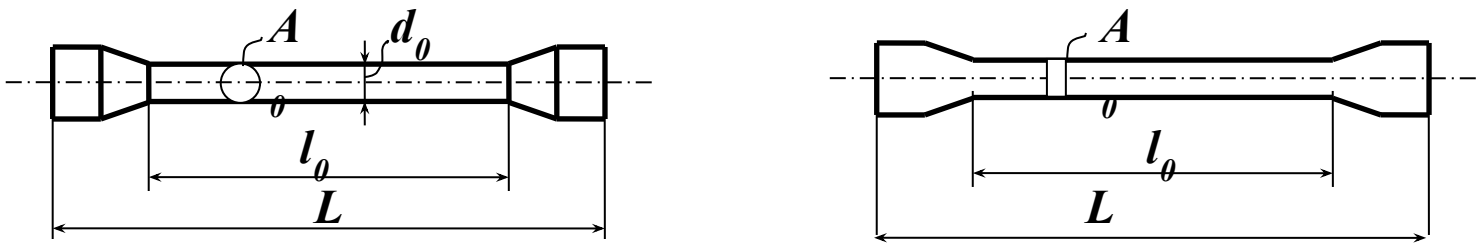
Лекція № 4.
Механічні властивості матеріалів при розтяганні і стисканні

§ 4.1 Випробування матеріалів на розтягнення. Зразки для випробування. Діаграми розтягнення. Визначення механічних характеристик при розтяганні.

Для вивчення властивостей матеріалу і встановлення значення граничних напружень проводять випробування зразків матеріалів на розтягання стискання, зсув, кручення, згинання та твердість, доводячи їх до руйнування. Деталі описи всіх видів механічних випробувань наведені в спеціальних курсах і посібниках з лабораторних робіт з опору матеріалів.

Одним із основних видів випробувань матеріалів є випробування на розтягання, оскільки при цьому виявляються найбільш важливі їхні властивості. З випробуваного матеріалу виготовляють спеціальні зразки, які роблять або циліндричними (рис. 4.1.а), або плоскими (рис. 4.1.б).



а) **б)**

Рис. 4.1

У циліндричних зразках має витримуватись співвідношення між розрахунковою довжиною l_0 та діаметром d_0 : у довгих зразках - $l_0 = 10d_0$, у коротких - $l_0 = 5d_0$.

Враховуючи, що

$$\mathbf{d_0 = \sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} = 1{,}13\sqrt{A_0}},$$

де A_0 – площа поперечного перерізу зразка, маємо:

$\ell_0 = \mathbf{11{,}3\sqrt{A_0}}$ – для довгого;

$\ell_0 = \mathbf{5{,}65\sqrt{A_0}}$ - для короткого.

Ці співвідношення поширюються і на плоскі зразки. Як основні використовують довгі зразки з діаметром $\mathbf{d_0 = 10}$ мм.

Для випробувань на розтягання розривні машини, за допомогою яких визначаються зусилля і відповідні до них деформації зразка у вигляді діаграми $\mathbf{P \div \Delta\ell}$. За окресленням вона схожа на діаграму $\boldsymbol{\sigma_t \div \varepsilon}$. (рис. 4.2), яка характеризує механічні властивості матеріалу і не залежить від розмірів зразків. Значення ординати такої діаграми дістають діленням розтягувальної сили на початкову площу поперечного перерізу зразка ($\boldsymbol{\sigma = P / A_0}$), а абсциси – діленням абсолютних подовжень розрахункової частини зразка на її початкову довжину ($\boldsymbol{\varepsilon = \Delta\ell / \ell_0}$).

На рис. 4.2 зображено типовий вигляд діаграми ($\boldsymbol{\sigma_t \div \varepsilon}$) для маловуглецевої сталі. На початку, пряма **OA**, має місце прямо пропорційна залежність між подовженням зразка та силою, тобто виконується закон Гука.

