



МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра механічної та біомедичної інженерії

С.П. Панченко, В.Я. Кіба

**Конспект лекції по «Механічним випробуванням матеріалів» для
бакалаврів спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

Дніпро
НТУ «ДП»

2022

0

С.П. Панченко, В.Я. Кіба

Конспект лекції з дисципліни “Механічні випробування матеріалів” для здобувачів першого рівня вищої освіти за спеціальністю 132 матеріалознавство [Електронний ресурс] / Панченко С.П., В.Я. Кіба ; Міністерство освіти і науки України, Нац. тех. ун-т “Дніпровська політехніка”, 2022. 81с.

Автори:

С.П. Панченко, доц., каф. МБМІ

В.Я. Кіба, ст. викл., каф. МБМІ

Погоджено рішенням науково-методичної комісії спеціальності 132 Матеріалознавство (протокол №3 від 19.12.2022 р.) за поданням кафедри механічної та біомедичної інженерії (протокол № 9 від 30.11.2022 р.).

Затверджено до видання редакційною радою (протокол № 12 від 27.12.2022 р.) за поданням методичної комісії спеціальності 132 Матеріалознавство (протокол №3 від 19.12.2022 р.).

У наведених методичних рекомендаціях розглянуті приклади проведення лабораторних робіт з дисципліни “Механічні випробування матеріалів”.

Відповідальний за випуск ст. викладач кафедри механічної та біомедичної інженерії Кіба В.Я.

Зміст

1. Вступ	2
2. Розділ 1. ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ НА РОЗТЯГ	3
3. Розділ 2. ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ НА СТИСНЕННЯ	14
4. Розділ 3. ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖІ МІЦНОСТІ СТАЛІ НА ЗРІЗЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ЙОГО З МЕЖЕЮ МІЦНОСТІ ПІД РОЗРИВУ	17
5. Розділ 4. ВИПРОБУВАННЯ СТАЛІ НА РОЗТЯГ І ВИВЧЕННЯ ДІАГРАМИ РОЗТЯГУ	19
6. Розділ 5. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ	26
7. Розділ 6. ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПОЗДОВЖНЬОЇ ПРУЖНОСТІ ТА КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ПРИ ВИПРОБУВАННІ МАТЕРІАЛУ НА РОЗТЯГ	40
8. Розділ 7. МЕТОД ВИПРОБУВАННЯ НА УДАРНИЙ ЗГИН	46
9. Розділ 8. ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ЗСУВУ	53
10. Розділ 9. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БРУСУ ПРИ ЗГИНІ З КРУЧЕННЯМ	56
11. Розділ 10. ОЦІНКА ПОХІДНОСТЕЙ ДОСВІДІВ ПРИ ОБРОБЦІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ	60
ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ	73

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

ВСТУП

Механічні випробування матеріалів проводять для отримання механічних властивостей матеріалів, які використовуються в інженерних розрахунках на міцність деталей машин та споруд.

При розрахунках на міцність, жорсткість та стійкість елементів машин та споруд необхідно знати механічні характеристики матеріалів, при цьому результати розрахунків тісно поєднуються з даними експериментальних досліджень. З цієї причини у навчальних курсах велика увага приділяється лабораторним роботам, які виконуються паралельно із проходженням теоретичного курсу.

Розділ 1

ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ НА РОЗТЯГ

Мета роботи: вивчення поведінки матеріалів під час розтягу до руйнування; визначення механічних характеристик міцності та пластичності

Зразки. Для випробування на розтяг застосовують пропорційні циліндричні або плоскі зразки діаметром або товщиною в робочій частині 3,0 мм і більше (рис. 1.1. а, б).

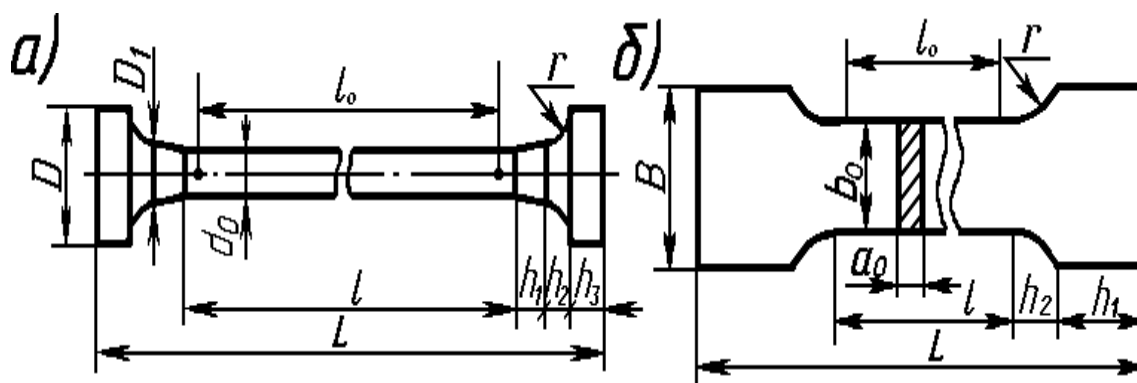


Рис. 1.1. Циліндричні (а) та плоскі (б) зразки, що застосовуються при випробуванні на розтягування

Найбільш поширені циліндричні зразки, у яких розрахункова довжина $l_0 = 5d_0$ (короткі, п'ятикратні зразки) і $l_0 = 10d_0$ (довгі, десяти-кратні зразки). У плоских зразків співвідношення між розрахунковою довжиною та розмірами поперечного перерізу залишається таким самим, як і для циліндричних зразків, з тією різницею, що у співвідношенні замість діаметра фігурує площа поперечного перерізу.

Оскільки площа $A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$, то для короткого зразка

$$l_0 = 5d_0 = 5\sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} = 5,65\sqrt{A_0};$$

для довгого зразка

$$l_0 = 10d_0 = 10\sqrt{\frac{4A_0}{\pi}} = 11,3\sqrt{A_0}.$$

Початкову розрахункову довжину l_0 з похибкою до 1% обмежують робочої довжини зразка кернами, ризиками або іншими мітками. При цьому l має становити

$l_0 + 0,5d_0$ до $l_0 + 2d_0$ – для циліндричних зразків

$l_0 + 1,5\sqrt{A_0}$ до $l_0 + 2,5\sqrt{A_0}$ – для плоских зразків.

Форми і розміри головок і перехідних частин циліндричних і плоских зразків визначаються способом кріплення зразків у захватах випробувальної машини. Спосіб кріплення повинен попереджати проковзування зразків у захватах, зминання опорних поверхонь, деформацію головок та руйнування зразка в місцях переходу від робочої частини до голівок та головок.

Випробувальна машина. Випробування на розтягнення виробляються в лабораторії на універсальних випробувальних машинах типу Amsler, УІМ-50, ГМС, УММ, ЦДМУ, конструкцію та принцип роботи яких можна звести до схеми, зображеної на рис. 1.2.

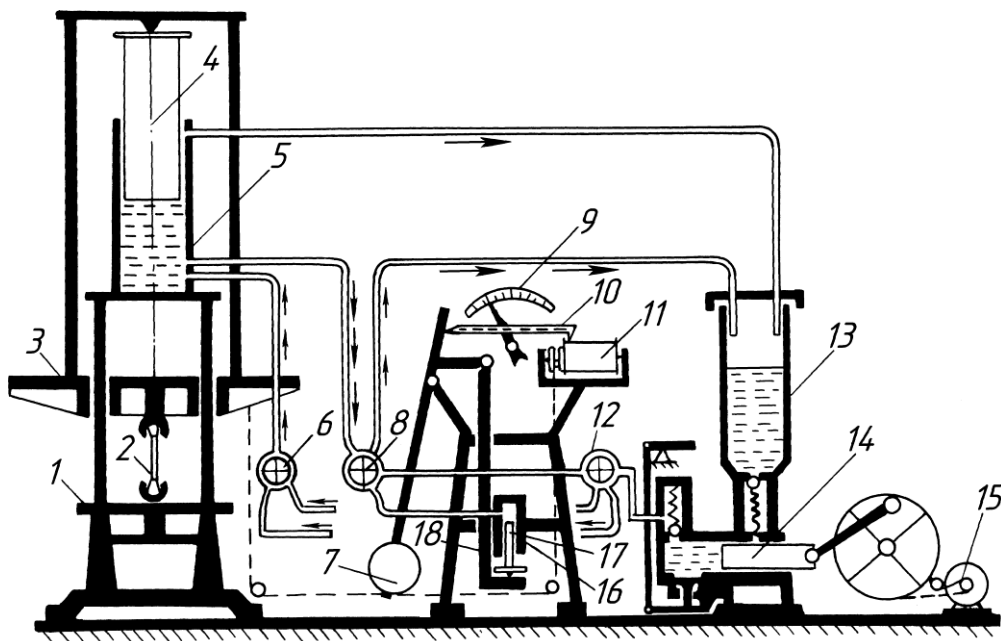


Рис. 1.2. Універсальна випробувальна машина

До складу випробувальної машини входять:

– власне машина, призначена для деформування зразка;

- електрогідравлічний привід, який слугує для створення зусилля на випробовуваний зразок;
- маятниковий силовимірник, призначений для реєстрації зусилля, що здійснює деформування зразка.

Власне машина складається з 3 рухомий і нерухомий 1 траверс. У нерухомій траверсі встановлена гідравлічна пара – робочий циліндр 5 з поршнем 4. У траверсах укріплені захвати, в яких закріплюється зразок 2, що розтягується.

Електрогідравлічний привід включає плунжерний насос 14 та електродвигун 15. Насос приводиться в дію електродвигуном і масло з резервуару 13 трубопроводами надходить у робочий циліндр 5 машини. Подача масла регулюється робочим вентилям 12 залежно від необхідної швидкості навантаження зразка. Для швидшого переміщення траверси вгору, необхідно для встановлення її в належне положення перед випробуванням, використовувати вентиль 6, для опускання – вентиль 8.

Тиск масла, що надходить у робочий циліндр 5, викликає переміщення поршня 4, пов'язаного за допомогою поперечок і тяг з рухомою траверзою 3. Переміщаючись, траверса буде розтягувати або стискати зразок залежно від того, де він закріплений (знизу або зверху траверси).

З робочого циліндра 5 тиск мастила по спеціальній трубі передається також в циліндр силоміра 16 і переміщає розташований у ньому поршень 17 (для зменшення тертя поршень під час роботи машини знаходиться у обертовому русі). Зусилля, що діє на поршень циліндра силовимірника, за допомогою тяг 18 передається на кривошип маятника 7. Маятник, повертаючись на осі, відхиляє кутовим важелем зубчасту рейку 10, пов'язану з шестернею, на осі якої знаходиться стрілка, 9 силовимірювача. Стрілка в кожен момент вказує навантаження, що діє на зразок. Маятниковий силовимірник є штангою зі змінними вантажами 7. За допомогою зміни довжини маятника і його ваги можна змінити максимальне зусилля машини. Для машин, що розглядаються, можливі установки з максимальним зусиллям 5, 10, 25 і 50 тонн*.

Для автоматичного креслення діаграми розтягування є барабан 11, навколо якого намотана міцна нитка, з'єднана з рухомою траверсою через систему блоків

(на схемі нитка показана пунктиром). Підйом траверси викликає обертання барабана. Одночасно вздовж його осі пересувається олівець, який пов'язаний з рейкою 10. Завдяки поєднанню двох рухів (обертання барабана та поступальне переміщення олівця) здійснюється креслення на папері, обгорнутому навколо барабана, кривою (діаграми розтягування), абсци (обертання барабана) в деякому масштабі дають абсолютне подовження зразка, а ординати (переміщення олівця) – діючу на зразок силу.

Машинна діаграма розтягування. У процесі випробування на барабані 11 випробувальної машини (рис. 1.2) автоматично викреслюється діаграма розтягування, яка показує залежність між розтягувальною силою P , що діє на зразок, і деформацією Δl . Типовий вид машинної діаграми розтягування маловуглецевої сталі зображено на рис. 1.3.

На діаграмі $P - \Delta l$ можна вказати п'ять характерних точок, положення яких визначається методом графічної побудови або методом тензометрування.

Прямолінійна ділянка діаграми OA вказує на пропорційність між навантаженням P та подовженням Δl . (Ця пропорційність вперше була помічена в 1670 р. Робертом Гуком і отримала надалі назву закону Гука.)

Величина сили $P_{\text{пц}}$ (точка A), до якої залишається справедливим закон Гука залежить від розмірів зразка та фізичних властивостей матеріалу.

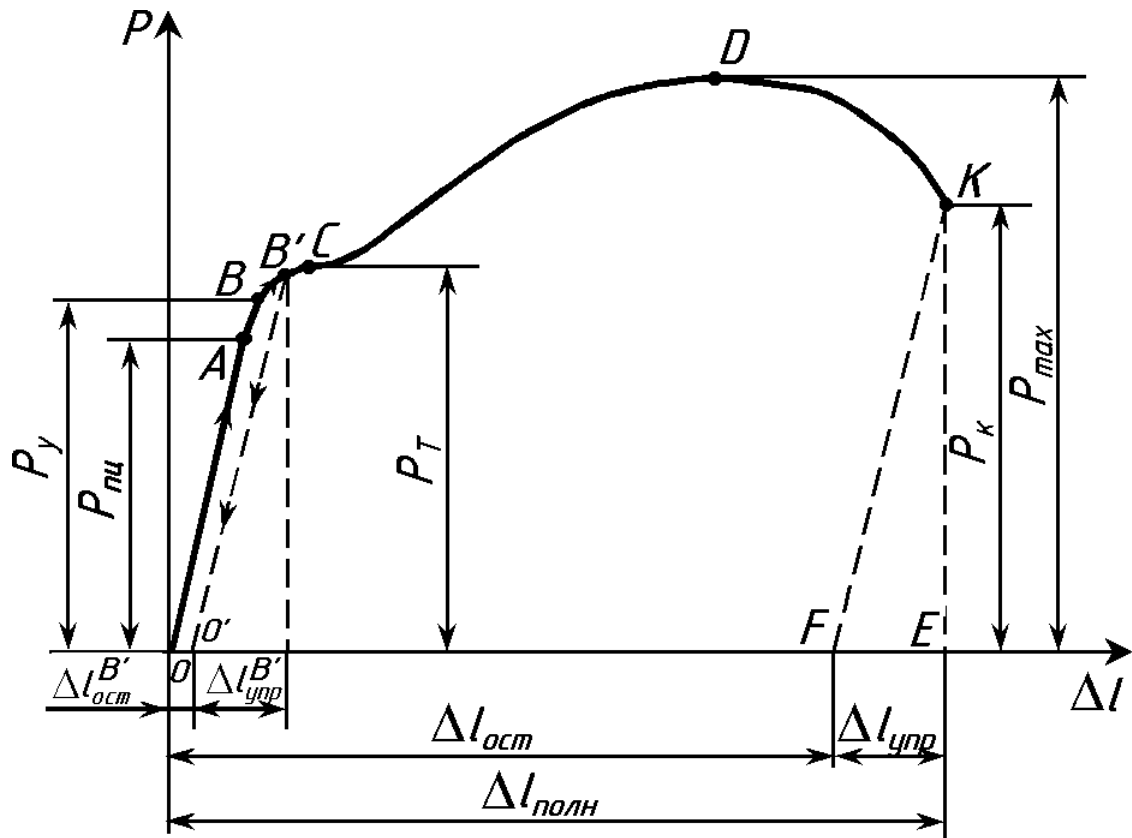


Рис. 1.3. Машинна діаграма розтягування маловуглецевої сталі

Якщо випробуваний зразок навантажити силою, що розтягує, не перевищує величину ординати точки B (сили P_y), а потім розвантажити, то при розвантаженні деформації зразка будуть зменшуватися за тим самим законом, за яким вони збільшувалися при навантаженні. Отже, у разі у зразку виникають лише пружні деформації.

У випадку, якщо зусилля, що розтягує вище P_y , при розвантаженні зразка деформації повністю не зникають і на діаграмі лінія розвантаження буде передявляти собою пряму $B'O'$, яка вже не збігається з лінією навантаження, а паралельну їй. В цьому випадку деформація зразка складається з пружної $\Delta l_{упр}^{B'}$ залишкової (пластичної $\Delta l_{ост}^{B'}$ деформації).

Таким чином, характерною особливістю точки B є те, що при перевищенні навантаження P_y зразок відчуває залишкові деформації при розвантаженні. Вище точки B діаграма розтягування значно відходить від прямої (деформація починає зростати швидше навантаження, і діаграма має криволінійний вид), а при навантаженні, що відповідає P_T (точка C), переходить в горизонтальна ділянка. У

цій стадії випробування у матеріалі зразка по всьому його обсягу поширюються пластичні деформації. Зразок отримує значне залишкове подовження практично без збільшення навантаження.

Властивість матеріалу деформуватися при практично постійному навантаженні називається плинністю. Ділянка діаграми розтягування, паралельна осі абсцис, називається майданчиком плинності.

У процесі плинності на відшліфованій поверхні зразка можна спостерігати появу ліній (смуг ковзання), нахилених приблизно під кутом 45° до осі зразка (рис. 1.4, а). Ці лінії є слідами взаємних зрушень кристалів, спричинених дотичною напругою.

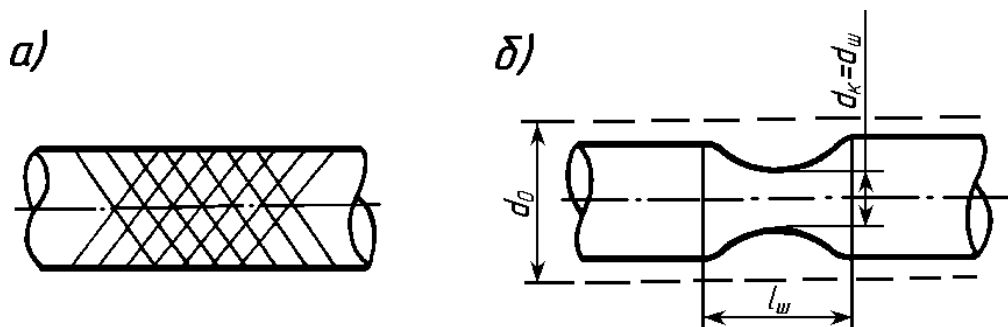


Рис. 1.4. Утворення ліній зсуву (а) та місцевого звуження –шийки (б) при випробуванні зразка на розтягування

Подовживши деяку величину при постійному значенні сили, тобто, зазнавши стан плинності, матеріал знову набуває здатності чинити опір розтягуванню (зміцнюватися), і діаграма піднімається вгору, хоча набагато порожнішого, ніж раніше (рис. 1.3). У точці D зусилля досягає максимального значення P_{max} .

Наявність ділянки зміцнення (від кінця майданчика плинності до найвищої точки діаграми розтягування) пояснюється мікроструктурними змінами матеріалу: коли навантаження на зразок зростає, мікроскопічні дефекти (лінійні та точкові) групуються так, що розвиток зрушень кристалів, спричинених дотичними напругами, утруднюється, а тому опір матеріалу зсуву починає зростати і наближатися до його опір відриву.

При досягненні зусилля P_{max} на зразку з'являється різке місцеve сування, так звана шийка (рис. 1.4, б), швидке зменшення площі перетину якої викликає

падіння навантаження, і в момент, що відповідає точці К діаграми, відбувається розрив зразка за найменшим перерізом шийки.

До точки D діаграми, що відповідає P_{max} , кожна одиниця довжини зразка подовжилося приблизно однаково; так само у всіх перерізах однаково зменшувались поперечні розміри зразка. З моменту утворення шийки вся деформація зразка локалізується на малій довжині ($l_{ш} \approx 2d_0$) в області шийки, а решта зразка практично не деформується.

Абсциси діаграми розтягування OE , OF та FE , що характеризують здатність зразка деформуватися до настання руйнування, відповідають повному абсолютному подовженню зразка Δl , остаточному абсолютному подовженню D та абсолютному пружному подовженню зразка $\Delta l_{упр}$. (Для визначення пружної деформації в момент розриву необхідно з точки K діаграми провести пряму KF , паралельну прямолінійній ділянці OA , оскільки пружні деформації при розриві також підкоряються закону Гука.)

Крихкі матеріали, типовим представником яких є чавун, дають діаграму розтягнення іншого характеру (рис. 1.5).

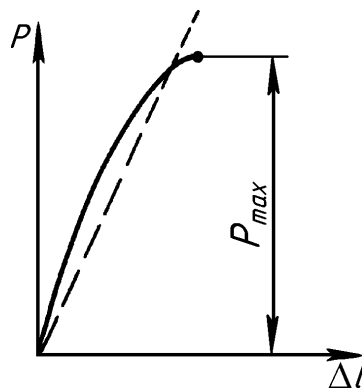


Рис. 1.5. Машинна діаграма розтягування чавуну

Чавун руйнується раптово при дуже малих деформаціях, що становлять порядку (0,5-0,6) % від розрахункової довжини зразка l_0 і без утворення шийки. Діаграма при цьому не має явно вираженої прямолінійної ділянки (відхилення від закону Гука починається дуже рано), майданчики плинності та зони зміцнення.

При випробуванні на розтягування крихких матеріалів визначають, як правило, лише максимальне навантаження P_{max} . Зазвичай при практичних

розрахунках для крихких матеріалів відхилення від закону Гука не враховують, тобто криволінійну діаграму замінюють умовною прямолінійною діаграмою.

