

Пружна та пластична деформація металів. Руйнування металів.

1. Пружна та пластична деформація металів

При впливі механічних навантажень на тверді тіла в них виникають напруження. Напруженням називають відношення прикладеного до тіла навантаження до одиниці площі його перерізу. Напруження вимірюють в МПа або Н/мм². Залежно від умов навантаження напруження визначають опір матеріалів короткочасному або тривалому руйнуванню, повзучості, втомі і т. д.

При статичній рівновазі зовнішнє навантаження P врівноважується внутрішньою силою опору $\int S dF$, де S – напруження в напрямку, перпендикулярному площині перерізу, а F – площа поперечного перерізу.

В умовах рівноваги

$$P = \int S dF. \quad (1)$$

Якщо напруження розподілені в перерізі рівномірно, то

$$P = S \int dF = SF \text{ та } S = P/F. \quad (2)$$

Якщо напрямок сили P становить з нормаллю до площі перерізу кут α , то нормальне напруження S буде

$$S = P/S \cos \alpha, \quad (3)$$

оскільки переріз набуває форму еліпса, а дотичне напруження τ буде

$$\tau = P/S \cos \alpha \sin \alpha. \quad (4)$$

Наведені напруження називаються істинними, оскільки враховується зміна площі перерізу при навантаженні. Нормальні напруження призводять до відриву, а дотичні – до зсуву.

Зазвичай зміну площі перерізу при навантаженні не враховують, а навантаження відносять до початкового значення площі поперечного перерізу F_0 . Тоді знайдені напруження називають умовними.

При навантаженні металів відбувається зміщення атомів в кристалічній структурі, змінюється відстань між атомами, тобто відбувається деформація.

У загальному випадку між двома атомами в твердих тілах діють сили тяжіння f^+ і відштовхування f^- . Величини цих сил залежать від відстані r між атомами, яка змінюється при деформуванні. При рівновазі абсолютні значення сил тяжіння і відштовхування рівні, це відповідає міжатомній відстані r_0 (рис. 1).

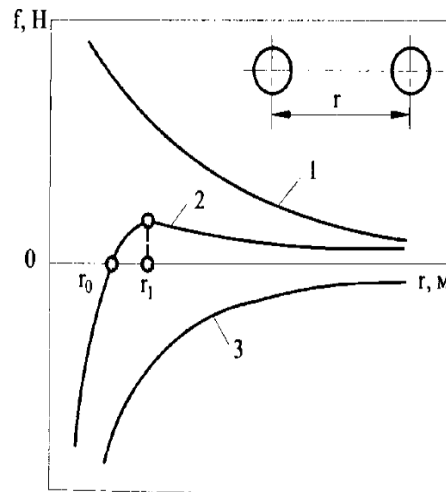


Рис. 1 – Вплив відстані r на між атомами на силу тяжіння (1), відштовхування (2) та рівнодіючу (3)

При $r < r_0$ превалює сила відштовхування, а при $r > r_0$ – сила тяжіння. Обидві сили є близькодійними. При деякому значенні $r = r_1$, рівнодіюча сил тяжіння і відштовхування досягає максимального значення, а надалі – відрив одного атома від іншого. Напруження, необхідні для відриву однієї частини кристала від іншої шляхом подолання атомних сил зв'язку в кристалах, визначають теоретичну міцність кристалічної решітки металів.

Деформації ε , що виникають у даному випадку в кристалах, називаються *пружними*. В області пружних деформацій зберігається лінійна залежність між навантаженням і деформацією, а пружні напруження в металах визначаються законом Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (5)$$

де E – модуль нормальної пружності.

Пружність є властивістю матеріалів внутрішніми силами відновлювати первинну форму, зіпсовану зовнішнім впливом, після припинення цього впливу.

Жорсткість характеризує властивість матеріалів чинити опір пружній деформації.

При пружній деформації металів атоми набувають незначних зміщень з положення рівноваги, що не порушують порядок в розташуванні атомів. Після припинення дії зовнішніх сил під дією внутрішніх сил тяжіння атоми повертаються в положення рівноваги.

