

## Лекція №11

### Тема 6.3 Визначення основних механічних характеристик матеріалів при розтяганні і стисканні

Говорячи про напружено-деформований стан тіла в точці, ми розуміємо, що він визначається в тому числі і фізико-механічними властивостями матеріалу. Скажімо, при визначенні напружень і деформацій в стержнях опираються на певну функціональну залежність між напруженнями і деформаціями, а саме – на закон Гука. Основними характеристиками матеріалу в цьому законі є модуль пружності  $E$  або  $G$  і коефіцієнт Пуассона  $\mu$ . Визначають ці пружні сталі експериментально, і для різних матеріалів ці характеристики різні.

Для розв'язання практичних задач з використанням умов міцності і жорсткості (див. тему 5.3) необхідно знати характеристики міцності і пластичності матеріалів. З метою їх визначення матеріали випробовують на розтягання, стискання, згинання, кручення, зсув і т.п. Для цього випробовують зразки, форма, розміри, способи виготовлення яких регламентуються спеціальними стандартами. Часто доводиться виконувати так звані натурні випробування, коли готовий виріб чи елемент конструкції піддають таким навантаженням, які матимуть місце в реальних умовах експлуатації.

Номенклатура випробувань матеріалів для визначення їх механічних властивостей досить широка. І одним з основних видів випробувань є випробування розтяганням. Вони дають можливість встановити найважливіші механічні характеристики конструкційних матеріалів.

#### 6.3.1. Діаграма розтягання

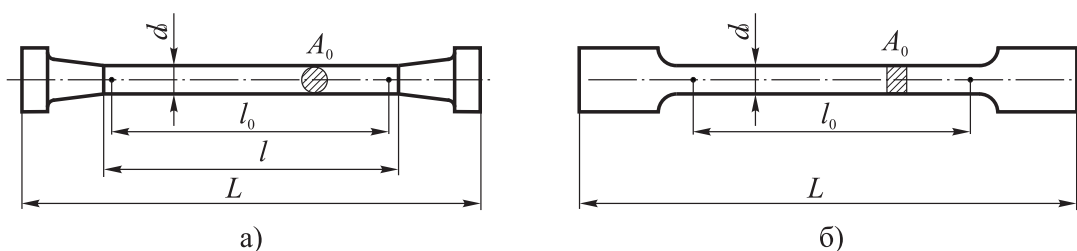
*Діаграмою розтягання називають графік залежності між напруженнями, що виникають у випробувальному зразку при розтяганні, і його деформацією від початку деформування до повного руйнування зразка.*

Методика випробувань на розтягання регламентована ГОСТ 1497-84 [6].

**Зразки для випробувань.** Згідно зі стандартом випробування проводять переважно на циліндричних (рис. 6.6 а) або, коли випробовують листові матеріали, – на плоских зразках (рис. 6.6 б).

В циліндричних зразках мають витримуватись певні співвідношення між діаметром  $d_0$  та розрахунковою довжиною робочої частини зразка  $l_0$ :  $l_0 = 10d_0$  для довгих зразків і  $l_0 = 5d_0$  – для коротких. Основними вважаються зразки, в яких діаметр  $d_0 = 10$  мм і розрахункова довжина  $l_0 = 100$  мм або 50 мм. Стандарт допускає використання зразків з іншим діаметром, але за умови

дотримання вказаних співвідношень діаметра і розрахункової довжини. Такі зразки називають *пропорційними*.



**Рис. 6.6. Зразки для випробувань на розтягання: а – циліндричний; б – плоский**

Розрахункову довжину можна також визначати через площу перерізу зразка. Враховуючи, що  $A_0 = \pi d_0^2/4$ , отримаємо:

- для довгих зразків  $l_0 = 11,3\sqrt{A_0}$  ;
- для коротких зразків  $l_0 = 5,65\sqrt{A_0}$  .

Цими співвідношеннями користуються і при визначенні розмірів плоских зразків.

**Випробувальне обладнання.** Для випробувань на розтягання використовують спеціальні *розривні машини*, оснащені електромеханічним або гідравлічним приводом для навантажування зразка, захватами для його фіксації, а також системою вимірювання та реєстрації експериментальних даних. Сучасні розривні машини, як правило, оснащені високоточною комп'ютерною системою збору та обробки інформації, засобами візуалізації експериментальних результатів, забезпечують широкий діапазон режимів навантажування. На рис. 6.7 зображені розривні машини, що виробляються провідними компаніями в галузі розробки та виготовлення випробувального обладнання.



**а)**



**б)**

**Рис. 6.7. Розривні машини: а) INSTRON (США); б) MTS (США)**

В процесі випробувань на розтягання вимірюється сила, прикладена до зразка в даний момент часу, і відповідне їй абсолютне видовження зразка. Для цього розривні машини оснащуються спеціальними силомірними пристроями – динамометрами – і засобами вимірювання деформацій.

Способи вимірювання деформацій залежать від необхідної точності отримуваних результатів. Найпростіше визначати видовження зразка за величиною переміщення рухомого захвата, але точність вимірювання деформації таким способом невисока, адже переміщення рухомого захвата, крім видовження робочої частини зразка з початковою довжиною  $l_0$  (рис. 6.6), включає також деформації перехідних ділянок зразка і самих захватів, переміщення, пов'язані з вибиранням зазорів у з'єднаннях і т. ін. Для вимірювань деформацій з максимальною точністю застосовують спеціальні пристрої – тензометри або екстензометри, – які дозволяють визначати видовження тільки робочої частини зразка (рис. 6.8).