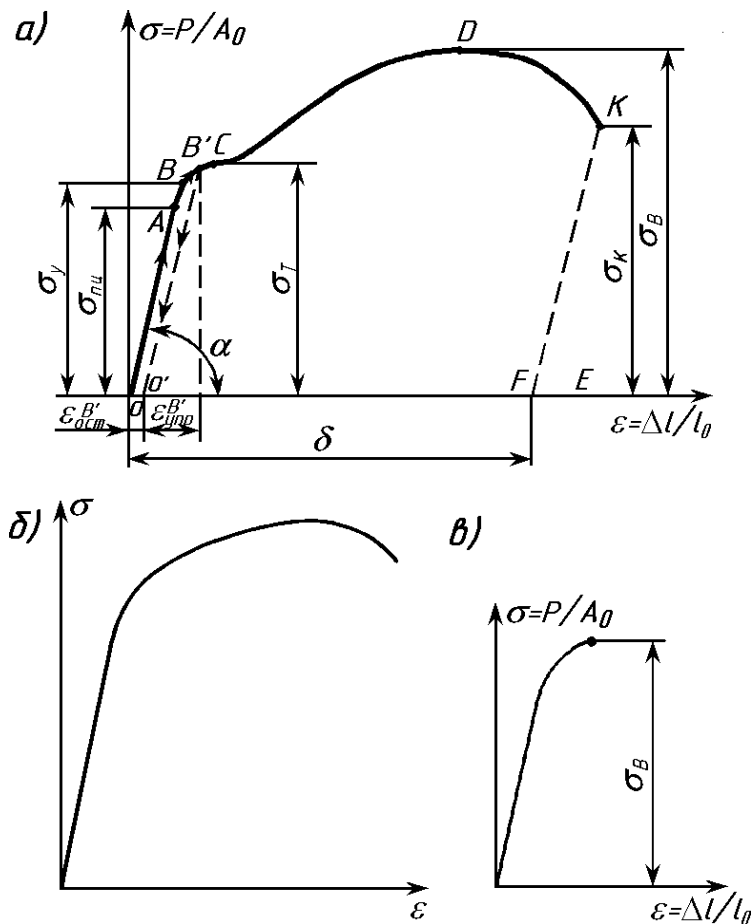


Рис. 1.6. Діаграми умовних напруг маловуглецевої сталі (а), легованої сталі (б), чавуну (в)

Діаграма умовної напруги. Механічні характеристики матеріалів. Ординати машинної діаграми $P - \Delta l$ (рис. 1.3) не є якісними характеристиками матеріалу, тому що сила, що розтягує зразок, залежить від площі перерізу, а подовження зразка – від його довжини.

Щоб виключити вплив розмірів зразка та отримати діаграму, що характеризує поведінку не зразка, а самого матеріалу та дати кількісну оцінку розглянутим вище властивостям, машинну діаграму перебудовують у

координатах $\sigma - \varepsilon$ шляхом розподілу ординат P на початкову площу перерізу зразка A_0 та абсцис Δl на l_0 (що рівносильне зміні масштабів по обох вісях). Перебудована таким чином діаграма називається діаграмою умовних напруг (рис. 1.6). Така назва пояснюється тим, що площа зразка у процесі випробування насправді змінюється.

Як видно із рис. 1.3, 1.6, ординатам характерних точок машинної діаграми розтягування $P_{\text{пц}}$ (зусилля при межі пропорційності), P_y (зусилля при межі пружності), P_T (зусилля, що відповідає межі плинності), P_{max} (найбільшого руйнівного навантаження) і P_k (зусилля в момент відриву зразка) відповідають наступні механічні характеристики матеріалу:

$$\text{–межа пропорційності} \quad \sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{A_0}, \quad (1.1)$$

$$\text{– межа пружності} \quad \sigma_n = \frac{P_n}{A_0}, \quad (1.2)$$

$$\text{–межа плинності} \quad \sigma_n = \frac{P_n}{A_0}, \quad (1.3)$$

$$\text{–межа міцності} \quad \sigma_\varepsilon = \frac{P_\varepsilon}{A_0}, \quad (1.4)$$

$$\text{напруга в момент відриву зразка} \quad \sigma_k = \frac{P_k}{A_0}. \quad (1.5)$$

Межа пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$ – найбільша напруга, після якої порушується справедливність закону Гука; $\sigma = E\varepsilon$, де E – модуль поздовжньої пружності, або модуль пружності першого роду (для сталі $E=(2,0 \div 2,2) \cdot 10^5$ Мпа, для чавуна $E=(0,75 \div 1,6) \cdot 10^5$ Мпа). При цьому $E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \text{tg} \alpha$ тобто модуль E графічно зображується тангенсом кута нахилу до вісі абсцис прямолінійної частини діаграми умовних напруг (рис. 1.6).

Межа пружності σ_n - найбільша напруга, яку може витримати матеріал, не виявляючи залишкових деформацій при розвантаженні.

Межа плинності σ_n -напруга, при якій відбувається зростання деформації без помітного збільшення навантаження, що розтягує. У тих випадках, коли на діаграмі відсутня явно виражена площадка текучості (рис. 1.6 б), межа плинності визначається з допуском 0,2% .

Межа міцності (тимчасовий опір) σ_e – напруга, що відповідає найбільшому навантаженню P_{\max} , що передує розриву зразка.

Механічні характеристики $\sigma_{\text{пл}}, \sigma_{\text{п}}, \sigma_{\text{п}}, \sigma_e$ називаються характеристиками міцності матеріалів. При цьому в практичних розрахунках оцінка механічних властивостей переважно проводиться по межі плинності $\sigma_{\text{п}}$ і межі міцності σ_e

Крім перерахованих вище характеристик міцності матеріалу при випробуванні на розтягнення визначають також відносне подовження після розриву δ і відносне звуження після розриву ψ .

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%; \quad (1.6)$$

де l_0 - початкова розрахункова довжина зразка, l_k - кінцева розрахункова довжина зразка;

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100\%; \quad (1.7)$$

де $A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$ - початкова площа поперечного перерізу зразка;

$A_k = \frac{\pi d_k^2}{4}$ – площа поперечного перерізу у найтоншому місці шийки після розриву (рис. 1.4).

Механічні характеристики δ та ψ є характеристиками пластичності матеріалу: чим вони більші, тим матеріал пластичніший. Для сталей, наприклад $\delta = 8 - 45\%$, $\psi = 40 - 65\%$.

Проведення випробувань. До випробування проводять вимірювання розмірів зразка по робочій частині (l_0 , d_0 з визначенням початкової площі поперечного перерізу A_0) з похибкою до 0,1 мм. На робочій частині зразка наносять мітки на відстані 5 або 10 мм одна від одної.

Завдяки міткам можна визначити деформацію як кожного 5 або 10 міліметрового проміжку, так і всієї робочої довжини зразка. Потім зразок встановлюють у захоплення випробувальної машини (рис. 1.7), після чого відбувається розтягування зразка.

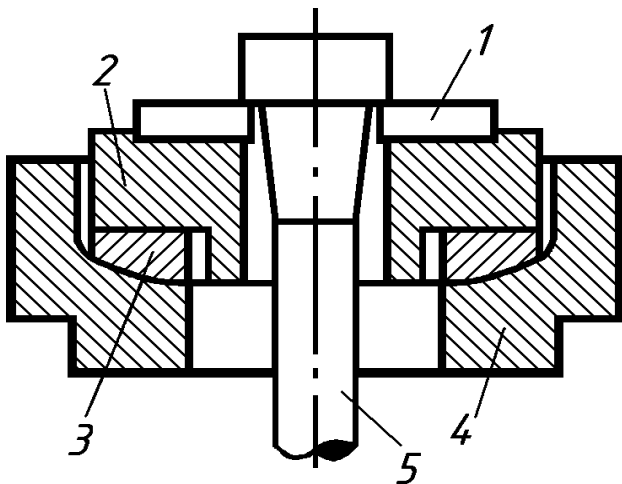


Рис. 1.7. Схема закріплення зразка у випробувальній машині

- 1 – опорне розрізне кільце;
- 2 – ступінчаста втулка;
- 3 – центруюче кульове кільце;
- 4 – кульова опора;
- 5 – зразок

У процесі випробування по силомірнику машини або після випробування по машинній діаграмі розтягування визначають навантаження $P_{п}$ відповідну межі плинності, і найбільше руйнівне навантаження P_{max} . Знаючи $P_{п}, P_{max}$ та площа A_0 за формулами (1.3, 1.4) визначають характеристики міцності $\sigma_{п}$ і $\sigma_{в}$.

Після випробування частини розірваного зразка щільно встановлюють по довжині в спеціальному пристосуванні і штангенциркулем вимірюють діаметр найбільш тонкому місці шийки d_k і кінцеву розрахункову довжину l_k . Якщо розрив зразка відбувається у середній частині розрахункової довжини, то вимір l_k водиться між крайніми рисками, як показано на рис. 1.8 а.

Якщо ж розрив відбувається у крайній третині зразка, то кінцева довжина розрахункової частини визначається з віднесенням місця розриву до середини. Наприклад, на початковій розрахунковій довжині зразка вкладається N число інтервалів (рис. 1.8, б, в). Після розриву крайню риску на короткій частині зруйнованого зразка позначимо A . На довгій частині зразка позначимо риску B , відстань від якої до місця розриву близько за величиною до відстані від місця розриву до риски A . Відстань від A до B становить n інтервалів.

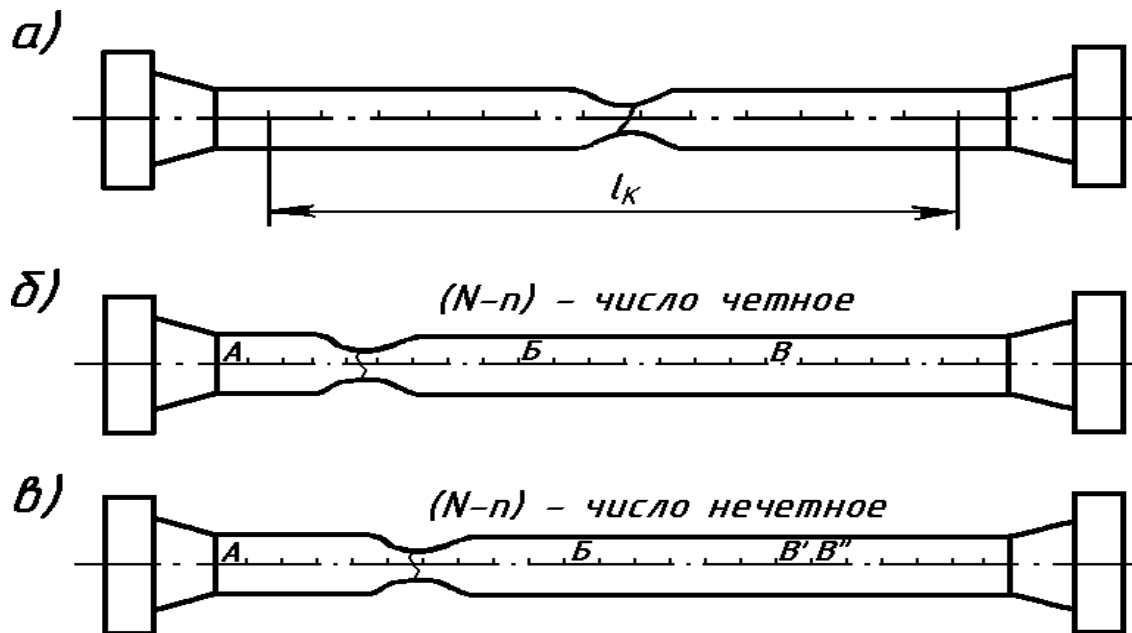


Рис. 1.8. Визначення кінцевої розрахункової довжини при розриві зразка в середній частині (а) та в крайній третині його розрахункової довжини (б, в)

Якщо різниця $(N-n)$ – число парне, то від риски B до риски B береться $(N-n)/2$ інтервалів та кінцева розрахункова довжина зразка визначається за формулою.

$$l_k = AB + 2BB.$$

Якщо різниця $(N-n)/2$ – число непарне, то від риски B до риски B' береться $(N-n-1)/2$ інтервалів і до точки B'' береться $(N-n+1)/2$ інтервалів (у сумі $BB' + BB'' = N-n$). В цьому випадку розрахункова довжина зразка l_k за формулою підраховується

$$l_k = AB + BB' + BB''.$$

Знаючи l_k та d_k , за формулами (1.6, 1.7) визначають характеристики пластичності матеріалу при розтягуванні δ та ψ .

Розділ 2

ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ НА СТИСНЕННЯ

Мета роботи: вивчення поведінки пластичних та крихких матеріалів та визначення їх механічних характеристик при стисканні.

Зразок. Для випробувань на стиск застосовуються зазвичай зразки кубічної форми або невисокі циліндричні зразки із співвідношенням висоти до діаметра $h_0/d_0 = 1 \dots 3$. Використання довших зразків є недоцільним у зв'язку з виникненням небезпеки поздовжнього вигину.

Випробувальна машина. Випробування на стиск виконуються на універсальній випробувальній машині, конструкція та принцип роботи якої дано у роботі № 1.

Проведення випробувань. Випробовування на стиск у цій роботі піддаються зразки з маловуглецевої сталі, чавуну та дерева. Дерево як анізотропний матеріал, що володіє різними властивостями в різних напрямках, випробовується на стиснення вздовж і поперек волокон.

Стиснення пластичного матеріалу (маловуглецевої сталі). Циліндричний зразок встановлюється між паралельними плитами випробувальної машини та поступово навантажується безперервно зростаючою силою P . Результати випробування на стиск можна подати у вигляді діаграми стиснення (рис. 2.1, а), побудованої в координатах: сила стиснення P та абсолютне укорочення Δl .

На вигляд діаграма стиснення, як і для більшості пластичних матеріалів, приблизно до межі плинності збігається з діаграмою розтягування. Точка A діаграми відповідає межі пропорційності матеріалу, після якого відзначається невелика ділянка, де спостерігається швидке зростання деформацій. Однак вираженого майданчика плинності для багатьох матеріалів не спостерігається. Внаслідок цього для них за межу плинності приймається умовна напруга, при якій залишкова деформація становить 0,2 % від початкової висоти зразка. При цьому визначення межі плинності здійснюється так само, як і у разі розтягування зразка (див. розділ 4). Надалі крива йде круто вгору через збільшення площі поперечного перерізу зразка та зміцнення матеріалу.

Поперечний переріз зразка, що збільшується в процесі деформації, стає здатним витримувати все велике навантаження. Зразок набуває бочкоподібної форми (через наявність сил тертя на торцях зразка) і може бути сплющений у тонку пластинку, не виявляючи ознак руйнування (рис. 2.1, а). У деяких випадках при недостатній пластичності матеріалу на бічній поверхні зразка з'являються дрібні тріщини. Довести зразок із пластичного матеріалу до руйнування практично не вдається. Досвід доводиться зупинити, не визначивши величини найбільшого руйнівного навантаження. Отже, межа міцності (тимчасовий опір)

при стисканні пластичних матеріалів може бути визначений. У цьому випадку зазвичай встановлюється лише межа пропорційності

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{A_0}$$

Слід зазначити, що з стисненні стали межа пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$, межа плинності $\sigma_{\text{п}}$, модуль пружності E мають такі самі значення, як і при розтягуванні. Тому стали на стиск відчують значно рідше, ніж на розтяг. На практиці схеми стиснення використовують переважно у технологічних пробах для оцінки деформаційної здатності напівфабрикатів та виробів. За допомогою проб по появі тріщин визначають придатність чи непридатність матеріалу після деформації стисненням на задану величину.

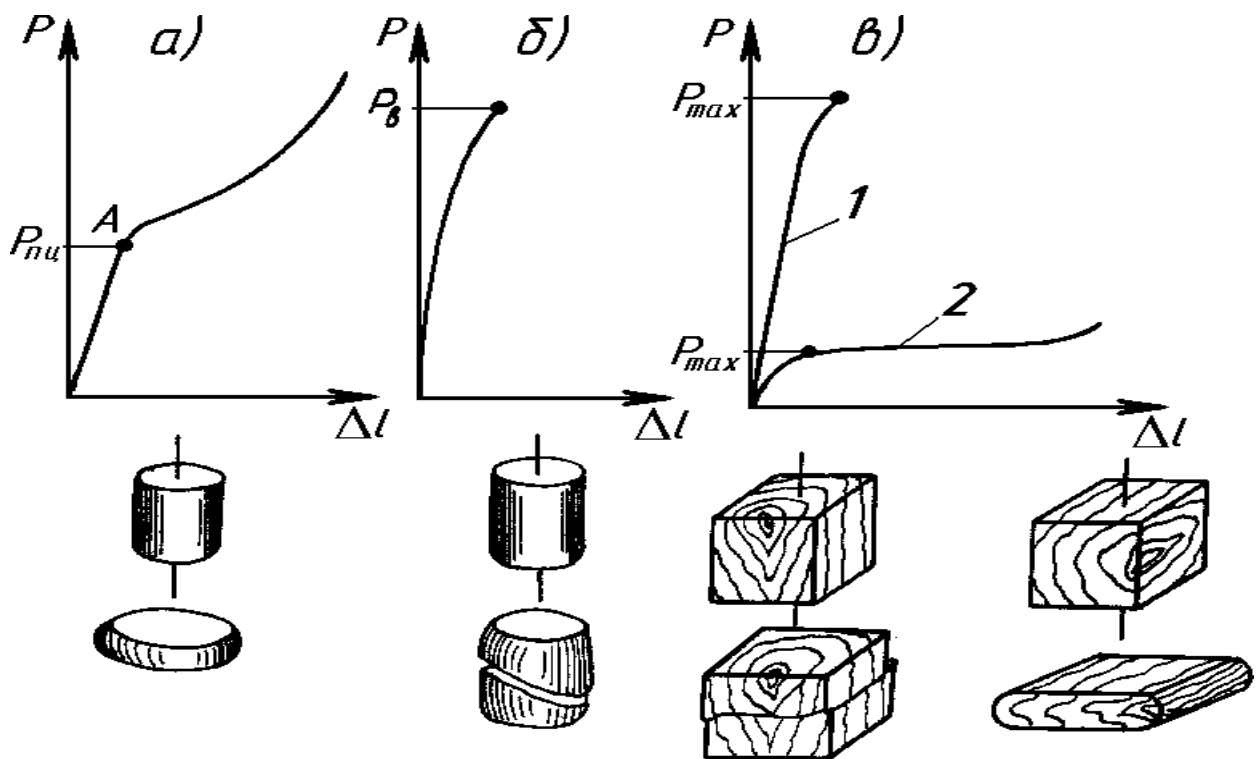


Рис. 2.1. Діаграми стиснення та характер руйнування зразків з маловуглецевої сталі (а), чавуну (б) та дерева вздовж волокон (в)

Стиснення крихкого матеріалу (чавуну). Циліндричний зразок ($h_0 / d_0 = 1,5$) після обміру встановлюється між плитами преса, та його піддають статичному навантаженню. Діаграма стиснення у своїй матиме вигляд, показаний на рис. 2.1 б. На діаграмі стиснення, як і діаграмі розтягування (рис. 1.5), відсутня

прямолінійну ділянку. Руйнування відбувається раптово при навантаженні P_{max} з появою низки похилих тріщин, спрямованих приблизно з кутом 45° до осі зразка. Такий характер руйнування пояснюється дією дотичних напруг, що виникають у похилих майданчиках під час стиснення.

Таким чином, при стисканні крихких матеріалів та їх розтягуванні можна визначити лише межу міцності.

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{A_0}.$$

При випробуванні на стиснення упоперек волокон діаграма має інший характер (крива 2). Спочатку лінія діаграми йде по похилій прямій до навантаження $R_{пц}$. Потім викреслюється слабо вигнута крива (кубик швидко деформується майже без збільшення навантаження), яке, якщо деревина не має пороків, може піти вгору після того, як зразок буде достатньо спресований.

Значне зростання деформації без збільшення навантаження дозволяє вважати, що вантажопідйомність зразка вже вичерпана. Тому за руйнівне навантаження P_{max} (відповідну межі міцності σ_B) умовно приймається таке навантаження, коли кубик стискається на 1/3 своєї початкової висоти.

Міцність дерева при стисканні поперек волокон зазвичай у 8-10 разів менша, ніж уздовж волокон. Ці властивості дерева слід враховувати, розташовуючи його так при проектуванні конструкцій, щоб стискаючі зусилля діяли у напрямку найбільшого опору, тобто вздовж волокон.

Розділ 3

ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖІ МІЦНОСТІ СТАЛІ НА ЗРІЗЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ЙОГО З МЕЖЕЮ МІЦНОСТІ ПІД РОЗРИВУ

Мета роботи: визначення межі міцності сталі при зрізі та порівняння його з межею міцності при розриві.

Зразки. Для випробування на зріз застосовується сталевий циліндричний зразок.

Випробувальна машина. Випробування на зріз виконуються на універсальній випробувальній машині, конструкція та принцип роботи якої дано у розділі 1.