Визначення 1: напруження, спричинене силою $P_{пг}\,(P_{ну})$, називається границею пропорційності й обчислюється за формулою

$$\sigma_{пг} = \frac{P_{пг}}{A_0} \qquad (\sigma_{ну} = \frac{P_{ну}}{A_0})\,. \tag{4.1}$$

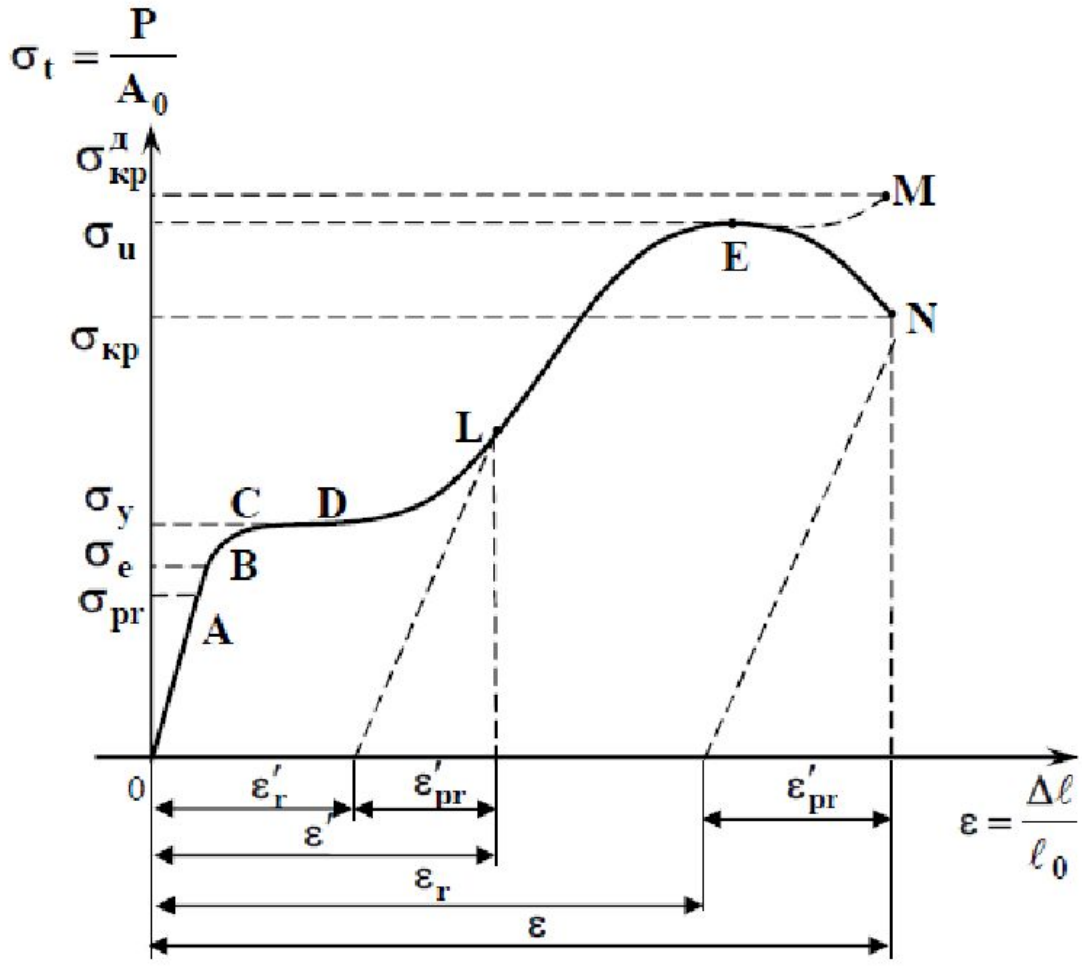


Рис. 4.2

Індекс *t* від першої літери слова *tension* (англ.) – розтягнення.

Визначення 2: найбільше напруження, до якого залишкова деформація при розвантаженні не виявляється, називається границею пружності

$$\sigma_e = \frac{P_e}{A_0} \quad (\sigma_{пр} = \frac{P_{пр}}{A_0}), \qquad (4.2)$$

Індекс *e* від першої літери слова *elastic(англ.) – пружній.*

де P_e ($P_{пр}$) – найбільше значення сили, при якому зразок ще не дає при розвантаженні залишкової деформації. Границя пружності є характеристика не пов'язана з законом Гука і їй відповідає дільниця **AB** на діаграмі.