Пружність є найважливішою властивістю матеріалів, що визначає їх продуктивність. Модуль пружності залежить в основному від природи металів, міцності атомних зв'язків, температури і умов навантаження. Модулі нормальної пружності полікристалів металів при температурі 20 °С наведені нижче.

Метал	Mg	Al	Au	Ti	Cu	Ni	Fe	Cr	W
E , МПа	45200	71900	80200	108000	123000	205000	217000	240000	396000

Легувальні елементи в металевих сплавах змінюють міцність атомних зв'язків і, відповідно, збільшують або зменшують модуль пружності. Так, наприклад, введення кремнію і літію в алюмінієві сплави підвищує їх жорсткість.

Динамічний модуль пружності трохи перевищує статичний. Нижче наведено вплив швидкості прикладання навантаження і температури на модуль пружності сплаву ЕП539.

t , °С	20	800	900
$E_{ст}$, МПа	204500	155000	138000
$E_{д}$, МПа	221600	165400	153900

При збільшенні температури модуль пружності зменшується.

Відомо, що реальна міцність кристалів істотно менше теоретичної і залежить від концентрації дефектів кристалічної будови металів. Так, наприклад, теоретична міцність заліза становить 43400 МПа, тоді як міцність

чистого заліза з малою концентрацією дефектів досягає 50 МПа, а технічного заліза 250 МПа.

За відсутності дислокацій міцність металів близька до теоретичної. При малій концентрації дислокацій вони мають високу рухливість, тому міцність падає. При подальшому збільшенні концентрації дефектів дислокації закріплюються і все більше втрачають рухливість за мірою збільшення їх щільності. Це викликає додаткове зміцнення сплавів (рис. 2).



Рис. 2 – Вплив концентрації дефектів на міцність металу

Розглянемо механізми пластичної деформації металів з монокристалічною структурою.

Пластична деформація в металах являє собою необоротну залишкову зміну форми і розмірів виробів під впливом зовнішнього навантаження, що зберігається після припинення дії зовнішніх сил.

Пластичністю називають властивість металів пластично деформуватися без руйнування. Пластичність є найважливішою властивістю матеріалів, яка забезпечує можливість надавати виробам необхідну форму, зменшувати чутливість до концентрації напружень, змінювати структуру металів в будь-якому напрямку.

Пластична деформація в металах виникає при впливі зовнішніх механічних та термічних напружень, при кристалізації, при термічному обробленні деталей, а також у процесі фазових перетворень, що супроводжуються помітною зміною питомих об'ємів.

Основним механізмом пластичної деформації є рух дислокацій. Пластична деформація найчастіше здійснюється по площинах і напрямках в решітці кристалів, найбільш щільно заповнених атомами. Оскільки існує безліч способів переміщення дислокацій, то й механізми переміщення частинок металів при пластичній деформації являє собою досить складне явище.

Деформація зсувом. Зазвичай площину, в якій відбувається ковзання, і напрямки ковзання, що лежать в цій площині утворюють систему ковзання. У напрямку зсуву в площині ковзання опір решітки переміщенню частинок металу мінімальний.

Реалізація тієї чи іншої системи ковзання залежить від типу кристалічної решітки, енергій дефектів кристалічної будови, температури деформації і т. д. У ГЦК-металах ковзання відбувається переважно в площині октаедра $\{111\}$ в напрямку з сімейства $\langle 110 \rangle$. У цій решітці загальне число систем ковзання дорівнює 12. В ОЦК-металах, зокрема в α -залізі, існує по чотири напрямки типу $\langle 111 \rangle$, кожний з яких розташований у площинах, що входять до сімейства $\{110\}$, $\{112\}$, $\{123\}$. Тому в ОЦК-металах існує 48 систем ковзання.

У зв'язку зі складністю явища, пов'язаного з різноманітним поведінкою дислокацій, в даний час закономірності пластичної деформації вивчені лише на якісному рівні.

При зростанні навантаження до деякої величини першими починають рухатися дислокації тієї системи ковзання, в якій досягається максимальне значення компоненти прикладеного напруження, що перевищує критичне напруження зсуву. Таку систему ковзання називають головною, а стадію деформації, коли дислокації рухаються переважно в головній системі, називають першою стадією або стадією легкого ковзання.

