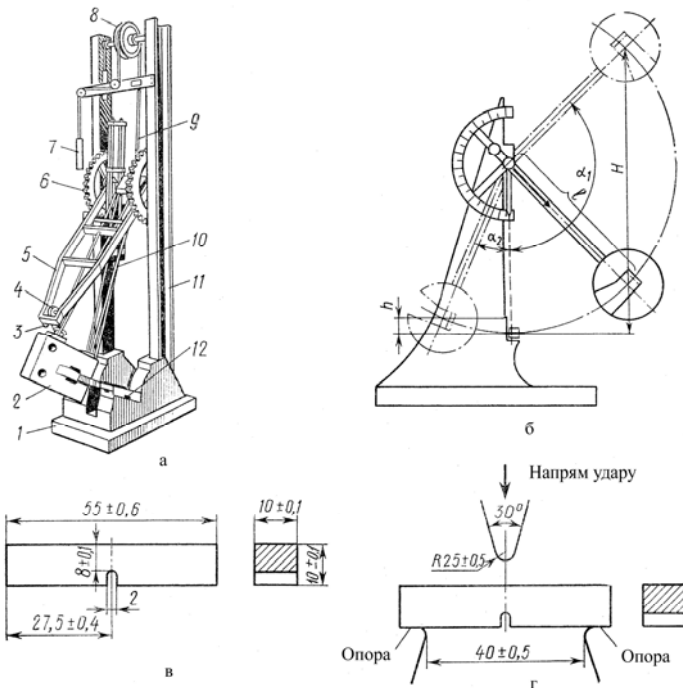
Рисунок 2.14 – Діаграми розтягнення при статичному (1) та динамічному (2) навантаженні

Найпростіше динамічне випробування – це ударний згин. Це, до речі, взагалі найменш складне механічне випробування. При випробуванні на ударний згин добре визначаються крихкі структурні стани металу, що відповідні за найбільшу чисельність аварійних випадків руйнації при експлуатації реальних конструкцій. Це було доведено ще у 1901 році Шарпі, який вперше запропонував ударні випробування зразків із надрізом. Він також розробив конструкцію маятникового копра, яка взагалі збереглася і по теперішній час.

Зараз ударні випробування зразків із надрізом досить розповсюджені при масовому контролі якості ливарних сплавів. Ударні випробування використовуються при визначенні критичних температур крихкості. Мінімальні значення ударної в'язкості долучаються до технічних умов на механічні властивості сплавів.

Таким чином, основне призначення ударних випробувань – це найбільш легке визначення небезпечної крихкості сплавів. Взагалі, ударним вважається навантаження, за умов якого змінення зусилля в зразку відносно часу перевищує $500 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2/\text{с}$.

Основний прилад для ударних випробувань - маятниковий копер (рис.2.15, а). Він складається з важкої основи 1, на якій встановлені дві металеві стійки 11, що підтримують вісь, що обертається в кулькових підшипниках. До цієї вісі на тяглах 10 підвішене у вертикальному стані важкий маятник 2 в прорізу якого міститься клиновидний ніж. Підйомна рамка 5 дозволяє встановити маятник у будь-якому положенні та зафіксувати його за допомогою храпових механізмів 6. Маятник з'єднується з рамкою за допомогою гачка 3 та зачінається запобіжним диском 4. Зразок встановлюється на опори 12. Копер має гальмо 9, що перекинute крізь блок 8 та закінчується вантажем 7. Гальмо потрібне для зупинки маятника після випробувань.



а – загальний вигляд маятникового копра; б – схема маятникового копра;
в – зразок для випробувань на ударний згин; г – схема розташування зразка на опорах.

Рисунок 2.15 – Визначення ударної в'язкості

Температура випробувань може бути, як кімнатною – $20 \pm 2^\circ\text{C}$, так і низькою: 0, –10, –20, –30, –40, –50, –60, –70, –80, –100, –196 $^\circ\text{C}$.

Зразок для випробувань на ударний згин має концентратор напружень. Згідно державного стандарту передбачені концентратори напружень трьох різновидів:

U – подібний, із радіусом надрізу 1 мм;

V – подібний, із радіусом надрізу 0,25 мм;

T – тріщина від втоми.

Ударна в'язкість, KC , визначається як відношення енергії, A_H , витраченої на руйнацію зразка до площини його пересічення F :

$$KC = \frac{A_H}{F}, \text{ МДж/м}^2 \quad (2.15)$$

$$A_H = M(h_1 - h_2), \quad (2.16)$$

де M – маса маятника;

h_1 – висота падіння маятника;

h_2 – висота підйому маятника після руйнації зразка.

Ударна в'язкість залежить від форми надрізу (концентратора напружень) (рис .2.16).

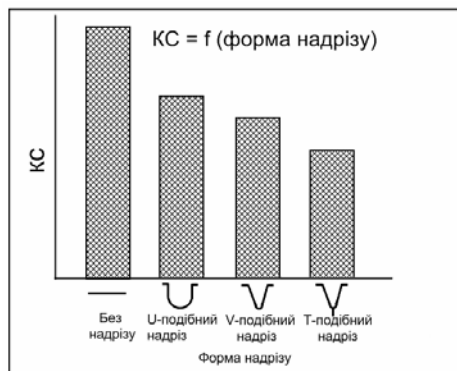


Рисунок 2.16 – Залежність ударної в'язкості KC від форми надрізу

Сучасні маятникові копри (рис.2.17) обладнані електронними пристроями, які дозволяють не тільки визначити інтегральну величину ударної в'язкості, але і розділити її на енергію зародження тріщини і енергію розповсюдження тріщини.



Рисунок 2.17 – Маятниковий копер, обладнаний електронними пристроями для обробки результатів випробувань

2.6 Визначення густини ливарних сплавів

Одним із методів оцінки якісних показників ливарних сплавів є визначення їх густини. Густина ρ – це відношення маси m сплаву до його об'єму V :

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (2.17)$$

Найбільш чутливими з методів визначення густини твердих тіл є пікнометричний, флотаційний, гідростатичний та рентгенівський.

Пікнометричний метод полягає у визначенні маси та об'єму рідини, що витісняється зі спеціальної судини – пікнометру, за умов занурення в нього зразку сплаву, що досліджується. Точність визначення густини пікнометричним методом сягає $5 \cdot 10^{-5}$ г/см³.

При флотаційному методі, підбирається рідина, густина якої дорівнює густині зразка. Густина та коефіцієнт об'ємного розширення рідини повинні бути відомі з достатньою точністю. Метод використовується для невеликих зразків легких сплавів. Для цього методу створені спеціальні пристрої – градієнтні колони, в яких можна створити стабільний за висотою градієнт густини. В такій колоні мірою густини

сплаву є висота, на якій зразок плаває в рідині. Точність вимірювання густини флотаційним методом дорівнює $5 \cdot 10^{-6}$ г/см³.

Для визначення густини твердого тіла гідростатичним методом треба послідовно зважити зразок у повітрі, та в допоміжній рідині. Густина визначається за формулою:

$$\rho = \frac{m_1 \cdot d_t - m_2 \cdot \sigma}{(m_1 - m_2)}, \quad (2.18)$$

де m_1 – маса зразку на повітрі;

m_2 – маса зразку в рідині;

σ – густина повітря;

d_t – густина допоміжної рідини, що відповідає температурі проведення вимірювань t .

Точність визначення густини залежить від точності визначення маси зразка в рідині.

Рентгенівський метод дозволяє одержати уявлення про густину елементарної чарунки кристалічної структури. Метод заснований на визначенні кристалічної густини матеріалу ρ за його атомною масою A , об'єму елементарної чарунки V та кількості атомів, що зосереджено в ній:

$$\rho = \frac{n \cdot A}{N \cdot V}, \quad (2.19)$$

де N – число Авогадро.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РУЙНАЦІЇ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ

3.1 Теоретична міцність сплавів

Відомо, що перша вимога до сплавів як конструкційних матеріалів – це міцність. Зрозуміло, що конструктори прагнуть одержати сплави з найбільшою міцністю. Тому властивості міцності ливарних сплавів з часом зростають. Так, міцність сталі за останні 100 років зросла в 12 разів, чавуну - в 15, алюмінієвих сплавів – в 9, мідних – в 6 разів. Чи є межа зростанню міцності сплавів? Щоб відповісти на це питання треба уявити особливості руйнації ливарних сплавів як кристалічних твердих тіл.

В твердих тілах розрізняють два головні види деформації: пружну і пластичну, що є різними за сутністю. Взагалі деформація – це зміна форми та розмірів тіла або його частини під дією зовнішніх сил, при зміні температури, вологості, фазових перетвореннях та інших впливах, що викликають зміну положення окремих частинок тіла.

Руйнація – це кінцева стадія процесу деформації, яка закінчується розділенням тіла на макроскопічні частини. Руйнація є наслідком розриву сил зв'язку між атомами або молекулами під дією зовнішніх або внутрішніх напружень. Принципова можливість розділення твердих тіл на окремі частини, що визначає основні явища руйнації, може бути реалізована під дією нормальних або тангенціальних напружень. Схеми руйнації наведені на рисунку 3.1.

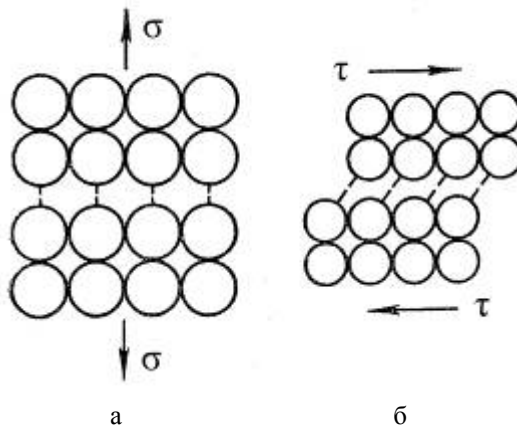


Рисунок 3.1 – Руйнація під дією нормальних (а) і тангенціальних (б) напружень

Вперше теоретичну міцність на зсув розрахував фізик – теоретик Я.І.Френкель. Він запропонував таке рівняння:

$$\sigma_{zc} = \frac{a \cdot G_{zc}}{b \cdot 2 \cdot \pi}, \quad (3.1)$$

де a – міжатомна відстань в напрямку зсуву;

b – міжплоскісна відстань;

G_{zc} – модуль зсуву.

Для щільних металевих ґраток $\frac{a}{b} = 1$ Таким чином, $\sigma_{zc} = \frac{G_{zc}}{2 \cdot \pi}$.

Теоретична міцність є межею підвищення міцності сплавів. Коли порівняти теоретичну та реально досягнуту міцність, виявляється дуже велика розбіжність. Максимально досягнута реальна міцність металів і сплавів на 2 – 3 порядки нижча за теоретичну (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Теоретична та реальна міцність деяких металів і сплавів

Метал (сплав)	Теоретична міцність, МПа	Максимально досягнута міцність, МПа
Залізо	30000	200
Мідь	13500	400
Алюміній	10000	50
Сталь	33000	2050
Дюралюміній	11700	470

Така розбіжність дуже здивувала вчених та інженерів. Означену формулу багато разів перевіряли, уточнювали, але принципово вона не змінилася. В сучасній інтерпретації формули для визначення теоретичної міцності виглядають таким чином:

$$\sigma_B = \frac{E}{10}, \quad (3.2)$$

$$\sigma_{zc} = \frac{G}{10}. \quad (3.3)$$

3.2 Дислокації як основний чинник розбіжності між теоретичною та реальною міцністю металів і сплавів

Розбіжність між теоретичною і реальною міцністю пояснюється тим, що реальні сплави складаються з окремих кристалів, що мають дефекти кристалічної ґратки. В найбільшій ступені знижують міцність дислокації – одномірні дефекти, якщо мають велику довжину тільки в одному напрямі. Дислокації виникають в ході процесів кристалізації, пластичної деформації, та після фазових перетворювань.

Визначаючим параметром геометрії дислокацій є вектор Бюргерса. За відсутності дислокацій він розімкнений (рис. 3.2).

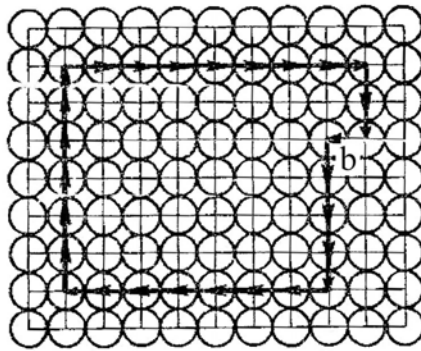
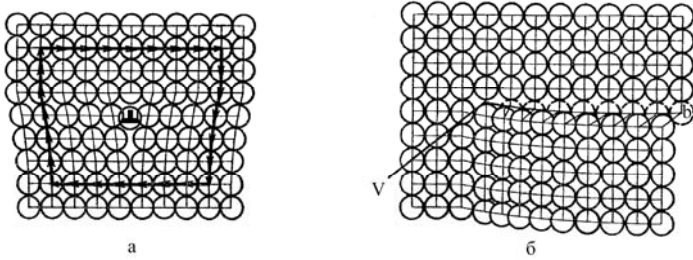


Рисунок 3.2 – Контур Бюргерса і вектор Бюргерса

За кутом між b та l (b – вектор Бюргера, l – лінія дислокації) розрізняють крайові дислокації (b перпендикулярно l), гвинтові дислокації (b паралельно l), та змішані дислокації (кут між b та l є більший за 0° та менший за 90°).