Рис. 6.8. Навісний тензометр виробництва фірми INSTRON

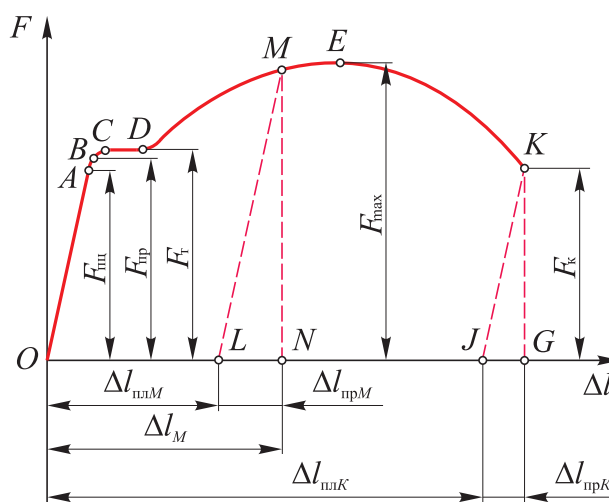


Рис. 6.9. Діаграма розтягання маловуглецевої сталі в абсолютних координатах

**Основні механічні властивості матеріалу при розтяганні.** За результатами вимірювань сили і відповідних їй деформацій зразка можна побудувати початкову діаграму розтягання, на якій по осі ординат відкладають в певному масштабі виміряну силу, а по осі абсцис – відповідне видовження робочої частини зразка. Слід зазначити, що ця діаграма будується автоматично самописними приладами, якими оснащені сучасні машини, або виводиться на дисплей комп'ютера.

На рис. 6.9 зображена *діаграма розтягання в абсолютних координатах*, типова для маловуглецевих сталей.

На цій діаграмі можна виділити характерні ділянки і точки, які відповідають певним стадіям деформування зразка.

*Стадія пропорційного деформування*, коли матеріал зразка підлягає закону Гука, відповідає ділянці  $OA$  (рис. 6.9). Тут  $F_{\text{пц}}$  – сила, за якої закон Гука припиняє свою дію.

До точки  $B$  на діаграмі матеріал зразка залишається пружним. Цій точці відповідає сила  $F_{\text{пр}}$ . Отже ділянка  $OB$  діаграми відповідає *стадії пружного деформування* зразка.

При подальшому розтяганні зразка діаграма підіймається до точки  $C$ , після якої починається горизонтальна ділянка  $CD$ . Деформація зразка відбувається за постійної сили  $F_{\text{т}}$ , при цьому з'являються залишкові або пластичні деформації, які не зникають після повного розвантаження зразка. Такий стан матеріалу називається *текучістю*. Ділянка  $CD$  діаграми називається *площадкою текучості*.

**Примітка 6.2.** Слід відзначити, що наявність площадки текучості характерна не для всіх матеріалів. Вона відсутня на діаграмах розтягання, наприклад, легованих сталей, титанових сплавів, багатьох інших матеріалів.

За стадією текучості настає *стадія зміцнення*, яка відповідає ділянці  $DE$  діаграми. Матеріал зразка відновлює здатність опиратися деформуванню. Подальше деформування відбувається при зростанні сили аж до деякої максимальної величини  $F_{\text{max}}$  (точка  $E$  на діаграмі розтягу).

До точки  $E$  деформація робочої частини зразка була рівномірною (див. примітка 4.12, лекція 8). Після досягнення сили  $F_{\text{max}}$  деформація локалізується на незначній частині робочої довжини зразка, що призводить до утворення на зразку місцевого звуження – *шийки* (рис. 6.10).



Рис. 6.10. Зразок з шийкою

Подальше деформування зразка (ділянка  $EK$ ) супроводжується зменшення сили, прикладеної до зразка. Точка  $K$  діаграми розтягу відповідає моменту повного руйнування зразка ( $F_{\text{к}}$  – сила, за якої відбулося руйнування).

**Розвантажування і повторне навантажування.** Якщо навантажити зразок силою певної величини, не доводячи його до руйнування, а потім повністю розвантажити, то, залежно від виду набутої на початок розвантаження деформації, отримаємо різні результати. Так, якщо досягнута сила буде меншою від  $F_{\text{пц}}$  (див. рис. 6.9), тобто навантаження було припинене на стадії пропорційного деформування, то розвантаження відбудеться за тим самим законом, що й навантаження. На діаграмі розтягання цей процес відобразиться лінією, що практично збігатиметься з лінією  $OA$ . Після повного розвантаження ми повернемося в точку  $O$  діаграми, а значить жодних залишкових деформацій зразка ми не виявимо, що й зрозуміло, адже ділянка  $OA$  діаграми розтягання відповідає стадії пружного пропорційного деформування матеріалу.

Іншу картину спостерігатимемо, коли сила перевищуватиме  $F_{пр}$ , і в зразку з'являться пластичні деформації. Так, якщо навантажити зразок до точки  $M$  на діаграмі розтягання (рис. 6.9), то розвантаження відбуватиметься вздовж лінії  $ML$ , паралельної прямолінійній ділянці  $OA$ , а не пройденим шляхом – вздовж лінії  $MDCBAO$ . Це легко пояснюється природою деформацій, які на момент початку розвантаження виникли у зразку. Повне видовження робочої частини зразка  $\Delta l_M$  включає як пружну  $\Delta l_{прM}$ , так і пластичну  $\Delta l_{плM}$  деформації:

$$\Delta l_M = \Delta l_{прM} + \Delta l_{плM}.$$

Пластичні або залишкові деформації – це набуті, не зникаючі, деформації, в той час, як пружні – зникаючі деформації. Як і на стадії пружного пропорційного деформування, так і на будь-якій іншій стадії, аж до повного руйнування зразка, пружні деформації підлягають закону Гука. Тому й розвантаження відбувається за тим самим законом, що й на стадії пружного пропорційного деформування.

Виходячи з вище означеного, після руйнування зразка його залишкове абсолютне видовження  $\Delta l_{плK}$  буде меншим від повного видовження, що відповідає точці  $K$ , на величину зникаючої пружної деформації  $\Delta l_{прK}$ .