Проведення випробувань. Сталевий циліндричний зразок із площею поперечного перерізу A_0 після обміру встановлюється в пристрій (рис. 3.1), що складається з корпусу 2 з розточеними в ньому гніздами для кілець 3 та накладок 4, за допомогою яких здійснюється передача зусилля на зразок. Після збирання пристрій встановлюється в випробувальну машину і завантажується. При цьому умовно вважають, що в зоні зрізу виникають лише дотичні напруження, рівномірно розподілені за перерізом (насправді в зоні руйнування з'являються і нормальні напруження вигину та стиснення, що підтверджується формою зразка після руйнування)

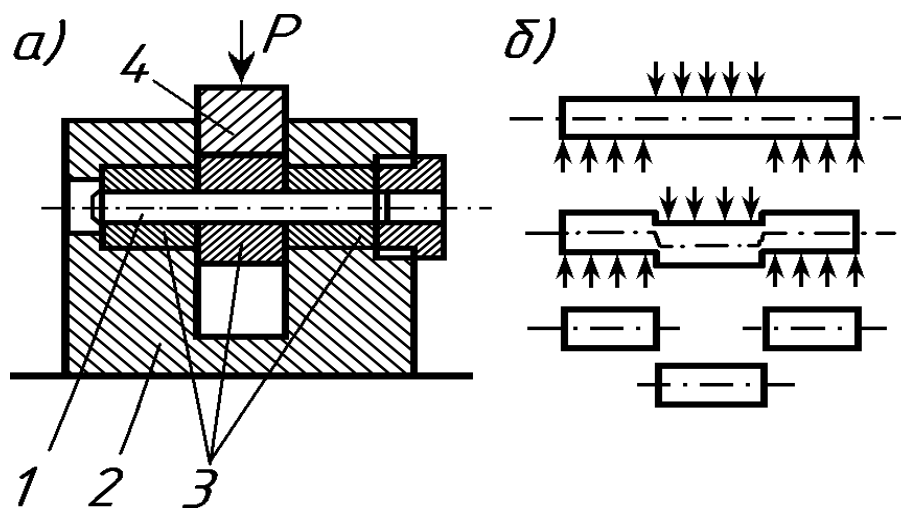


Рис. 3.1. Пристрій для проведення випробувань (а) та схема завантаження зразка (б) при зрізі

Так як в даному пристосуванні зсув під навантаженням відбувається по двох площинах, то межа міцності при зрізі через руйнуючий зразок, навантаження знаходиться за формулою

$$\tau_B = \frac{P_{max}}{2A_0}.$$

Для визначення межі міцності матеріалу зразка на розрив використовують експериментальне співвідношення між межею міцності сталі та твердістю по Брінелю (див. розділ 5):

$$\sigma_B \approx 3,53HB \text{ [МПа]}.$$

Після закінчення випробування знаходять відношення τ_B / σ_B , яке для маловуглецевої сталі становить 0,7 – 0,8.

Розділ 4

ВИПРОБУВАННЯ СТАЛІ НА РОЗТЯГ І ВИВЧЕННЯ ДІАГРАМИ РОЗТЯГУ

Мета роботи: дослідження процесу розтягування металевого зразка аж до його розриву та визначення наступних механічних характеристик матеріалу: межі плинності $\sigma_{п}$ та пропорційності $\sigma_{пц}$; межі міцності $\sigma_{в}$, напруги при розриві $S_{к}$, відносного подовження при розриві δ , відносного звуження зразка ψ , питомої роботи a , що витрачається на розрив.

Випробувальна машина. У лабораторії можна вивчати діаграму розтягу, записавши її на машині УМЕ – 10Т або на пресі.

Прес застосовується для випробувань як у стиск, і на розтяг. При випробуванні на розтяг використовується пристосування, яке називається реверсором (рис. 4.2). Зразок (рис. 4.1) встановлюється реверсором як показано на рис. 4.2.

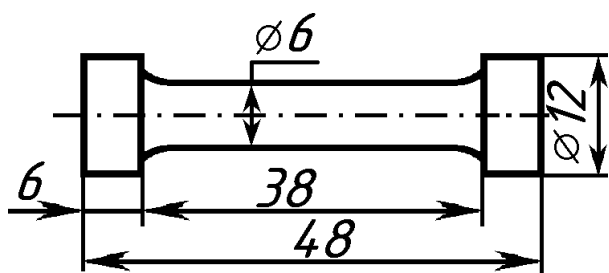


Рис. 4.1. Зразок для випробування

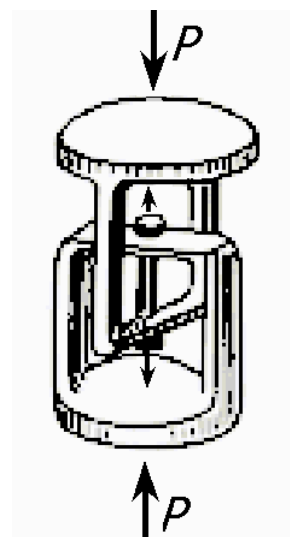


Рис. 4.2. Реверсор

При цьому стискаюча сила преса, що діє зверху та знизу на зав'язані поверхні реверсора, розтягуватимуть зразок. Існують також реверсори для випробувань на зріз та скручування.

Опис преса. Схема преси зображена на рис. 4.3.

За допомогою мотора або руки діаграмний апарат 1 приводиться у обертальний рух навколо осі. При цьому поступово висувається гвинт 5, який

натискає на зразок 2, встановлений реверсор. Сила натискання гвинта передається через зразок на коротке плече важеля 3. На іншому плечі важеля міститься врівноважуючий вантаж 4, підвішений до візка, який може пересуватися по важелю. Пересування візка відбувається автоматично за допомогою пружинних годинникових механізмів 6 і 7, кожен з яких може підключатися до нескінченного ланцюга 8 пересуває візок з вантажем; механізм 6 рухає візок ліворуч, а механізм 7 - праворуч. Якщо навантаження зростає, то довге плече важеля 3 піднімається і один із вусиків регулятора 9 притискається до маховика механізму 6 і загальмовує його. У цей час механізм 7 відсуває вантаж 4 вправо доти, доки важіль не опуститься; тоді відбувається загальмовування механізму 7 (і механізм 6 починає відсувати вантаж у зворотний бік). Таким чином, будь-яке опускання або підняття важеля відразу зупиняється відповідним переміщенням вантажу, що врівноважує. На важелі 3 є шкала навантажень, при подальшому збільшенні навантаження процес повторюється. Прес належить до великого класу випробувальних машин, що мають гвинтовий силосбудник та важільний силовимірвач. Від інших машин цього класу прес вигідно відрізняється тим, що має пристрій для автоматичного врівноваження навантаження.

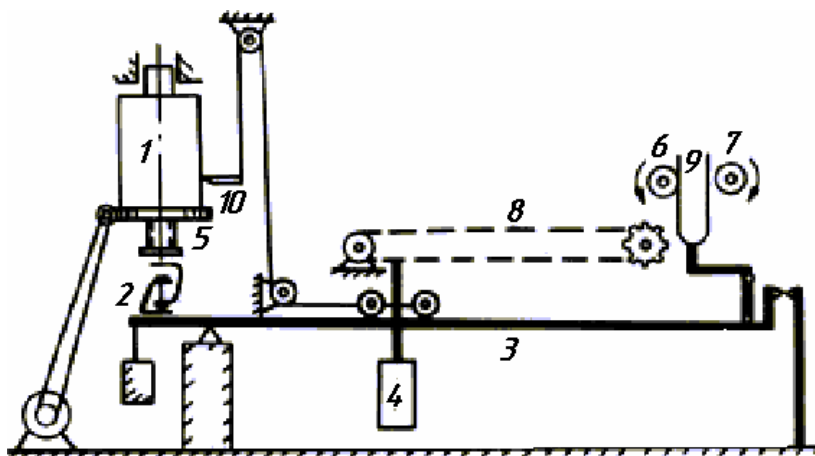


Рис. 4.3. Схема преса

Діаграма розтягування (діаграма сил). Перо 10 (рис. 4.3), яке викреслює на барабані 1 діаграму, пересувається по вертикалі між напрямними. Положення пера визначається положенням візка з врівноважуючим вантажем 4 на важелі 3, оскільки воно підвішене на нитці, прикріпленій до візка і, отже, переміщення

візка вздовж важеля відповідає такому ж вертикальному переміщенню пера. Таким чином, вертикальний масштаб діаграми або масштаб навантажень співпадає з масштабом шкали важеля, становлячи 100 кг на 1 см або 20 кг на 1 см, залежно від величини вантажу 4. При проведенні випробування під час лабораторних робіт 1 см по осі ординат буде відповідати навантаженню 100 кг. Максимальне навантаження 5 т.

Горизонтальний масштаб діаграми, тобто масштаб подовження залежить від швидкості повороту барабана. Кут повороту діаграмного барабана пропорційний величині опускання гвинта, тобто подовження зразка (якщо знехтувати деформацією реверсора); отже, при повороті барабана перо прокреслює на поверхні барабана лінію, горизонтальна проекція якої пропорційна подовженню зразка. Одному міліметру подовження зразка відповідає 10 см по осі абсцис на діаграмі, тобто. подовження виявляються збільшеними в 100 разів (таким чином, 1 см по осі ординат буде відповідати подовженню зразка на 0,01 см).

Проведення випробування та обробка дослідних даних

Проведення випробувань. Перед випробуванням вимірюють довжину зразка (з точністю до 0,1 мм) та його діаметр (з точністю до 0,01 мм). Потім зразок закріплюють у реверсорі та включають випробувальну машину. У процесі випробування на барабані автоматично викреслюється діаграма розтягування. Внаслідок неповного контакту між головками зразка та гніздами для них у реверсорі, на початку діаграми виходить криволінійну ділянку, яку слід виключити, продовживши прямолінійну ділянку діаграми до перетину з віссю абсцис у точці 0 (рис. 4.4). У цьому слід пам'ятати, що кут нахилу прямолінійного ділянки діаграми напруги до осі ординат виходить трохи завищеним, т.к. на деформацію зразка накладаються пружні деформації колон та реверсора.

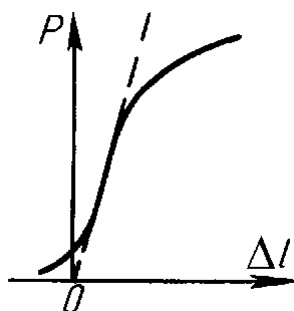


Рис. 4.4. Початкова ділянка діаграми розтягування

Визначення межі пропорційності з допуском 50%. Умовна межа пропорційності з допуском 50 % знаходиться тоді, коли по діаграмі важко точно визначити точку, до якої зберігається лінійна залежність між силою та подовженням зразка.

Межею пропорційності з допуском 50% прийнято називати таку напругу, при якій тангенс кута нахилу дотичної до діаграми розтягування збільшується на 50% порівняно з тангенсом кута нахилу прямолінійної ділянки діаграми. Графічно це виглядає так: на довільній висоті проводять пряму AC (рис. 4.5), паралельну осі абсцис, і відкладають на ній відрізок CD , що дорівнює половині AC . Тангенс кута нахилу прямої OD до осі ординат буде, очевидно, на 50% більше тангенсу кута нахилу прямолінійної ділянки діаграми розтягування. Тому дотична до діаграми NN , проведена паралельно OD , визначить точку K , координата якої буде відповідати шуканій межі пропорційності $\sigma_{пц}$

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{A_0}$$

Визначення умовної межі плинності з допуском 0,2 %. Умовною межею плинності з допуском 0,2 % називається така напруга, при якій у зразку виникають залишкові подовження, що становлять 0,2 % від початкової довжини зразка. Щоб знайти умовну межу плинності, необхідно відкласти у масштабі на осі абсцис відрізок $OO_1 = 0,002l_0$ і провести пряму OS паралельно до прямої OA (рис. 4.6). точка перетину прямої з діаграмою напруг визначить навантаження $(P_T)_{0,2}$, що відповідає умовній межі плинності.

$$(\sigma_T)_{0,2} = \frac{(P_T)_{0,2}}{A_0}$$

Умовна межа плинності перебуває у тому випадку, коли діаграма напруг немає явно вираженої площадки плинності.

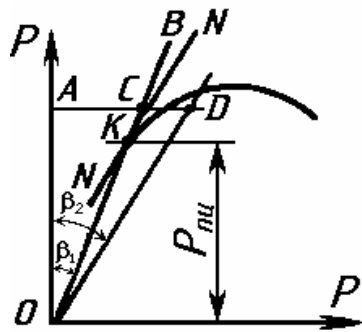


Рис. 4.5. Графічне визначення умовної межі пропорційності

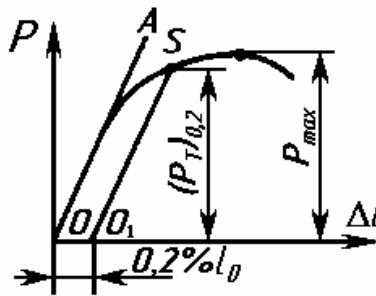


Рис. 4.6. Визначення умовної межі плинності

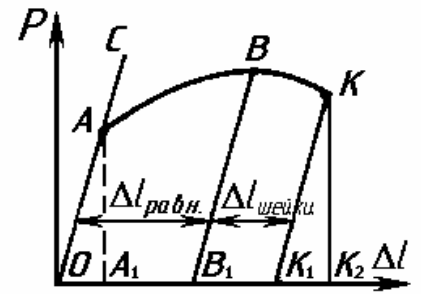


Рис. 4.7. Повна діаграма розтягування

Визначення межі міцності. Так як межею міцності називається напруга, що відповідає максимальному навантаженню, що витримується зразком під час випробування (див. розділ 1), то

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{A_0}$$

де P_{\max} – максимальне навантаження на зразок у процесі випробування, яке визначається з діаграми розтягування.

Визначення відносної деформації 6-кратного та 10-кратного зразків.

Розглянемо характер деформації зразка під час розтягування. На рис. 4.7 відрізок OK_2 , зображує повну деформацію зразка Δl_0 . Сюди входять як залишкова, і пружна деформація зразка. Щоб одержати на діаграмі лише залишкове подовження, слід провести похилий пряму KK_1 , паралельну OC , яка відсіче на осі абсцис відрізок OK_1 , що відповідає залишковій деформації, та $K_1 K_2$ деформації зразка при розриві.

Залишкове подовження можна знайти також безпосередньо, вимірявши довжину зразка до та після розриву:

$$\Delta l = l_1 - l_0$$

Після випробувань 6-разового зразка визначають абсолютне залишкове подовження 10-кратного зразка ($l_0 = 10d_0$) такого ж діаметра:

$$\Delta l_{10} = (\Delta l_{\text{равн}})_{10} + (\Delta l_{\text{шійки}})_{10}$$

де $(\Delta l_{\text{равн}})_{10}$ – рівномірна деформація зразка аж до руйнівного навантаження (див. відрізок OB_1 на рис. 4.7);

$(\Delta l_{\text{шийки}})_{10}$ – деформація, що відповідає утворенню шийки (відрізок B_1K_1 на рис. 4.7).

Деформація $(\Delta l_{\text{равн}})$ 10-кратного зразка буде в стільки разів більше відповідної деформації 6-кратного зразка, скільки початкова його довжина більше довжини 6-кратного зразка, тобто

$$(\Delta l_{\text{равн}})_{10} = (\Delta l_{\text{равн}})_6 \cdot \frac{(l_0)_{10}}{(l_0)_6} = OB_1 \frac{(l_0)_{10}}{(l_0)_6}$$

$(\Delta l_{\text{шийки}})_{10}$ – залежить тільки від діаметра зразка, який у обох зразків однаковий, тому

$$(\Delta l_{\text{шийки}})_{10} = (\Delta l_{\text{шийки}})_6 = B_1K_1$$

Вимірявши в масштабі відрізки OB_1 та B_1K_1 на діаграмі розтягування, знайдемо

$$(\Delta l_0)_{10} = OB \frac{(l_0)_{10}}{(l_0)_6} + B \cdot K = (\Delta l_{\text{равн}})_6 \cdot \frac{(l_0)_{10}}{(l_0)_6} + \Delta l_{\text{шийки}}$$

Відносне подовження зразків визначимо за формулами:

$$\delta_6 = \frac{(\Delta l)_6}{(l_0)} \cdot 100\%; \quad \delta_{10} = \frac{(\Delta l)_{10}}{(l_0)_{10}} \cdot 100\%.$$

Визначення відносного звуження поперечного перерізу після розриву зразка. Відносне звуження визначається так:

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\%,$$

де A_0 та A_1 – площі поперечного перерізу зразка до випробування та після розриву відповідно.

Визначення повної та питомої робіт, витрачених на деформацію зразка.

Площа діаграми OAA_1O (рис. 4.7) виражає роботу деформації в межах пружності; площа $OAKK_1O$ – роботу, витрачену на освіту пластичної деформації; площа $OAKK_2O$ – повну роботу деформації до розриву (1 см² площі діаграми відповідає роботі деформації в 1 кг см).

Повна робота, витрачена на розрив зразка, віднесена до одиниці його обсягу, називається питомою роботою деформації,

$$a = \frac{W}{V},$$

де V – обсяг середньої, циліндричної частини зразка,
 W – робота, витрачена на розрив зразка.

Питома робота розриву характеризує здатність матеріалу поглинати енергію при розриві, в'язкість матеріалу та опір його динамічному впливу.

Побудова діаграми справжньої напруги. Справжня діаграма розтягування будується у координатах: справжнє напруження – справжня деформація. Справжня напруга S є відношенням розтягуючого зусилля P_t (визначеного за діаграмою розтягування) до площі поперечного перерізу в даний момент випробування, тобто

$$S = \frac{P_t}{A_t}.$$

Справжня деформація

$$\psi_t = \frac{A_0 - A_t}{A_t} \cdot 100\%$$

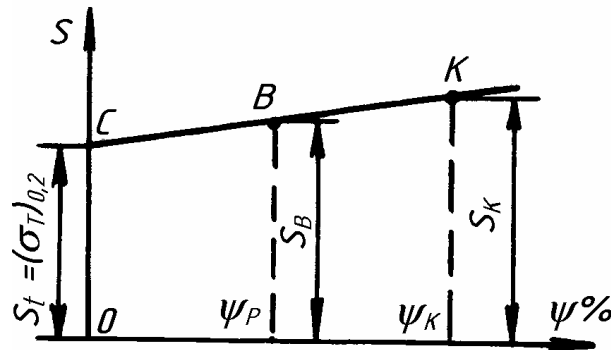


Рис. 4.8. Діаграма істинної напруги

Для побудови істинної діаграми напруги необхідно розглянути три точки, відповідно межі плинності, межі міцності та моменту розриву.

При межі плинності поперечний переріз зразка змінюється незначно, тому можна прийняти, що в цьому випадку

$$A_t \cong A_0; \psi_t = 0;$$

$$S_T = \sigma_T = (\sigma_T)_{0,2}.$$

Для того, щоб визначити площу перерізу зразка в момент, коли навантаження досягає P_{max} , необхідно виміряти діаметр зразка після розриву в середній частині між головкою та місцем розриву (на більш довгій частині зразка)

та підрахувати площу перерізу A_p . Істинна межа міцності та відносне поперечне звуження для цієї точки будуть рівні,

$$S_B = \frac{P_{max}}{A_0}; \quad \psi_p = \frac{A_0 - A_p}{A_0} \cdot 100\%$$

Справжнє напруження та відносне поперечне звуження при розриві знайдемо за формулами:

$$S_k = \frac{P_k}{A_k}; \quad \psi_k = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100\%$$

де P_k – навантаження при розриві зразка (кінцеве);

A_k – площа перерізу зразка у місці шийки.

З'єднаємо три точки) C , B , і K і отримаємо діаграму істинної напруги (рис. 4.8)

Розділ 5

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ

Мета роботи: визначення значення твердості матеріалу за Брінеллем та Роквеллом.

Загальні відомості. Під твердістю розуміють властивість матеріалу опиратися проникненню в нього більш твердого наконечника (індентора), який не отримує залишкових деформацій. Випробування на твердість набули великого поширення у промисловості, т.к. вони дають змогу вивчати властивості матеріалу не тільки на дослідних зразках, а й на готових конструкціях та деталях. До того ж, є можливість за результатами випробувань на твердість визначити величину межі міцності матеріалу без проведення випробувань матеріалу на розтяг.

Найбільшого поширення набули статичні методи:

- а) метод Брінелля – вдавлювання сталеві загартованої кульки;
- б) метод Роквелла - вдавлювання сталеві кульки при контролі м'яких матеріалів або алмазного конуса при випробуванні твердих;
- в) метод Віккерса – вдавлювання алмазної піраміди.

Тут розглядаються лише найпоширеніші методи, до яких належать: метод вимірювання твердості за Брінеллем та метод вимірювання твердості за Роквеллом).

Метод вимірювання твердості за Брінеллем

Сутність методу полягає у вдавлюванні кульки (сталевого або з твердого сплаву) в зразок або виріб під впливом навантаження P , що накладена перпендикулярно поверхні зразка, протягом певного часу та вимірювання діаметра відбитка d після зняття навантаження (рис. 5.1.). Діаметр сферичного відбитка, що утворюється, d вимірюється лупою-компаратором (за допомогою мікроскопа).

Твердість по Брінеллю (НВ) чисельно дорівнює напрузі, вираженому ставленням доданого навантаження P до площі поверхні A сферичного відбитка діаметром d (розмірність при позначенні твердості опускається).

Для випадку вимірювання навантаження у кілограмах

$$\text{НВ} = \frac{P}{A}, \quad (5.1)$$

Для випадку вимірювання навантаження у ньютонках

$$\text{НВ} = 0,102 \frac{P}{A} \quad (5.2)$$

$$\text{де } A = \frac{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2} = \frac{\pi D^2}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}}\right),$$

φ – кут вдавлювання, тобто кут між двома радіусами кульки, проведеними до кінців відбитка.