Крайова дислокація це лінія – край екстра площини, що вставлена в решітку або вилучена з неї (рис. 3.3,а). Крайові дислокації знаходяться всередині решітки і зникають при виході з неї, утворюючи уступ.

У випадку гвинтової дислокації (рис. 3.3,б) вектор Бюргера і лінія дислокації паралельні і площина решітки закручується по гвинту навколо лінії дислокації, утворюючи гелікоїдальну поверхню.



а – крайова дислокація, б – гвинтова дислокація.

Рисунок 3.3 – Дислокації в кубічній решітці

Дислокації можна спостерігати за допомогою електронного мікроскопу при дуже великих збільшеннях (рис.3.4).

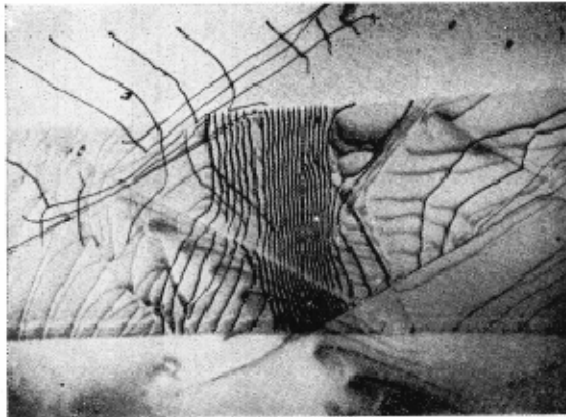


Рисунок 3.4 – Дислокації в корозійностійкій сталі

Дислокації можуть рухатись. Саме рухом дислокацій пояснюється розбіжність між теоретичною та реальною міцністю металів і сплавів. Існують такі види руху дислокацій: ковзання, поперечне ковзання, переповзання.

Ковзання дислокацій – це консервативна форма руху дислокацій за заданою системою ковзання. В результаті трансляції атомних шарів по площинам ковзання при пластичній деформації на поверхні металевго кристалу з'являються сходи́нки, що на шліфах мають вигляд так званих ліній або смуг ковзання.

Поперечне ковзання характерно для гвинтових дислокацій, що, у порівнянні з крайовими, можуть легко змінювати свою площину ковзання.

Переповзання – це неконсервативний рух дислокацій, коли крайова дислокація може покинути свою площину, залишаючи при цьому вакансію, або збільшуючи до краю екстра площини додаткове число атомів.

3.3 Руйнація як процес виникнення та розповсюдження тріщини

Руйнація визначається процесами виникнення та розповсюдження тріщин, що відбуваються послідовно на атомарному, мікроскопічному та макроскопічному рівні.

Виникнення тріщин починається з утворення зародкових тріщин, що з'являються в процесі механічного навантаження та визначаються взаємодією дислокацій і створених ними слідів ковзання.

Розповсюдження тріщини відбувається в дві стадії:

а) поступове зростання тріщини (докритичне збільшення до небезпечного розміру);

б) нестабільне розповсюдження тріщини, коли вона досягає критичного та позакритичного розміру, що приводить до руйнації виробу. Схема виникнення та розкриття тріщини наведено на рис. 3.5.

Перелічимо чинники, що впливають на виникнення та розповсюдження тріщин.

1 Вид навантаження у сукупності із внутрішніми напруженнями.

2 Температура. Відомо, що наднизькі, так звані криогенні, температури сприяють виникненню та розповсюдженню тріщин у сплавах з кубічною решіткою.

3 Форма зразків і деталей. Найбільш небезпечними з точки зору виникнення тріщин є деталі з так званими концентраторами напружень: гострі надрізи, різьба, раптовий перехід пересічень.

4 Навколишнє середовище. Агресивне навколишнє середовище сприяє виникненню та розповсюдженню тріщин. Питання, пов'язані із впливом навколишнього середовища на фізико-механічні властивості металів і сплавів вивчає спеціальна наука – фізико-хімічна механіка матеріалів. Доречи, ця наука вперше створена в Україні.

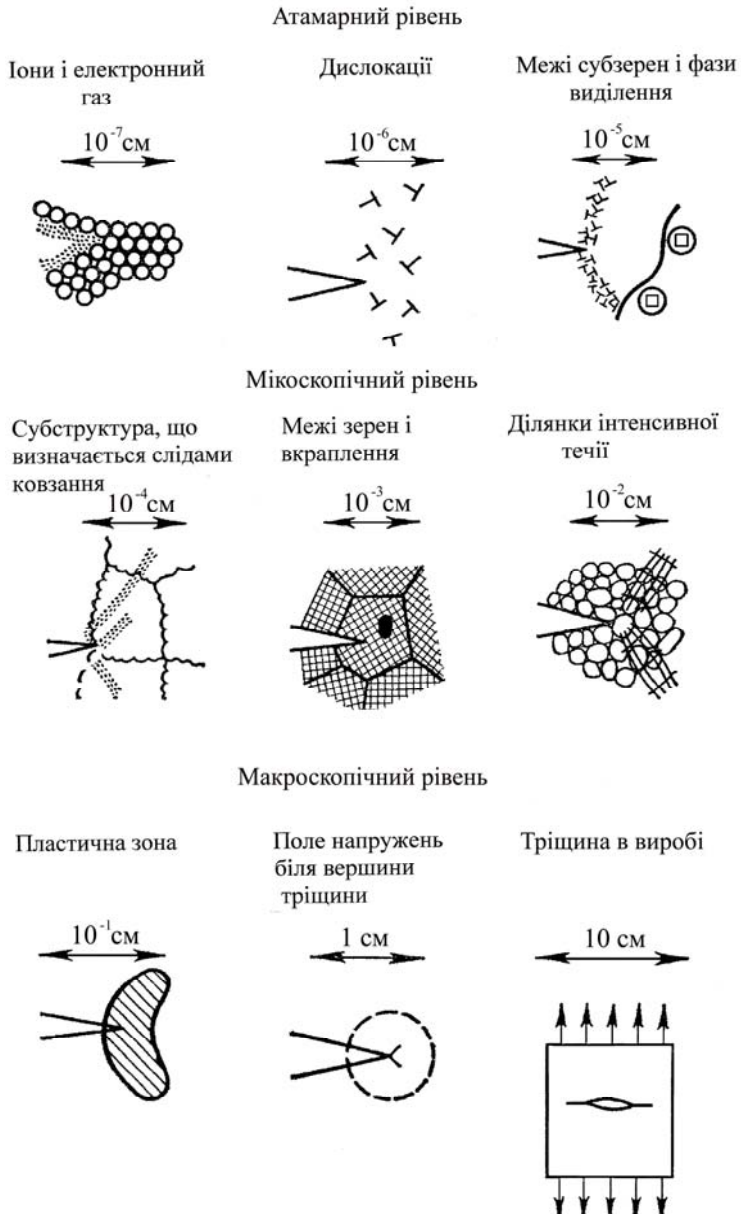


Рисунок 3.5 – Схема виникнення та розповсюдження тріщини

5 Властивості матеріала: хімічний склад, розмір зерна, фази виділення, домішки, тонка структура. Наприклад, вміст вуглецю суттєво впливає як на виникнення, так і на розповсюдження тріщин в залізо-вуглецевих сплавах. Відомо, що дрібнозернисті сплави менш чутливі до розповсюдження тріщин. Фази виділення, за певних умов, можуть ініціювати виникнення тріщин. Шкідливі домішки послаблюють межі зерен, що сприяє як зародженню, так і розповсюдженню тріщин.

На мікроскопічному рівні руйнація сплавів відбувається у два етапи.

1 Процес ковзання формує площину майбутнього зламу.

2 Відбувається процес відриву, який може реалізуватися або за поверхніми розділу, або за межами площин спайності. Поверхні розділу – це, за звичай, межі зерен. Площини спайності – це певні кристалографічні площини. Можлива також змішана руйнація, коли поверхня зламу проходить як крізь зерна, так і по межах між зернами.

На макроскопічному рівні розрізняють такі види руйнації:

- зріз;
- подвійний зріз;
- злам під дією нормальних напружень з утягуванням;
- руйнація під дією тільки нормальних напружень без пластичної деформації.

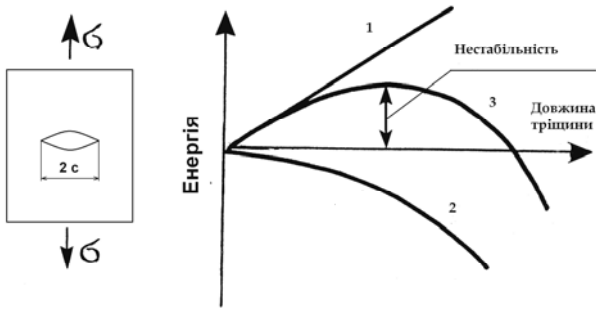
На практиці руйнацію металів і сплавів розділяють на крихку, в'язку та втомлену.

3.4 Крихка руйнація ливарних сплавів

Це руйнація без пластичної деформації, або з дуже невеликою пластичною деформацією. Крихка руйнація є найбільш небезпечною, бо в більшості випадків відбувається раптово при наявності напружень, що є нижчими за межу текучості сплаву. Крихка руйнація може відбуватись при напруженнях, що перевищують межу текучості, якщо в процесі навантаження відбувається деформаційне зміцнення. Початок руйнації відбувається на концентраторах напружень: рисках, надрізах або маленьких тріщинках, при цьому відбувається швидке розширення тріщинок.

Крихку руйнацію вивчає спеціальна наука – лінійна механіка руйнації. Теорія крихкої руйнації була розроблена англійським вченим Гріфітсом. Згідно з цією теорією розглядається пластина, на яку

діє напруження, та в якій вже є еліптична тріщина довжиною $2c$ з малою піввіссю, що прагне до нуля (рис. 3.6).



а – модель тріщини; б – діаграма енергетичного балансу для тріщини у безмежній пластині; 1 – поверхнева енергія; 2 – пружна енергія; 3 – повна енергія

Рисунок 3.6 – Напруження в пластині з еліптичною тріщиною

За умов виникнення тріщини зменшення пружної енергії складає $-\frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot c^2}{E}$, а збільшення поверхневої енергії $-4 \cdot c \cdot T$, де E – модуль пружності, T – поверхнева енергія, що припадає на одиницю довжини тріщини.

Зміна потенційної енергії складає:

$$dU = \frac{\sigma^2 \cdot \pi \cdot c^2}{E + 4 \cdot c \cdot T}. \quad (3.4)$$

За умов $\frac{dU}{dc} < 0$ відбувається самочинний (без підживлення додатковою енергією) розвиток тріщини. В цьому випадку рішення наведеного рівняння визначає наступну залежність між напруженням, σ , довжиною тріщини, $2c$, та поверхневою енергією, T :

$$\sigma = \left(\frac{2 \cdot E \cdot T}{\pi \cdot c} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.5)$$

Для абсолютно пружних тіл теорія Гріфітса підтверджується. Але опис крихкої руйнації пластичних матеріалів, в тому числі, багатьох металів та сплавів, за допомогою цієї теорії стикається із рядом перешкод. Для урахування пластичної деформації при утворенні зламу в рівняння Гріфітса слід ввести замість поверхневої енергії, T , ефективну поверхневу енергію, γ , що враховує енергію пластичної деформації. Таке уточнення приводить до рівняння Гріфітса – Орована, що є основою сучасних теорій крихкої руйнації:

$$\sigma = \left(\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot c} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.6)$$

Згідно теорії Котрела та Петча процес зародження тріщини пов'язаний із дією тангенціальних напружень, що викликають рух дислокацій, тобто пластичну деформацію. Етап розвитку тріщини відбувається під дією розтягуючих напружень. Крихка руйнація відбувається, коли напруження при вершині тріщини досягає значень, необхідних для розкриття тріщини, подібної Гріфітсової.

У випадку, коли напруження є нижчими за вказаний рівень, тріщина розвивається за рахунок приєднання до неї нових ділянок, що виникають внаслідок пластичної деформації.

Таким чином, руйнація буде в'язкою, якщо напруження, що є необхідними для зростання тріщини, будуть перевищувати межу пружності. В цьому випадку можуть утворюватися дрібні тріщини, але зростати вони не будуть. В крихкому матеріалі межа пружності перевищує напруження зростання тріщини.

3.5 В'язкість руйнації та її визначення

Схильність сплаву до крихкої руйнації досить коректно визначається за допомогою коефіцієнта інтенсивності напружень, K .

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\alpha \cdot \pi \cdot a}, \quad (3.7)$$

де σ – номінальне напруження в тілі без тріщини;

α – параметр, що залежить від форми тіла і геометрії тріщини;

a – довжина тріщини.

Розрізняють три основні види навантажень тіла з тріщинами: відрив, поздовжній зсув і поперечний зсув, що відповідно зуться першим, другим та третім типом (рис.3.7). Перший, відривний тип є найбільш небезпечним, тому усі інженерні методи оцінки в'язкості руйнації відносяться саме до нього.

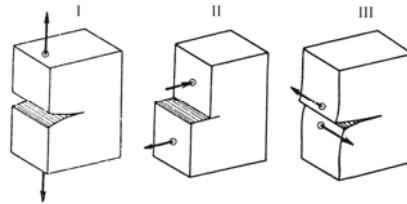


Рисунок 3.7 – Три основні види навантажень тіл з тріщинами

При створенні теорії тріщиностійкості матеріалів Ірвін виходив з того, що при досягненні нестабільного зростання тріщини коефіцієнт інтенсивності напружень досягає свого критичного значення K_C . K_C залежить від товщини виробів, та з її збільшенням зменшується до певного мінімального значення K_{IC} (рис.3.8).