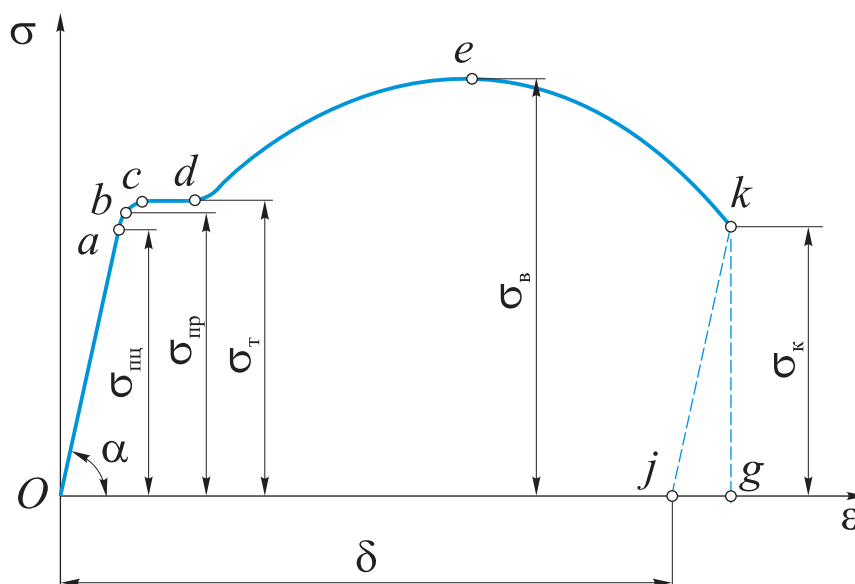
Повернемося до зразка, який був повністю розвантажений з точки  $M$ . Повторне його навантаження відбуватиметься практично вздовж тієї ж лінії  $LM$ , що й при розвантаженні. Причому, стадія пружного пропорційного деформування відповідатиме тепер ділянці  $LM$  діаграми повторного розтягу, а подальше деформування зразка в точності описуватиметься ділянкою  $MEK$  діаграми розтягання.

З наведених спостережень можна зробити ряд висновків. По-перше, при повторному навантажуванні, коли зразок попередньо був zdeформований пластично, початок координат діаграми розтягання слід перенести в точку  $L$ . По-друге, абсолютна залишкова деформація робочої частини такого зразка буде меншою на величину  $\Delta l_{плM}$ . По-третє, текучість матеріалу почнеться за сили, яка буде більшою від сили  $F_T$ , отриманої для попередньо недеформованого зразка. Тобто, матеріал зразка стає міцнішим, але одночасно й більш крихким. Таке явище називають *наклепом*, і воно лежить в основі цілого ряду технологічних процесів деформаційного зміцнення деталей, відіграючи тут позитивну роль. Проте в інших випадках це явище небажане, оскільки може викликати зменшення ресурсу елементів конструкцій, і його вплив намагаються зменшувати.

**Діаграма розтягання у відносних координатах. Механічні характеристики матеріалів.** Щоб виключити вплив розмірів зразка на отримувані механічні характеристики матеріалу, діаграму розтягання в абсолютних координатах  $F - \Delta l$  (рис. 6.9) перебудовують у координатах  $\sigma - \varepsilon$  (напруження – лінійна деформація). Для цього силу для будь-якої точки

діаграми ділять на початкову площу перерізу зразка:  $\sigma = F/A_0$ , а відповідне абсолютне видовження робочої частини зразка ділять на початкову розрахункову довжину:  $\varepsilon = \Delta l/l_0$ .

Діаграма розтягання у відносних координатах, що відповідає початковій діаграмі (рис. 6.9), зображена на рис. 6.11.



**Рис. 6.11. Умовна діаграма розтягання**

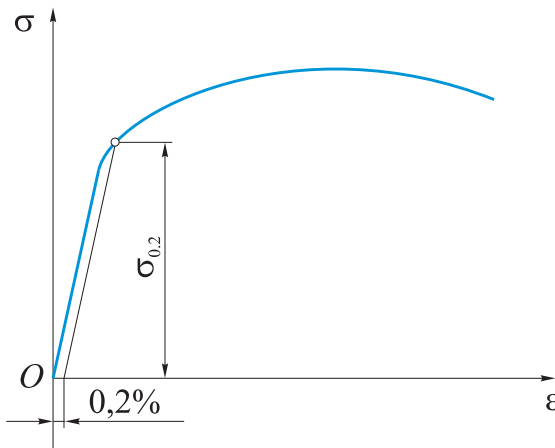
Оскільки початкова площа перерізу зразка  $A_0$  і його розрахункова довжина  $l_0$  є величинами сталими, то отримана діаграма розтягання у відносних координатах (рис. 6.11) подібна до початкової діаграми (рис. 6.9), а значить всі точки і ділянки цієї діаграми мають той самий фізичний зміст, що й відповідні точки і ділянки початкової діаграми. За цією діаграмою визначають основні механічні характеристики матеріалу.

*Характеристики міцності:*

- *границя пропорційності*  $\sigma_{\text{мц}} = F_{\text{мц}}/A_0$  – це найбільше напруження, до якого виконується закон Гука (точка  $a$  на діаграмі розтягання);
- *границя пружності*  $\sigma_{\text{пр}} = F_{\text{пр}}/A_0$  – це напруження, до якого залишкова деформація при розтяганні не виявляється (точка  $b$  на діаграмі розтягання);
- *границя текучості*  $\sigma_{\text{т}} = F_{\text{т}}/A_0$  – це напруження, за якого деформування зразка відбувається при постійному зусиллі (ділянка  $c-d$  на діаграмі розтягання);
- *границею міцності або тимчасовим опором матеріалу* називається напруження, що відповідає максимальній силі, яку може витримати зразок при розтяганні:  $\sigma_{\text{в}} = F_{\text{в}}/A_0$  (точка  $e$  на діаграмі розтягання).



Деякі з вказаних характеристик міцності потребують певних коментарів. По-перше, сформульоване означення для границі текучості справедливе лише для матеріалів, діаграма розтягання яких має площадку текучості. Якщо площадка текучості відсутня, то вводиться умовна границя текучості  $\sigma_{0,2}$  – напруження, за якого залишкова деформація складає 0,2% від розрахункової довжини зразка. Методику визначення умовної границі текучості ілюструє схема, зображена на рис. 6.12.