Визначення 3: границею текучості σ_y (σ_T) зветься найменше напруження, при якому деформація зразка відбувається при сталому значенні розтягувальної сили:

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A_0} \quad (\sigma_T = \frac{P_T}{A_0}), \qquad (4.3)$$

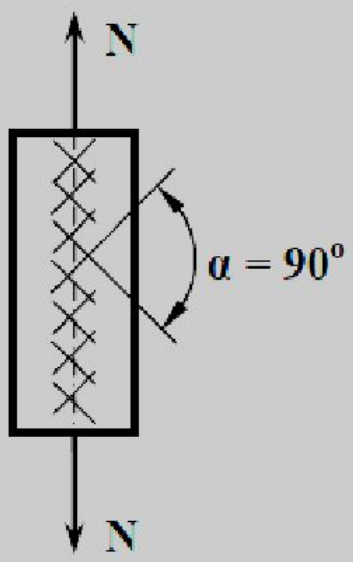
Індекс *y* від першої літери слова *yield(англ.) – текучість.*

де P_y – сталі значення сили, при якій подовження зразка продовжує зростати (ділянка **CD**).

Ділянка **CD** називається площадкою текучості. Такий процес деформації, що має назву текучості матеріалу, супроводжується залишковим (пластичним) подовженням, яке не зникає після розвантаження. Початок пластичної деформації відповідає наставанню деякого критичного стану металу. Окрім залишкових деформацій, підвищується температура зразка і у сталі змінюються електропровідність та магнітні властивості, характерна поява на полірованій поверхні зразків густої сітки ліній. Ці лінії мають назву ліній Чернова-Людерса. Вони нахилені до осі зразка приблизно під кутом 45

градусів і становлять мікроскопічні нерівності, що виникають внаслідок зсувів у тих площинах кристалів, де діють найбільші дотичні напруження.

Після стадії текучості матеріал знову набирає здатності збільшувати опір подальшому деформуванню і сприймає додаткові навантаження (ділянка **DE**).



Ділянка **DE** зветься <u>ділянкою зміцнення</u>.

Визначення 4: напруження, що відповідає максимальній силі, називається тимчасовим опором або границею міцності

$$\sigma_u = \frac{P_u}{A_0} \qquad (\sigma_B = \frac{P_{max}}{A_0}). \qquad \textbf{(4.4)}$$

Індекс ***u*** від першої літери слова *ultimate (англ.) – граничний.*

Після досягнення розтягувальної сили значення P_u під час подальшого розтягання зразка деформація відбувається, в основному, на невеликій довжині зразка. Це призводить до місцевого звуження діаметру зразка у вигляді шийки (рис. 4.3) і до зменшення сили P.

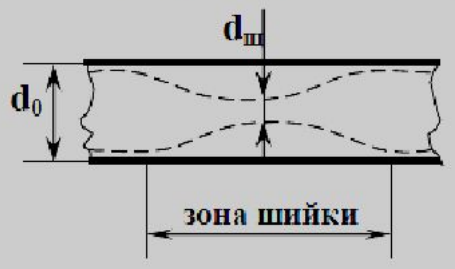


Рис. 4.3

Позначивши через $P_{кр}$ силу в момент розриву, матимемо

$$\sigma_{кр} = \frac{P_{кр}}{A_0}. \qquad (4.5)$$

Основними характеристиками пружності та міцності матеріалів, що використовуються в практичних розрахунках, є границя пружності σ_{pr}, границя текучості σ_y та тимчасовий опір (границя міцності) σ_u. Для маловуглецевої сталі **Ст20**, ці характеристики такі: $\sigma_{pr} = 200$ **МПа**, $\sigma_y = 220 \div 260$ **МПа**, $\sigma_u = 340 \div 420$ **МПа**.

Зауваження 1: якщо при зусиллі розтягання, що спричиняє напруження не вище за границю пружності, припинити навантажування зразка, а потім розвантажити зразок, то процес розвантаження зобразиться на діаграмі лінією **OA**. Крім того, бачимо, що

$$E = tg\alpha = \sigma_{пр} / \varepsilon = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = const\ , \qquad (4.6)$$

тобто модуль Юнга або пружності 1-го роду дорівнює тангенсу кута нахилу прямолінійної ділянки діаграми до осі абсцис.

Якщо до початку розвантаження напруження у зразку перевищує границю пружності, наприклад, точка **L** на діаграмі, то після розвантаження деформація зразка ε', яка була до початку розвантаження, зникає не повністю. Зникла пружна частина деформації позначається ε'_{pr}, а та частина пластичної деформації, що залишилась – ε'_r, тобто

$$\varepsilon' = \varepsilon'_{pr} + \varepsilon'_r \qquad (4.7)$$

Крім наведених характеристик міцності матеріалу при випробуванні на розтягання визначають також <u>відносне остаточне подовження зразка</u> після розриву.

$$\varepsilon_r = \frac{\ell_1 - \ell_0}{\ell_0} \cdot 100\%, \quad \left(\delta = \frac{\ell_1 - \ell_0}{\ell_0} \cdot 100\%\right), \qquad (4.8)$$

Індекс r від першої літери слова *rest (англ.) – залишок.*

де ℓ_1 – розрахункова довжина зразка після розриву.