При зсуві дислокації, переміщаючись, зрушують шари кристала один щодо іншого вздовж площини ковзання. Досягаючи поверхні, крайова дислокація утворює сходинок висотою рівною параметру решітки. Зазвичай на поверхню в одному місці виходять не одна, а 10 – 100 дислокацій.

Дислокації, розташовані в площині ковзання, утворюють лінію ковзання, видиму в оптичному мікроскопі. Групи близько розташованих ліній ковзання утворюють смуги ковзання (рис. 3).

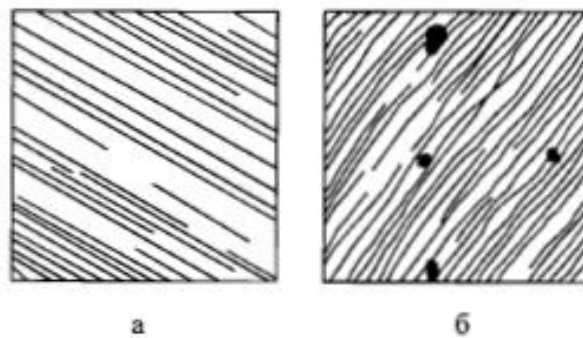


Рис. 3 – Смуги ковзання у монокристалах кремнистого заліза (а)
і алюмінію (б)

В процесі пластичної деформації кристалічні матеріали зміцнюються. Таке зміцнення за рахунок деформації називають *наклепом* або *деформаційним зміцненням*. На стадії легкого ковзання зміцнення незначне. Матеріал «тече» без помітного збільшення навантаження. При збільшенні деформації ковзання поширюється і на менш сприятливо орієнтовані системи, спостерігається множинне ковзання. Посилюється пружна взаємодія дислокацій, починається утворення дислокаційних скупчень і бар'єрів, тому на другій стадії деформації різко зростає зміцнення. На третій стадії відбувається групування дислокацій в об'ємні сітки. Виникають *текстури* деформації.

Пластична деформація відрізняється високою неоднорідністю, особливо в полікристалах, де спостерігається одночасне ковзання в зернах, вигини і повороти зерен, змінюється форма зерен. Зерна витягуються в напрямку деформації, наприклад, при розтягуванні. Сітчаста дислокаційна структура в полікристалах виникає при величині деформації 5 – 10%.

Деформація двійникування

Двійникування являє собою механізм пластичної деформації ковзанням під впливом зовнішніх навантажень. При двійникуванні атомні площини кристалів зміщуються паралельно площині двійникування в певному напрямку на відстань, пропорційну відстані від площини розділу, яка є загальною для частин кристалу, що змістилися (рис. 4).

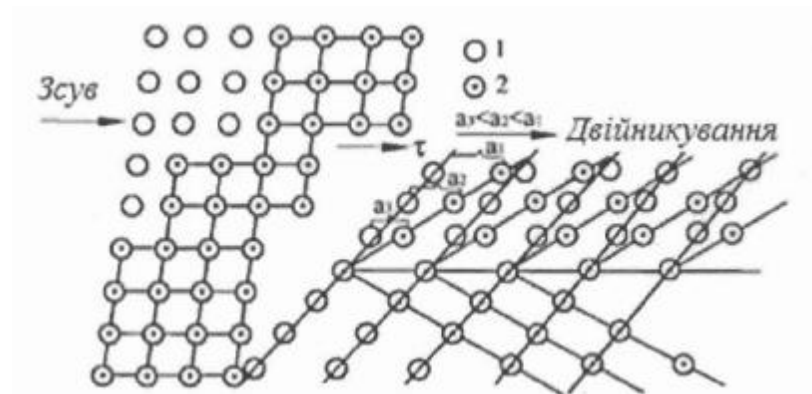


Рис. 4 - Зміщення атомів при зсуві та двійникуванні. Положення атомів до (1) і після (2) деформації

Така двійникова границя називається когерентною, вона має малу енергією, що забезпечує більшу термічну стійкість.

Для решіток кожного типу характерні свої площини і напрямки двійникування (табл. 1).