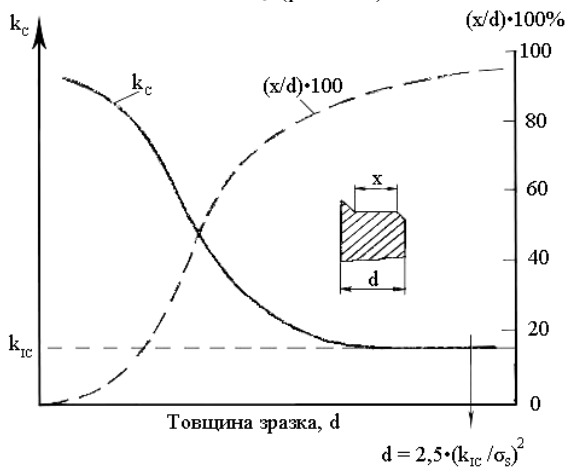
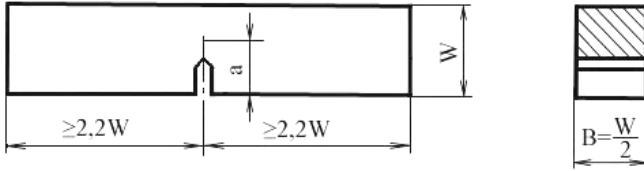
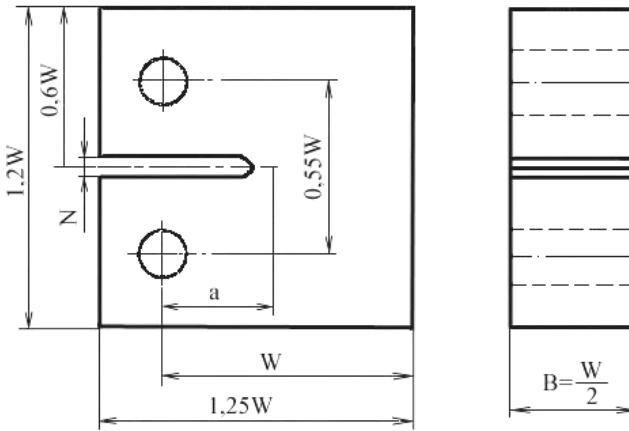


Рисунок 3.8 – Зміна K_{IC} і долі крихкого зламу в залежності від товщини зразка з тріщиною

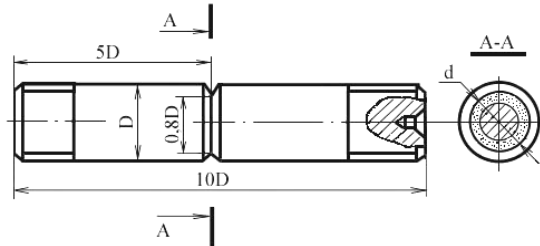
В'язкість руйнації визначають при позацинтровому розтягненні або згині на зразках спеціальної форми (рис.3.9). Для зразків характерним є гострий надріз, що закінчується втомленою тріщиною.



а



б



в

а – для випробувань на згин; б – для випробувань на позацинтрове розтягнення;
в – для випробувань на розтягнення.

Рисунок 3.9 – Типи зразків для визначення K_{IC}

Механіка руйнації виходить з того, що в сплаві вже є тріщина, існування якої повинно бути враховано або шляхом визначення припустимих напружень. Або шляхом встановлення максимально припустимого розміру тріщини при заданих робочих напруженнях. В багатьох випадках тріщина є особливо небезпечною коли її площа спрямована до зовнішньої поверхні виробу. Для такої тріщини Ірвін запропонував наступне рівняння:

$$K_{IC} = \frac{1,21 \cdot \pi \cdot a_c \cdot \sigma^2}{\Phi^2 - 0,212 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2}, \quad (3.8)$$

де σ – напруження, що діє перпендикулярно до поверхні тріщини;

Φ – повний еліптичний інтеграл другого роду, що залежить від співвідношення a/c ;

σ_T – межа текучості матеріалу, що відповідає $\sigma_{0,2}$.

При розрахунках в'язкості руйнації сплавів з еліптичною тріщиною в цьому рівнянні коефіцієнт 1,21 замінюється на 1. Величина знаменника, що віддзеркалює залежність параметра тріщини Q від співвідношення $a/2c$, може бути визначена за графіком, наведеним на рисунку 3.10.

На рисунку 3.11 схематично наведено залежність максимально припустимої величини a/Q від напруження. При певному співвідношенні $a/2c$ і урахуванні величини a/Q можна розрахувати максимально припустиму глибину тріщини a_i для певного робочого напруження у зразку і так званий резерв глибини тріщини $a_c - a_i$ у порівнянні з критичною глибиною a_c .

Крихкій руйнації сприяють такі фактори:

– конструктивна форма виробів (різьба, насічки, риски, раптова зміна перерізу деталі);

– технологічні фактори (поверхневі дефекти, або тріщини як наслідки неправильного зварювання, гартування, шліфування, виникнення складного та небезпечного поля внутрішніх напружень). Тому особливу увагу треба приділяти деталям та виробам, що виготовляються з литих заготовок методом зварювання;

– умови навантаження. Крихкій руйнації сприяють ударні навантаження;

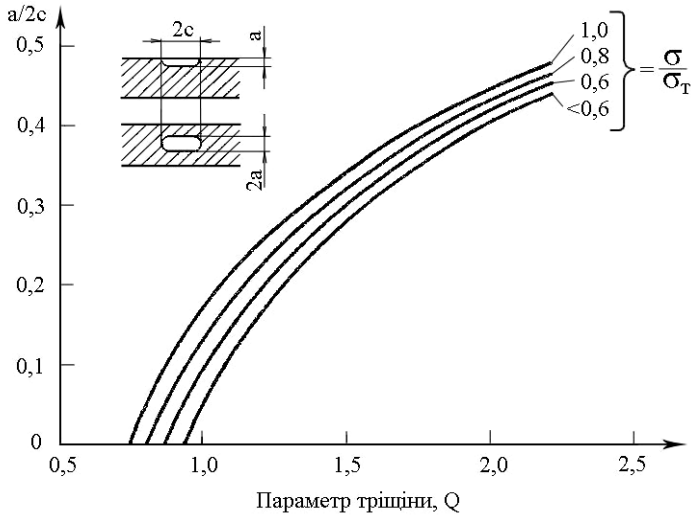
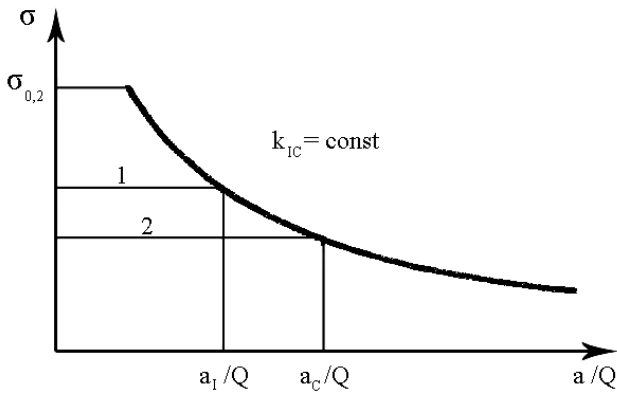


Рисунок 3.10 – Значення параметра тріщини Q для полуеліптичної зовнішньої і еліптичної внутрішньої тріщини від $a/2c$



1 – напруження при випробуванні; 2 – робоче напруження.

Рисунок 3.11 – Визначення напруження в зразку за максимально можливою глибиною тріщини

– зовнішні умови (наявність корозійного середовища, рідкого металу, воднева крихкість);

– особливості структури сплавів. Несприятливою щодо крихкої руйнації є об'ємноцентрована кубічна решітка, крупнозерниста структура, фази, що виділяються на межах зерен (особливі плівки), шкідливі домішки та неметалеві вкраплення, старіння сплавів, деякі види термічної обробки;

– температура. Зниження температури сприяє крихкій руйнації.

На рисунку 3.12 наведена температурна залежність K_{IC} для сталі. Зі зниженням температури збільшується межа текучості та зменшується K_{IC} . Подібна залежність існує також для деяких інших сплавів, наприклад, для сплавів на основі титану (рис.3.13).

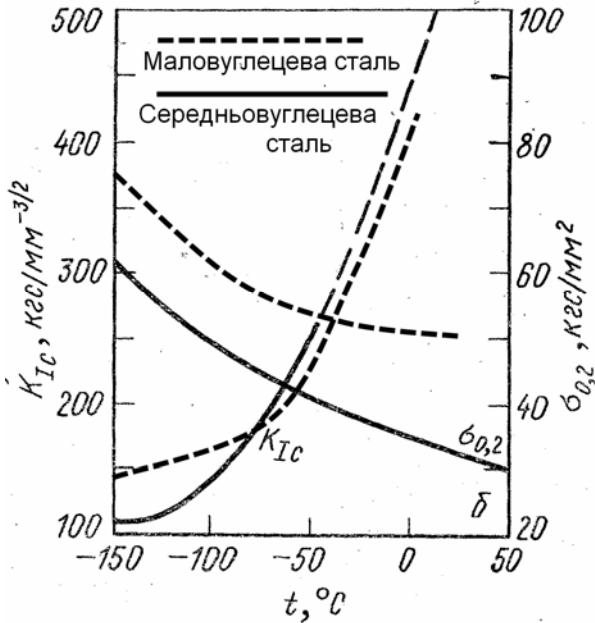


Рисунок 3.12 – Температурна залежність межі текучості і в'язкості руйнації для сталі

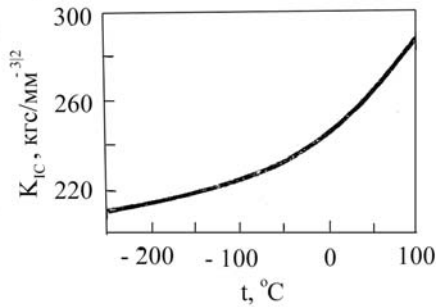


Рисунок 3.13 – Температурна залежність в'язкості руйнації для сплаву на основі титану

3.6 В'язка руйнація

В'язка руйнація супроводжується великою пластичною деформацією. Розвиток в'язкої руйнації відбувається з відносно малою швидкістю при напруженнях, що перевищують межу текучості. Тому в деяких випадках в'язку руйнацію можна помітити та попередити.

В'язка руйнація здійснюється двома шляхами:

- утворення шийки, в якій виникають пори (рис.3.14,а). Далі ці пори зростають об'єднуються в тріщину, що розповсюджується перпендикулярно діючим нормальним напруженням, тобто вісі зразка. В заключній стадії здійснюється вихід тріщини на поверхню під кутом до вісі розтягнення близьким до 45 градусів. Виникнення пор – це найбільш повільна стадія процесу в'язкої руйнації. Пори, зазвичай, утворюються навколо неметалевих включень та фаз виділення. Ділянки інтенсивної течії сплаву розташовані під кутом 45 градусів до вісі розтягнення, тому в цих ділянках утворюється більшість пор і проходить траєкторія тріщини, що перебуває у розвитку;

- повільне зростання ступінчастої тріщини при утворенні дислокацій та ямок поперед вершини тріщини (рис.3.14,б).

При повільному зростанні ступінчастої тріщини від скупчування дислокацій у межі розділу «частка-матриця» та неповний переріз частки, або скупчення дислокацій у межі розділу та руйнації частинки виникають пори спереду фронту розповсюдження тріщини.

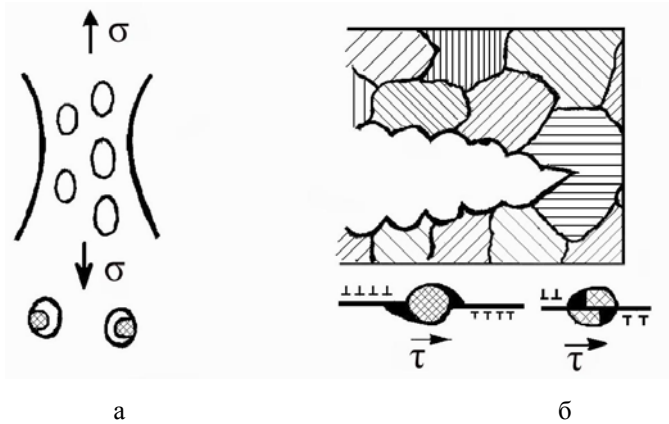


Рисунок 3.14 – Схеми в'язкої руйнації

3.7 Втомлена руйнація

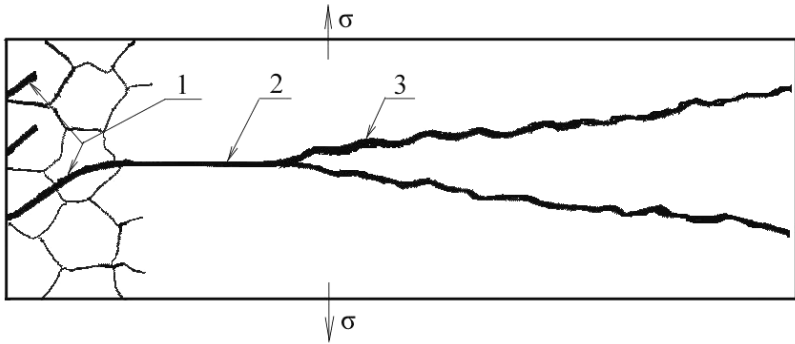
Втомлена руйнація виникає в процесі циклічного навантаження, що часто повторюється. Результат такого навантаження – не відновлюваний процес накопичення дефектів – джерел майбутньої руйнації.