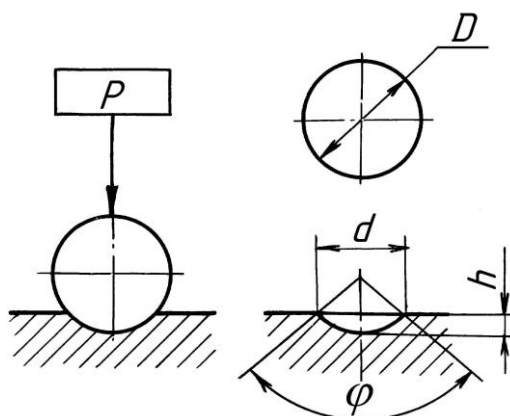


Рис. 5.1. Схема вдавлювання кульки в зразок або виріб

Згідно з формулами (5.1 та 5.2) для отримання однакової твердості при використанні кульок різних діаметрів (допускається застосування діаметрів 1,0; 2,0; 2,5; 5,0 та 10 мм) необхідно, щоб кут вдавлювання φ (рис. 5.1) залишався

незмінним при постійному відношенні навантаження до квадрата діаметру кульки, яке позначається через

$$K = \frac{0,102P}{D^2}, \text{Н / мм}^2 \quad (K = \frac{P}{D^2}, \text{кг / мм}^2).$$

Для вибору значень K при випробуванні різних матеріалів рекомендується користуватися даними табл. 5.1. Визначившись значенням і діаметром кульки D , використовуваного при випробуваннях, вибирають навантаження P згідно з даними табл. 5.2.

Таблиця 5.1

Значення коефіцієнта K

Метали та сплави	K	НВ	
Залізо, сталь, чавун та інші високоміцні сплави	30	от 96 до 450	
Титан та його сплави	15	50	220
Алюміній, мідь, нікель та їх сплави	10	32	200
Магній та його сплави	5	16	100
Подшипникові сплави	2,5	8	50
Олово, свинець	1	3,2	20

Згідно твердості по Брінеллю при використанні кульки $D=10$ мм під навантаженням $P=29420$ Н (3000 кг) з тривалістю витримки під навантаженням від 10 до 15 секунд позначається цифрами, що характеризують величину твердості, та літерами НВ, наприклад: 185 НВ. За інших умов випробування після літер НВ вказується умова випробування в наступному порядку: діаметр кульки, навантаження та тривалість витримки під навантаженням, наприклад: 185 НВ 5/750/20 – твердість за Брінеллем, визначена із застосуванням кульки $D = 5$ мм , при навантаженні 750 кг та тривалості витримки під навантаженням 20 с. Розмірність числа твердості завжди опускається.

Діаметр кульки та навантаження слід вибирати так, щоб діаметр відбитка знаходився в межах $0,25D < d < 0,6D$. У разі недотримання цих вимог необхідно змінити умови випробувань (D та P).

Твердість НВ для багатьох матеріалів пов'язана з межами міцності емпіричними залежностями, наприклад, для сталей $\sigma_B = (2,94 - 3,53) \text{ НВ, МПа}$.

Слід пам'ятати, що по Брінеллю не можна визначати твердість дуже м'яких ($\text{НВ} < 8$) і дуже твердих матеріалів ($\text{НВ} > 450$). У м'яких матеріалах кулька

зануриться дуже глибоко, діаметр відбитка буде близьким до діаметра кульки D і перестане служити критерієм твердості. Навпаки, якщо твердість матеріалу буде дуже великою, величина відбитка вийде маленькою і краї його будуть такими нечіткими, що не вдасться точно виміряти діаметр відбитка, до того ж кулька може отримати залишкову деформацію, яка спотворює результати випробування.

Таблиця 5.2

Значення навантаження P

Діаметр кульки, мм	Навантаження P , Н (кГ), для $K=0,102P/D^2$, (P/D^2)					
	30	15	10	5	2,5	1
1,000	294,2 (30)	–	98,07 (10)	49,03 (5)	24,52 (2,5)	98,807 (1)
2,000	1177 (120)	–	392,3 (40)	196,1 (20)	98,07 (10)	39,23 (4)
2,500	1839 (187,5)	–	612,9 (62,5)	306,0 (31,2)	153,0 (15,6)	60,80 (6,2)
5,000	7355 (750)	–	2452 (250)	1226 (125)	612,9 (62,5)	245,2 (25)
10,000	29420 (3000)	14710 (1500)	9807 (1000)	4903 (500)	2452 (250)	980,7 (100)

Умови випробувань та вимоги до зразків. Мінімальна товщина зразка повинна бути не менше десятикратної глибини відбитка та визначатися за формулою $S \geq 10h$.

$$S \geq 10 \cdot \frac{0,102P}{\pi D H V} \quad (P \text{ виражена в Н});$$

$$S \geq 10 \cdot \frac{P}{\pi D H V} \quad (P \text{ виражена в кГ}).$$

Насправді мінімальна товщина зразка чи виробу визначається за таблицею, наведеної у додатку 2

При випробуванні на твердість особливе значення має якість поверхні. Чим менша глибина вдавлювання індентора (або навантаження), тим вище має бути чистота поверхні. Важливо також, щоб у процесі підготовки поверхні не змінювалися властивості поверхневого шару (внаслідок наклепу або розігріву під час шліфування або полірування).

. Тривалість витримки під навантаженням повинна бути від 10 до 15 с для чорних металів, для кольорових металів та сплавів – від 10 до 180 с, залежно від

матеріалу та його твердості. Відстань між центрами двох сусідніх відбитків має бути не меншою за $4d$, а відстань від центру відбитка до краю зразка (виробу) – не менше ніж $2,5d$; для металів з твердістю менше 35НВ відстані повинні бути відповідно $6d$ та $3d$.

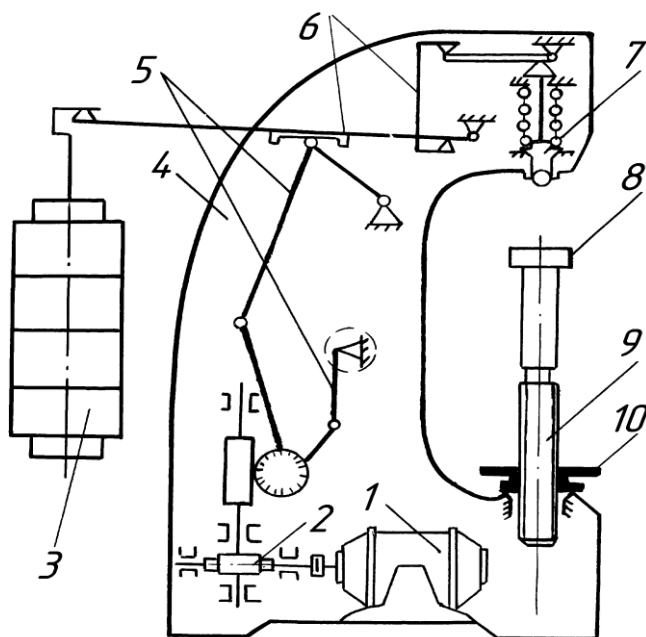


Рис. 5.2. Прилад для вимірювання твердості матеріалів ТШ-2М

Число твердості може бути визначене за формулою (5.1) або (5.2). Для швидкого визначення числа твердості, залежно від діаметра кульки D , випробувального навантаження P , величини K , користуються спеціальними таблицями (див. табл. 5.3), що заміняють обчислення за вказаними формулами, наведеними у додатку 2

Прилад вимірювання твердості металів ТШ – 2М (тип ТБ). Прилад ТШ-2М призначений для вимірювання твердості металів за методом Брінелля. Принципова схема пристрою зображена на рис. 5.2. Механізм підйомного столика 8, на який поміщається зразок, складається з пари гвинт-маховик 9, 10. Випробування здійснюються за допомогою механізму, що приводиться в роботу електродвигуном 1, включення якого здійснюється натисканням пускової кнопки, розташованої на лівій стороні станини 4. Від двигуна через черв'ячний редуктор 2 обертання передається на кривошипно-шатунний механізм навантаження 5. Шатун опускається, і звільнена система важеля навантаження 6 з вантажами 3 передає через оправку 7 з кулькою на кінці задане навантаження образ. Механізм навантаження повертається у вихідне положення механізмом перемикачів

обертання ротора електродвигуна. Електродвигун при цьому автоматично вимикається.

Час витримки зразка під повним навантаженням контролюють за допомогою сигнальної лампи. Величина навантаження, діаметр кульки та час випробування можуть змінюватись шляхом регулювання преса в залежності від твердості матеріалу зразка.

Проведення випробувань. Вибираються відповідний кульковий наконечник, закріплюють його в кульковій оправці 7, накладають на підвіску необхідну кількість вантажів та встановлюють необхідну тривалість витримки зразка під навантаженням. Оскільки твердість матеріалів, що випробовується студентами в лабораторії, лежить у межах від $140 < \text{НВ} < 450$, то випробування проводяться при навантаженні $P=29240 \text{ Н}$ (3000 кг) та діаметрі кульки $D=10 \text{ мм}$. Зразок кладеться на столик преса 8 і за допомогою маховика 10 до відмови підтискається до кулькової оправки 7. Натисканням на кнопку вмикається електродвигун 1, обертання якого через редуктор 2 передається на зразок. Після закінчення випробування, коли лампочка згасне і ввімкнеться електродвигун, опускається столик, знімається зразок і вимірюється діаметр отриманого відбитка за допомогою спеціальної лупи або мікроскоп. На рис. 5.3 дано зображення відбитка, видиме в лупу ($d = 4,25 \text{ мм}$).

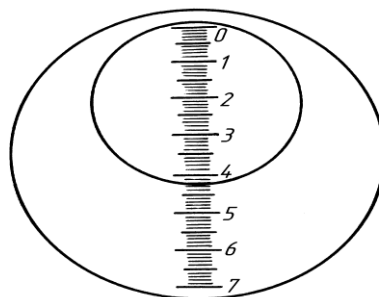


Рис. 5.3. Схема вимірювання відбитка

Діаметр кожного відбитка слід виміряти двічі за двома взаємно перпендикулярними напрямками з точністю до сотих часток міліметра та взяти середнє з двох отриманих вимірів (різниця вимірів не повинна перевищувати 2%). Число відбитків щоразу має бути не менше трьох. По діаметру відбитка знаходять число твердості за формулами (5.1) або (5.2) або табл. 5.3. За кількістю

обчислюють межу міцності матеріалу. Для вуглецевої сталі $\sigma_B=3,53$ НВ, МПа.

Таблиця 5.3

Величини твердості за Брінеллем

при діаметрі кульки $D=10$ мм, навантаженні $P=29420$ Н (3000 кг) і $K=30$.

<i>d</i> , мм	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
2,40	653	648	643	637	632	627	621	616	611	606
2,50	601	597	592	587	582	578	573	569	564	560
2,60	555	551	547	543	538	534	530	526	522	518
2,70	514	510	507	503	499	495	492	488	485	481
2,80	477	474	471	467	464	461	457	454	451	448
2,90	444	441	438	435	432	429	426	423	420	417
3,00	415	412	409	406	404	401	398	395	393	390
3,10	388	385	383	380	378	375	373	370	368	366
3,20	363	361	359	356	354	352	350	347	345	343
3,30	341	339	337	335	333	331	329	326	325	323
3,40	321	319	317	315	313	311	309	307	306	304
3,50	302	300	298	297	295	293	292	290	288	286
3,60	285	283	282	280	278	277	275	274	272	271
3,70	269	268	266	265	263	262	260	259	257	256
3,80	255	253	252	250	249	248	246	245	244	242
3,90	241	240	239	237	239	235	234	232	231	230
4,00	229	228	226	225	224	223	222	221	219	218
4,10	217	216	215	214	213	212	211	210	208	204
4,20	207	205	204	203	202	201	200	199	198	198
4,30	197	196	195	194	193	192	191	190	189	188
4,40	187	186	185	185	184	183	182	181	180	179
4,50	179	178	177	176	175	174	174	173	172	171
4,60	170	170	169	168	167	167	166	165	164	164
4,70	163	162	161	161	160	159	158	158	157	156
4,80	156	155	154	154	153	152	152	151	150	150
4,90	149	148	148	147	146	146	145	144	144	143
5,00	143	142	141	141	140	140	139	138	138	137
5,10	137	136	135	135	134	134	133	133	132	132
5,20	131	130	130	129	129	128	128	127	127	126
5,30	126	125	125	124	124	123	123	122	122	121
5,40	121	120	120	119	119	118	118	117	117	116
5,50	116	115	115	114	114	114	113	113	112	112
5,60	111	111	110	110	110	109	109	108	108	107
5,70	107	107	106	106	105	105	105	104	104	103
5,80	103	103	102	102	101	101	101	100	99,9	99,5
5,90	99,2	98,8	98,4	98,0	97,7	97,3	96,9	96,6	96,2	95,9
6,00	95,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Метод вимірювання твердості за Роквеллом

Сутність методу полягає у вдавлюванні наконечника з алмазним конусом або зі сталеву кулькою в випробуваний зразок (виріб) під дією послідовно

доданих попередньої (P_0) і основної (P_1) навантажень і у вимірюванні залишкової глибини проникнення цього наконечника (e) після зняття основного навантаження (рис. 5.4).

При вимірі твердості за Роквеллом застосовують два типи стандартних наконечників:

а) для матеріалів невеликої (середньої) твердості – сталева кулька діаметром 1,588 мм (1/16 дюйма);

б) для матеріалів з високою твердістю (з твердістю по Брінеллю $HV > 230$) – алмазний наконечник, що є конусом з кутом $\alpha = 120^\circ$ і радіусом закруглення при вершині $R = 0,2$ мм.

При випробуванні по Роквеллу спочатку прикладається мале (попереднє навантаження) $P_0 = 98$ Н (10 кг) для надійного притискання наконечника до зразка. Потім додатково прикладається додаткове навантаження P_1 , яке в сумі з попереднім навантаженням становлять загальне навантаження P , що додається до випробуваного зразка ($P_0 + P_1 = P$). При відліку числа твердості навантаження P зменшується до P_0 .

Таким чином, твердість за Роквеллом характеризується різницею між максимальною глибиною проникнення в матеріал наконечника (вираженої в поділах шкали приладу) та залишковою глибиною його проникнення після зняття основного навантаження (рис. 5.4).

При випробуванні по Брінеллю більш твердому матеріалу відповідає і більше твердості. Щоб ця умова виконувалася і при визначенні твердості за Роквеллом, вводять умовну шкалу глибин, приймаючи за її розподіл глибину, рівну 0,002 мм. При випробуванні алмазним конусом гранична глибина застосування становить 0,2 мм, або $0,2/0,002 = 100$ поділів, при випробуванні кулькою – 0,26 мм, або $0,26/0,002 = 130$ поділів.

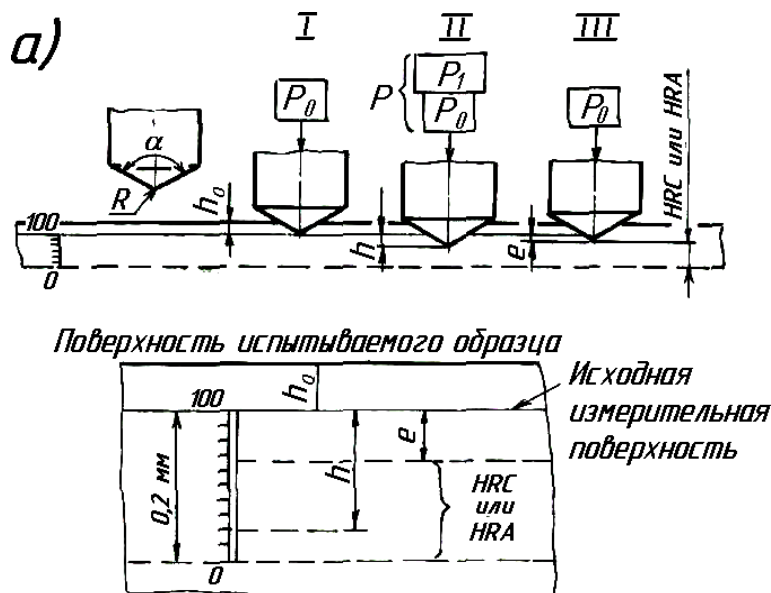
Виміри глибини проникнення здійснюють за шкалою циферблату індикатора приладу. На циферблаті нанесено числа твердості в умовних одиницях. Одиниця твердості за Роквеллом відповідає осьовому переміщенню наконечника на 0,002 мм (розмірність при позначенні числа твердості опускається).

Прилад для вимірювання твердості за Роквеллом має шкали А, В і С. Відлік за шкалами А та С (на циферблаті індикатора приладу ці шкали мають чорний колір) проводиться при втисканні в випробуваний зразок алмазного наконечника. Відлік за шкалою В (на циферблаті індикатора ця шкала червоного кольору) провадиться при втисканні у зразок сталеві кульки під дією відповідних навантажень, зазначених у табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Значення навантажень вдавлюємої кульки.

Навантаження	Випробування з Роквелла					
	Шкала С		Шкала А		Шкала В	
	Н	кг	Н	кг	Н	кг
Попереднє навантаження (P_0)	98	10	98	10	98	10
Основне навантаження (P_1)	1373	140	490	50	883	90
Загальне навантаження (P)	1471	150	588	60	981	100



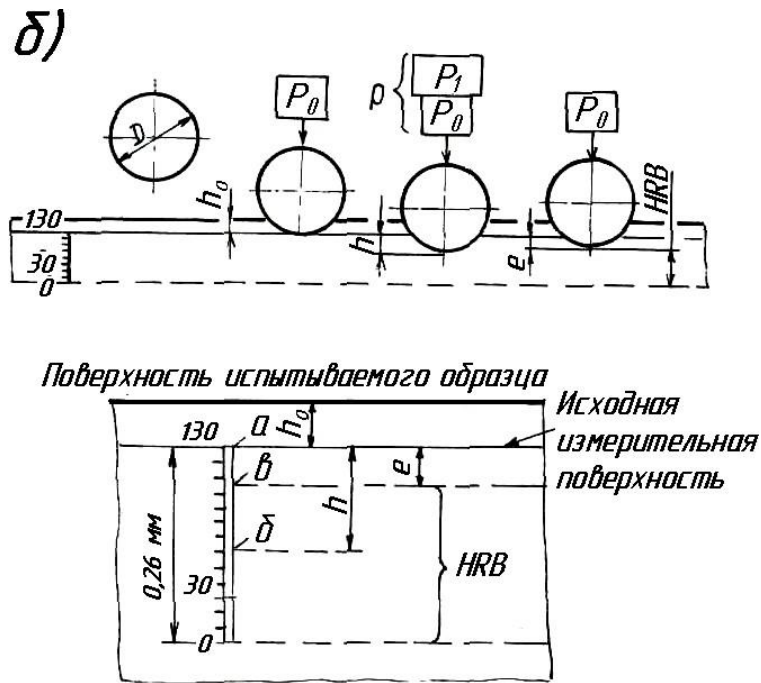


Рис. 5.4. Схеми впровадження алмазного (а) та кулькового (б) наконечників
 Чим твердіший матеріал, тим меншою буде глибина проникнення наконечника в нього. Щоб при більшій твердості матеріалу виходило більше твердості за Роквеллом, прийнято висловлювати його формулами:

а) при вимірі за шкалою А та С

$$HR = 100 - \frac{e}{0,002} \text{ (див. рис. 5.4, а)}$$

де e – залишкова глибина проникнення наконечника;

б) при измерении по шкале В

$$HR = 130 - \frac{e}{0,002} \text{ (див. рис. 5.4, б)}$$

Символ HR супроводжується літерою, що вказує на шкалу, за якою проводилися випробування, наприклад HRA , HRB або HRC .

Шкалу А застосовують для випробування твердих сплавів, тонкого листового матеріалу та визначення твердості тонкого верхнього шару поверхні.

Шкалу застосовують для випробувань металів середньої твердості.

Шкала С служить для визначення твердості термічно обробленої сталі.

Граничні числа твердості для відповідних шкал наведено у табл. 5.5. При твердості менше HRC 20 алмаз занадто глибоко проникає в зразок, а при твердості

більше *HRC 67* – в алмазному конусі створюється занадто великий тиск. Аналогічно пояснюються і межі застосування шкал *A* і *B*.

Таблиця 5.5

Граничні числа твердості

Позначення		Навантаження кг, загальна = (попередити. + основна)	Вид наконечника	Межа виміру твердості за Роквеллом HR	Зразкова твердість за Брінеллю HB
шкали	числа твердості				
B	HRB	100=(90+10)	кулька	25-100	60-230
C	HRC	150=(10+140)	алмазний конус	20-67	230-700
A	HRA	60=(10+50)	алмазний конус	78-85	свыше 700

Число твердості за Роквеллом можна перевести до числа твердості за Брінеллем, користуючись табличними даними (табл. 5.6) або емпіричними формулами Петренко:

а) для чорної шкали

$$HB = \frac{1420000}{(100 - HRC)^2}$$

б) для червоної шкали

$$HB = \frac{7300}{130 - HRB}$$

Але слід пам'ятати, що переклад чисел Роквелла у числі Брінелля не зовсім точний.

Результат випробувань по Брінеллю точніше за випробування з Роквелла внаслідок великих розмірів одержуваних відбитків і, отже, меншого впливу неоднорідності матеріалу та дефектів на поверхні. Однак метод Роквелла має такі переваги: незначність пошкоджень поверхні випробуваного зразка, можливість визначення твердості тонко- стінних деталей, а також твердості термічно оброблених сталевих поверхонь.