Таблиця 1 -

Основні площини та напрямки двійникування

Тип решітки	Метал	Площина двійникування	Напрямок двійникування
ОЦК	Залізо, вольфрам, β-латунь	{112}	<111>
ГЦК	Алюміній, нікель, мідь	{111}	<112>
ГПУ	Магній, β-титан, берилій	{1012}	<1011>

Двійникування в ГЦК-металах починається після досягнення критичного напруження зсуву. При двійникуванні крива напруження – деформація має

зубчастий, пилкоподібний вид. Зубчаста ділянка виникає в результаті узгодженого руху часткових дислокацій, який змінює орієнтування, принаймні частити кристала на двійникову орієнтацію.

У ГЦК-кристалах деформаційні двійники утворюються в результаті ковзання часткових дислокацій по площинах $\{111\}$, а в ОЦК-металах - по площинах $\{112\}$, причому величина зміщення атомів при ковзанні в кожній площині не дорівнює міжатомній відстані.

Деформаційне двойникование є важливим механізмом деформації для ОЦК-і ГПУ-металів, особливо при низьких температурах, і ускладнене, рідше виявляється в ГЦК-металах.

Можливим механізмом утворення двійників є утворення спіральної дислокації з кроком, рівним відстані між площинами двійникування. При переміщенні спіральної часткової дислокації утворюється двійник.

При деякій, достатньо великій деформації зерна полікристалів займають певне кристалографічне орієнтування щодо напрямку дії зовнішнього навантаження. Поворот решітки і зміна орієнтування відбувається поступово по мірі зростання ступеня деформації. У підсумку в сильно деформованих металах виникає переважне кристалографічне орієнтування зерен, яке називають текстурою деформації. Утворення текстури спостерігається при ступені деформації не менше 30%.

Пластична деформація значно впливає на механічні та фізичні властивості металів - зростає міцність, твердість, концентрація дефектів у кристалах. Деформація призводить до утворення структурних дефектів у металах і зниження пластичності (рис. 5).

Особливо інтенсивно зміцнюються метали з ГЦК-решіткою, Так, наприклад, в результаті 90%-ної деформації сплаву на основі алюмінію границя плинності зростає в три рази, а в нікелі - більш ніж у сім разів.

При пластичній деформації зростає внутрішня енергія, яка обумовлена зростанням концентрації дефектів кристалічної будови, і збільшується питомий об'єм металу.

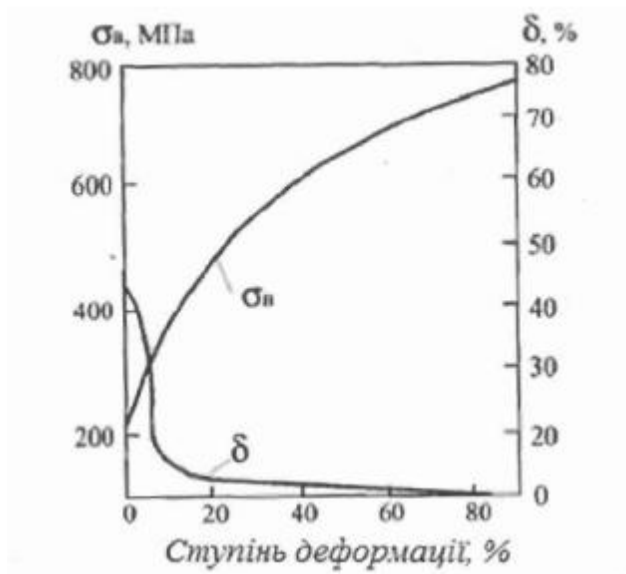


Рис. 5 – Вплив пластичної деформації на міцність і пластичність металів

Механізм пластичної деформації

Оскільки реальна міцність кристалів значно менше теоретичної міцності, то пластична деформація кристалів здійснюється шляхом неодночасного та незворотнього переміщення дислокацій в площині ковзання. Ковзання відбувається послідовно. Воно починається в одній або декількох ділянках площини ковзання і поширюється по всій площині з деякою кінцевою швидкістю.