<u>Зауваження 2</u>: відносне подовження матеріалу характеризує пластичність матеріалу. Залежно від цього подовження матеріали поділяють на <u>пластичні</u> і <u>крихкі.</u> Для пластичних матеріалів можна умовно вважати, що $\delta > 5\%$, для крихких – $\delta < 5\%$.

До пластичних матеріалів належить маловуглецева сталь ($\delta_r = 35\%$), до крихких – чавун ($\varepsilon_r = 1\%$), скло, камінь тощо.

<u>Зауваження 3</u>: другою характеристикою пластичності матеріалу є <u>відносне остаточне звуження зразка</u> після розриву.

$$\psi_r = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\%, \qquad (4.9)$$

де A_1 – площа поперечного перерізу в найбільш тонкому місці шийки після розриву. Для сталі **Ст30** значення ψ дорівнює **50 – 60%.**

Зауваження 4: для матеріалів, що не мають площадки текучості, границю текучості визначають умовно як напруження, при якому залишкова деформація є величиною, регламентованою держаним стандартом або технічними умовами. Згідно з **ГОСТ 1497-84**, залишкова деформація становить **0,2%** від вимірюваної довжини зразка. Умовну границю текучості позначають нижнім індексом **0,2** – $\sigma_{0,2}$.

Зауваження 5: умовною границею пружності називають найменше напруження при якому залишкова деформація досягає заданого значення (як правило, **0,001 ÷ 0,05%** від вимірюваної довжини зразка). Їх позначають, наприклад, $\sigma_{0,05}$.

Зауваження 6: оскільки після утворення шийки напруження по довжині зразка розподіляються нерівномірно, тоді відповідно до дійсної діаграми розтягання зразка (штрихова лінія **ЕМ**, рис. 4.2) відносне звуження поперечного перерізу шийки $\psi_ш$ та дійсне критичне напруження $\sigma^д_{кр}$ дорівнюють:

$$\psi_ш = \frac{A_0 - A_ш}{A_0} 100\% , \qquad (4.10)$$

$$\sigma^д_{кр} = \frac{P_{кр}}{A_ш}. \qquad (4.11)$$

Діаграма розтягнення дає змогу визначити ще й енергетичні характеристики матеріалу. Робота, яку витрачено на розрив зразка буде дорівнювати площі діаграми розтягання $P \div \Delta\ell$.

У межах пружності повна робота деформації визначається площею трикутника (рис 3.а):

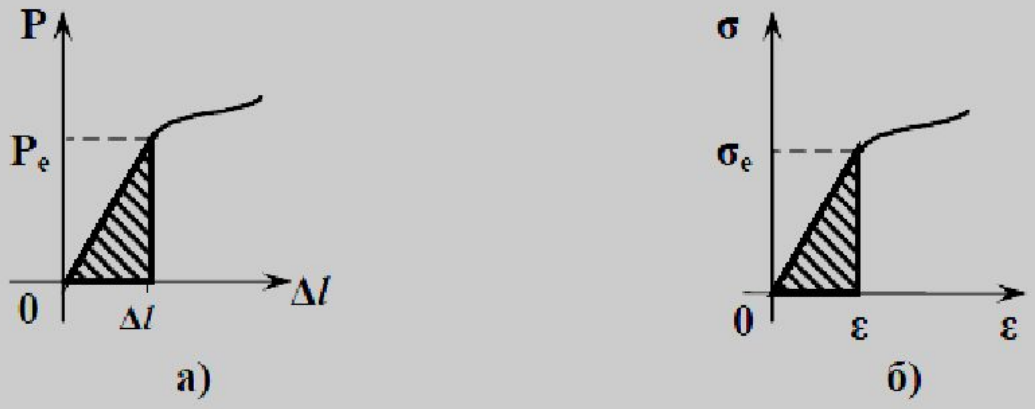


Рис. 4.4

$$U_e = \frac{P_e \cdot \Delta l}{2} \quad . \qquad \textbf{(4.12)}$$

Поділивши роботу деформації на об'єм робочої частини зразка, знайдемо питому роботу деформації (рис. 4.4 б)

$$u_e = \frac{U_e}{V} = \frac{P_e \cdot \Delta \ell}{2A_0 \ell_0} = \frac{\sigma_e \cdot \varepsilon}{2} \quad . \qquad \textbf{(4.13)}$$

§4.2 Випробування на стискання. Діаграма стискання. Механічні характеристики матеріалу на стискання

Для на стискання застосовують короткі циліндричні або призматичні зразки (рис. 4.5).