У випадку, коли в сплаві є тріщина, розміри якої менші за критичні, при певних статичних навантаженнях руйнації не відбудеться. Але при циклічних навантаженнях тріщина може досягти критичного значення, інтенсивність напруження може сягнути величини K_{IC} , що призведе до наступної загальної руйнації.

Під дією напружень, що циклічно змінюються, навколо центрів руйнації (неметалевих вкраплень, окремих структурних складових) відбувається процес поступового накопичення пошкоджень. Це призводить до спотворення кристалічної ґратки в окремих об'ємах. При цьому створюються локальні шпичасті напруження, що викликають розрив міжатомних зв'язків та утворення втомлених тріщин.

Процес зростання втомленої тріщини можна розділити на три періоди (рис.3.15). В перший період тріщина виникає в зоні дії тангенціальних напружень, при цьому швидкість зростання тріщини повільна. Другий період – це зростання тріщини нормально до діючих напружень. Це період стабільного зростання тріщини, швидкість розповсюдження якої пропорційна інтенсивності напружень. Третій, заклю-

чний період – катастрофічний розвиток тріщини, який закінчується руйнацією.



1 - початкова стадія; 2 - стабільне зростання тріщини; 3 - катастрофічний розвиток тріщини

Рисунок 3.15 – Схема зростання втомленої тріщини

Напружений стан при вершині тріщини повністю залежить від коефіцієнту інтенсивності напружень. Тому можна припустити, що швидкість розповсюдження тріщини також визначається коефіцієнтом інтенсивності напружень. На рисунку 3.16 наведено залежність довжини тріщини від кількості циклів до руйнації (максимальна амплітуда напруження - σ_0 , мінімальна - $\sigma_U = 0$).

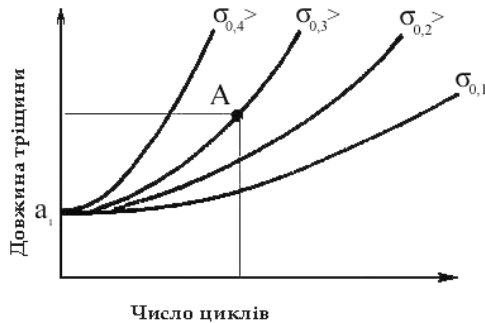


Рисунок 3.16 – Залежність зміни довжини тріщини від кількості циклів

За цими графіками для різних точок можна визначити відношення довжини тріщини до кількості циклів до руйнації (за нахилом кривої у точці А). Для напружень $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_U$ можна визначити циклічний коефіцієнт інтенсивності напруження:

$$\Delta K = \Delta\sigma \cdot \sqrt{a \cdot M}. \quad (3.9)$$

Ця залежність в логарифмічних координатах наведена на рисунку 3.17.

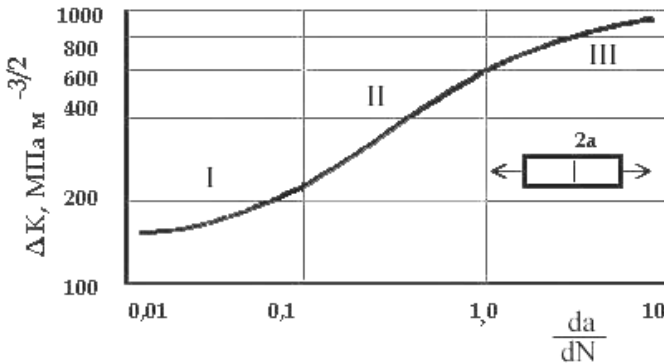


Рисунок 3.17 – Залежність між циклічним коефіцієнтом інтенсивності напружень і розповсюдженням тріщин для алюмінієвого сплаву

Відхилення від лінійного вигляду на початковій стадії I пов'язане з утворенням та вирівнюванням фронту тріщини. Для другого періоду характерною є лінійна залежність, що описується таким рівнянням:

$$\frac{d \cdot a}{d \cdot N} = C_0 \cdot (\Delta K)^n, \quad (3.10)$$

де C_0 і n – константи матеріалу що визначаються експериментально;
 a – товщина тріщини.

Величини C_0 та n визначаються експериментально. Як константи матеріалу вони залежать від форми зразка.

Якщо в це рівняння підставити значення ΔK з попереднього рівняння та проінтегрувати його від початку дослід (а = a_i) до руйнації

зразка ($a = a_c$), можна одержати рівняння Вільсона, що дозволяють розрахувати кількість циклів до досягнення критичної величини тріщини:

$$N = \frac{1}{C_0 \cdot (\Delta\sigma)^2 \cdot M} \cdot \ln\left(\frac{a_c}{a_i}\right) \quad (3.11)$$

при $n=2$

$$N = \frac{2}{(n-2) \cdot C_0 \cdot (\Delta\sigma)^n \cdot M^{\frac{n}{2}}} \cdot \left\{ \frac{1}{a_i^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{a_c^{\frac{n-2}{2}}} \right\}, \quad (3.12)$$

при $n \neq 2$.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ РУЙНАЦІЇ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ

При руйнації зразків або реальних деталей з ливарних сплавів виникають поверхні руйнації, що містять багато інформації про причину руйнації. Наука, що вивчає поверхні руйнації, зветься фрактографією.

Термін "фрактографія" виник у 1944 р., але металурги займаються дослідженням зламів вже на протязі багатьох сторіч. Значення фрактографії для металознавства і теорії ливарних сплавів визначається тим, що це ефективний засіб аналізу причин експлуатаційних пошкоджень та джерело важливої інформації відносно мікромеханізму руйнації та внутрішніх особливостей структури твердих тіл.

Контрольована руйнація – одно з найбільш ранніх досягнень людини. При виготовленні кам'яної зброї та інструментів стародавні майстри повинні були знати, як обрати типи кам'яних порід, що є найбільш придатними для контрольованої руйнації. Ці знання дозволяли виготовляти досить гострий інструмент з добрими ріжучими властивостями. Фрактографія розділяється на макрофрактографію та мікрофрактографію.

4.1 Макрофрактографія

Макрофрактографія передбачає дослідження зламів при збільшеннях до 50 разів, мікрофрактографія охоплює діапазон збільшень більших ніж 50 разів до деякої межі, що залежить від типу мікроскопу, що використовується при цьому.

При макрофрактографічних дослідженнях поверхню зламу спочатку оглядають неозброєним оком. З оптичних приладів найчастіше при макрофрактографії використовується лупа, або збільшувальне скло. На рисунку 4.1 наведено принцип одержання зображення об'єкту за допомогою лупи.

Збільшення лупи визначається за формулою:

$$Z = 250 / F, \quad (4.1)$$

де 250 – відстань найкращого зору, мм;

F - фокусна відстань лупи, мм.

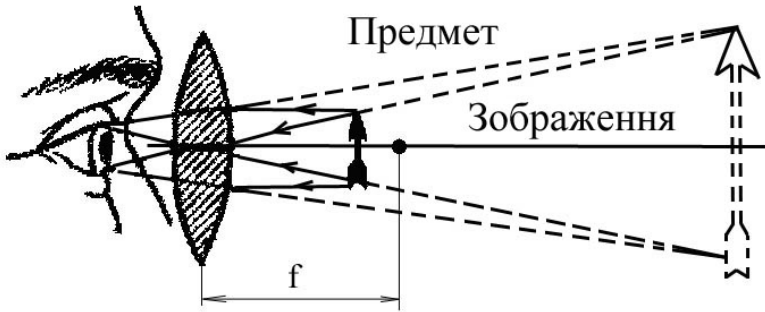


Рисунок 4.1 – Одержання збільшеного зображення за допомогою лупи

Для макрофрактографії використовуються лупи зі збільшенням від 2 до 20 разів. Більш досконалим приладом для макрофрактографії є мікроскоп малого збільшення. Найбільш розповсюджені стереоскопічні бінокулярні мікроскопи МБС-1, МБС- 9, МБС-10. Зовнішній вигляд мікроскопа МБС-10 наведено на рисунку 4.2.



Рисунок 4.2 – Стереоскопічний бінокулярний мікроскоп МБС-10

Класифікація макроскопічних особливостей металевих макрозломів була розроблена ще Реомюром в 1722 році, потім удосконалена Брінелем. В 1919 році вона була подальше вдосконалена Тіманом, який виділив шість основних видів макрозламів:

а) зернуватий, або міжзеренний злам. Його також звуть крупнозернистим, блискучим кристалічним, блискучим зернистим кристалічним. В особливо несприятливих формах він зветься яскравим, блискучим, засліплюючим, що відповідає випадкам, коли в метал потрапили сторонні частки (палива, шлаку та ін.);

б) кристалічний, транскристалічний або внутризеренний злам. Іноді такий злам звуть дрібнозернистим, гладким, рівним, матовим, зернисто-сірим або аморфним (фарфороподібним);

в) шовковистий злам. Нитковидний малюнок на поверхні зруйнованих частинок кристалу;

г) зубчастий або гачкуватий злам. Відноситься до зламу неправильної форми з гострими зазублинами. В окремих випадках такий злам звуть голчастим;

д) волокнистий злам. Інші варіанти мають назву шиферний, скалкуватий, деревовидний або шаруватий;

е) стовбчастий злам. Особливо грубий злам, який іноді спостерігається у периферійних ділянках виливків.

Макрофрактографію часто використовують для оцінювання в'язкості металу. Відповідно до механіки руйнації в'язкість – це механічна властивість, що тісно пов'язана з опором руйнації. На поверхні зламу є остатні ознаки, що визначають на протязі руйнації частку високоенергетичного (в'язкого) та низькоенергетичного (крихкого) розповсюдження тріщини.

Для поверхні зламів зразків після випробувань на розтягнення характерні три зони (рис.4.3): 1 – волокниста зона; 2 – радіальна зона; 3 – зона зрізу.

Злами, що мають тільки одну зону, утворюються за умов дуже великої в'язкості або крихкості матеріалу. На більшості зламів розрізняються дві або усі три зони.

Волокниста зона відповідає ділянці повільного зростання тріщини. Вона розташована в центрі зламу та оточує центр руйнації, що міститься на вісі розтягнення або поруч із нею.

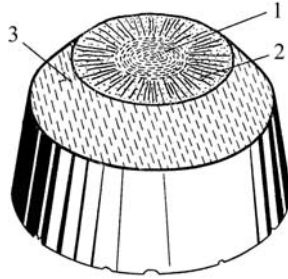


Рисунок 4.3 – Схема зламу, який утворився після розтягнення гладкого циліндричного зразка

Радіальна зона утворюється при переході тріщини від повільного зростання до швидкого або нестабільного її розповсюдження. При цьому утворюються радіальні рубці, що збігаються із загальним напрямом розповсюдження тріщини. За відсутності волокнистої зони точка, в якій збігаються рубці, є центром руйнації (рис.4.4).



Рисунок 4.4 – Визначення центру руйнації за видом зламу. Радіальні рубці нижче центру руйнації і шевронний візерунок ліворуч і праворуч визначають напрям розповсюдження тріщини

Точне визначення центру руйнації пов'язане з дослідженням рельєфу поверхні зламу. При цьому враховують матеріал деталі, термічну обробку та вид навантаження.

За одним виключенням – повністю косий злам при перерізі, в усіх різновидах швидких або катастрофічних руйнацій на поверхні

зламів утворюються рубці, що вказують на напрям зростання тріщини. Радіальні рубці є перпендикулярними до фронту тріщини. Вершини V – подібних шевронних візерунків спрямовані в сторону, що є протилежною напрямку розповсюдження тріщини. На рисунку 4.5 наведено приклад визначення центру руйнації в зламі надрізаного прутка з інструментальної сталі, що було зруйновано двома ударами.

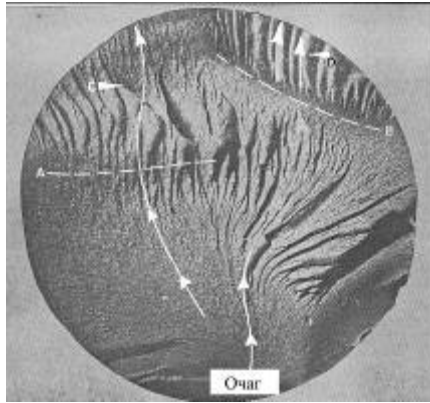


Рисунок 4.5 – Визначення центру руйнації

Центр руйнації може бути визначений трьома шляхами:

- подовженням радіальних рубців до їх пересічення у нижній частині зламу;
- побудовою нормалей до фронту зупинки тріщини;
- проведенням дотичних до кінцевих радіальних рубців.

На рисунку 47 тріщина зупинилась на лініях А і В після першого удару, та відновила рух після другого удару.

Втомлені злами, на яких утворюються лінії втомленості, мають різноманітний рельєф, що залежить від того є втомленість малоцикловою або багатоцикловою.

В поверхневозміцнених деталях втомлені тріщини можуть починатися поблизу межі розділу «поверхневий зміцнений шар – середина» в результаті концентрації напружень в місцях великих перепадів міцності.