Основним механізмом пластичної деформації є переміщення дислокацій (рис. 6). У процесі ковзання переміщується мала дефектна область, яка має розміри, близькі до величини атомних діаметрів. Розвиток ковзання супроводжується переміщенням екстраплоскості зліва направо. Після завершення процесу ковзання дислокація зникає, відбувається одиничний зсув на величину параметра решітки кристала.

Послідовність здійснення зсуву, розтягнутого за часом, визначає необхідність в малій величині зовнішніх сил для реалізації зміщення однієї частини кристала щодо іншої.

Властивість металу чинити опір виникненню і розвитку пластичної деформації визначає його міцність. Міцність металів підвищують легуванням, термомеханічною обробкою, наклепом та іншими способами.

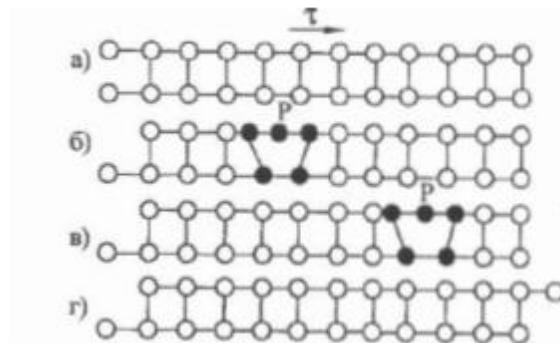


Рис. 6 – Послідовність переміщення дислокації Р в напрямку τ при зсуві

2. Руйнування металів. В'язкість руйнування

Руйнування металів являє собою процес зародження і зростання тріщин, що призводить до поділу його на частини.

Розрізняють крихке і в'язке руйнування. І крихке, і в'язке руйнування, як правило, зароджується внаслідок руху дислокацій. В'язке і крихке руйнування розрізняються за шириною пластичної зони у вершини тріщини - більш вузької при крихкому і більш широкої при в'язкому руйнуванні. Релаксація напружень у вершини в'язкої тріщини забезпечує затуплення тріщини і збільшення опору металу її подальшому розвитку на відміну від крихкого руйнування. Тому при крихкому розтріскуванні швидкість поширення тріщини, наприклад у сталей, досягає 2500 м/с.

Елементи авіаційних конструкцій нерідко працюють за наявності в них мікро-, а іноді і макротріщин. Для оцінки опору матеріалів поширенню в них тріщин, введена характеристика в'язкості руйнування K . В'язкість руйнування, характеризує тріщиностійкість матеріалів і відноситься до характеристик їх надійності. Іноді величину K називають коефіцієнтом інтенсивності напружень у вершині тріщини. При плоскій деформації розтягуванням додають індекс 1, наприклад K_1 (рис. 7).

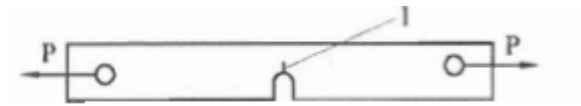


Рис. 1.8 - Розтягнення зразка з тріщиною 1

При досягненні тріщиною критичної довжини вона починає поширюватись нестабільно. Для оцінки опору матеріалу з тріщиною критичної довжини $l_{кр}$ введено поняття критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} .

Розглянемо напруження матеріалу з тріщиною критичних розмірів $l_{кр} = 2c_{кр}$ за Гріффітсом.

Максимальні напруження у вершини тріщини критичної довжини називають також сколюючими; вони залежать не тільки від $l_{кр}$, але і від ρ -радіуса у вершини тріщини, які можна визначити за формулою:

$$\sigma_{\max} = \sigma \sqrt{2c/\rho} \quad (6)$$

Зазвичай визначають середні значення напружень і вводять коефіцієнт геометрії тріщини α . Тоді в'язкість руйнування визначається виразом

$$K_{Ic} = \sigma_{cr} \sqrt{\alpha \pi 2c_{кр}} = \sigma_{cr} \sqrt{\alpha \pi l_{кр}} \quad (7)$$

Величина K_{Ic} має розмірність $\text{МН/м}^{3/2}$ або $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Чим більше в'язкість руйнування, тим вище надійність матеріалів (табл. 2). K_{Ic} дозволяє оцінити безпечний розмір тріщини при відомому напруженні, і навпаки - безпечні напруження при відомому розмірі дефекту.