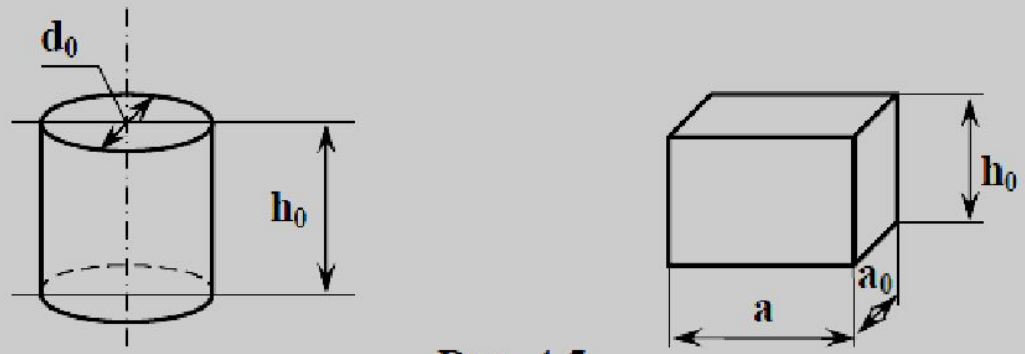


Рис. 4.5

Висота цих зразків не повинна перебільшувати характерні розміри поперечного перерізу, тобто

$$h_0 \le 2d_0, \qquad h_0 \le 2a_0 . \qquad (4.14)$$

Для пластичних матеріалів модуль пружності, границя пружності та границя текучості при стисканні приблизно ті самі, що і при розтяганні. З діаграми стискання зразка не можна здобути характеристики умовної границі міцності, а також характеристики, аналогічні відносному подовженню і відносному звуженню при розриві.

Випробуванням на стискання підлягають, як правило, крихкі матеріали, що краще чинить опір стисканню, ніж розтяганню. Тертя, що виникає під час випробування на стискання між плитами машини і торцями зразка істотно впливає на результати випробування і на характер руйнування.

Якщо для пластичних матеріалів напруження, що відповідають руйнівній силі дістати не можна (рис. 4.6 а) (оскільки зразок перетворюється на диск), то для крихких матеріалів руйнування відбувається внаслідок зсуву однієї частини зразка відносно іншої.

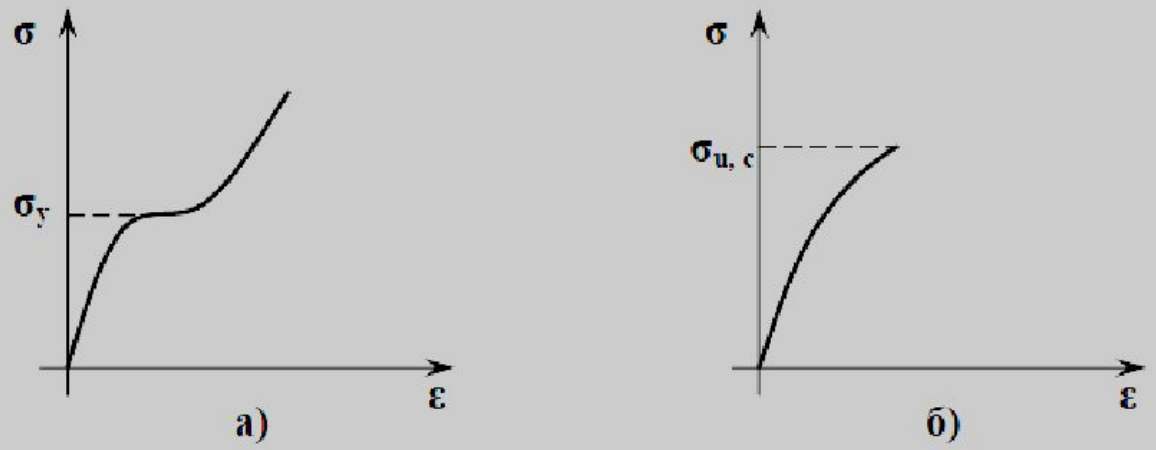


Рис. 4.6

Границя міцності при розтяганні позначається $\sigma_{u,t}$, при стисканні – $\sigma_{u,c}$.