У випадку, коли руйнація відбувається під дією менш, ніж 4000 циклів, зона втомленої тріщини може бути дуже малою та розрізняється тільки при 50-ти кратному збільшенні. Зона втомленої тріщини зазвичай має радіальні рубці, що збігаються в центрі руйнації (рис.4.6).

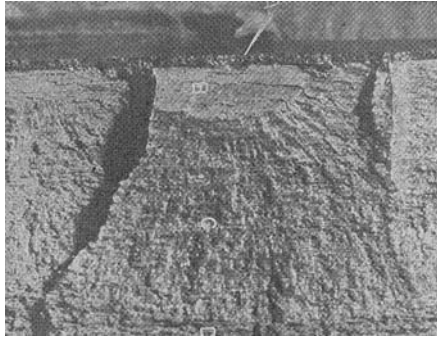


Рисунок 4.6 – Втомлений злам деталі з алюмінієвого сплаву.

На рисунку 4.7 схематично наведено місця виникнення втомлених тріщин, що дозволяють визначити розташування центрів руйнації.

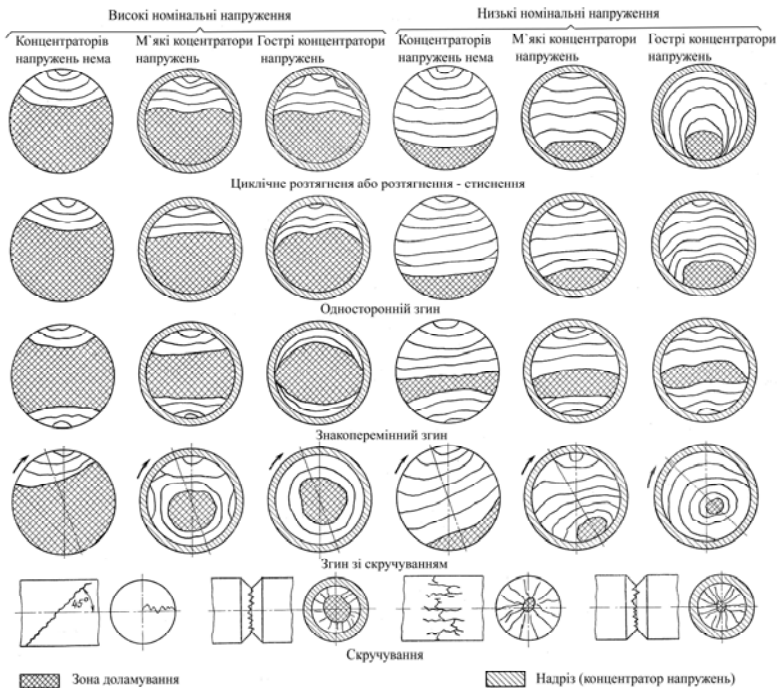


Рисунок 4.7 – Класифікація втомлених зламів, що утворюються у гладких та надрізаних деталях круглого пересічення

4.2 Мікрофрактографія

Мікрофрактографічні дослідження зламів здійснюються за допомогою мікроскопів – світлового або електронного. На рис. 4.8 наведено схему дії світлового мікроскопа. Загальне збільшення мікроскопа визначається комбінацією двох оптичних систем: об'єктива та окуляра, що складаються з кількох коаксіально розташованих скляних лінз.

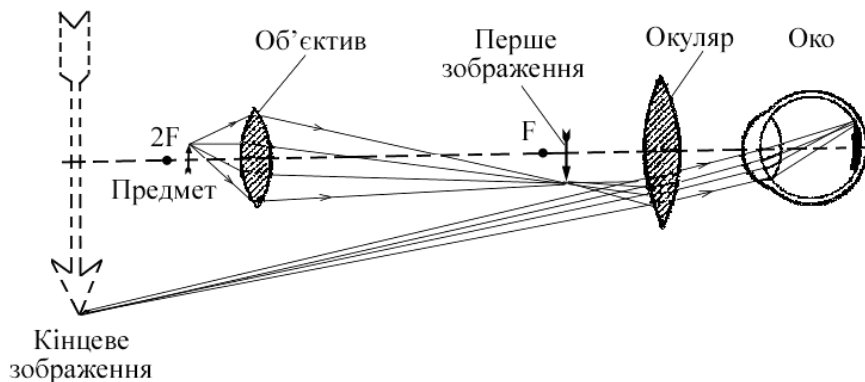


Рисунок 4.8 – Принцип дії світлового мікроскопа

Найважливіша характеристика будь-якого мікроскопу – це виокремлювальна здатність, тобто мінімальна лінійна відстань між двома крапками - об'єктами, що можна розрізнити. Вона визначається за формулою:

$$d = \frac{0,61 \cdot \lambda}{A}, \quad (4.2)$$

$$A = n \cdot \sin \alpha, \quad (4.3)$$

де, λ – довжина хвилі світла;

A – чисельна апертура;

n – показник переломлення.

Ця формула накладає межу на можливе збільшення мікроскопа. Для світлового мікроскопа це 1500 разів. Кінцеве збільшення мікроскопа визначається, як добуток власних збільшень об'єктива та окуляра. Для конкретного об'єктива мінімальне збільшення дорівнює $500A$, максимальне – $1000A$ (A – чисельна апертура).

Найбільш придатними для дослідження на світловому мікроскопі є крихкі злами. На рисунку 4.9 наведено злам зразку армко-заліза, зруйнованого при температурі - 196°C.

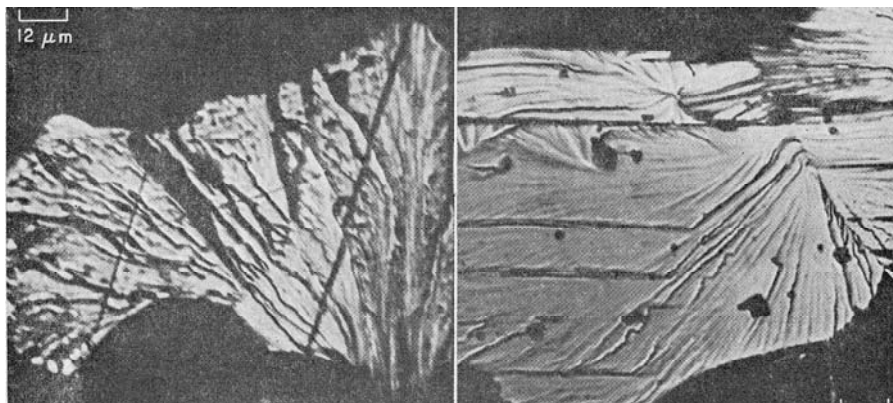


Рисунок 4.9 – Злами зразка армко-заліза, зруйнованого при температурі 196 °C

Основний недолік світлового мікроскопу при дослідженні зламів – це дуже мала глибина різкості. При збільшенні порядку 500 глибина різкості світлового мікроскопа дорівнює 0,25 мкм. Рельєф зламів, особливо в'язких, сягає 1000 мкм і більше, тому такі злами неможливо вивчати за допомогою світлового мікроскопу навіть фрагментарно.

Найбільш придатними для мікро фрактографії є електронні мікроскопи, глибина різкості яких сягає 250 мкм, що дозволяє досліджувати на цих приладах рельєфні поверхні руйнації. Для мікрофрактографії найчастіше використовують мікроскопи двох типів: ті, що просвічують (трансмісійні), та растрові.

Принцип дії просвічуючого електронного мікроскопу наведено на рисунку 4.10. Джерело випромінювання – електронна гармата випромінює потік електронів, що прискорюються на шляху до аноду за рахунок різниці потенціалів між катодом та анодом. Електронний пучок фокусується за допомогою конденсорних електромагнітних лінз на об'єкті. Об'єктивна електромагнітна лінза формує первинне збільшене зображення, що додатково збільшується системою з проміжною та проекційною електромагнітною лінзи. Кінцеве збільшене зображення об'єкту формується на екрані.

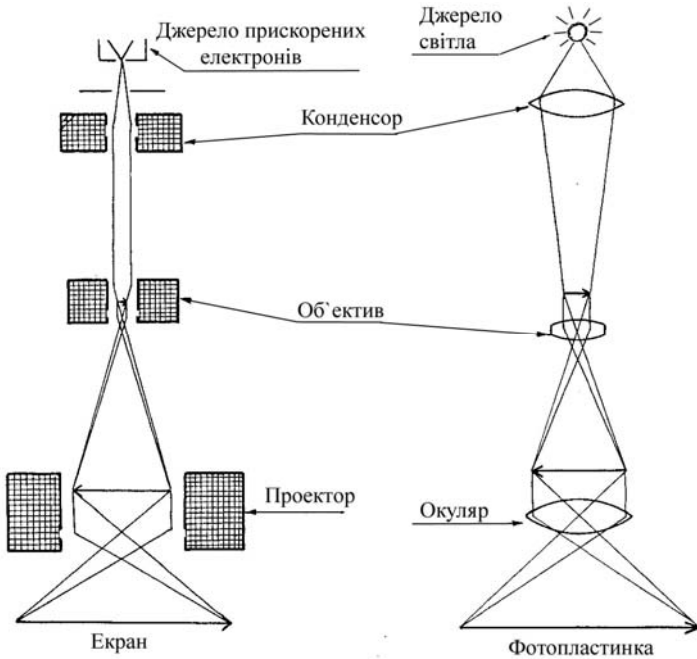


Рисунок 4.10 – Принцип дії електронного мікроскопа, що просвічує

Як відомо, збільшення мікроскопу залежить від довжини хвилі електромагнітного випромінювання, що використовується. Довжину хвилі електронного випромінювання можна визначити за допомогою наступного рівняння:

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{U}} \cdot 10^{-10}, \text{ м} \quad (4.4)$$

де, λ – довжина хвилі електронів;

U – напруга, що прискорює.

Згідно цьому рівнянню пучок електронів, прискорений різницею потенціалів 60 кВ, має довжину хвилі 0,05 А, отже теоретичне збільшення електронного мікроскопу має бути у 100000 разів більшим, ніж у світлового та досягати 100000000 разів. Практично дефекти електромагнітних лінз суттєво зменшують це значення, але збільшення сучасних електронних мікроскопів досить велике та досягає 500000 раз

зів у серійних приладах і 1000000 разів в унікальних прецизійних електронних мікроскопах.

Сучасний електронний мікроскоп – дуже складний агрегат. Оптична система розміщена в герметичній металевій колонні, де підтримується глибокий вакуум (остаточний тиск $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.). Для цього мікроскоп має систему відкачування з трьох насосів: механічного, бустерного та високовакуумного. Стабілізовані електронні блоки живлення підтримують високостабільну напругу, що прискорює, та струми в електромагнітних лінзах. Зовнішній вигляд електронного мікроскопу наведено на рисунку 4.11.

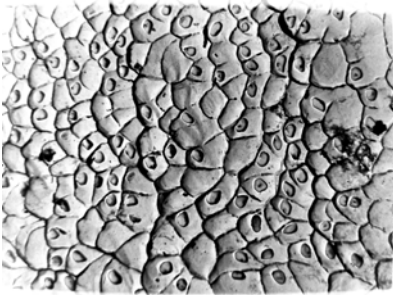


Рисунок 4.11 – Електронний мікроскоп, що просвічує

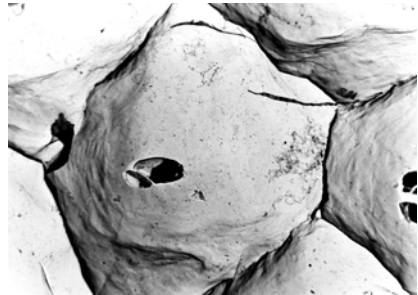
Об'єкт для дослідження на електронному мікроскопі, що про-свічує, повинен бути прозорим для потоку електронів. Масивні злами для цього непридатні, тому з поверхні зламів виготовляють спеціальні препарати – репліки. Репліки можна одержати з деяких полімерів (так звані лакові репліки) або методом термічного наплення в вакуумі титану, вуглецю, окису кремнію.

Наплені репліки фіксують дрібні частинки реальних фаз з по-верхні зламів. Фазовий склад цих частинок може бути визначений в сучасному електронному мікроскопі методом мікродифракції.

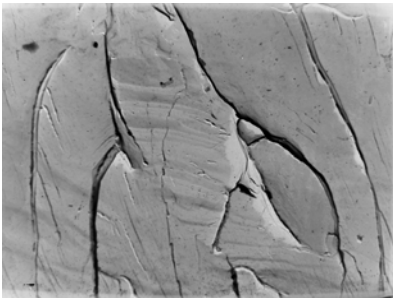
Основні види мікрозламів можна розділити на в'язкий, крихкий міжзеренний, крихкий внутризеренний, та втомлений (рис.4.12).