Таблиця 2-

Співвідношення умовної границі текучості і в'язкості руйнування K_{Ic} сплавів

Властивість	На основі алюмінію	На основі титану	На основі заліза
$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	300 700	700 1200	1200 2100
$K_{Ic}, \text{МН/м}^{3/2}$	46,5 ... 18,5	62,0 ... 37,2	93,0 ... 31,0

Розглянемо залежність критичного напруження від розміру тріщини для матеріалів I і II (рис. 8) при $K_{Ic}^I > K_{Ic}^{II}$. Видно, що дефект розміром l безпечний

при навантаженні σ_p для матеріалу I, так як $l_{Iкр} > l$, та небезпечний для матеріалу II, де $l_{IIкр} < l$.

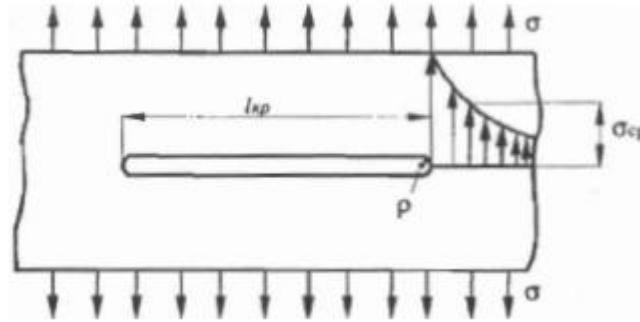


Рис. 8 – Схема розвитку тріщини за Гріффітсом

ρ – радіус у вершині тріщини; $\sigma_{ср}$ - середнє значення напружень у вершини тріщини; σ – зовнішнє навантаження; $l_{кр}$ – критична довжина тріщини

В'язкість руйнування залежить від швидкості прикладання навантаження. Встановлено, що при збільшенні швидкості прикладання навантаження в'язкість руйнування зростає:

$$K_{Ic}^{стат} \equiv 0,6 K_{Ic}^{динам} . \quad (8)$$

З ударною в'язкістю в'язкість руйнування пов'язана емпіричним співвідношенням

$$K_{Ic} = 0,00114 \sqrt{K C U E / (1 - \mu^2)} , \quad (9)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона.

В'язкість руйнування залежить від вмісту домішок в металах, складу легуючих елементів, структури, зовнішнього середовища та інших факторів. При зміцненні металів шляхом введення легувальних елементів в'язкість руйнування зазвичай зменшується.

Збільшення вмісту домішок, особливо водню в сталях та титанових сплавах, знижує K_{Ic} . Тому очищення високоміцних сплавів від шкідливих домішок є важливим напрямком підвищення надійності авіаційних сплавів.

Для сплавів на основі титату при величині відношення $K_{Ic}/\sigma_{0,2} > 0,24$ критична довжина тріщини $l_{кр}$ досягає декількох сантиметрів; при $K_{Ic}/\sigma_{0,2} = 0,08 - 0,24$ величина $l_{кр}$ зменшується до 0,1 - 1,0 см, а при $K_{Ic}/\sigma_{0,2} < 0,8$ величина $l_{кр}$ має значення менше декількох мікрометрів (рис. 9).

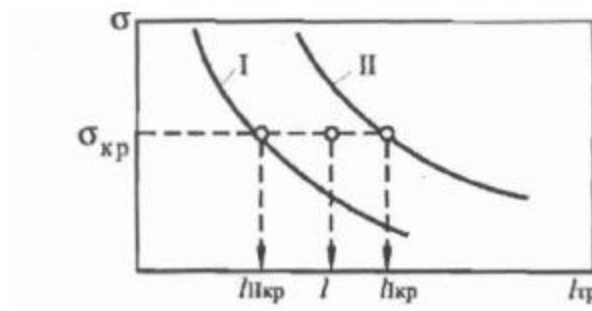


Рис. 9 Критичні розміри тріщини l в матеріалах I і II при зовнішньому навантаженні $\sigma_{кр}$

В зв'язку з цим високоміцні матеріали не завжди задовільняють потребам надійності конструкцій із-за їх зниженої зносостійкості.