Переклад чисел твердості за Роквеллом у числі твердості за Брінеллем

<i>HRB</i>	<i>HB</i>	<i>HRB</i>	<i>HB</i>	<i>HRB</i>	<i>HB</i>	<i>HRB</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HB</i>
100	237	75	137	50	93	25	68	65	682	40	370
99	231	74	135	49	92	24	67	64	665	39	360
98	225	73	133	48	90	23	66	63	650	38	350
97	219	72	131	47	88	22	65	62	635	37	340
96	214	71	127	46	87	21	65	61	621	36	331
95	209	70	125	45	86	20	65	60	607	35	322
94	204	69	123	44	85	19	64	59	594	34	314
93	198	68	121	43	83	18	64	58	581	33	304
92	193	67	119	42	82	17	63	57	568	32	296
91	189	66	117	41	81	16	63	56	555	31	288
90	184	65	116	40	80	15	62	55	542	30	280
89	180	64	114	39	79	14	62	54	530	29	272
88	177	63	112	38	78	13	62	53	518	28	265
87	173	62	110	37	77	12	61	52	506	27	258
86	169	61	108	36	76	11	61	51	494	26	252
85	165	60	107	35	75	10	60	50	482	25	246
84	162	59	106	34	75	9	60	49	470	24	240
83	159	58	104	33	74	8	59	48	458	23	234
82	156	57	103	32	74	7	59	47	447	22	228
81	153	56	101	31	73	6	58	46	436		
80	150	55	100	30	72	5	58	45	425		
79	147	54	98	29	71	4	58	44	414		
78	144	53	97	28	71	3	58	43	403		
77	141	52	96	27	70	2	57	42	392		
76	138	51	95	26	69	-	57	41	381		

Умови випробування та вимоги до зразків. Товщина зразка або глибина поверхневого шару повинна бути не менше ніж у 8 разів більша за величину e . Після випробування на протилежній стороні зразка не повинно бути помітно слідів деформації від відбитка. Відстань між центрами двох сусідніх відбитків або від центру відбитків до краю зразка має становити не менше 3 мм, якщо у нормативно-технічній документації на металопродукцію не встановлено інших вимог.

Прилад для виміру твердості металів ТК-2М. Прилад призначений для вимірювання твердості металів та сплавів за методом вдавлювання алмазного конуса або сталевий загартованої кульки під дією заданого навантаження протягом певного часу (метод Роквелла). Принципова схема приладу показана на рис. 5.5. Механізм 14 підйомного столика 11 складається з пари гвинт-маховик 12, 13. Випробування зразка на твердість здійснюється за допомогою механізму

занурення, що приводиться в дію електродвигуном 1. Від двигуна через черв'яковий редуктор 2 обертання передається кулач через шток 5 опускає вантажний важіль 6 з вантажами 3 і передає навантаження на зразок через наконечник 10 з кулькою або алмазним конусом на кінці. При повороті кулачкового блоку 16 на один оборот шток 5 повертає вантажний важіль 6 в початкове положення, знімаючи з наконечника додане навантаження (за рахунок підвіски 6 і пружини 9 на зразок передається навантаження, рівне відповідно 60 і 10 кН; кг передається на зразок рахунок змінних вантажів 3).

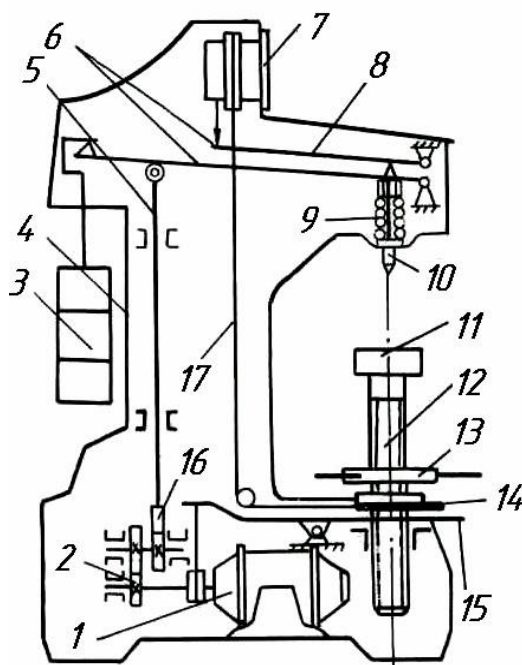


Рис. 5.5. Прилад для вимірювання твердості матеріалів ТК-2М

Включення приводу навантаження здійснюється педаллю 15, а включення електродвигуна – вмикачем, встановленим на правій стороні корпусу приладу 4.

Фіксування глибини проникнення наконечника в зразок здійснюється індикатором 7, який рухається важелем 8. Точна установка індикатора на нуль досягається маховичком 14, який керує шкалою індикатора 7 через трос 17.

Проведення випробувань. Випробуваний зразок поміщають на підйомний столик 11. Відповідно до вичікуваної твердості вибирають тип наконечника і встановлюють відповідні вантажі 3. (У лабораторії кафедри випробування проводяться для матеріалів середньої твердості шляхом вдавлювання сталеві

кульки – відліку) щенням маховичка 13 піднімається столик із зразком до зіткнення з наконечником.

Потім продовжують повільно обертати маховик підйомного столика доти, доки мала стрілка індикатора стане проти червоної точки, а велика приблизно вертикально. При такому положенні стрілок пружина 9 стискається та створює додаткове навантаження на зразок $P_0=10$ кг.

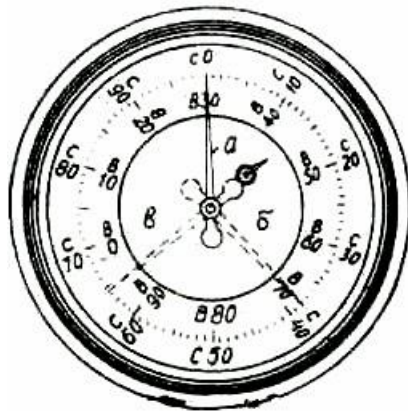


Рис. 5.6. Індикатор преса Роквелла (ТК-2)

Після цього за допомогою маховичка управління 14 шкалою індикатора поєднують тридцять поділ червоної шкали (відповідне позначки 130 умовної шкали глибин) з кінцем великої стрілки індикатора (становище "а" на рис. 5.6). Натисканням педалі 15 включають механізм навантаження приладу: спочатку прикладається повне навантаження (вона відповідає положенню стрілки «б»), відбувається витримка під навантаженням, а потім повне навантаження знижується до попереднього навантаження P_0 . Положення стрілки при цьому навантаженні (положення «в» на рис. 5.6) відповідає числу твердості за Роквеллом. (На рис. 5.6 – $HRB=94$.) Зазначені положення стрілки пов'язані з положенням кульки на шкалі глибин, позначеними літерами «а», «б» та «в». Після визначення числа твердості обертанням маховика 13 у зворотному напрямку звільняють зразок. На кожному зразку має бути проведено не менше трьох випробувань. Усі випробування бажано проводити однією ділянці зразка. Відстань від центру відбитка до краю зразка або до центру іншого відбитка має бути не менше 4 мм. Не слід також вдавлювати наконечник близько до відбитків, отриманих за способом Брінелля.

Розділ 6

ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПОЗДОВЖНЬОЇ ПРУЖНОСТІ ТА КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ПРИ ВИПРОБУВАННІ МАТЕРІАЛУ НА РОЗТЯГ

Мета роботи: визначення пружних характеристик матеріалу – модуля поздовжньої пружності (модуля Юнга) та коефіцієнта Пуассона; ознайомлення із принципами роботи приладів для вимірювання малих деформацій – тензомерами.

Загальні відомості. Для переважної більшості матеріалів у межах пружного деформування до межі пропорційності між напругами та деформаціями має місце прямо пропорційна залежність (рис. 1.3), яка була встановлена Р. Гуком. В умовах осьового розтягування (стиснення), коли тільки по двох гранях виділеного з об'єму матеріалу елемента діють нормальні напруження (рис. 6.1), спостерігається його лінійне деформування – поздовжнє подовження (укорочення) та зміна розмірів поперечного перерізу. При цьому нормальна напруга прямо пропорційна відносної поздовжньої деформації:

$$\sigma = \varepsilon E.$$

Ця залежність отримала назву закону Гука при розтягуванні-стисненні. Коефіцієнт E називається модулем поздовжньої пружності. Як випливає з наведеної залежності, E чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу прямолінійної ділянки діаграми напруги при розтягуванні (стисненні) до вісі абсцис (рис. 1.3). Чим більша величина E , тим менше деформуватиметься матеріал під навантаженням. Таким чином, модуль поздовжньої пружності характеризує жорсткість матеріалу під час розтягування-стиснення.

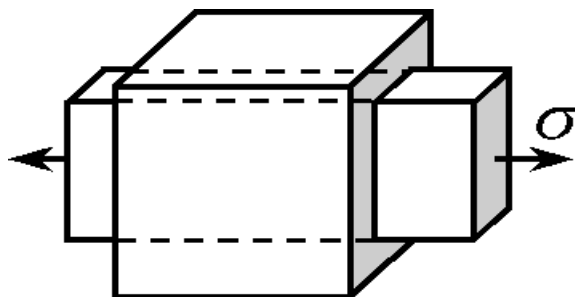


Рис. 6.1. Лінійне деформування об'єму матеріалу.

В умовах деформування до межі пропорційності відношення відносної поперечної деформації ε' до відносної поздовжньої ε , як показав С. Пуассон, є для даного матеріалу величиною постійної:

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}.$$

Ця величина називається коефіцієнтом поперечної деформації, чи коефіцієнтом Пуассона. Значення береться у зазначеній залежності за абсолютною величиною у зв'язку з тим, що при подовженні зразка спостерігається зменшення його поперечних розмірів (рис. 6.1).

Модуль поздовжньої пружності та коефіцієнт Пуассона є досить стабільними фізичними характеристиками матеріалу, що слабо залежать від температури, швидкості навантаження та інших зовнішніх факторів, тому їх умовно називають пружними постійними матеріалами.

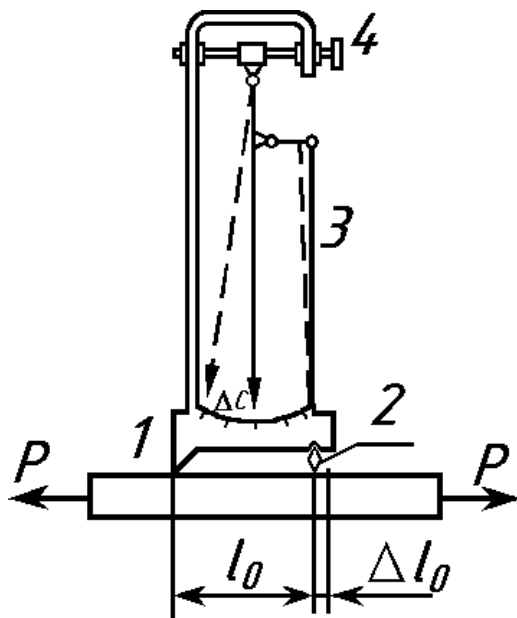


Рис. 6.2. Важільний тензометр Гуггенбергера

Прилади для вимірювання деформації – тензометри. Важільний тензометр Гуггенбергера служить для безпосереднього вимірювання лінійної деформації при статичному навантаженні та відноситься до механічних тензометрів (рис. 6.2). Жорстка рама приладу з нерухомим ножом 1 має паз, який входить рухома призма 2, з'єднана системою важелів 3 зі стрілкою приладу. Для встановлення стрілки в робоче положення служить гвинт 4. Для виміру деформації тензометр за допомогою спеціальної струбцини притискається до

зразка. У процесі розтягування (стиснення) зразка довжина його ділянки l_0 , укладеного між рухомою та нерухомою призми (база приладу), збільшується (зменшується) на величину Δl_0 , при цьому відбувається поворот призми 2 навколо її верхнього кінця та разом з цим за рахунок системи важелів 3 відбувається відхилення стрілки за шкалою приладу на величину ΔC . Величина абсолютної лінійної деформації Δl_0 пов'язана з величиною ΔC відношенням:

$$\Delta l_0 = \frac{\Delta C}{K},$$

де K – коефіцієнт збільшення тензометра. Величина K змінюється в межах 1000 – 1200 і вказується у паспорті приладу.

Величина відносної деформації у місці встановлення тензометра визначається за залежністю:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} = \frac{1}{Kl_0} \cdot \Delta C = n \cdot \Delta C,$$

Величина відносної деформації у місці встановлення тензометра визначається за залежністю:

Тензорезистори. Для вимірювання деформації застосовують такі прилади – датчики, в яких використовується взаємозв'язок між деформацією, що сприймається датчиком, та якоюсь електричною його характеристикою (ємністю, індуктивністю, опором). Найбільшого поширення на практиці набули тензометри омичного опору – тензорезистори, або тензодатчики. Тензорезистори служать для вимірювання відносної деформації на поверхні деталі як за статичних, так і за динамічних навантажень.

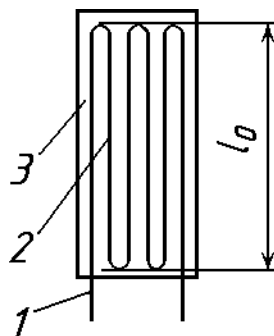


Рис. 6.3. Тензорезистор

Тензорезистор (рис. 6.3) є тонким константановим або ніхромовим дротом або фольгою 2, вклеєною у вигляді петель між двома смужками тонкого паперу 3.

До кінців дроту припаюють два мідні провідники 1. База тензорезистора l_0 може коливатися від 3 до 5 мм, опір – від 50 до 500 Ом.

Тензорезистор наклеюється на поверхню деталі так, щоб розмір бази l_0 збігався з напрямком, вздовж якого вимірюється деформація. При сумісному деформуванні деталі та датчика змінюється довжина та площа перетину дроту тензорезистора, що призводить до зміни його омичного опору. Дослідження показують, що відносна величина зміни опору дроту пропорційна його відносному подовженню:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K \varepsilon,$$

де K – коефіцієнт тензочутливості, який залежить від матеріалу дроту (для константану $K = 2 \div 2,4$). Для датчика K також залежить від якості його наклейки на деталь. Таким чином визначення деформації за допомогою тензорезистора зводиться до вимірювання зміни його опору.

Для вимірювання зміни опору тензорезистора на практиці широке застосування отримала мостова схема його включення (рис. 6.4), що дозволяє реєструвати малі зміни опору датчика по зміни величини струму у вимірювальній діагоналі.

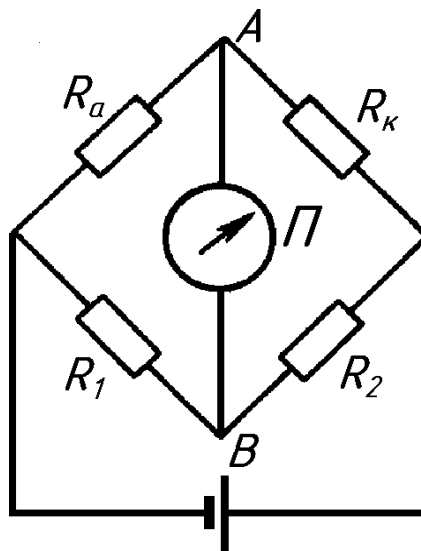


Рис. 6.4. Мостова схема включення тензорезистора

Мостова схема складається з чотирьох опорів: R_a – робочий (активний) тензорезистор, наклеєний на досліджувану деталь; R_k – компенсаційний тензорезистор (такий самий, як і робочий); R_1, R_2 – рівні опори, в якості яких

можуть використовуватися тензорезистори, змінні опори, реохорди. Умовою відсутності струму у вимірювальній діагоналі AB на гальванометрі Π (умовою балансу моста) є рівність:

$$R_a \cdot R_2 = R_1 R_k.$$

При деформуванні активного тензорезистора разом з деталлю його опір змінюється на величину ΔR , умова балансу мосту порушується і через діагональ потече струм, що реєструється гальванометром. Величина струму буде пропорційна зміні опору тензорезистора, а отже, і деформації деталі.

Компенсаційний тензорезистор служить для компенсації зміни опору робочого датчика внаслідок зміни температури. На відміну від робочого компенсаторного тензорезистора наклеюється на ненавантажену пластинку, виконану з того ж матеріалу, що і досліджувана деталь. Так як робочий і компенсаційний датчики включені в різні плечі моста, його баланс при зміні температури не змінюється.

Величина відносної лінійної деформації в місці наклейки робочого тензорезистора визначається зміною показань гальванометра Π (умовою балансу моста) є рівність:

$$R_a \cdot R_2 = R_1 R_k.$$

При деформуванні активного тензорезистора разом з деталлю його опір змінюється на величину ΔR , умова балансу мосту порушується і через діагональ потече струм, що реєструється гальванометром. Величина струму буде пропорційна зміні опору тензорезистора, а отже, і деформації деталі.

Компенсаційний тензорезистор служить для компенсації зміни опору робочого датчика внаслідок зміни температури. На відміну від робочого компенсаторного тензорезистора наклеюється на ненавантажену пластинку, виконану з того ж матеріалу, що і досліджувана деталь. Так як робочий і компенсаційний датчики включені в різні плечі моста, його баланс при зміні температури не змінюється.

Величина відносної лінійної деформації в місці наклейки робочого тензорезистора визначається за зміною показань гальванометра ΔC :

$$\varepsilon = n \Delta C,$$

де n – ціна розподілу приладу у величинах відносної деформації, визначена дослідним шляхом (таруванням приладу).

На практиці для вимірювання деформацій за допомогою тензорезисторів використовуються спеціальні прилади як стрілочного типу, що мають вимірну шкалу (ІД), так і цифрові (ІДЦ, ЦТМ, СПТ). Прилади розраховані на роботу за напівмостовою схемою, коли опори R_1 та R_2 моделюються приладом. Показання приладів в одиницях відносної деформації відповідають коефіцієнту тензочутливості $K = 2$. У випадку K , відмінному від 2, величина деформації визначається за формулою

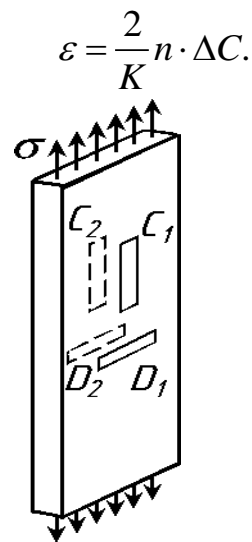


Рис. 6.5. Зразок із тензометрами

Опис лабораторної установки та проведення випробувань. Випробування проводяться на плоскому зразку прямокутного поперечного перерізу на випробувальній машині, що створює навантаження, що розтягує. Для вимірювання деформацій використовуються важільні тензометри Гуттенбергера і тензорезистори, які розташовуються попарно в поздовжньому C_1 , C_2 і поперечному D_1 , D_2 , напрямках на протилежних гранях зразка для усунення впливу його вигину. Випробування проводять при навантаженнях, що не перевищують зусилля, що відповідає межі пропорційності (рис. 6.5):

$$P_{\max} < A \cdot \sigma_{\text{пц}},$$

де A – n – поперечного перерізу зразка;

$\sigma_{\text{пц}}$ – межа пропорційності матеріалу.

Навантаження здійснюється ступенями $\Delta P = 1000$ кг, починаючи з навантаження $P_0 = 500$ кг, необхідної для стійкої роботи машини та усунення зазорів у навантажувальному пристрої. По різниці відліків, взятих з приладів, які вимірюють деформацію в поздовжньому ($\Delta C_1, \Delta C_2$) та поперечному ($\Delta D_1, \Delta D_2$) напрямках, обчислюють середню відносну поздовжню та поперечну деформації, що відповідають навантаженню ΔP :

$$\varepsilon = n \Delta C, \quad \varepsilon' = n \Delta D,$$

де $\Delta C = \frac{\Delta C_1 + \Delta C_2}{2}$ $\Delta D = \frac{\Delta D_1 + \Delta D_2}{2}$ n – ціна розподілу приладу у

величинах відносної деформації.

Величини $\Delta C, \Delta D$ і приймаються опосередкованими за кількома вимірами. За знайденими деформаціями визначаються модуль поздовжньої пружності та коефіцієнт Пуассона:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta P}{A\varepsilon}; \quad \nu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|.$$

Розділ 7

МЕТОД ВИПРОБУВАННЯ НА УДАРНИЙ ЗГИН

Мета роботи: Ознайомлення з методом випробування матеріалів на ударний згин та визначення повної роботи K , витраченої при ударі (робота удару), або ударної в'язкості $KС$, під якою розуміють роботу удару, віднесену до початкової площі поперечного перерізу зразка в місці концентратора.

Загальні відомості. Для оцінки властивостей матеріалу при динамічних навантаженнях недостатньо механічних характеристик, що визначаються під час статичних випробувань. При великих швидкостях навантаження, наприклад, при ударі збільшується небезпека крихкої руйнації. Ця небезпека особливо зростає за наявності в деталі різного роду надрізів (отвори, галтелі, канавки та ін.), що спричиняють концентрацію напруг (нерівномірний розподіл напруг). Надріз дозволяє зосередити всю деформацію, що поглинає удар, в одному місці. Крім того, наявність надрізу ставить матеріал у більш важкі умови роботи, тому що

надріз значно послаблює перетин і викликає підвищення напруги від вигину (поблизу дна надрізу ці напруги різко зростають через концентрацію напруги).