а



б



в

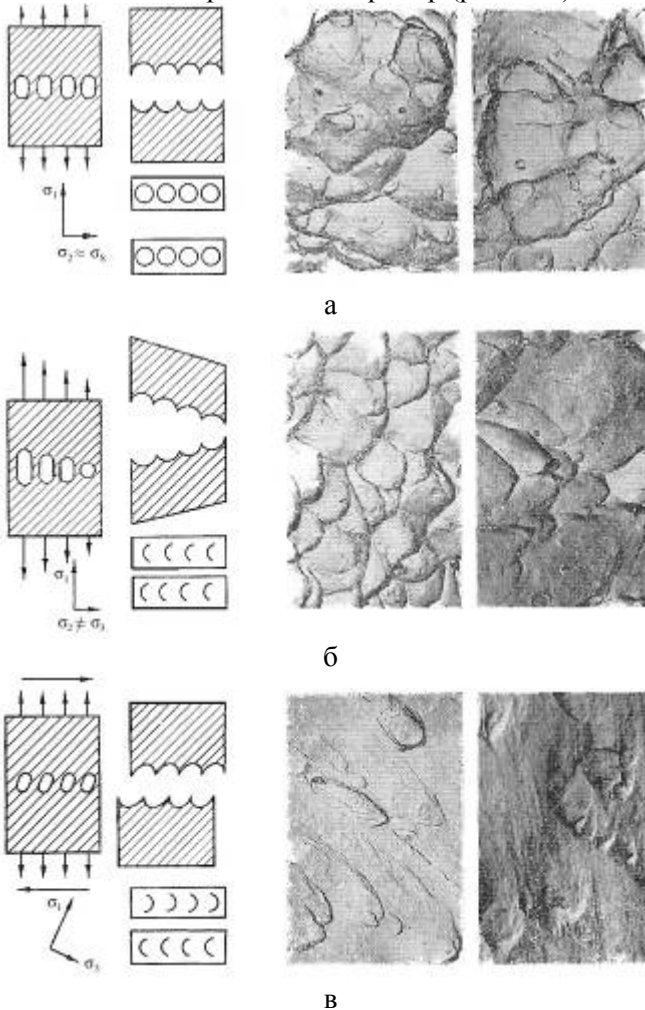


г

а – в'язкий; б – крихкий міжзеренний; в – крихкий внутризеренний;
г – втомлений.

Рисунок 4.12 – Основні види мікрозламів

В'язка руйнація здійснюється за рахунок злиття мікропор. При цьому на поверхні зламу утворюється специфічний рельєф – так звані, ямки. На форму ямок впливають відносні напрямки напружень, що визначають особливості зростання мікропор (рис.4.13).



а - рівновісні ямки (розтягнення); б - подовжені ямки (відрив, що розклинює);
в – витягнуті ямки (зсув)

Рисунок 4.13 Вплив напрямку максимального напруження на форму ямок в'язкого зламу

Основний недолік електронного мікроскопа, просвічує – це необхідність використання для дослідження зламів спеціальних препаратів – реплік. Растровий електронний мікроскоп дозволяє досліджувати масивні металеві зразки, тобто безпосередньо поверхні зламів.

Принцип дії растрового електронного мікроскопа наведено на рисунку 4.14, а його зовнішній вигляд – на рисунку 4.15.

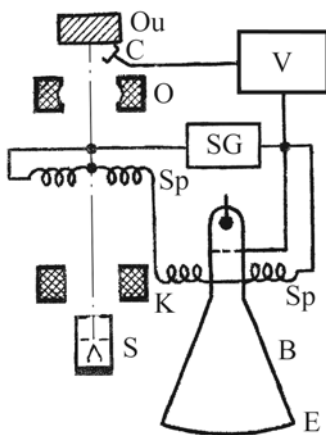


Рисунок 4.14 – Принцип дії растрового електронного мікроскопа



Рисунок 4.15 – Зовнішній вигляд растрового електронного мікроскопа

За допомогою електронної гармати S та електромагнітних лінз K та O створюється тонкий (діаметром до 5 – 10 нм) електронний зонд, що під дією відхиляючої системи Sp розгортається у вигляді растру на поверхні зразка Оц.

Відбиті від поверхні зразка вторинні електрони уловлюються детектором С, підсилюються підсилювачем V, та потім модулюють за яскравістю електронний промінь монітору В, на екрані якого Е створюється збільшене зображення зламу. Генератор SG забезпечує синхронне відхилення електронного зонда та електронного променя монітора.

На рис. 4.16 наведено мікрофрактограми основних видів зламів, що одержані за допомогою растрового електронного мікроскопу.

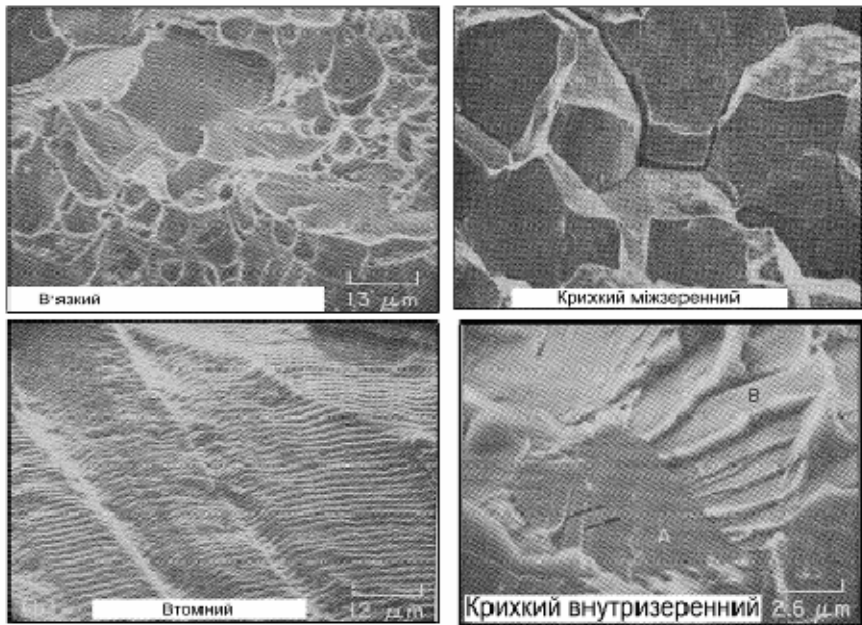


Рисунок 4.16 – Мікрофрактограми зламів (растровий електронний мікроскоп)

Растровий електронний мікроскоп дозволяє проводити дослідження зламів в широкому діапазоні збільшень – від п'ятикратного до кількох десятків тисяч. Це дозволяє досить швидко визначити безпосередню причину руйнації. На рис. 4.17 наведено приклад визначення центру руйнації за допомогою серії фрактограм зі зростаючим збільшенням.

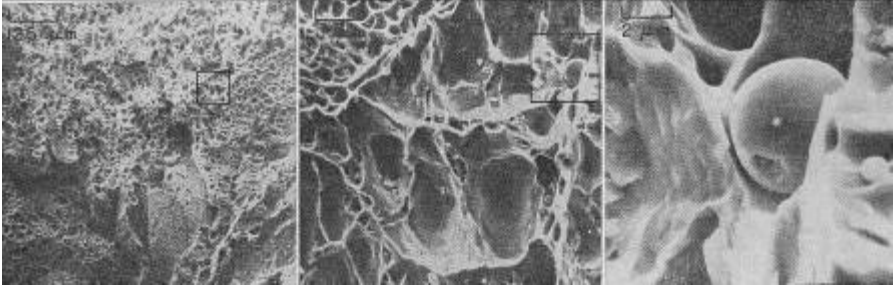


Рисунок 4.17 – Виявлення центру руйнації за допомогою серії мікрофрактограм

Як підсумок, треба сказати, що не слід розглядати світловий, електронний просвічуючий та електронний растровий мікроскопи як конкуруючі прилади. Вони доповнюють один одного і найбільш доцільним є їх комплексне використання у дослідженні зламів ливарних сплавів.

5 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ

5.1 Два основні методи підвищення міцності ливарних сплавів

Основна задача, що вирішується при створенні нових або удосконаленні існуючих ливарних сплавів – це підвищення міцності.

Відомо, що міцність металів і сплавів знижується на 2–3 порядки у порівнянні з теоретичною за рахунок наявності дефектів кристалічної решітки, і в першу чергу дислокацій. Тому, якщо отримати досконалі бездефектні металеві кристали, їх міцність сягне теоретичного значення.

На жаль, зараз ще не створені технологічні процеси одержання великих бездефектних монокристалів, з яких безпосередньо можна було б виробляти деталі для машинобудування.

Практично бездефектні кристали, що мають лише одну гвинтову дислокацію, у вигляді так званих «вусів» одержують при осадженні певних елементів із газової фази. Ці кристали мають довжину від 1 до 10 мм, їх діаметр не перевищує 10 мкм. Вони використовуються при створенні, так званих, композитних матеріалів. Використання бездефектних кристалів – це перший напрямок підвищення міцності ливарних сплавів. Взагалі композитний матеріал складається з високоміцного армуючого каркасу та заповнюючої матриці. На рисунку 5.1 наведено схему будови та мікрофрактограму зламу металоматричного композитного матеріалу, що відноситься до ливарних сплавів.

В цьому композитному матеріалі в якості каркасу, або преформи, використовуються волокна монокристалів вуглецю, матриця – литий магній. Сплав містить 40% вуглецю та 60% магнію. Межа міцності досягає 640 МПа при густині 1950 кг/м^3 . Питома міцність (відношення σ_b/ρ) цього сплаву дорівнює $0,328 \text{ МНм/кг}$, що значно перевищує аналогічний показник для високоміцної легованої сталі (205 МНм/кг). Ці сплави використовують в авіа-космічній техніці, наприклад, в деталях космічних човнів типу Шаттл (рис. 5.2).

Другий метод зміцнення сплавів, який зараз є найбільш поширеним – це гальмування руху дислокацій. Цей метод здійснюється за допомогою декількох механізмів, дія яких узгоджується зі структурою сплавів.

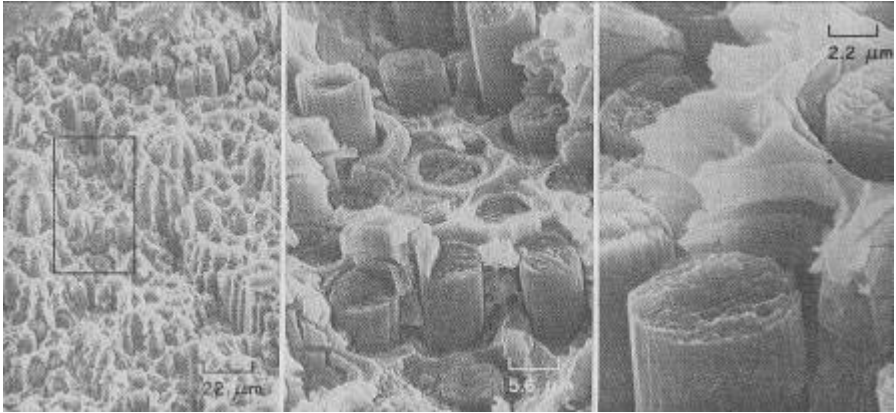
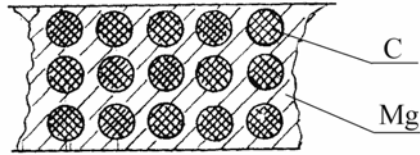


Рисунок 5.1 – Схема будови і мікрофрактограмми композитного матеріалу C – Mg



Рисунок 5.2 – Космічний корабель Шаттл

5.2 Структура ливарних сплавів як складна ієрархічна система

Взагалі структуру сплавів слід розглядати як складну систему, що складається з ієрархії підсистем або рівнів. Кожний елемент верхнього рівня складається з багатьох елементів суміжного нижнього рівня. Елементи суміжних рівнів розрізняються за природою, механізмами формування та розмірам (на два-три порядки). Існують такі рівні структури: макроструктура, мікроструктура, субструктура, мезоструктура, атомна структура.

Макроструктура. Основні структурні елементи рівня – це зерна первинної кристалізації. Розмірність елементів: $10^{-1} - 10^{-3}$ м. Засіб дослідження – спостереження неозброєним оком та мікроскопи малого збільшення.

Мікроструктура. Основні елементи – зерна вторинної кристалізації. В сплавах, що не мають алотропічних перетворень, макро- та мікроструктура об'єднуються в один рівень. Розмірність елементів складає $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-5}$ м. Засіб дослідження – світловий мікроскоп.

Субструктура. Основні елементи – блоки, що розмежуються скупченнями дислокацій, дрібні виділення, що виникають в процесі термообробки. Неметалеві вкраплення знаходяться в межевій галузі мікро- та субструктури. Розмірність елементів: $10^{-5} - 5 \cdot 10^{-8}$ м. Засіб дослідження – електронний мікроскоп.

Мезоструктура. Головні елементи – атомно-кристалічні чарунки та фрагменти атомно-кристалічної решітки, дислокації та інші дефекти твердого металу. Розмірність елементів: $5 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-10}$ м. Засоби дослідження – іонний проектор.

Атомний рівень. Елементи рівня – атоми та їх зовнішні електронні оболонки. Розмірність елементів: $10^{-10} - 10^{-13}$ м. Засіб дослідження – рентгенівське випромінювання.

5.3 Зміцнення ливарних сплавів на атомному рівні

На атомному рівні дислокації можна закріпити за рахунок утворення твердого розчину атомів легуючих елементів в основі. Розрізняються тверді розчини заміщення і тверді розчини втілення.

Твердий розчин заміщення виникає коли місця в деяких вузлах кристалічної решітки основи займають атоми іншого елемента, тобто шляхом заміщення атомів основи (рис. 5.3).