**Рис. 6.12.** До методики визначення умовної границі текучості матеріалу

По-друге, оскільки точно встановити напруження, за яких порушується закон Гука (границя пропорційності) чи починається стадія пружно-пластичного деформування (границя пружності), досить складно, вводяться поняття *умовної границі пропорційності* – найменшого напруження, за якого залишкова деформація складає порядку 0,002% від розрахункової довжини зразка, – і *умовної границі пружності* – найменшого напруження, за якого залишкова деформація знаходиться в межах 0,001 – 0,05% від розрахункової довжини зразка.

*Характеристики пластичності:*

- *відносне видовження після розриву  $\delta, \%$*  (див. рис. 6.11) – це відношення приросту розрахункової довжини зразка після розриву до його початкової довжини:

$$\delta = \frac{\Delta l_0}{l_0} \cdot 100\% . \quad (6.14)$$

Тут  $\Delta l_0$  – суть залишкове абсолютне видовження  $\Delta l_{плк}$  (рис. 6.9).

- *відносне звуження зразка  $\Psi, \%$*  – це відношення абсолютного зменшення площі поперечного перерізу зразка після розриву (в шийці) до початкової площі його перерізу:

$$\Psi = \frac{\Delta A_0}{A_0} \cdot 100\% . \quad (6.15)$$

За характеристиками пластичності судять про пластичність матеріалу.

***Матеріал вважається пластичним, коли залишкове видовження після розриву  $\delta > 5\%$ , а коли  $\delta < 5\%$  – то матеріал вважається крихким.***

*Модуль пружності за розтягання.*

На ділянці  $Oa$  умовної діаграми розтягання, де виконується закон Гука, залежність між напруженнями і деформаціями пропорційна. Можна записати, що  $\operatorname{tg}\alpha = \sigma/\varepsilon$  (див. рис. 6.11). Тобто

$$\operatorname{tg}\alpha = E. \quad (6.16)$$

*Модуль пружності за розтягання дорівнює тангенсу кута нахилу прямолінійної ділянки діаграми розтягання, побудованої в координатах  $\sigma \sim \varepsilon$ , до осі абсцис.*

**Діаграма дійсних напружень.** Умовна діаграма розтягання, зображена на рис. 6.11, носить таку назву цілком обґрунтовано. Умовність її полягає у способі визначення напружень, коли зусилля в зразку, що виникає на будь-якій стадії деформування, ділиться на початкову площу перерізу зразка  $A_0$ . Але за рахунок поперечної деформації площа перерізу зразка буде постійно зменшуватись, і особливо інтенсивно після утворення шийки.

Якщо зусилля поділити на дійсну площу зразка, то отримаємо дійсні напруження, а побудована за цими даними діаграма суттєво відрізнятиметься від умовної діаграми розтягання (рис. 6.13).

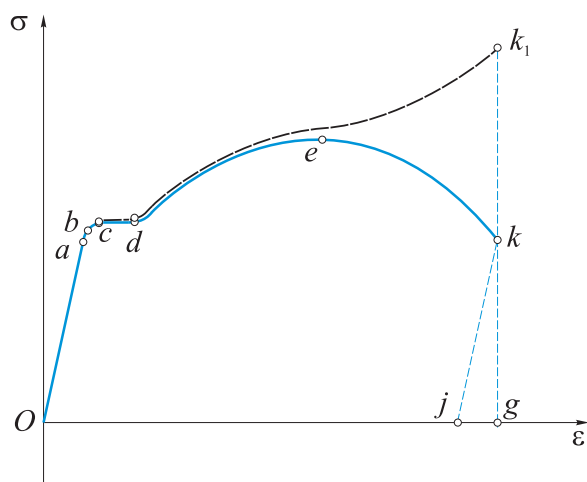


Рис. 6.13. Діаграма дійсних напружень

Як бачимо, спадаюча після точки  $e$  ділянка на діаграмі дійсних напружень відсутня. Опір матеріалу деформуванню зразка зростає аж до моменту його руйнування. Дійсна границя міцності матеріалу, яка відповідає точці  $k_1$  діаграми, набагато перевищує технічну границю міцності – тимчасовий опір  $\sigma_B$ .

Проте визначають механічні характеристики матеріалу за умовною діаграмою розтягання. Ці дані цілком задовольняють потреби інженерних розрахунків.

Побудувати діаграму дійсних напружень значно складніше, і дані, отримані з її допомогою, застосовують переважно для теоретичних досліджень.

**Логарифмічна деформація.** Як і у випадку з напруженнями, відносне видовження  $\delta$  і відносне звуження  $\Psi$  зразка після розриву до певної міри є умовними величинами. Адже їх визначають, відносячи приріст довжини зразка до початкової його довжини, а зменшення площі – до початкової площі перерізу зразка. Насправді довжина робочої частини зразка, де відбувається пластична деформація, постійно змінюється, як змінюється і площа її перерізу. Тому



коректніше розглядати приріст довжини  $l$  зразка в даний момент часу як нескінченно малу величину  $dl$ , а зменшення площі перерізу  $A$  – як  $dA$ . Тоді дійсне відносне видовження зразка знайдемо як інтеграл

$$e = \int_{l_0}^{l_K} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_K}{l_0}, \quad (6.17)$$

де  $l_0$  і  $l_K$  – відповідно початкова і кінцева його довжини.

Оскільки  $l_K = l_0 + \Delta l$ , а  $\delta = \Delta l / l_0$ , отримаємо залежність

$$e = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \delta), \quad (6.18)$$

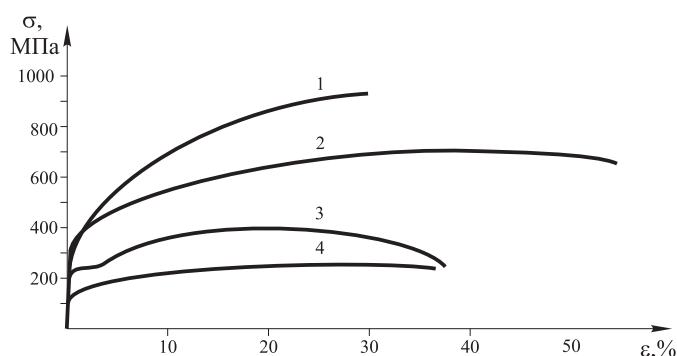
Аналогічно дійсне поперечне звуження

$$\tilde{\Psi} = - \int_{A_0}^{A_K} \frac{dA}{A} = \ln \frac{A_0}{A_K}, \quad (6.19)$$

Оскільки  $A_K = A_0 - \Delta A$ , а  $\Psi = \Delta A / A_0$ , отримаємо

$$\tilde{\Psi} = \ln \frac{A_0}{A_0 - \Delta A} = \ln \frac{1}{1 - \Psi}, \quad (6.20)$$

При малих значеннях відносного видовження  $\delta$  умовна і дійсна, або логарифмічна, деформації практично збігаються. Так при  $\delta = 10\%$  дійсне видовження  $e = 9,95\%$  [1].