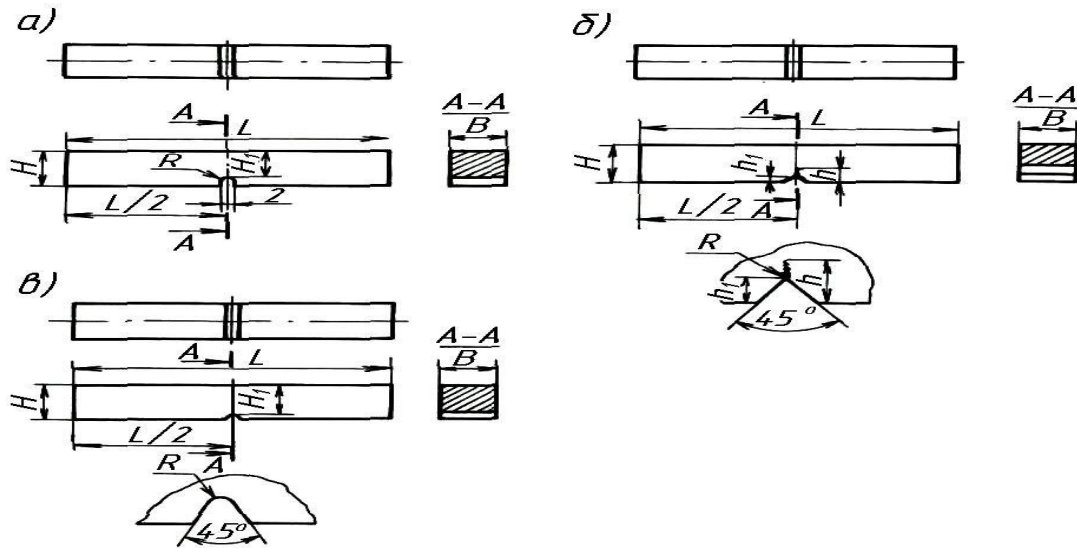


Рис. 7.1. Зразки із концентраторами: а) концентратор виду U ; б) концентратор виду T (утомлена тріщина) в) концентратор виду V

В даний час застосовують випробування на ударний згин зразків із концентраторами. Зразки встановлюються на двох опорах і піддаються впливу ударного навантаження падаючого маятника. Руйнування відбувається у площині надрізу, і тому форма надрізу та його розміри впливають на схильність матеріалу до крихкого руйнування. Тип T відповідає концентратору, що містить тріщину втоми, яку отримують у вершині початкового надрізу при циклічному згині зразка в одній площині.

Робота удару. Роботу удару позначають буквами (KU , KV або KT) та цифрами. Перша буква (K) – означає символ роботи удару, друга буква (U , V чи T) – вид концентратора. Наступні цифри позначають максимальну енергію удару маятника, глибину концентратора та ширину зразка. Наприклад: $KV - 4050/2/2$ – робота удару, визначена на зразку з концентратором виду V за нормальної температури мінус 400°C . Максимальна енергія маятника 50 Дж, глибина концентратора 2 мм, ширина зразка 2 мм. Якщо випробування проводяться при кімнатній температурі ($t=20 \pm 100^{\circ}\text{C}$), то температура в позначках не проставляється.

Ударна в'язкість. Ударна в'язкість (КС) називається відношення роботи (K), необхідної для руйнування зразка, площі поперечного перерізу A_0 в місці надрізу. Обчислюється ударна в'язкість за формулою

$$КС = \frac{K}{A_0}, \quad A_0 = H_1 B,$$

де H_1 – Початкова висота робочої частини зразка, м (см); B – початкова ширина зразка, м (см); H_1 та B вимірюються з похибкою не більше 0,00005 м (0,005 см). Площа поперечного перерізу округляють: при ширині зразка 5 мм і менше – до третьої цифри, при ширині зразка більше 5 мм – до другої значущої цифри. Значення КС записується в протоколі з округленням до 1 (0,1) Дж/см² (кг м/см²), при $КС > 10$ (1) Дж/см² (кг м/см²) або до 0,1 (0, 01) Дж/см² (кг м/см²) при $КС < 10$ (1) Дж/см² (кг м/см²).

Ударну в'язкість позначаються поєднанням літер та цифр. Перші дві букви КС позначають символ ударної в'язкості, третя літера – вид концентратора; перша цифра – максимальна енергія удару маятника, друга – глибину концентратора та третя – ширину зразка. Наприклад:

$КСТ^{+100} 150/3/7,5$ – ударная вязкость, определённая на образце с концентратором вида T при температуре плюс 100°С. Максимальная энергия удара маятника 150 Дж, глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

Цифри не вказують при визначенні роботи удару або ударної в'язкості на копре з максимальною енергією удару маятника 294 (30) Дж (кг м), при ширині зразка 10 мм, глибині концентратора 2 мм для концентраторів виду U та V та 3 мм для концентраторів виду T .

Маятникові копри для випробування на ударний згин та проведення випробування.

Маятникові копри. Для випробування матеріалів на ударний вигин більшого поширення набули маятникові копри. На рис.7.2 показані важливі схеми копрів МК-15 і МК-30А. Цифра в маркуванні копра показує максимальну роботу удару в кг м, яку може зробити копер при випробуванні зразків.

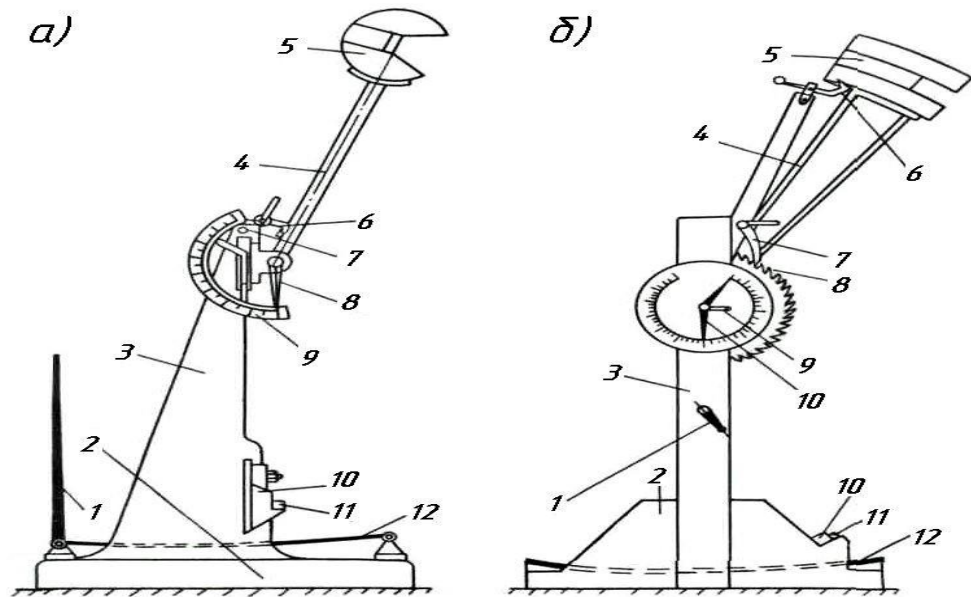


Рис. 7.2. Маятникові копри для випробування на ударний згин: МК – 15(а), МК – 30А(б)

Копер складається з чавунної станини у вигляді масивної плити 2 з двома вертикальними колонами 3. У верхній частині колон на горизонтальній вісі підвішений укріплений у шарикопідшипниках маятник з вантажем у вигляді сталевого плоского диска з вирізом 5, в якому закріплений сталевий загартований ніж, що служить бійком під час випробування (рис. 7.3). Внизу на рівні вертикально висить маятника до колон станини прикріплені дві сталеві загартовані опори 10, на які поміщають зразок 11, що випробовується. Під опорами між колонами проходить гальмівний ремінь 12, який, притискаючись до маятника, хитається після його удару, гальмування. Гальмівний ремінь приводиться в дію або вручну спеціальною рукояткою 1 (копер МК-15), або автоматично рукояткою 1 (копер МК-30А).

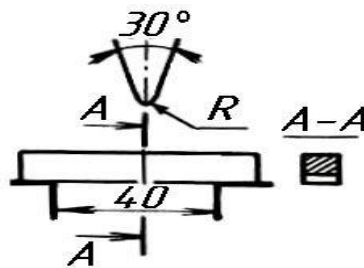


Рис. 7.3. Опори та ніж маятника

Перед випробуванням маятник піднімають на вихідну висоту і утримують його в цьому положенні клямкою 6 (у копії МК-30А ця висота залежить від того, в якому положенні встановлена клямка підйомної рами 7 у храповику 8).

При випробуванні зразка маятник звільняється від клямки 6, падаючи, вдаряє зразок, руйнує його і злітає на деякий кут, яким визначається робота, витрачена на руйнування зразка. Визначення кута зльоту маятника в копії МК-15 здійснюється таким чином. Стрілка 8, насаджена на осі маятника, вільно, але з деяким тертям у момент удару упирається в упор 7 у нульового поділу шкали 9. При зльоті маятника стрілка залишається нерухомою, а при зворотному русі маятника, рухаючись, внаслідок трення, разом із маятником, показує кут зльоту маятника у градусах (рис. 7.4).

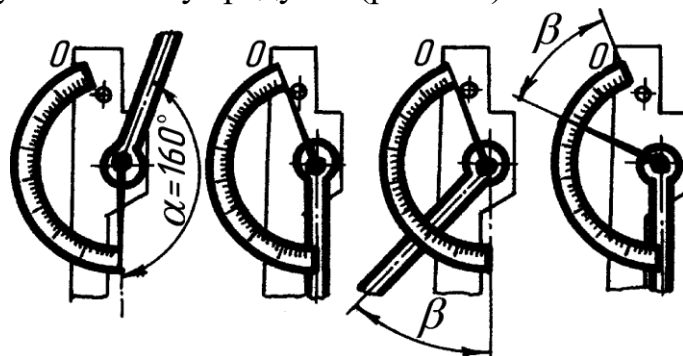


Рис. 7.4. Схема визначення кута зльоту маятника

У копії МК-30А на осі маятника жорстко закріплений повідець 9. При прямому та зворотному русі маятника повідець захоплює за собою відповідно одну або іншу стрілку шкали 10 і залишає їх у положенні, що фіксує роботу (енергію) маятника до і після удару (Перед початком випробування необхідно перевірити, щоб при вільно висить маятнику показники стрілок збігалися з нульовим розподілом шкали).

Маятникові копії розрізняються максимальною енергією удару маятника:

4,9 (0,5); 9,8 (1,0); 49,0 (5,0); 98,0 (10,0); 147(15); 294,0 (30) Дж (кг·м).

При записі значення максимальної енергії удару маятника значення в джоулях слід округлювати відповідно до 5; 10; 50; 100; 150 та 300 Дж.

Максимальна енергія удару маятника повинна бути такою, щоб значення роботи удару становило не менше 10% від максимальної енергії удару маятника, що застосовується. Швидкість руху маятника в момент удару, похибка градуювання шкал копра, вимоги до термостатів, що забезпечують рівномірне охолодження або нагрівання зразка, та термометри для вимірювання температури контрольних зразків також регламентовані ДСТУ.

Проведення випробувань. Руйнування зразків здійснюється на маятниковому копрі (див. рис. 7.2, а). Випробуваний зразок 11, розміри якого попередньо заміряють, встановлюють на опори 10 надрізом у протилежний бік ножа маятника. Визволення маятника проводиться за допомогою рукоятки засувки. У копрі МК-30А (рис. 7.2 б) маятник, пройшовши нижнє положення і зруйнувавши зразок, повертає стрілку шкали на кут, який відповідає енергії, що збереглася в маятнику після руйнування зразка. Робота, витрачена на руйнування зразка, дорівнюватиме різниці енергії маятника до удару і після удару.

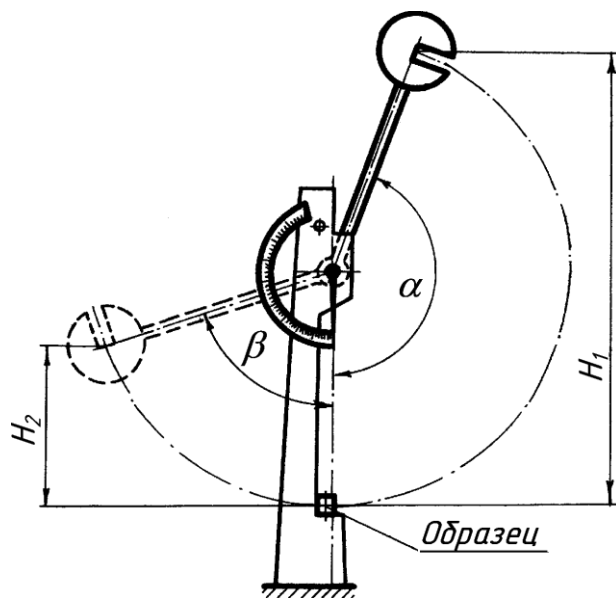


Рис. 7.5 Схема визначення енергії маятника до і після удару

У деяких копрах (наприклад, МК-15) немає підйомної рами, а шкала їх проградуєвана в градусах. У цьому випадку величина роботи K , витрачена на злам зразка, визначається як різницю потенційної енергії маятника у його

положеннях до та після удару (рис. 7.5) та обчислюється за формулою

$$K = Q(H_1 - H_2),$$

де Q – вага маятника; H_1 - висота підйому маятника до удару; H_2 – висота зльоту маятника після удару.

Вводячи відповідні позначення, отримуємо

$$H_1 = R + R \cdot \sin(\alpha - 90^\circ) = R(1 - \cos \alpha),$$

$$H_2 = R - R \cdot \cos \beta = R(1 - \cos \beta),$$

Таблиця 7.1

Робота, витрачена на злам зразка на маятниковому копрі ($Q=97.972$ Н; $R=0.7945$)

β	K	β	K	β	K	β	K	β	K
0	150,98	32	139,16	64	107,27	96	65,01	128	25,22
1	150,97	33	138,43	65	106,04	97	63,66	129	24,16
2	150,94	34	137,68	66	104,80	98	62,31	130	23,11
3	150,88	35	136,91	67	103,56	99	60,97	131	22,08
4	150,80	36	136,12	68	102,30	100	59,63	132	21,06
5	150,69	37	135,31	69	101,04	101	58,29	133	20,06
6	150,56	38	134,42	70	99,77	102	56,96	134	19,07
7	150,40	39	133,64	71	98,49	103	55,64	135	18,10
8	150,23	40	132,77	72	97,20	104	54,31	136	17,13
9	150,03	41	131,89	73	95,90	105	53,00	137	16,22
10	149,80	42	130,99	74	94,60	106	51,69	138	15,30
11	149,55	43	130,07	75	93,29	107	50,39	139	14,40
12	149,28	44	129,14	76	91,98	108	49,09	140	13,52
13	148,99	45	128,19	77	90,65	109	47,80	141	12,65
14	148,67	46	127,22	78	89,33	110	46,52	142	11,81
15	148,33	47	126,23	79	87,99	111	45,25	143	10,98
16	147,97	48	125,23	80	86,66	112	43,99	144	10,17
17	147,58	49	124,21	81	85,32	113	42,73	145	9,38
18	147,18	50	123,18	82	83,98	114	41,49	146	8,61
19	146,74	51	122,13	83	82,63	115	40,25	147	7,86
20	146,29	52	121,70	84	81,28	116	39,02	148	7,13
21	145,82	53	119,99	85	79,92	117	37,80	149	6,42
22	145,32	54	118,90	86	78,57	118	36,60	150	5,73
23	144,80	55	171,79	87	77,22	119	35,41	151	5,07
24	144,25	56	116,67	88	75,86	120	34,23	152	4,42
25	143,69	57	115,54	89	74,50	121	33,06	153	3,79
26	143,11	58	114,39	90	73,14	122	31,90	154	3,18
27	142,50	59	113,24	91	71,79	123	30,75	155	2,60
28	141,87	60	112,06	92	70,43	124	29,62	156	2,04
29	141,22	61	110,88	93	69,07	125	28,50	157	1,49
30	140,55	62	109,69	94	67,72	126	27,39	158	0,97
31	139,87	63	108,48	95	66,36	127	26,30	159	0,48

де R - Довжина маятника (відстань від центру тяжкості маятника до його вісі обертання).

Тоді робота, витрачена маятником

$$K = Q \cdot R \cdot \cos\beta = R(1 - \cos\beta).$$

Цю величину можна визначити з табл. 7.1 за кутом β .

Розділ 8

ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ЗСУВУ

Мета роботи: перевірка закону Гука під час кручення та визначення модуля зсуву.

Загальні відомості. Кут закручування стрижня у межах пружних деформацій пов'язані з навантаженням, тобто з крутним моментом, лінійною залежністю. Для валу круглого перерізу кут закручування визначають за формулою:

$$\varphi = \frac{M_{кр} \cdot l}{GI_p},$$

де l – довжина валу; $M_{кр}$ – крутний момент; G – модуль пружності матеріалу при зсуві (або просто модуль зсуву); I_p – полярний момент інерції площі поперечного перерізу валу (для суцільного валу діаметром d , $I_p = \pi^4/32$).

Зазначена пропорційність між навантаженням та деформацією спостерігається у початковій стадії кручення зразка; потім пропорційність порушується, і настає швидке збільшення кута закручування при незначному збільшенні моменту, що крутить. Шия на зразку при цьому не утворюється. На рис. 8.1 *а* представлена діаграма кручення для маловуглецевої сталі, на рис.8.1, *б* - діаграма для чавунного зразка приблизно тих же розмірів. З діаграм ми бачимо, що чавун не підпорядковується закону пропорційності.

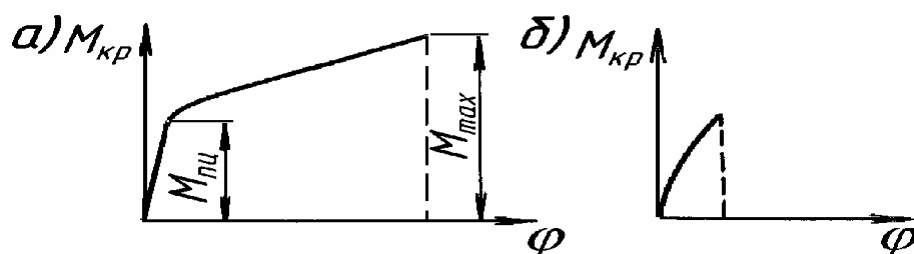


Рис. 8.1. Діаграма кручення зразка маловуглецевої сталі (а) та чавунного зразка (б)

Для визначення модуля зсуву матеріалу G необхідно виміряти величину $M_{кр}$ та відповідний їй кут закручування φ .

Модуль G пов'язаний з модулем поздовжньої пружності E та коефіцієнтом Пуассона ν наступним співвідношенням:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Проведення випробувань. Для визначення кута закручування використовується прилад конструкції Н. Г. Токаря (рис. 8.2).

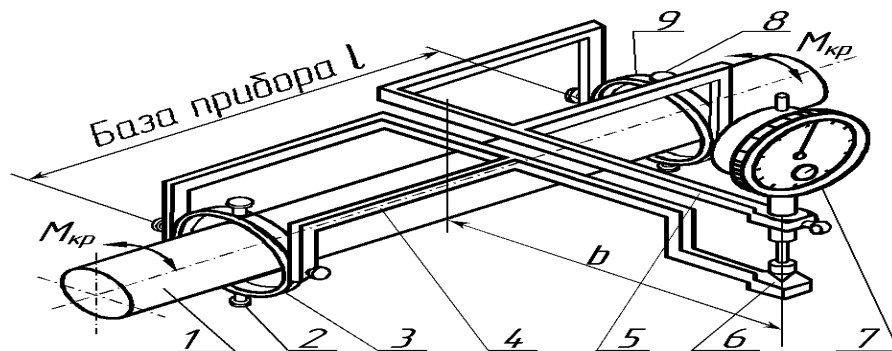


Рис. 8.2. Схема приладу конструкції Н. Г. Токаря для визначення кута закручування

При випробуванні застосовується зразок круглого поперечного перерізу із головками по кінцях. Головки зразка закріплюються у затискачах випробувальної машини. На зразку 1 за допомогою гвинтів 2 встановлено кільце 3 з важелем 4, що має опорну поверхню для індикатора 7, який кріпиться на важелі правого кільця 9. Кільце праве 9 гвинтами 8 закріплено на відстані l (база приладу) від лівого кільця.

Додаток моменту, що крутить, викликає відносне закручування перерізів, де укріплені кільця, на кут φ (рис. 8.3). Одночасно важіль b приладу довжиною b повернеться, а стрілка індикатора переміститься на x поділок. Взаємний кут закручування розрізів, що розглядаються, легко обчислюється за формулою:

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi = x/b.$$

Для попереднього обтиснення кінців стрижня у захватах дається початкове навантаження M_0 . При цьому навантаженні знімається перший відлік індикатора. Потім даються приращення моменту, що крутить, на величину $\Delta M_{кр}$, знову знімаються відліки по індикатору, підраховуються різниці та приращення кутів закручування $\Delta\varphi = \Delta x/b$ на цьому ступені навантаження. Таких ступенів навантаження слід мати кілька. Результати вимірювань заносяться до таблиці.

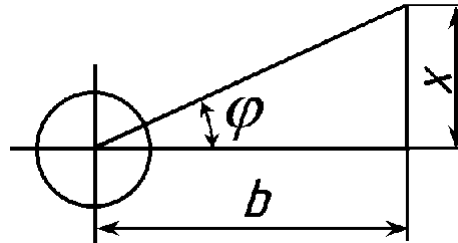


Рис. 8.3. Схема виміру кута закручуєня

Для встановлення характеру залежності між моментом, що крутить, і кутом закручування будують за досвідченими даними графік $M_{кр}(\varphi)$. Отримані на графіку точки при ретельному проведенні досвіду лягають приблизно на одну пряму, що доводить пряму залежність між крутним моментом і деформацією, що викликається. Цим підтверджується справедливність закону Гука під час кручення:

$$\tau = G \gamma,$$

де τ – дотична напруга; γ – кут закручування; G – модуль зсуву, що характеризує здатність матеріалу чинити опір пружному деформуванню-зсуву.