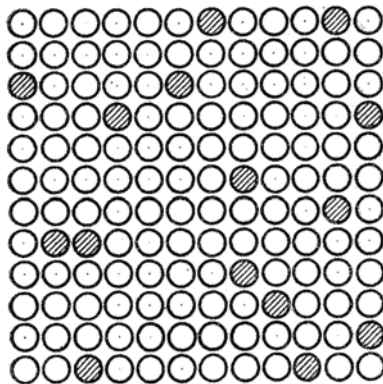


Рисунок 5.3 – Схема твердого розчину заміщення

Межі розчинності будь-якого елемента у визначеній основі можна оцінити за допомогою емпіричного правила Юм-Розері. Широка область розчинності можлива, коли наявні такі умови:

- різниця в атомних радіусах легуючого елемента та матриці не перевищує 10 – 15 %;
- елементи мають практично однакові електрохімічні властивості;
- їх кристалічні решітки ізотопні.

При виконанні всіх цих умов утворюється безперервний ряд твердих розчинів (наприклад, $\text{Cu} - \text{Ni}$), а при частковому виконанні цих умов розчинність у твердому стані є обмеженою.

При утворенні твердих розчинів твердість та електричний опір найчастіше збільшуються, а теплопровідність та пластичні властивості - знижуються.

Ближній порядок виникає, коли реалізується тенденція до розміщення в якості ближніх сусідів різнорідних атомів. Енергія зв'язку між різнорідними атомами є більшою, ніж між однорідними (рис.5.4).

Дальній порядок, або надструктура, виникає за наявності певного (стехіометричного) співвідношення кількості різнорідних атомів, що утворюють певну решітку. Надструктури є стійкими тільки нижче певної температури, коли зберігається закономірне розміщення різнорідних атомів у певних вузлах надгратки. На рисунку 5.5 наведені схеми надструктури золота і міді.

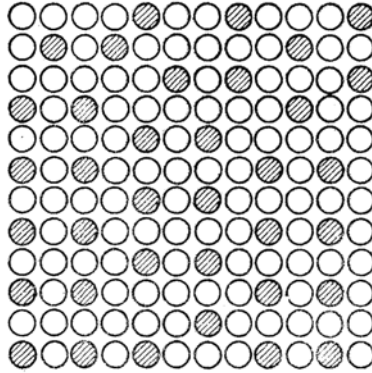


Рисунок 5.4 – Ближній порядок

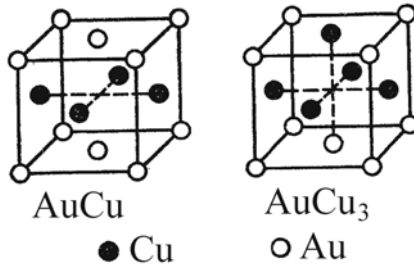
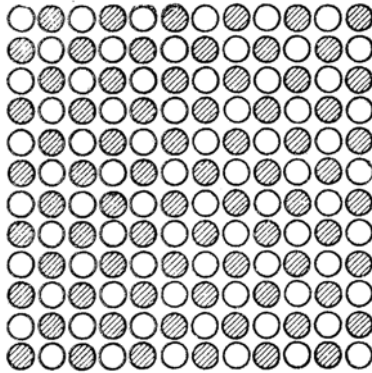


Рисунок 5.5 – Надструктури

Тверді розчини втілення утворюються коли у міжвузлові частини кристалічної решітки основи втілюються чужорідні атоми елемента, що розчинюється (частіше металоїдів із малим атомним радіусом) (рис.5.6). Незважаючи на малу розчинність таких елементів, вони значно зміцнюють сплави.

Твердорозчинне зміцнення пояснюється взаємодією дислокацій. Для ОЦК металів та їх сплавів взаємодія між дислокаціями, а також розміщення дислокацій є аналогічними. Але утворення сплаву викликає поступові зміни, як у розташуванні дислокацій, так і в їх взаємодії. При цьому міцність сплавів підвищується.

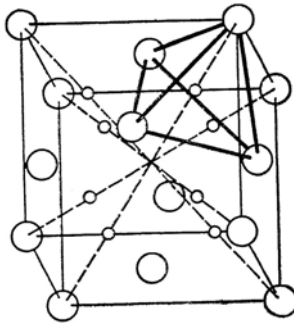


Рисунок 5.6 – Схема твердого розчину втілення

Фази втілення – це надструктури в системах розчинів втілення. Вони мають напівметалевий блиск, високу твердість і зносостійкість. Для зміцнення ливарних сплавів використовуються такі фази втілення, як карбіди, боріди, силіциди. На рисунку 5.7 зображено структуру карбіду вольфраму.

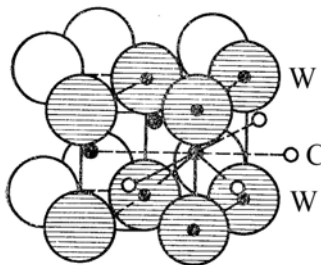


Рисунок 5.7 – Структура фази втілення – карбіду вольфраму

Навіть у стані рівноваги в областях розтягнення вальних та стискуваних напружень навколо дислокацій утворюються хмари атомів легуючих елементів, так звані, хмари Котрела (рис. 5.8).

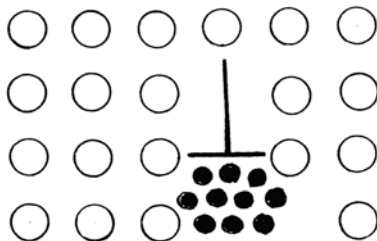


Рисунок 5.8 – Хмари Котрела

Атоми легуючих елементів можна розглядати, як нуль-мірні перешкоди руху дислокацій. Зміцнення за рахунок твердого розчину можна визначити за допомогою наступного рівняння:

$$\Delta\sigma_c = G \cdot \varepsilon^2 \cdot c^{\frac{1}{2}}, \quad (5.1)$$

де G – модуль зсуву;

C – концентрація розчинених атомів ($C \geq 1\%$).

$$\varepsilon = \frac{(r - r_0)}{r_0}, \quad (5.2)$$

де r_0 – розмір атомів основи;

r – розмір атомів легуючого додатку.

При $C \leq$ слід використовувати наступне рівняння:

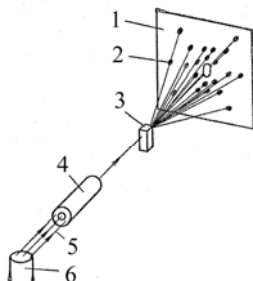
$$\sigma = A \cdot G \cdot \varepsilon^{\frac{3}{2}} \cdot C^{\frac{1}{2}}, \quad (5.3)$$

де A – константа, яка залежить від матеріалу.

Це – перший механізм зміцнення.

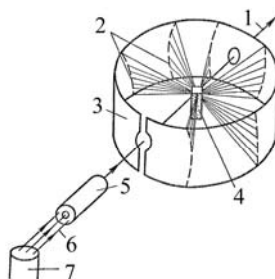
Основний метод дослідження вказаних структур – рентгеноструктурний аналіз. Він здійснюється з метою отримання інформації щодо форми та розмірів елементарної чарунки, кількості атомів, що знаходяться в елементарній чарунці, розмірів чарунки та решітки.

Рентгенівське випромінювання є одним з видів електромагнітного випромінювання та має довжину хвилі $10^{-12} - 10^{-8}$ м, тобто порядку міжатомних відстаней. Для дослідження монокристалів використовується метод Лауе (рис.5.9), полікристалів – метод Дебая–Шерера (рис.5.10).



- 1 – плівка; 2 – інтерференційна пляма; 3 – монокристал (не обертається);
4 – коліматор; 5 – поліхроматичне рентгенівське випромінювання;
6 – анод рентгенівської трубки

Рисунок 5.9 – Схема рентгеноструктурного аналізу монокристалів



- 1 – первинний пучок; 2 – інтерференційні смуги; 3 – плівка;
4 – полікристалічний об'єкт; 5 – коліматор; 6 – монохроматичне рентгенівське випромінювання; 7 – анод рентгенівської трубки

Рисунок 5.10 – Схема рентгеноструктурного аналізу полікристалів

При рентгеноструктурному аналізі одержують, так звані, дифракційні картини, за допомогою яких для монокристалів визначають орієнтування кристалу, параметри решітки, симетрії решітки. Для полікристалів визначають параметри решітки, оцінюють щільність дефектів кристалів, пружні напруження, текстури.

5.4 Зміцнення сплавів на рівні мезоструктури

На рівні мезоструктури реалізується дислокаційний механізм зміцнення. При наявності дислокацій критичне напруження течії, σ_T :

$$\sigma_T \approx \rho^{\frac{1}{2}}, \quad (5.4)$$

де ρ – щільність дислокацій;

При пластичній деформації відбувається утворення великої кількості нових дислокацій. В результаті такого розмноження кількість дислокацій зростає з $10^6 - 10^8$ у відпаленому стані до $10^1 - 10^{12}$ після пластичної деформації, тобто на чотири порядки. Через утворення нових дислокацій та підвищення їх щільності з'являються обмеження для руху кожної дислокації, що прогресивно збільшуються. Взаємні обмеження руху дислокацій є причиною дислокаційного зміцнення. Дислокаційне зміцнення можна визначити за таким рівнянням:

$$\sigma_T = a \cdot G \cdot b \cdot \rho^{\frac{1}{2}} \cdot 2 \cdot \pi, \quad (5.5)$$

де G – модуль зсуву;

ρ – щільність дислокацій;

b – вектор Бюргерса;

a – постійна (для гвинтової дислокації $a = 1$, для крайової - $a = 1,5$).

Максимальна щільність дислокацій, що може бути досягнутою при холодному наклепі, дорівнює 10^{10} одиниць на см^2 . Це – другий механізм зміцнення.

Основні методи дослідження – електронна мікроскопія та іонний проектор, або автоіонний мікроскоп.

Схему автоіонного мікроскопа наведено на рисунку 5.11. Зразок, 3, має вигляд гостро заточеного шпичака. Він охолоджується рідким воднем, 2. До зразку прикладається висока напруга, 1 ($5 - 25$ кВ). Колонна автоіонного проектора заповнюється зображуючим газом (гелієм або воднем) під тиском 10^{-3} мм рт. ст. Атоми або молекули газу, що наближуються до шпичака, іонізуються або поблизу від нього, або на шляху до шпичака, або коли відскочують від шпичака. Потім іони прискорюються в напрямку до екрану, 6, де і утворюють збільшене зображення зони іонізації. Збільшення сягає двох мільйонів разів, то-

му можна спостерігати окремі атоми та дефекти кристалічної решітки (рис.5.12). Недоліком автоіонної мікроскопії є необхідність створення для іонізації електричного поля напруженністю 50000 МВ/м. В таких полях усі метали з відносно невеликими температурами плавлення, наприклад, залізо, навіть при температурі рідкого гелію випаровується настільки швидко, що це заважає спостережанню стабільної структури.

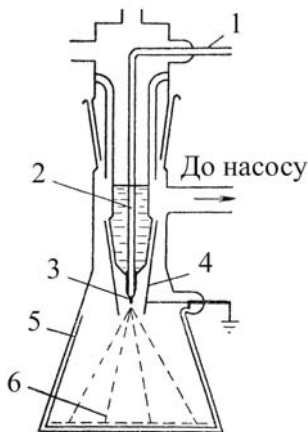


Рисунок 5.11 – Схема автоіонного проектора

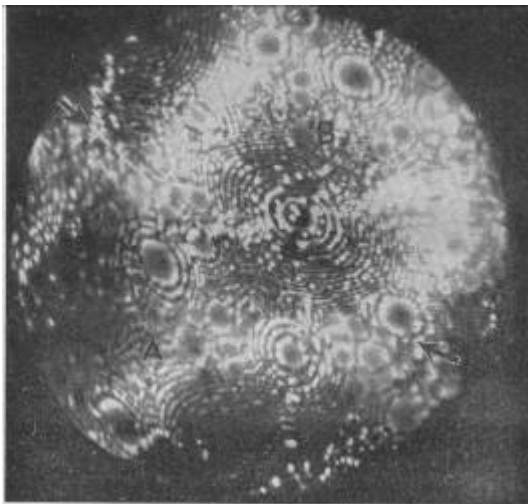


Рисунок 5.12 Зображення в іонному проекторі сплаву W-Rh

5.5 Зміцнення ливарних сплавів на рівні субструктури

На рівні субструктури діє механізм зміцнення сплавів за рахунок гальмування дислокацій частинками інших фаз. Необхідною умовою для створення ефекту зміцнення частками є висока твердість часток, для того щоб дислокації не могли проникнути у ці частки та не деформували їх. Коли частки не перерізаються дислокаціями, останні при зростанні напруження згинаються у півколо. Це є, так званий, механізм Орована (рис.5.13).

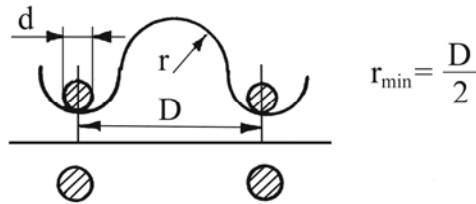


Рисунок 5.13 – Механізм Орована

Зміцнення частинками можна визначити за допомогою рівняння:

$$\Delta\sigma_3 = \beta \cdot G \cdot b \cdot d^{-1}, \quad (5.6)$$

де G – модуль зсуву;
 β – постійна ($\beta \approx 0,5$);
 b – вектор Бюргера;
 d – розмір частинок.

Оптимальними з точки зору гальмування дислокацій є наступні умови: відстань між частинками $D \leq 0,1$ мкм, розмір часток $d \leq 0,01$ мкм.