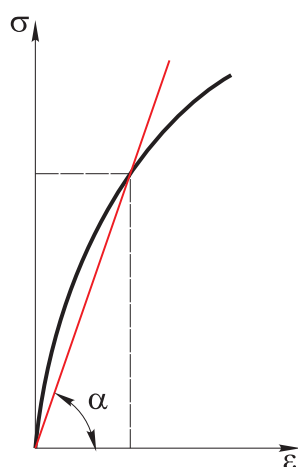


**Рис. 6.14. Діаграми розтягання для різних матеріалів**

Як уже вказувалось, діаграми розтягання для різних матеріалів можуть суттєво відрізнитись. На рис. 6.14 [1] наведені деякі приклади діаграм розтягання для поширених у машинобудуванні металевих сплавів. Судячи з діаграм, всі вони відносяться до пластичних матеріалів, проте механічні характеристики їх значно відрізняються.

Так, для марганцевистої сталі (діаграма 1) границя міцності  $\sigma_B = 916$  МПа, залишкове видовження після розриву  $\delta = 30\%$ ; для нікелевої

сталі (діаграма 2)  $\sigma_B = 715$  МПа,  $\delta = 54\%$ ; для вуглецевої сталі (діаграма 3)  $\sigma_B = 358$  МПа,  $\delta = 38\%$ ; для бронзи (діаграма 4)  $\sigma_B = 247$  МПа,  $\delta = 36\%$ .



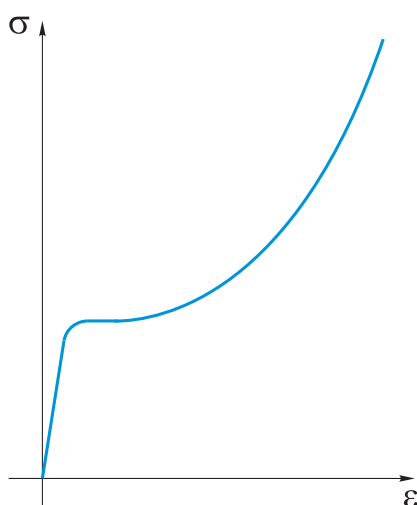
**Рис. 6.15.** Діаграма розтягання для крихких матеріалів

Зразки крихких матеріалів за розтягання руйнуються без помітних залишкових деформацій та без утворення шийки на зразку. Деформації в цьому випадку визначають за законом Гука. Характерною для багатьох крихких матеріалів є, насправді, відсутність прямолінійної ділянки на діаграмі розтягання (наприклад, для сірих чавунів). В якості модуля пружності тоді беруть тангенс кута нахилу прямої, що проходить через початок координат і точку на діаграмі, що відповідає напруженню, за якого визначають деформацію. Такий модуль пружності називають *січним модулем пружності* (рис. 6.15).

### 6.3.2. Випробування на стискання

Ці випробування проводять на універсальних машинах або спеціальних пресах, поміщаючи зразок між паралельними навантажувальними плитами машини. Зразки виготовляють у вигляді коротких циліндрів, висота яких не перевищує трьох діаметрів, або кубиків.

Як і за розтягання, пластичні і крихкі матеріали за стискання ведуть себе по-різному.



**Рис. 6.16.** Діаграма стискання маловуглецевої сталі

На рис. 6.16 зображена діаграма стискання, типова для маловуглецевої сталі. Як показують досліди, границі пропорційності, пружності, текучості, а також модуль пружності за стискання приблизно такі ж, як і за розтягання. Що стосується границі міцності, то її встановити неможливо, оскільки зразок не руйнується, перетворюючись на диск, а стисна сила постійно зростає. З цієї ж причини неможливо встановити характеристик пластичності матеріалу.

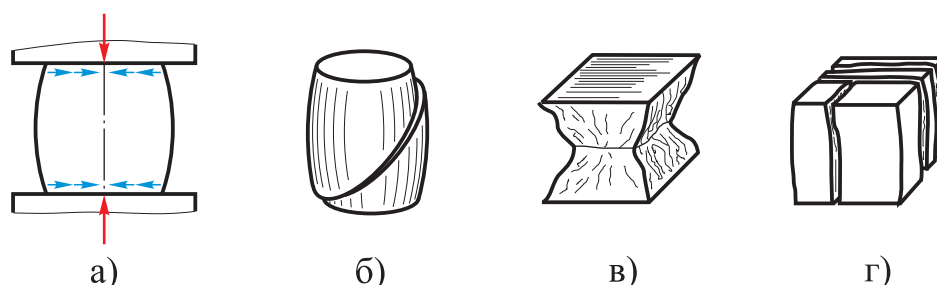
Тому випробування на стискання для пластичних матеріалів нетипові. Обмежуються, як правило, випробуваннями на розтягання, з яких отримують всю необхідну інформацію для інженерних розрахунків.

Зовсім по-іншому ведуть себе при стисканні крихкі матеріали. Як уже відзначалось, основною характеристикою для них є границя міцності. Так за розтягання і стискання границі міцності можуть дуже відрізнятись. Наприклад, для чавунів тимчасовий опір за стиску перевищує тимчасовий опір за розтягу в кілька разів:  $\sigma_B^{ct} / \sigma_B^p = 2,5 \dots 5$ ; для керамічних матеріалів ця розбіжність іще більша:  $\sigma_B^{ct} / \sigma_B^p = 5 \dots 10$ . Існують матеріали, які можуть сприймати за розтягу більші навантаження, ніж за стиску. Це матеріали з волокнистою структурою: деревина, деякі композити, з металів – магній [4].