§4.3 Порівняння результатів випробувань на розтягання і стискання. Недосконалість структури кристалів матеріалу. Механізм пластичної деформації. Дислокація. Полоси зсуву. Ефект Баушингера. Поняття про допустимі напруження

Порівняння результатів випробувань на розтягання і стискання дозволяє зробити наступні висновки:

а) для більшості пластичних конструкційних матеріалів за значенням границі текучості

$$\sigma_{y,c} \cong \sigma_{y,t}; \qquad (4.15)$$

б) для крихких матеріалів за значенням границі міцності, якщо

$$K = \frac{\sigma_{u,t}}{\sigma_{u,c}}, \qquad (4.16)$$

тоді для чавуна – $K = 0{,}2 \div 0{,}4$, для кераміки – $K = 0{,}1 \div 0{,}2$, для кварцу – $K = 0{,}033$.

В якості небезпечного напруження приймається:

а) для пластичних матеріалів –

$$\sigma_н = \sigma_y \quad (\sigma_н = \sigma_т), \qquad (4.17)$$

щоб запобігти виникнення суттєвих остаточних деформацій;

б) для крихких матеріалів –

$$\sigma_н = \sigma_u \quad (\sigma_н = \sigma_в). \qquad (4.18)$$

Отже допустимі напруження, при яких забезпечується надійна робота машин, конструкцій, можна визначити за формулою

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_н}{n_{adm}}, \qquad ([\sigma] = \frac{\sigma_н}{n}) \qquad (4.19)$$

де $n > 1$ – коефіцієнт запасу міцності, що показує, у скільки разів допустимі напруження нижче ніж граничні.

Таким чином:

а) для пластичних матеріалів –

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{n_y}, \quad ([\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}), \tag{4.20}$$

де n_y (n_T) – коефіцієнт запасу по границі текучості;

б) для крихких матеріалів

$$\sigma_{adt} = \frac{\sigma_н}{n_u} \quad ([\sigma] = \frac{\sigma_в}{n_в}), \tag{4.21}$$

де n_u $(n_в)$ – коефіцієнт запасу по границі міцності.

Метали, як відомо, мають кристалічну структуру і складаються з багатьох кристалів (кристаліту) неправильної форми, які утворюються з центрів кристалізації в процесі отвердіння розплаву. В свою чергу атоми матеріалів складають його кристалічну решітку. У вузлах решітки розташовані іони. Коли метал деформується, відстані між атомами під дією зовнішніх сил змінюється у певних напрямах і виникають сили притягання й відштовхування. Залежність між малими зміщеннями атомів та сила взаємодії можна вважати лінійною (закон Гука).

Якщо зовнішні сили збільшуються, тоді в зернах металу відбуваються зміщення однієї частини відносно іншої, що зветься ковзанням. Поява полос зсувів у кристалічній решітці призводить до пластичної деформації. Точні теоретичні розрахунки дозволяють визначити максимальні дотичні напруження, при яких з'являються пластичні деформації. Але в дійсності вона починається, коли напруження в сотні разів менші, ніж дає теорія. Така розбіжність пояснюється тим, що перехід атомів з одного положення в інше здійснюється не одночасно, а за хвильовими аналогом, з місцевим викривленням решітки, що звуться дислокаціями.

Попереднє витягування сталі у холодному стані при напруження, що перевищують границю текучості матеріалу (наклеп), сильно підвищує границю текучості пластичного матеріалу, але знижує залишкове подовження після розриву. Якщо при розтяганні границя текучості була $\sigma_{y,t}$, тоді при стисканні цього ж матеріалу границя текучості $\sigma_{y,c}$ зменшується тим більше, чим більше було зміцнення. Описане явище має назву <u>ефекту Баушингера</u> (рис. 4.7).