Особливе значення зміцнення частками має для сплавів на основі кольорових металів. Цей процес зветься дисперсійним твердінням. У сплавах типу дюралюміній фазою, що зміцнює, є дрібні частки інтерметалідної фази Cu_3Al . Взагалі інтерметалідні сполуки утворюються у середніх частинах діаграм стану за межею твердих розчинів, коли не виконується правило Юм–Розері. Інтерметалідні фази характеризуються проявленням гетерополярної та гомеополярної складових частин зв'язку поряд з металевим зв'язком при повній або частковій сте-

хіометрії. Інтерметаліди більш стабільні аніж надструктури, вони тверді, крихкі, мають невелику електропровідність.

Зміцнення частками – це третій механізм зміцнення.

Дослідження субструктури здійснюється за допомогою електронних мікроскопів.

5.6 Зміцнення ливарних сплавів на рівні мікроструктури

Реальні сплави – це, як правило, полікристалічні об'єкти, що складаються з окремих зерен. Взагалі у полікристалічних сплавах межа текучості з більшою, ніж у монокристалічних.

Вплив розміру зерна на межу текучості оцінюється за допомогою рівняння Петча–Хола:

$$\sigma_T = \sigma_{iy} + k_y \cdot d^{-0,2}, \quad (5.7)$$

де σ_{iy} – напруження тертя, що повинні подолати дислокації, коли останні рухаються в дуже великих зернах;

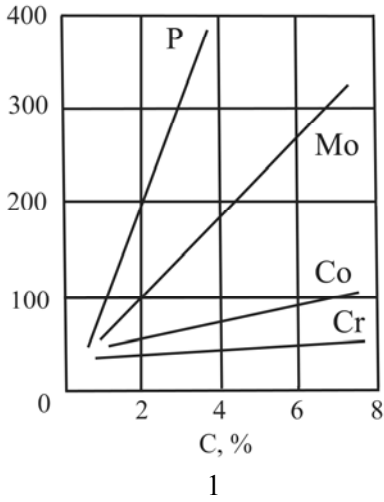
k_y – коефіцієнт, що чисельно віддзеркалює опір зерен руху дислокацій;

d – середній розмір феритних зерен в сталі з низьким вмістом вуглецю.

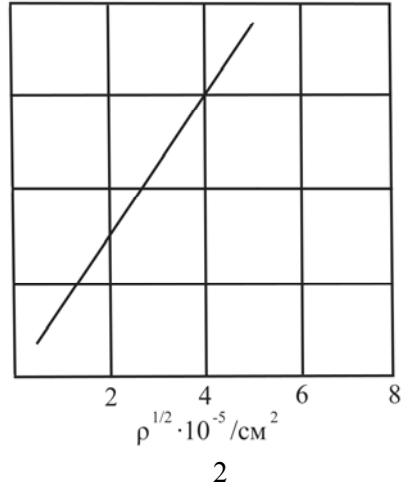
Для перлітних сталей існує подібна залежність, але замість розмірів феритних зерен треба застосувати товщину феритних пластин. В загальному вигляді d можна уявляти, як величину вільного пробігу дислокацій.

Зміцнення сплавів за допомогою елементів мікроструктури здійснюється на другому структурному рівні. Це четвертий механізм зміцнення ливарних сплавів.

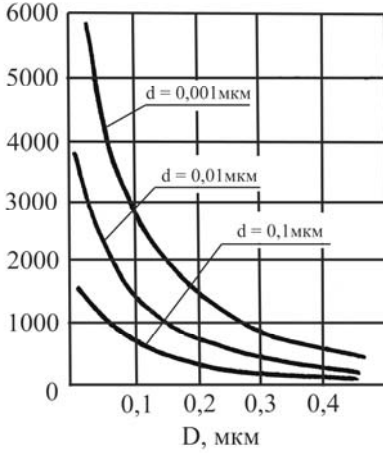
Для основних чотирьох механізмів зміцнення в сплавах на основі заліза наведено на рисунку 5.14.

σ_T , МПа

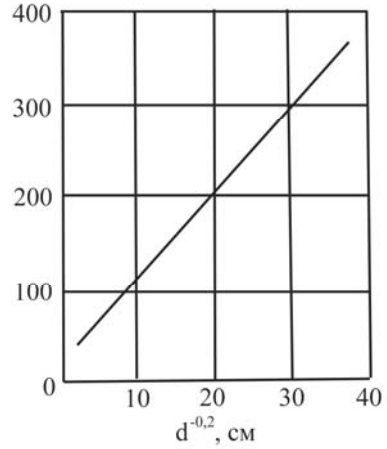
1



2

 σ_T , МПа

3

 σ_T , МПа

4

- 1 – зміцнення за рахунок твердого розчину;
 2 – зміцнення за рахунок дислокацій;
 3 – зміцнення частинками;
 4 – зміцнення за рахунок меж зерен.

Рисунок 5.14 – Дія основних механізмів зміцнення ливарних сплавів

5.7 Комбінації основних механізмів зміцнення

Кожен з чотирьох основних механізмів зміцнення має деякі обмеження, що перешкоджають досягненню теоретичної міцності при їх екстраполяції до високої щільності перешкод.

Концентрація розчинених атомів, що викликають твердорозчинене зміцнення, обмежена максимальною розчинністю елементу, $C_{\max}$. На рисунку 5.15 наведено вплив концентрації срібла на межу текучості сплаву золото – срібло. Максимальній міцності відповідає вміст срібла 50 %.

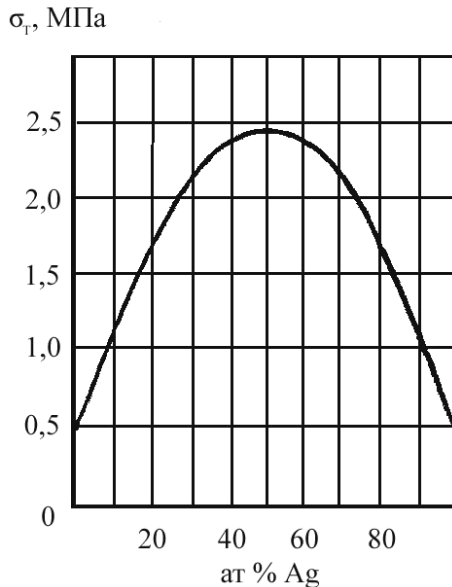


Рисунок 5.15 – Вплив концентрації срібла на межу текучості сплаву Au – Ag

Можливість збільшення щільності дислокацій також обмежена через те, що коли відстань між дислокаціями дуже мала, вони навіть при кімнатній температурі або рекомбінують (з'єднуються), або анігілюють (знищуються).

При зміцненні частками, кількість їх в сплаві також обмежена.

Обмеження існують і для зміцнення за рахунок меж зерен. Шляхом швидкого охолодження або рекристалізаційної обробки практич-

но неможливо одержати діаметр зерен менше одного мкм. Міцність може бути підвищена за рахунок збільшення коефіцієнту K_y шляхом створення сегрегацій на межах зерен, але при цьому виникає зерно-межева крихкість.

Таким чином, використання будь-якого одного механізму зміцнення не є припустимим шляхом для того, щоб наблизитись до теоретичної міцності. Навіть коли це вдається, то тільки за рахунок втрати пластичності. Тому краще використовувати комбінацію декількох механізмів зміцнення. 10 основних комбінацій чотирьох механізмів зміцнення наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – 10 комбінацій чотирьох основних механізмів зміцнення ливарних сплавів

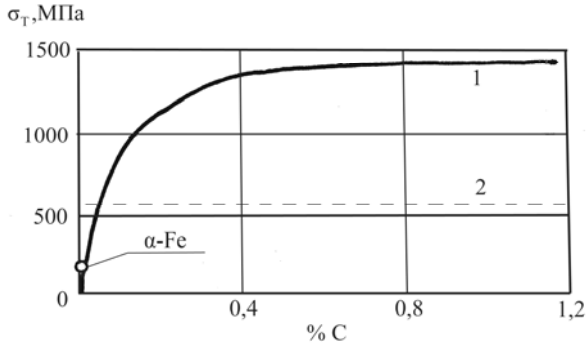
Твердорозчинене зміцнення	М	МТ	МК	МУ	ММ
Дислокаційне зміцнення	У	УТ	УК	УУ	
Зміцнення дрібним зерном	К	КТ	КК		
Зміцнення частками	Т	ТТ			

Найбільш ефективні подвійні комбінації механізмів зміцнення наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Найбільш ефективні подвійні комбінації механізмів зміцнення

Дрібнозернистий твердий розчин	МК
Холоднодеформований твердий розчин	МУ
Твердий розчин з атомами втілення або заміщення	ММ
Дисперсійно зміцнений сплав після холодної деформації	УТ
Дрібнозернистий дисперсійно зміцнений сплав	КТ
Сплав, зміцнений межами зерен і двійниками	КК
Сплав, зміцнений частинками двох видів або двох різних ступенів дисперсності, одержаних за допомогою подвійної обробки	ТТ

Приклад зміцнення сталі за допомогою двох механізмів наведено на рисунку 5.16.

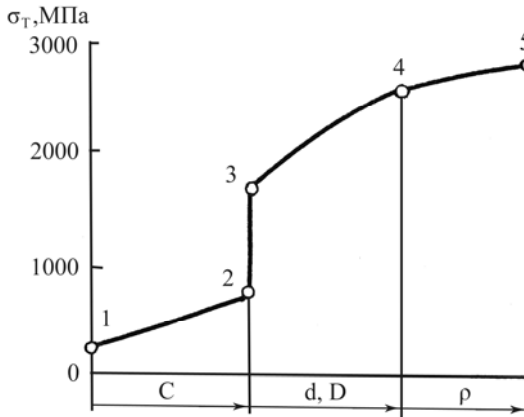


1 – зміцнення за допомогою атомів вуглецю (твердий розчин);

2 – зміцнення дефектами решітки при перетворенні

Рисунок 5.16 – Зміцнення вуглецевої сталі за допомогою двох механізмів

Зараз створено сплави, в яких діють усі чотири механізми зміцнення. Це, наприклад, мартенситно-старіюча сталь, що містить 28 % нікелю та 12 % алюмінію. Дія основних механізмів зміцнення на межу текучості мартенситно-старіючої сталі наведено на рисунку 5.17.



1–2 – твердорозчинене зміцнення;

2–3 – зміцнення дефектами ґратки (мартенситне перетворення);

3–4 – зміцнення дисперсійними частинками;

4–5 – зміцнення дислокаціями (для деформованого металу).

Рисунок 5.17 – Дія основних механізмів зміцнення на межу текучості мартенситно-старіючої сталі.

Межу текучості сплаву можна визначити за допомогою рівняння, що враховує усі головні механізми зміцнення. Це рівняння має наступний вигляд:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_{iy} + \Delta\sigma_w + \left(\Delta\sigma_{H1}^2 + \Delta\sigma_{H2}^2\right)^{\frac{1}{2}} + k_y}{\frac{1}{D^2}}, \quad (5.8)$$

Індексми W та H позначено відповідно м'які та тверді перешкоди, тобто такі, що вимушують дислокації незначно (W) або значно (H) прогинатися. Постійна, K_y , рівняння Петча–Хола залежить від існування твердих перешкод.

Два види твердих перешкод позначені як H1 та H2. Таким чином, межа текучості – одна з найважливіших механічних властивостей може бути досить коректно розрахована для складної структури ливарних сплавів. На цій основі можливо спрямовано виконувати розробку ливарних сплавів та методів їх термічної обробки.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Золоторевский В.С. Механические свойства металлов [Текст] / В.С.Золоторевский. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
- 2 Жуковец И.И. Механические испытания металлов [Текст] / И.И.Жуковец. – М.: Высшая школа, 1980. – 252 с.
- 3 Бялік О.М. Металознавство [Текст]: підручник / О. М. Бялік, В. С. Черненко, В. М. Писаренко, Ю. Н. Москаленко. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Політехніка, 2006. – 384 с.
- 4 Металловедение и термическая обработка [Текст]. Т. 1. Методы испытаний : справочник / Б.С.Бокштейн, Ю.Т.Векслер, М.И.Виноград и др. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
- 5 Металознавство та термічна обробка металів [Текст] : підручник для студ. вищ. навч. закл. / О. А. Кузін, Р. А. Яцюк. – Л.: Афіша, 2002. – 304 с.
- 6 Фрактография и атлас фрактограмм [Текст] : справочник / под ред. Дж. Феллоуза. – М.: Металлургия, 1982. – 489 с.
- 7 Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія [Текст] : підручник для студ. машинобудівних спец. / О.М. Бялік, С.Э. Кондратюк, М.В. Кіндрачук, В.С. Черненко ; НТУУ "КПІ". – LinkКиїв : Політехніка, 2006. – 328 с.
- 8 Гуляев А.П. Металловедение [Текст] / А.П.Гуляев. – М.: Металлургия, 1977. – 650 с.
- 9 Статическая прочность и механизм разрушения сталей [Текст] / под ред. В.Даля. – М.: Металлургия, 1988. – 566 с.
- 10 Шульте Ю.А. Электрометаллургия стального литья [Текст] / Ю.А.Шульте. – М.: Металлургия, 1970. – 224 с.
- 11 Хеккель К. Техническое применение механики разрушения [Текст] / К Хеккель; пер. с нем. – М.: Металлургия, 1974. – 64 с.
- 12 Циммерман Р. Металлургия и материаловедение [Текст] : справочник / Р.Циммерман, К. Гюнтер. – М.: Металлургия, 1982. – 480 с.