Зі сказаного випливає, що, на відміну від пластичних матеріалів, для крихких матеріалів випробування на стиск є обов'язковими.

Окремо слід зупинитись на характері руйнування зразків з різних матеріалів за стискання. Крім властивостей матеріалу випробувального зразка, значний вплив має методика випробувань, а також сама форма зразка.

При навантажуванні між торцями зразка і навантажувальними плитами випробувальної машини внаслідок поперечного розширення зразка виникає тертя. Для пластичних матеріалів його вплив проявляється у набутті бічною поверхнею попередньо циліндричного зразка бочкоподібної форми (рис. 6.17 а). Чим вищий коефіцієнт тертя на поверхні контакту, тим інтенсивнішою буде бочкуватість.



**Рис. 6.17. Характер деформування та руйнування зразків після стискання залежно від матеріалу: а – пластичний матеріал; б – чавун; в, г – камінь**

Чавунний зразок при стисканні руйнується за рахунок зсуву по площині, нахиленій під кутом  $45^\circ$  до лінії дії сили (рис. 6.17 б).

Кам'яні зразки, залежно від сили тертя на поверхні контакту з плитою, руйнуються по-різному: за значної сили тертя характер руйнування зразка такий, як показано на рис. 6.17 в, а при зменшенні тертя (наприклад, за допомогою шару парафіну, нанесеного на контактну поверхню) у зразку виникають поздовжні тріщини, які приводять до його розшарування (рис. 6.17 г).

### 6.3.3. Визначення твердості поверхні

В умовах виробництва постійно виникає необхідність оперативного контролю механічних властивостей деталей, які, наприклад, підлягають термічній, хімічній чи механічній обробці. Проводити стандартні випробування, пов'язані з виготовленням зразків та наявністю спеціального обладнання, часто просто неможливо. Проте існує метод непрямого визначення границі міцності матеріалу за числом твердості поверхні деталі. Визначення твердості поверхні деталей є дуже поширеним видом випробувань. За цією характеристикою оцінюють також здатність деталей опиратись зносу, дії циклічних навантажень і т. ін. Як правило в технічних умовах, на кресленнях деталей вказують необхідну величину твердості.

*Твердістю називають здатність матеріалу опиратись проникненню в поверхню тіла інших, більш твердих тіл.*

Існує кілька методів вимірювання твердості.

До найпоширеніших відносяться методи з застосуванням інденторів: загартованої кульки (метод Брінелля); алмазного конуса (метод Роквелла); алмазної піраміди (метод Віккерса).

За Брінеллем величину твердості визначають за розмірами відбитка, що залишається на поверхні деталі після вдавлювання кульки. Число твердості виражають у кгс/мм<sup>2</sup>, але при написанні одиниці не вказують. Якщо твердість складає, наприклад, двісті одиниць за Брінеллем, то це записують як 200 HB.

Коли твердість  $HB \geq 450$ , то методом Брінелля користуватись не можна через значну деформацію самої кульки. В цих випадках користуються або методом Роквелла (HRC), або Віккерса (HRV).

Величина твердості для деяких конструкційних матеріалів пов'язана з границею міцності. Так, для маловуглецевої сталі  $\sigma_B \approx 0,36 HB$ , для сірого чавуну  $\sigma_B = (HB - 40)/6$  [1].

### 6.3.4. Вплив різних факторів на механічні властивості матеріалів

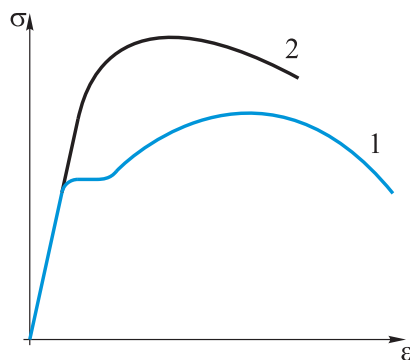
Механічні властивості матеріалів, які вивчаються з використанням стандартних зразків на спеціальному обладнанні, насправді залежать від багатьох технологічних і експлуатаційних факторів, таких як технологія отримання самих матеріалів, термічна і механічна обробка, температура, стан середовища, характер навантаження і т. ін. Далі ми коротко зупинимось на деяких найважливіших факторах з точки зору їх впливу на механічні властивості конструкційних матеріалів, що широко використовуються у машинобудуванні.

**Вплив швидкості навантаження.** Стандартні випробування на розтягання і стискання відбуваються за відносно невисоких швидкостей навантаження, коли наростання деформації зразка або швидкість деформації

$\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$  складає  $0,0002 \dots 0,05 \text{ c}^{-1}$ . Експериментально встановлено, що чим більшою буде швидкість деформації, тим за більших напружень досягатимуться однакові деформації зразка. Тобто опірність матеріалу його деформуванню зі зростанням швидкості навантаження збільшується.

Слід відзначити, що рівень впливу швидкості навантаження дуже залежить від матеріалу. Аморфні матеріали, такі як пластмаси, кераміка, бетони, дещо меншою мірою легкоплавкі метали (олово, свинець), дуже чутливі до зміни швидкості деформації. Так при стисканні свинцевих зразків однакова відносна деформація  $\varepsilon = 0,25$  для швидкості деформації  $\dot{\varepsilon} = 1,25 \text{ c}^{-1}$  досягається за напружень, які вдвічі перевищують напруження для швидкості деформації  $\dot{\varepsilon} = 0,003 \text{ c}^{-1}$  [5].

Для сталей помітний вплив швидкості навантаження спостерігається при її збільшенні щонайменше на 3 порядки. Для маловуглецевої сталі за нормальних температур зростання швидкості навантаження в тисячу разів призводить до зростання границі текучості на третину. На рис. 6.18 показані діаграми розтягання маловуглецевої сталі, отримані для статичного і динамічного навантаження.