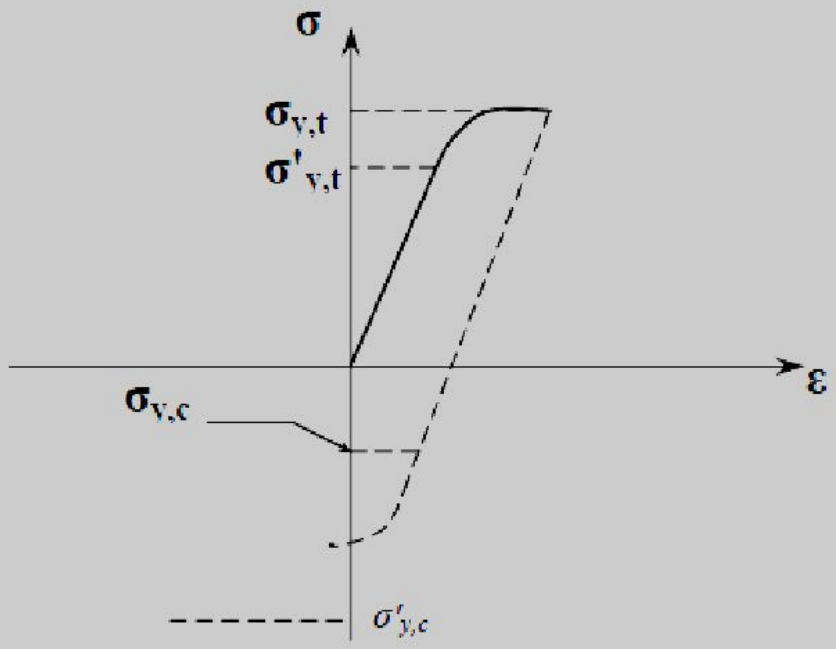


Рис. 4.7

§ 4.4. Вплив температури та швидкості навантаження на механічні властивості матеріалу.

Чим вища швидкість деформування, тим вищі границі текучості та тимчасовий опір.

Всі механічні характеристики матеріалів істотно залежно від температури.

Жаростійкістю називається властивість матеріалу протистояти хімічному руйнуванню поверхні при високих температурах, а жароміцністю - здатність зберігати при високих температурах механічні властивості.

§ 4.5. Повзучість. Тривала міцність. Границя тривалої міцності. Концентрація напружень. Вплив концентрації напружень при ударних і повторно змінних навантаженнях.

Повзучість матеріалів – характеризує зростання пластичної деформації з часом при постійному напруженні, що не причиняє пластичних деформацій при короткочасній дії навантаження.

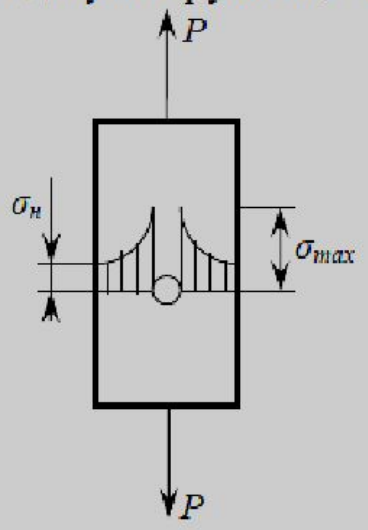
Границею повзучості називається найбільше напруження, при якому швидкість або деформація повзучості при даній температурі за певний проміжок часу не перевищує встановленого значення. Наприклад, $\sigma_{0.2/100}^{700}$ означає границю повзучості при допуску на деформацію 0.2% за 100 годин випробування при температурі 700 °С.

Границею тривалої міцності називається напруження, що спричинює розрив зразка після заданого строку безперервної дії цього напруження при певній температурі. Наприклад, σ_{1000}^{700} - границя тривалої міцності за 1000 годин випробування при температурі 700 °С.

Релаксацією напружень називається зменшення їх з часом унаслідок повзучості в навантаженій деталі при незмінній її новій деформації.

Матеріали називають холодноламкими, які стають крихкими при низьких температурах.

Різкі зміни площі поперечного перерізу внаслідок наявності поперечних отворів, викруток, канавок, та надрізів призводять до нерівномірного розподілу напружень, спричиняють концентрацію напружень.



$$\sigma_н = \frac{N}{F_{\min}}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_н}$$ - коефіцієнт концентрації

В пластичних матеріалах пластичність сприяє вирівнюванню напружень. Тому при статичному навантаженні такі матеріали мало чутливі до концентрації напружень. При ударних та повторно змінних навантаженнях, коли деформації швидко змінюються в часі, напруження не встигають вирівнюватись, і шкідливий вплив концентрації напружень зберігається.