Користуючись формулою для кута закручування, визначають величину зсуву модуля при крученні:

$$G = \frac{\Delta M_{кр} l}{\Delta\varphi I_p}.$$

Знайдене значення слід порівняти з величиною G , обчисленою за теоретичною залежністю між трьома пружними постійними, наведеною вище.

Необхідні значення E та ν беруть із відповідних таблиць або визначають дослідним шляхом при розтягуванні зразка даного матеріалу (див. розділ 6).

Розділ 9

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БРУСУ ПРИ ЗГІНІ З КРУЧЕННЯМ

Мета роботи: експериментальна перевірка теоретичних формул для визначення величин та напрямки головної напруги в брусі при його вигині з крученням; ознайомлення з методикою визначення поверхні деталей величин деформацій з допомогою тензометрів – тензометрированием.

Загальні відомості. Крім випробувань матеріалів з метою визначення їх механічних характеристик, в інженерній практиці широкого поширення набули випробування конструкцій з метою дослідження напруженого стану як загалом конструкції, так і її окремих вузлів та деталей. Такі випробування дають змогу оцінити міцність конструкцій, перевірити точність теоретичних розрахунків.

До найпоширеніших методів визначення напруг у конструкціях відноситься метод тензометрування, який полягає у вимірі за допомогою тензометрів (див. розділ 6) величин деформацій на поверхні деталей з подальшим обчисленням на основі узагальненого закону Гуку величин напруг. В даний час в якості тензометров переважно використовуються тензорезистори, що дозволяють автоматизувати процес вимірювання деформацій.

На поверхні деталі, де безпосередньо не додане зовнішнє навантаження, має місце плоский напружений стан. При експериментальному дослідженні напруженого стану можливі три випадки:

1. У досліджуваній точці конструкції має місце лінійний напружений стан і відомий напрямок напруги σ (рис. 9.1, а).

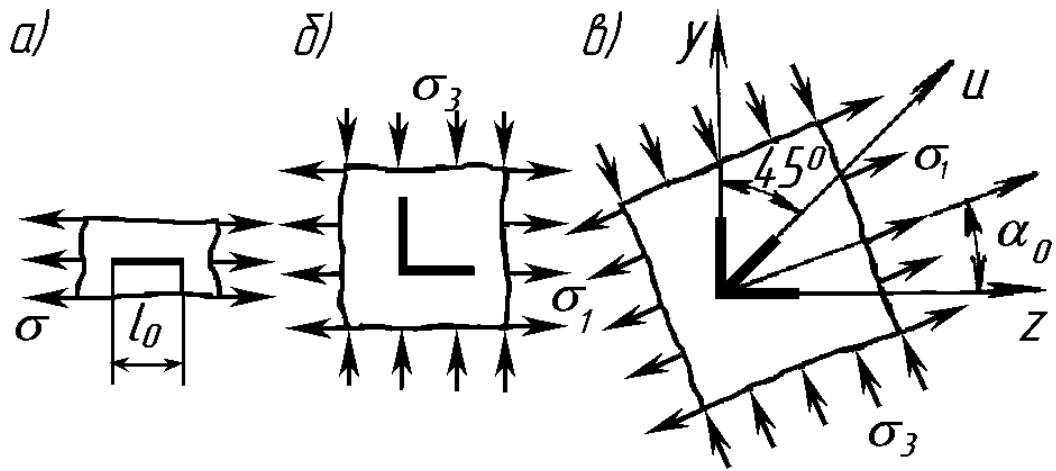


Рис. 9.1. Різні варіанти встановлення тензометрів

У цьому випадку для визначення величини σ достатньо встановити один тензометр із базою вздовж напруг σ . Визначивши з досвіду величину деформації ε при відомому модулі поздовжньої пружності E , значення σ знаходять відповідно до закону Гука:

$$\sigma = E\varepsilon$$

2. У досліджуваній точці конструкції має місце плоский напружений стан з відомим напрямом основних напруг, наприклад σ_1 та σ_3 (рис. 9.1, б). Для визначення величин цих напруг необхідно встановити два тензометри, бази яких розташовуються в напрямку σ_1 та σ_3 . За допомогою тензометрів визначають величини головних деформацій ε_1 та ε_3 і, після чого за співвідношенням закону Гука при плоскому напруженому стані знаходять значення головної напруги:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_3),$$

$$\sigma_3 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_3 + \nu\varepsilon_1).$$

3. У досліджуваній точці конструкції має місце плоский напружений стан і невідомий напрямок α_0 головних напруг (рис. 9.1, в). У цьому випадку необхідно встановити 3 тензометри у напрямку вісей z , y і під кутом $\alpha = 45^\circ$ до них (розетку тензометрів).

Визначивши із досвіду ε_z , ε_y , ε_u та використовуючи залежність

$$\varepsilon_u = \varepsilon_z \cos^2 \alpha + \varepsilon_y \sin^2 \alpha - \frac{1}{2} \gamma_{zy} \sin 2\alpha,$$

спочатку знаходять деформацію зсуву. При $\alpha = 45^0$

$$\gamma_{zy} = \varepsilon_z + \varepsilon_y - 2\varepsilon_u. \quad (9.1)$$

Потім за узагальненим законом Гука визначають величину напруги на двох взаємно перпендикулярних площинах:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_z - \nu\varepsilon_y), \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y - \nu\varepsilon_z), \\ \tau_{zy} &= G\gamma_{zy} \frac{E}{1-\nu^2} \nu_{zy}. \end{aligned} \quad (9.2)$$

Величину та напрямок головної напруги знаходять за формулами:

$$\sigma_{zл} = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2}, \quad (9.3)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(-\frac{2\tau_{zy}}{\sigma_z - \sigma_y} \right).$$

Опис установки. Досліджувана конструкція є зразком у вигляді труби 5 (рис. 9.2, а), закріпленої на жорсткій підставі 4. До торця вільного кінця труби прикріплена горизонтальна планка 6. Один кінець планки з'єднаний з тросиком 2, який перекинутий через нерухомий блок 3. Інший кінець планки 6 і вільний кінець троса 2 з'єднані з підвісками для вантажів 1 і 7. При накладенні вантажів на один кінець планки 6 діятиме сила P_2 , спрямована вгору, а на інший P_1 , спрямована вниз. При $a_1 = a_2$ и $P_1 = P_2$ зразок випробовує чисте кручення, при $P_1 \neq P_2$ – кручення із вигином.

Для виміру деформацій на поверхні зразка наклеєна розетка із трьох тензорезисторів (рис. 9.2, б). (Опис роботи тензорезисторів див. у розділі б).

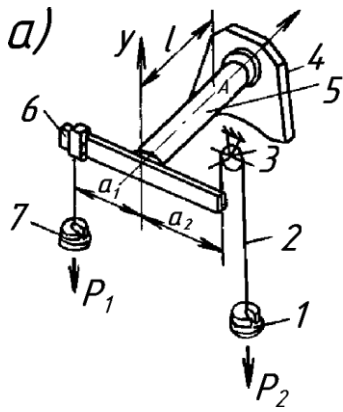


Рис. 9.2. Схема установки

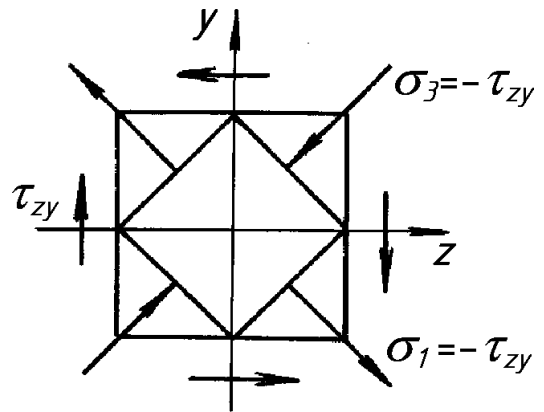
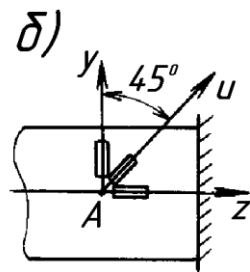


Рис. 9.3. Напружений стан бруса при його крученні

Проведення випробувань. На першому етапі випробувань проводиться тарування тензорезисторів та вимірювального приладу, метою якої є визначення ціни поділу показань приладу у величинах відносної деформації – тарувального коефіцієнта n . З цією метою проводиться навантаження зразка зусиллями $P_1 = P_2 = P$, що створює умови чистого кручення бруса та в досліджуваній точці, де встановлені тензорезистори, виникає стан чистого зсуву (рис. 9.3).

При зміні навантаження на величину $\Delta P = P_k - P_0$ від свого початкового значення P_0 до кінцевого P_k , у досліджуваній точці у напрямку головної напруги σ_1 виникає лінійна відносна деформація, величина якої може бути визначена за формулою

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_3) = \frac{1}{E}(\tau_{zy} + \nu\tau_{zy}) = \frac{\tau_{zy}(1+\nu)}{E} = \frac{M_z(1+\nu)}{W_p E}, \quad (9.4)$$

де $M_z = \Delta P \cdot 2a$ – момент, що крутить, що відповідає прирощенню навантаження на величину ΔP .

За показниками приладу величина деформації визначається співвідношенням

$$\varepsilon_1 = n\Delta C_{cp}, \quad (9.5)$$

де ΔC_{cp} – середня (за трьома вимірами) різниця показань приладу для тензорезистора з напрямком u , що відповідає зміні навантаження ΔP .

Прирівнюючи (9.4) та (9.5), отримуємо формулу для тарувального

коефіцієнта:

$$n = \frac{M_z(1+\nu)}{W_p E \Delta C_{cp}}$$

На другому етапі брус завантажують зусиллями $P_1 \neq P_2$, що викликає одночасно його вигин та кручення. Для кожного з трьох тензорезисторів з напрямками z , u за середньою різницею показань приладу ΔC_{cp} (за трьома вимірами), що відповідають зміні навантаження, $\Delta P_1 = P_{1K} - P_{10}$, $\Delta P_2 = P_{2K} - P_{20}$ використовуючи співвідношення), визначають величини відносних лінійних деформацій ε_z , ε_u .

За формулами (9.1 – 9.3) знаходять величини головних напруг σ_1 та σ_3 та положення головних майданчиків α_0 . Отримані значення порівнюються з величинами, визначеними теоретичними розрахунками за відомими значеннями моменту, що крутить, $M_z = (\Delta P_1 + \Delta P_2) \cdot a$ та згинального моменту, $M_x = (\Delta P_1 - \Delta P_2) \cdot l$, де l – відстань від торцевого перерізу труби до досліджуваної точки:

$$\sigma_z = \frac{M}{W}; \tau_{zy} = \frac{M_z}{W_p}; \sigma_{гл} = \frac{\sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2}; \alpha_0 = \frac{1}{2} \arctg\left(-\frac{2\tau_{zy}}{\sigma_z}\right).$$

Результати вимірів та розрахунків заносяться до таблиці.

Розділ 10

ОЦІНКА ПОХІДНОСТЕЙ ДОСВІДІВ ПРИ ОБРОБЦІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ

Мета роботи: усі експериментальні дослідження, що проводяться в лабораторії опору матеріалів, супроводжуються виміром різних фізичних величин. Виміряти фізичну величину – отже, порівняти її з іншою однорідною величиною, прийнятою за одиницю виміру.

Однією з основних вимог до даних, що отримуються в результаті досвіду, має бути їхня порівнянність. Порівнювати можна лише результати, мають однакову точність. Звідси випливає необхідність визначення точності та

надійності отриманих досвідчених даних. Зазначимо, відсутність знання похибки результатів зводить цінність досвіду до нуля. Ступінь точності результатів експерименту залежить від використовуваних при вимірюваннях машин та приладів, а також від загальних методів вимірювань.

Класифікація вимірювань та похибок. Виконуючи лабораторні роботи, ми зустрічаємося з двома послідовними процесами: по-перше, з *вимірюваннями*, що зустрічаються в процесі роботи, і, по-друге, з *обчисленнями*, які виконуються після закінчення вимірювань під час обробки результатів.

З точки зору загальних прийомів отримання результатів вимірювань розраховують прямі та непрямі виміри фізичних величин.

До *прямих вимірів* відносяться такі, результат яких виходить безпосередньо з досвідчених даних виміру. Прикладами цих вимірювань є: вимірювання довжини за допомогою розділової лінійки, часу – за допомогою годинника, маси – за допомогою гир на рівноплечих вагах, температури – термометром і т.д.

Непрямими вимірами називають такі, результат яких виходить на підставі досвідчених даних прямих вимірів кількох величин, пов'язаних із шуканою величиною відомою функціональною залежністю. Як приклад непрямого виміру можна навести визначення щільності D тіла, що має форму циліндра, на підставі прямих вимірів його маси m , діаметра d та висоти h :

$$D = \frac{m}{\frac{\pi d^2}{4} h}.$$

Результат будь-якого виміру, з якою б точністю воно не виконувалося, дає не справжнє значення вимірюваної величини, а лише наближене, більш-менш близьке до справжнього значення.

Спотворення, що вносяться в результати вимірювань через недосконалість вимірювальної апаратури, органів чуття спостерігача, а також методів та умов вимірювання, називаються похибками (помилками) вимірювань; вони вказують на рівень достовірності отриманого значення вимірюваної величини.

Відповідно до загальноприйнятої класифікації, похибки виміру поділяються на три класи: а) систематичні похибки; б) випадкові похибки; в)

промахи.

Систематичними похибками називаються похибки, що постійні за величиною та знаком або змінюються за певним законом. Приклади систематичних похибок: похибки заходів від неточного їх доведення; похибки показань вимірювальних приладів унаслідок неправильного градування шкал; похибки заходів та вимірювальних приладів, що викликаються неправильною їх установкою, зміною температури тощо.

Збільшення кількості вимірів не зменшує впливу цих помилок. Їх можна виключити досвідченим шляхом, якщо ввести знайдені зі спостережень поправки або розташувати спостереження певним чином. Результати вимірів настільки правильні, оскільки вони не спотворені систематичними похибками, і тим правильнішими, чим менші ці похибки.

Випадковими похибками називають невизначені за своєю величиною та природою похибки, у появі яких не спостерігається будь-якої закономірності. Їх наявність підтверджується тим, що у разі повторних вимірювань однієї й тієї самої величини в одних і тих самих умовах з однаковою ретельністю числові результати відрізняються останніми значущими цифрами. Випадкові похибки викликаються неточністю відліків, і причини їх криються як у недосконалому нашому органі чуття, так і в інших обставинах, що супроводжують виміри, які важко врахувати.

Випадкові похибки неможливо знайти виключеним досвідченим шляхом, та його впливом геть результат можна знайти за законами теорії ймовірностей. Багаторазове повторення того самого вимірювання зменшує вплив випадкових похибок.

Промахи називають похибки, що призводять до явного спотворення результатів вимірів. Приклади промахів: неправильний відлік за шкалою вимірювального приладу, неправильний запис відліків, перепустки у спостереженнях, неправильні маніпуляції з приладами та ін. Наявність промахів визначає придатність вимірювань. Спостереження, що містять промахи, повинні бути відкинуті, як такі, що не заслуговують на довіру.

Абсолютна та відносна похибки. Основні положення теорії

наближених обчислень. У більшості випадків при дослідному визначенні будь-якої фізичної величини доводиться зробити ряд окремих вимірів, а потім отримані чисельні значення підставити у формулу, що служить для визначення шуканої величини. Так, наприклад, при визначенні модуля пружності при розтягуванні необхідно виміряти абсолютне подовження зразка, довжину зразка (базу), площу поперечного перерізу його, а також силу, що викликало дане пружне подовження зразка. Кожен окремий вимір виконується з певною точністю, причому похибка результату залежатиме від ступеня точності окремих вимірів та від математичних операцій, які провадяться над ними. Оцінюючи похибки дослідного визначення тих чи інших величин, можна порівнювати дослідні дані з теоретичними. Розбіжність між досвідченими та теоретичними значеннями досліджуваної величини залежить як від похибки досвіду, так і від точності прийнятих у теоретичному висновку гіпотез та припущень.

За характеристику ступеня точності будь-якого виміру найпростіше прийняти абсолютну похибку.

Абсолютною похибкою визначення будь-якої величини називають різницю між точним (істинним) і наближеним, визначеним шляхом виміру чи досвіду, значеннями цієї величини. Найбільша можлива абсолютна похибка називається межею абсолютної похибки. Межа абсолютної похибки залежить від типу та конструкції вимірювального приладу і може бути прийнята рівною половині ціни найменшого його поділу. Так, наприклад, межа абсолютної похибки вимірювання якогось лінійного розміру штангенциркулем з ціною розподілу 0,1 мм становить 0,05 мм. Якщо тензомер (прилад для вимірювання малих деформацій) має шкалу з діленнями 1 мм і дає збільшення в K разів, то межа абсолютної похибки вимірювання цим тензомером буде дорівнює

$$\frac{0,5}{K} \text{ мм.}$$

Значення абсолютної похибки якогось виміру ще не характеризує якість останнього. Наприклад: Стрижень завдовжки 2 м виміряний з точністю до 0,5

мм і товщина зразка діаметром 2 см виміряна з тією самою точністю. Очевидно, ці виміри нерівноцінні. Тому зручніше скористатися поняттям відносної похибки.

Відносною похибкою ε_N визначення будь-якої величини N називають відношення абсолютної похибки δN к до точного значення даної величини:

$$\varepsilon_N = \frac{\delta N}{N}. \quad (10.1)$$

Відносні похибки величин прийнято виражати у відсотках:

$$\varepsilon_N \% = 100\varepsilon_N = \frac{\delta N}{N} 100. \quad (10.2)$$

З формули (1) отримаємо:

$$\delta N = N \cdot \varepsilon_N. \quad (10.3)$$

Таким чином, абсолютна похибка будь-якої величини дорівнює добутку цієї величини у її відносну похибку.

Найбільша можлива відносна похибка називається межею похибки. Межа відносної похибки $\varepsilon_{N_{\max}}$ визначення будь-якої величини дорівнює відношенню межі абсолютної похибки δN_{\max} до самої величини N , тобто:

$$\varepsilon_{N_{\max}} = \frac{\delta N_{\max}}{N}. \quad (10.4)$$

З формули (4) випливає, що найбільша можлива відносна похибка буде тим меншою, чим меншою буде δN_{\max} і чим більше N .

Для зменшення величини δN_{\max} слід застосовувати якомога точніші та вивірені машини та прилади; при даних машинах і приладах величина δN_{\max} мало залежить від особи, яка проводить досвід, а тому для зниження відносної похибки слід збільшувати N . У ряді випадків це може бути досягнуто при проведенні досвіду збільшенням інтервалу вимірювання сили або деформації, а якщо дозволяє конструкція машини, то збільшенням розмірів випробуваного зразка.

При проведенні дослідів іноді, наприклад, для отримання графічної залежності між силою і деформацією, що викликається, навантаження зразка проводиться рівними ступенями, при цьому в формулу, що служить для визначення шуканої величини, підставляють середні значення приросту навантаження і викликані нею деформації. Якщо середнє прирощення з n

вимірів визначеної величини за один ступінь дорівнює N_{cp} , а межа абсолютної похибки δN_{cp} , то гранична відносна похибка буде:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\delta N_{cp}}{n \cdot N_{cp}}. \quad (10.5)$$

Усі завдання наближеного обчислення поділяються на дві групи. Перша група завдань визначає межу похибки остаточного результату при відомих похибках величин, що входять до цієї формули. Завдання другої групи визначають необхідний ступінь точності окремих величин, що входять до формули, що обчислюється, за заданою похибкою результату.

У першій групі задач відомими є наближені числові значення величин та їх похибки, і за цими даними визначається похибка результату. У другій групі – наперед задається похибка остаточного результату і по ній потрібно підібрати значення величин, що входять до формули, з необхідною точністю.

Найчастіше щоб одержати остаточного результату досвіду треба з отриманими числовими значеннями вимірюваних величин зробити різні математичні обчислення. Оскільки помилки вимірювань досить малі, то їх обчислення модно користуватися диференціальним обчисленням.

У загальній теорії помилок доводяться такі положення:

а) абсолютна похибка результату обчислення функції багатьох незалежних змінних дорівнює сумі абсолютних величин усіх приватних диференціалів цієї функції;

б) відносна похибка результату обчислення функції багатьох незалежних змінних дорівнює диференціалу натурального логарифму цієї функції, причому слід брати суму абсолютних величин усіх членів цього виразу.

Так, якщо величина N є функцією багатьох незалежних змінних, тобто якщо $N = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, то абсолютна δN та відносна ε_N похибки функції N визначаються такими виразами:

$$\delta N = \left[\left| \frac{\partial N}{\partial x_1} dx_1 \right| + \left| \frac{\partial N}{\partial x_2} dx_2 \right| + \left| \frac{\partial N}{\partial x_3} dx_3 \right| + \dots + \left| \frac{\partial N}{\partial x_n} dx_n \right| \right]; \quad (10.6)$$

$$\varepsilon_N = \pm \frac{\delta N}{N} = \pm d \left[\ln f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \right]. \quad (10.7)$$

Із загальних формул (6), (7) можна отримати такі правила для визначення похибок результатів основних дій:

а) абсолютна похибка алгебраїчної суми дорівнює сумі абсолютних похибок доданків;

б) відносна похибка суми дорівнює відносній похибці найменш точного з усіх доданків;

в) відносна похибка твору дорівнює сумі відносних похибок усіх співмножників;

г) відносна похибка приватного дорівнює сумі відносних похибок діленого та дільника;

д) відносна похибка ступеня дорівнює показнику ступеня, помноженому на відносну похибку основи. Це і для дробового показника, тобто випадку вилучення кореня.

Застосовуючи ці теореми, легко визначити похибку результату досвіду.