**Рис. 6.18.** Діаграма розтягання маловуглецевої сталі:  
1 – статичне навантаження;  
2 – динамічне навантаження

За цими діаграмами можна зробити такі практично важливі висновки:

- крива динамічного розтягання 2 лежить вище від кривої статичного розтягання 1;
- модуль пружності для сталі за статичного і динамічного навантажень не змінюється;
- характеристики міцності – границі пропорційності, пружності текучості, міцності – за динамічного навантаження зростають, а характеристики пластичності – зменшуються

**Вплив температури.** Експериментально показано, що всі механічні характеристики матеріалів суттєво залежать від температури. На рис. 6.19 приведені залежності основних характеристик міцності, пластичності та модуля пружності для маловуглецевої сталі в діапазоні температур  $0 \dots 500^\circ\text{C}$  [4].

Як видно з наведених залежностей, в усьому дослідженому діапазоні температур модуль пружності  $E$  і границя текучості  $\sigma_T$  спадають. Границя міцності  $\sigma_B$  і залишкове видовження  $\delta$  мають складнішу залежність. В діапазоні температур від  $100$  до  $300^\circ\text{C}$  границя міцності помітно зростає, а залишкове видовження – спадає. У вказаному діапазоні температур маловуглецева сталь стає більш крихкою. Це явище називають *синьоламкістю сталі*.

При  $t > 300^\circ\text{C}$  спостерігається різке зменшення характеристик міцності і зростання пластичності, що унеможливорює використання маловуглецевих сталей для виготовлення деталей, які мають експлуатуватись за таких температур. З іншого боку така поведінка сталі при нагріванні використовуються в технологічних процесах обробки металів тиском: прокатування, кування, штампування і т.п.

### Вплив технологічних факторів.

Механічні властивості матеріалів з однаковим хімічним складом можуть відрізнятися залежно від способу їх отримання та обробки, наприклад механічні характеристики ливарної та прокатної сталі.

Якщо ливарна сталь – це ізотропний матеріал, то прокат через набуту текстуру в процесі виготовлення є вже анізотропним матеріалом, властивості якого у напрямку прокатування і в поперечному напрямку різні.

Пластична обробка сталі в холодному стані (наприклад видавлювання) приводить до наклепу – деформаційного зміцнення, яке розглядалось вище. Наклепують також поверхневі шари багатьох деталей з метою більшої їх витривалості чи контактної міцності. Для цього застосовують обдування деталей шротом, накатування роликком. Навіть після звичайного точіння оброблювана поверхня наклепується. В результаті механічні властивості матеріалу поверхневих шарів та основного металу суттєво відрізняються.

Термічна та хіміко-термічна обробка деталей також приводить до зміни механічних характеристик матеріалів у бік збільшення характеристик міцності і твердості та зменшення пластичності.

Тому, визначаючи механічні характеристики матеріалів, слід обов'язково враховувати вихідний стан матеріалу, з якого виготовлялися зразки, щоб не помилитись у виборі граничного стану матеріалу та допустимих напружень при розрахунках деталей машин та елементів конструкцій на міцність і жорсткість.

Безумовно, розглянуті властивості конструкційних матеріалів за розтягання і стискання та методи їх вивчення, як і перелік факторів, що на них впливають, далеко не вичерпують всієї необхідної інформації щодо поведінки цих матеріалів в процесі реальної експлуатації деталей, які мають неодмінно бути враховані вже на стадії їх проектування та виготовлення. В наступних розділах ми суттєво доповнимо отриману інформацію щодо фізико-механічні властивості матеріалів залежно від умов роботи, способів навантаження і т. ін.

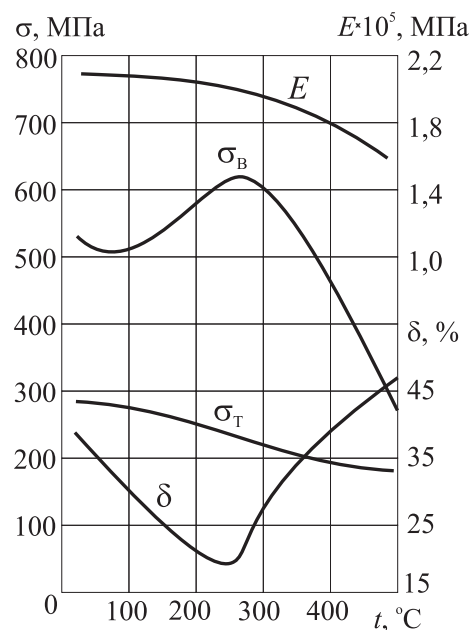


Рис. 6.19. Графіки залежності основних механічних характеристик маловуглецевої сталі



## Тема 6.1. Визначення допустимих напружень

Виходячи з поняття допустимого напруження (див. тему 5.3), необхідно визначитись з граничним або небезпечним напруженням для матеріалу.

Оскільки всі конструкційні матеріали можна умовно поділити на пластичні і крихкі, принаймні в умовах статичного навантажування та лінійного напруженого стану, який має місце в стержні за розтягу-стиску, то саме з цих позицій і обиратимемо граничний стан того чи іншого матеріалу.

**Пластичні матеріали.** Для пластичних матеріалів ( $\delta > 5\%$ ) граничним станом є початок текучості, адже виникнення в деталях пластичних деформацій вважається, як правило, неприпустимим. Отже, небезпечне напруження – це границя текучості  $\sigma_T$  або  $\sigma_{0.2}$ . Тоді допустиме напруження

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}. \quad (6.21)$$

Тут коефіцієнт запасу міцності

$$n_T = 1,4 \dots 1,6.$$

**Крихкі матеріали.** Для крихких матеріалів ( $\delta < 5\%$ ) граничним станом є руйнування, а небезпечним напруженням є границя міцності. Тоді допустиме напруження

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B}{n_B}. \quad (6.22)$$

Коефіцієнт запасу міцності

$$n_B = 2,5 \dots 3,0.$$

*Примітка 6.3. Вказані величини коефіцієнтів запасу міцності стандартизовані для умов статичного навантаження. Менші їх значення беруть у випадку матеріалів з однорідною структурою та в разі впевненості розраховувача у коректності розрахункових схем, точності обраних методів розрахунків, доброму знанні властивостей матеріалу.*

**Приклад 6.4** Визначити допустимі напруження за розтягання-стискання для таких матеріалів: сірий чавун СЧ 15, сталь 20, алюмінієва бронза БрА5

*Користуючись даними, наведеними в додатках [1], подамо механічні характеристики вказаних матеріалів у вигляді таблиці.*

Табл. 6.1. Механічні характеристики матеріалів (до прикладу 6.4)

Матеріал		Границя міцності $\sigma_B$ , МПа		Границя текучості $\sigma_T$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %
		Розтягання	Стискання		
СЧ 15		150	650	–	–
Сталь 20		420		250	25
БрА5	М'який стан	380		160	65
	Твердий стан	400		500	4

Сірий чавун СЧ 15 віднесемо до крихких матеріалів. Він по-різному опирається розтяганням і стисканню. Враховуючи, що коефіцієнт запасу міцності  $n_B = 2,5 \dots 3,0$ , отримаємо такі значення допустимих напружень:

- для розтягання  $[\sigma]_p = \sigma_{Bp} / n_B = 150 / 3 \dots 150 / 2,5 = 50 \dots 60$  МПа ;
- для стискання  $[\sigma]_c = \sigma_{Bc} / n_B = 650 / 3 \dots 650 / 2,5 = 217 \dots 260$  МПа .

Сталь 20 – пластичний матеріал ( $\delta = 25\% > 5\%$ ), тому небезпечним напруженням є границя текучості. Коефіцієнт запасу міцності для сталей приймають  $n_T = 1,5$ . Тоді  $[\sigma] = \sigma_T / n_T = 250 / 1,5 = 167$  МПа .

Бронза БрА5 представлена двома станами. У м'якому стані це пластичний матеріал ( $\delta = 65\% > 5\%$ ), коефіцієнт запасу міцності  $n_T = 1,4 \dots 1,6$ . У твердому стані – крихкий матеріал ( $\delta = 4\% < 5\%$ ), коефіцієнт запасу міцності  $n_B = 2,5 \dots 3,0$ . Отже,

- для м'якого стану  $[\sigma] = \sigma_T / n_T = 160 / 1,6 \dots 160 / 1,4 = 100 \dots 114,3$  МПа ;
- для твердого стану  $[\sigma] = \sigma_B / n_B = 500 / 3 \dots 500 / 2,5 = 167 \dots 200$  МПа .

**Зауваження.** Остаточний вибір значень допустимих напружень для сірого чавуну і бронзи слід виконувати з урахуванням рекомендацій, сформульованих у примітці 6.3.

## Питання для самоперевірки знань

1. Які зусилля виникають в перерізах стержня в умовах чистого розтягання і стискання?
2. Якою гіпотезою користуються при складанні геометричних рівнянь для стержня в умовах чистого розтягання і стискання? Сформулюйте цю гіпотезу.
3. Який елемент стержня називають волокном?
4. Який вид напруженого стану реалізується в стержнях за чистого розтягання і стискання?
5. Чи виникають за чистого розтягання-стискання дотичні напруження в перерізах стержня? Якщо так, то як ці перерізи зорієнтовані відносно осі стержня?
6. Сталевий стержень діаметром 40 мм розтягається силою  $F = 100$  кН . Які напруження виникають у стержні?
7. Сталевий стержень завдовжки 1 м має квадратний переріз зі стороною  $a = 20$  мм . Які жорсткості має стержень та його переріз?
8. Два стержні, виготовлені з одного матеріалу, мають однакові перерізи, але один зі стержнів довший від іншого удвічі. Який з двох стержнів жорсткіший і у скільки разів?

9. Запишіть вираз для закону Гука в абсолютних величинах для чистого розтягання та стискання стержня.
10. Визначте питому потенціальну енергію деформації стержня, розглянутого в п. 7.
11. Перелічіть всі відомі вам механічні характеристики матеріалів.
12. Границя пружності, відносне видовження, модуль пружності, умовна границя текучості... Які з перелічених характеристик є характеристиками міцності?
13. Яким ГОСТом регламентуються випробування на розтягання?
14. Що називають діаграмою розтягання?
15. Зразки для випробувань на розтягання виготовлені з такими співвідношеннями довжин та діаметрів:  $l_0 = 5d_0$ ;  $l_0 = 10d_0$ ;  $l_0 = 15d_0$ . Які зі зразків виконані з порушенням вимог стандарту?
16. Які зразки називають пропорційними?
17. Як називаються машини, призначені для випробувань на розтягання?
18. Як називаються пристрої для вимірювань деформацій зразка?
19. Який основний недолік визначення деформації зразка за переміщеннями рухомого захвата випробувальної машини?
20. Назвіть основні стадії деформування зразка?
21. Назвіть відомі Вам матеріали, що мають площадку текучості?
22. Як отримують діаграму розтягання у відносних координатах? Чим відрізняються умовна та дійсна діаграми розтягання?
23. Що називають умовною границею текучості? Наведіть приклади матеріалів, для яких її визначають.
24. Що називають тимчасовим опором матеріалу?
25. Назвіть основні характеристики пластичності матеріалів? За якою ознакою матеріали поділяють на крихкі та пластичні?
26. Сталі однаково опираються розтягання і стискання... Поясніть, будь-ласка, яка властивість сталі покладена в основу цього твердження?
27. Що називають твердістю матеріалів? Назвіть основні методи визначення твердості та границі їх застосування.
28. Перелічіть основні фактори, які можуть впливати на механічні характеристики матеріалів.
29. Границя міцності сталі, отримана за швидкості деформування  $\dot{\epsilon} = 0,02 \text{ c}^{-1}$ , складає  $\sigma_B = 450 \text{ МПа}$ . Вкажіть, за яких з наведених швидкостей деформування ( $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ c}^{-1}$ ;  $0,5 \text{ c}^{-1}$ ;  $20 \text{ c}^{-1}$ ) спостерігатиметься помітна зміна цієї величини і в який бік?
30. Які коефіцієнти запасу міцності прийняті для пластичних і крихких матеріалів у загальному машинобудуванні?