Так, наприклад, відносна похибка величини:

$$N = \frac{a \cdot b^m}{c \cdot \sqrt[n]{d}}. \quad (10.8)$$

складе:

$$\varepsilon_N = \frac{\delta N}{N} = \frac{\delta a}{a} + m \frac{\delta b}{b} + \frac{\delta c}{c} + \frac{1}{n} \cdot \frac{\delta d}{d}. \quad (10.9)$$

З формули (10.9) видно, що зведення у ступінь збільшує похибку, а витяг коріння її знижує.

У табл. 10.1 наведено значення абсолютних та відносних похибок при різних математичних операціях.

Таблиця 10.1

Значення абсолютних та відносних похибок

Математична операція	Похибки	
	абсолютна	відносна

$N = a + b + c$	$\pm(\delta a + \delta b + \delta c)$	$\pm \frac{\delta a + \delta b + \delta c}{a + b + c}$
$N = a - b$	$\pm(\delta a + \delta b)$	$\pm \frac{\delta a + \delta b}{a - b}$
$N = ab$	$\pm(a\delta b + b\delta a)$	$\pm \left(\frac{\delta a}{a} + \frac{\delta b}{b} \right)$
$N = a^n$	$\pm n \cdot a^{n-1} \cdot \delta a$	$\pm n \frac{\delta a}{a}$
$N = \sqrt[n]{a}$	$\pm \frac{1}{n} a^{\frac{1}{n}-1} \cdot \delta a$	$\pm \frac{1}{n} \cdot \frac{\delta a}{a}$
$N = \frac{a}{b}$	$\pm \frac{b\delta a + a\delta b}{b^2}$	$\pm \left(\frac{\delta a}{a} + \frac{\delta b}{b} \right)$
$N = \sin a$	$\pm \cos a \cdot \delta a$	$\pm \operatorname{ctga} \cdot \delta a$
$N = \cos a$	$\pm \sin a \cdot \delta a$	$\pm \operatorname{tga} \cdot \delta a$
$N = \operatorname{tga}$	$\pm \frac{\delta a}{\cos^2 \cdot a}$	$\pm \frac{2\delta a}{\sin 2a}$
$N = \operatorname{ctga}$	$\pm \frac{\delta a}{\sin^2 \cdot a}$	$\pm \frac{2\delta a}{\sin 2a}$

Обробка результатів вимірів. З точки зору точності вимірювання можуть бути виконані технічними та лабораторними методами.

У технічних методах вимір проводиться один раз, при цьому похибка вимірювання не перевищує наперед заданого значення, що визначається похибкою застосованої вимірювальної апаратури.

У лабораторних методах вимірювань потрібна більш висока точність вимірюваної величини. В цьому випадку для підвищення точності виробляють багаторазові вимірювання за однакових умов досвіду, виключають систематичні похибки і обчислюють середнє арифметичне з усіх отриманих значень, яке приймається за достовірне значення вимірюваної величини у разі вимірювань однакової точності (постулат середнього арифметичного). Далі, скориставшись теорією ймовірності, проводять оцінку точності результату багаторазових вимірів (облік випадкових похибок).

З можливості проведення вимірювань двома методами впливає і два методи оцінки точності вимірювань: технічний і лабораторний.

а) Оцінка точності результату багаторазових прямих вимірів

Визначають середнє арифметичне результату L :

$$L = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n}{n},$$

де $l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n$ – результати n окремих вимірів.

Надійність середнього значення L тим більша, чим менші залишкові абсолютні похибки окремих вимірювань Δl_i

$$\Delta l_i = l_i - L.$$

Оцінку точності окремих вимірювань прийнято характеризувати середньою квадратичною абсолютною похибкою ряду вимірювань:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\Delta l_1^2 + \Delta l_2^2 + \Delta l_3^2 + \dots + \Delta l_n^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta l_i^2}{n-1}}.$$

Теоретично ймовірностей доводиться, що значення граничної абсолютної погрішності окремого виміру δ_{lim} не перевищує 3σ . Якщо ж гранична абсолютна похибка $\delta_{\text{lim}} > 3\sigma$, цей вимір слід віднести до грубих похибок чи промаху.

Для оцінки точності результату кількох окремих прямих вимірювань прийнято користуватися граничною абсолютною похибкою λ_{lim} або ймовірною похибкою результату R . При цьому

$$\lambda_{\text{lim}} \approx \Delta l_{\text{cp}} = \frac{|\Delta l_1| + |\Delta l_2| + |\Delta l_3| + \dots + |\Delta l_n|}{n}.$$

Результат виміру записують так:

$$L_0 = L \pm \lambda_{\text{lim}}.$$

Не наводячи висновку, дамо кінцеву формулу для ймовірності похибки результату R :

$$R = \pm 0,0645 \sqrt{\frac{\sum \Delta l_i^2}{n(n-1)}}.$$

У цьому випадку результат вимірювань повинен бути записаний так:

$$L_0 = L \pm R.$$

Чим менше R , тим надійніше результати вимірювань, тим краще вважати себе гарантованим від випадкових помилок.

При досить велику кількість вимірів однієї й тієї ж величини можна звести ймовірність помилок до мінімуму.

Наведеними вище формулами теорії похибок можна скористатися, якщо кількість вимірів становить щонайменше 5 – 10.

б) Оцінка точності результату одного прямого виміру (технічний метод)

Якщо в процесі багаторазових вимірювань вимірювальний прилад (вимірювальна установка) дає одні й ті самі показання, то багатократність вимірів втрачає сенс – достатньо провести один раз. Це має місце, очевидно тоді, коли абсолютна похибка робочого вимірювального приладу буде більшою, ніж залишкові абсолютні похибки окремих вимірювань. Отже, абсолютна похибка результату технічного виміру може бути більше, ніж абсолютна похибка робочого вимірювального приладу, що вказується у його технічному паспорті. Гранична абсолютна похибка результату технічного виміру приймається рівною абсолютною похибкою вимірювального приладу або половиною ціни розподілу його шкали.

в) Оцінка точності результату непрямих вимірів

Коли всі виміри, необхідних визначення шуканої величини, закінчено, необхідно виходячи з їх обчислити остаточний результат. При цьому немає жодного сенсу виконувати обчислення вище межі точності величин, що безпосередньо вимірювалися. Таким чином, точністю вимірювання визначаються і ті способи, за допомогою яких слід вести обчислення.

Значення граничної та абсолютної похибки результату одноразового непрямого вимірювання за відомими похибками величин, що входять до цієї формули, визначаються згідно з табл. 10.1.

У разі проведення непрямих вимірювань лабораторним методом (багаторазові вимірювання) насамперед оцінюють точність кожного окремого виміру, прийнявши за достовірне значення середньої арифметичної величини з отриманих результатів. Залишкові похибки окремих непрямих вимірів повинні перевищувати граничної похибки результату непрямого виміру, отриманої технічним методом, тобто розрахованої з урахуванням обліку похибки вимірювальної апаратури.

Якщо залишкові похибки окремих непрямих вимірів виявилися більшими за граничну похибку результату непрямого виміру, то у відповідних вимірах

мали місце грубі похибки або промахи, і ці виміри повинні бути відкинуті. Для отримання достовірного значення вимірюваної величини бажано окремі непрямі вимірювання проводити видозмінюючи постановку експерименту.

Як приклад, знайдемо найбільшу можливу відносну похибку визначення модуля поздовжньої пружності E сталі за пружними подовженнями зразка. Відомо, що пружне подовження Δl прямого стрижня на основі закону Гука визначається за формулою:

$$\Delta l = \frac{P \cdot l}{E \cdot A},$$

звідси отримуємо такий вираз для модуля поздовжньої пружності:

$$E = \frac{P \cdot l}{\Delta l \cdot A}, \quad (10.10)$$

де

P – сила, що викликає подовження;

l – довжина зразка, що вимірюється, рівна базі тензометра

A – початкова площа, що дорівнює основі тензометра;

Підставляючи у формулу (10) значення зусиль та відліки по дзеркальному приладу на початку та в кінці досвіду, отримаємо наступну формулу для визначення модуля поздовжньої пружності:

$$E = \frac{(P_k - P_H) l \cdot 2K}{A [(C_{1k} + C_{2k}) - (C_{1H} + C_{2H})]} = \frac{\Delta P \cdot l \cdot 2K}{A \cdot \Delta C_{cp}}. \quad (10.11)$$

Тут

$$\Delta l = \frac{(C_{1k} + C_{2k}) - (C_{1H} + C_{2H})}{2K} = \frac{\Delta C_{cp}}{2K}, \quad (10.12)$$

$K = 500$ – збільшення дзеркального приладу.

Досвід проводився із круглим зразком $d = 15,0$ мм; подовження з урахуванням $l = 100$ мм замірялося з допомогою дзеркального приладу Мартенса; зусилля, що діє на зразок, визначалося за шкалою випробувальної машини, ціна поділу якої дорівнює 25 кг. Середня сума відліків за шкалами на ступінь навантаження $\Delta P = 500$ кг дорівнює $\Delta C_{cp} = 14,1$ мм.

Початкова площа поперечного перерізу зразка при діаметрі $d = 15,0$ мм:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 15,0^2}{4} = 177 \text{ }^2.$$

Згідно формули (11) значення модуля поздовжньої пружності буде:

$$E = \frac{500 \cdot 100 \cdot 2 \cdot 500}{177 \cdot 14,1} = 2,0 \cdot 10^4 \text{ кг / мм}^2.$$

Відносна похибка $\frac{\delta E}{E}$ визначення величини E згідно (10), виражається формулою:

$$\varepsilon_E = \frac{\delta E}{E} = \frac{\delta P}{P} + \frac{\delta l}{l} + \frac{\delta \Delta C}{l} + \frac{\delta A}{A}.$$

З формули (10.12) випливає, що абсолютна похибка виміру Δl залежить від точності відліку за шкалою дзеркального приладу та при чотирьох відліках складе $\delta \Delta l = 4 \delta C$, де δC дорівнює половині ціни поділу шкали.

Якщо число ступенів завантаження дорівнює n , то остаточна формула для визначення відносної похибки набуде вигляду:

$$\varepsilon_E = \frac{\delta E}{E} = \frac{2\delta P}{nP} + \frac{\delta l}{l} + \frac{4\delta C}{\Delta C_{cp} \cdot n} + \frac{\delta A}{A}.$$

Навантаження DP , що відповідає одному ступеню завантаження, визначається як різниця кінцевого та початкового значення навантаження $\Delta P = P_k - P_n$. Найбільша абсолютна похибка вимірювання сили дорівнює половині ціни поділу шкали і становить 12,5 кг. Відносна похибка вимірювання сили при двох відліках та числі ступенів завантаження $n = 5$ становитиме:

$$\frac{2\delta \cdot P}{n \cdot P} = \frac{2 \cdot 12,5}{5 \cdot 500} = 0,01.$$

Абсолютну похибку розрахункової довжини зразка (база дзеркального тензометра) можна прийняти рівною $\delta l = 0,1$ мм тоді відносна похибка вимірювання l дорівнює:

$$\frac{\delta l}{l} = \frac{0,1}{100} = 0,001.$$

Оскільки ціна розподілу шкал приладу Мартенса становить 1 мм, то абсолютна похибка відліку за шкалами дзеркального приладу дорівнює $\delta C = 0,5$ мм, при цьому відносна похибка відліку буде:

$$\frac{4\delta C}{n \cdot \Delta C_{cp}} = \frac{4 \cdot 0,5}{5 \cdot 14,1} = 0,0284.$$

Приймаючи до уваги, що $A = \frac{\pi d^2}{4}$ відносна похибка визначення площі поперечного перерізу зразка становитиме:

$$\frac{\delta A}{A} = \frac{\delta \pi}{\pi} + 2 \frac{\delta d}{d}.$$

Абсолютна похибка наближеного значення π .

$$\delta \pi = 3,14159 - 3,14 = 0,0016.$$

Діаметр зразка вимірюється штангенциркулем з ціною розподілу, що дорівнює 0,1 мм, тому $\delta d = 0,05$ мм.

Тоді відносна похибка визначення площі поперечного перерізу зразка:

$$\frac{\delta A}{A} = 0,0005 + 0,0067 = 0,0072.$$

Найбільша можлива відносна похибка визначення E , отже, дорівнює:

$$\frac{\delta E}{E} = (0,01 + 0,001 + 0,0284 + 0,0072)100 = 4,7\% .$$

Абсолютна похибка визначення E дорівнює:

$$\delta E = 0,047 \cdot 2 \cdot 10^4 = 0,09 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2.$$

Остаточний результат визначення величини модуля записується так:

$$E = (2 \pm 0,09) \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2,$$

тобто справжнє значення E лежить у межах

$$1,91 \cdot 10^4 \div 2,09 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2.$$

Насамкінець зазначимо, що необхідно не тільки ретельно проводити вимірювання, але також точно і своєчасно їх реєструвати, оскільки недбалості, допущені під час запису вимірювань, можуть призвести до грубих помилок та неправильних висновків при обробці результатів роботи. На основі проведених вимірювань, занесених до журналу-звіту до лабораторних робіт, проводиться остаточна обробка результатів вимірювань, обчислюються помилки вимірювань, і складається звіт по роботі.

ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ

Сертифікація досягнень студентів здійснюється за допомогою прозорих процедур, що ґрунтуються на об'єктивних критеріях відповідно до Положення університету «Про оцінювання результатів навчання здобувачів вищої освіти».

Досягнутий рівень компетентностей відносно очікуваних, що ідентифікований під час контрольних заходів, відображає реальний результат навчання студента за дисципліною.

Шкали

Оцінювання навчальних досягнень студентів НТУ «ДП» здійснюється за рейтинговою (100-бальною) та інституційною шкалами. Остання необхідна (за офіційною відсутністю національної шкали) для конвертації (переведення) оцінок мобільних студентів.

Шкали оцінювання навчальних досягнень студентів НТУ «ДП»

Рейтингова	Інституційна
90...100	відмінно / Excellent
74...89	добре / Good
60...73	задовільно / Satisfactory
0...59	незадовільно / Fail

Кредити навчальної дисципліни зараховуються, якщо студент отримав підсумкову оцінку не менше 60-ти балів. Нижча оцінка вважається академічною заборгованістю, що підлягає ліквідації відповідно до Положення про організацію освітнього процесу НТУ «ДП».

Засоби та процедури

Зміст засобів діагностики спрямовано на контроль рівня сформованості знань, умінь, комунікації, автономності та відповідальності студента за вимогами НРК до 6-го кваліфікаційного рівня під час демонстрації регламентованих робочою програмою результатів навчання.

Студент на контрольних заходах має виконувати завдання, орієнтовані виключно на демонстрацію дисциплінарних результатів навчання (розділ 2).

Засоби діагностики, що надаються студентам на контрольних заходах у вигляді завдань для поточного та підсумкового контролю, формуються шляхом конкретизації вихідних даних та способу демонстрації дисциплінарних результатів навчання.

Засоби діагностики (контрольні завдання) для поточного та підсумкового контролю дисципліни затверджуються кафедрою.

Види засобів діагностики та процедур оцінювання для поточного та підсумкового контролю дисципліни подано нижче.

Засоби діагностики та процедури оцінювання

ПОТОЧНИЙ КОНТРОЛЬ			ПІДСУМКОВИЙ КОНТРОЛЬ	
навчальне заняття	засоби діагностики	процедури	засоби діагностики	процедури
лекції	контрольні завдання за кожною темою	виконання завдання під час лекцій	Лабораторна робота	визначення середньозваженого результату поточних контролів;
лабораторні	перевірка та захист	виконання лабораторних робіт		

Під час поточного контролю лекційні заняття оцінюються шляхом визначення якості виконання контрольних конкретизованих завдань. Лабораторні заняття оцінюються якістю виконання контрольного або індивідуального завдання.

Якщо зміст певного виду занять підпорядковано декільком складовим, то інтегральне значення оцінки може визначатися з урахуванням вагових коефіцієнтів, що встановлюються викладачем.

За наявності рівня результатів поточних контролів з усіх видів навчальних занять не менше 60 балів, підсумковий контроль здійснюється без участі студента шляхом визначення середньозваженого значення поточних оцінок.

Критерії

Реальні результати навчання студента ідентифікуються та вимірюються відносно очікуваних під час контрольних заходів за допомогою критеріїв, що описують дії студента для демонстрації досягнення результатів навчання.

Для оцінювання виконання контрольних завдань під час поточного контролю лекційних і практичних занять в якості критерію використовується коефіцієнт засвоєння, що автоматично адаптує показник оцінки до рейтингової шкали:

$$O_i = 100 a/m,$$

де a – число правильних відповідей або виконаних суттєвих операцій відповідно до еталону рішення; m – загальна кількість запитань або суттєвих операцій еталону.

Індивідуальні завдання та комплексні контрольні роботи оцінюються експертно за допомогою критеріїв, що характеризують співвідношення вимог до рівня компетентностей і показників оцінки за рейтинговою шкалою.

Зміст критеріїв спирається на компетентнісні характеристики, визначені НРК для бакалаврського рівня вищої освіти (подано нижче).

Загальні критерії досягнення результатів навчання для 6-го кваліфікаційного рівня за НРК

Опис кваліфікаційного рівня	Вимоги до знань, умінь/навичок, комунікації, відповідальності і автономії	Показник оцінки

Опис кваліфікаційного рівня	Вимоги до знань, умінь/навичок, комунікації, відповідальності і автономії	Показник оцінки
Знання		
♦ концептуальні наукові та практичні знання, критичне осмислення теорій, принципів, методів і понять у сфері професійної діяльності та/або навчання	Відповідь відмінна – правильна, обґрунтована, осмислена. Характеризує наявність: <ul style="list-style-type: none"> - концептуальних знань; - високого ступеню володіння станом питання; - критичного осмислення основних теорій, принципів, методів і понять у навчанні та професійній діяльності 	95-100
	Відповідь містить негрубі помилки або описки	90-94
	Відповідь правильна, але має певні неточності	85-89
	Відповідь правильна, але має певні неточності й недостатньо обґрунтована	80-84
	Відповідь правильна, але має певні неточності, недостатньо обґрунтована та осмислена	74-79
	Відповідь фрагментарна	70-73
	Відповідь демонструє нечіткі уявлення студента про об'єкт вивчення	65-69
	Рівень знань мінімально задовільний	60-64
	Рівень знань незадовільний	<60
Уміння/навички		
♦ поглиблені когнітивні та практичні уміння/навички, майстерність та інноваційність на рівні, необхідному для розв'язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем у сфері професійної діяльності або навчання	Відповідь характеризує уміння: <ul style="list-style-type: none"> - виявляти проблеми; - формулювати гіпотези; - розв'язувати проблеми; - обирати адекватні методи та інструментальні засоби; - збирати та логічно й зрозуміло інтерпретувати інформацію; - використовувати інноваційні підходи до розв'язання завдання 	95-100
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності з негрубими помилками	90-94
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності, але має певні неточності при реалізації однієї вимоги	85-89
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності, але має певні неточності при реалізації двох	80-84

Опис кваліфікаційного рівня	Вимоги до знань, умінь/навичок, комунікації, відповідальності і автономії	Показник оцінки
	ВИМОГ	
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності, але має певні неточності при реалізації трьох вимог	74-79
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності, але має певні неточності при реалізації чотирьох вимог	70-73
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання в практичній діяльності при виконанні завдань за зразком	65-69
	Відповідь характеризує уміння/навички застосовувати знання при виконанні завдань за зразком, але з неточностями	60-64
	рівень умінь/навичок незадовільний	<60
Комунікація		
<ul style="list-style-type: none"> ♦ донесення до фахівців і нефахівців інформації, ідей, проблем, рішень, власного досвіду та аргументації; ♦ збір, інтерпретація та застосування даних; ♦ спілкування з професійних питань, у тому числі іноземною мовою, усно та письмово 	<p>Вільне володіння проблематикою галузі. Зрозумілість відповіді (доповіді). Мова:</p> <ul style="list-style-type: none"> - правильна; - чиста; - ясна; - точна; - логічна; - виразна; - лаконічна. <p>Комунікаційна стратегія:</p> <ul style="list-style-type: none"> - послідовний і несуперечливий розвиток думки; - наявність логічних власних суджень; - доречна аргументації та її відповідність відстоюваним положенням; - правильна структура відповіді (доповіді); - правильність відповідей на запитання; - доречна техніка відповідей на запитання; - здатність робити висновки та формулювати пропозиції 	95-100
	<p>Достатнє володіння проблематикою галузі з незначними хибами. Достатня зрозумілість відповіді (доповіді) з</p>	90-94

Опис кваліфікаційного рівня	Вимоги до знань, умінь/навичок, комунікації, відповідальності і автономії	Показник оцінки
	незначними хибами. Доречна комунікаційна стратегія з незначними хибами	
	Добре володіння проблематикою галузі. Добра зрозумілість відповіді (доповіді) та доречна комунікаційна стратегія (сумарно не реалізовано три вимоги)	85-89
	Добре володіння проблематикою галузі. Добра зрозумілість відповіді (доповіді) та доречна комунікаційна стратегія (сумарно не реалізовано чотири вимоги)	80-84
	Добре володіння проблематикою галузі. Добра зрозумілість відповіді (доповіді) та доречна комунікаційна стратегія (сумарно не реалізовано п'ять вимог)	74-79
	Задовільне володіння проблематикою галузі. Задовільна зрозумілість відповіді (доповіді) та доречна комунікаційна стратегія (сумарно не реалізовано сім вимог)	70-73
	Часткове володіння проблематикою галузі. Задовільна зрозумілість відповіді (доповіді) та комунікаційна стратегія з хибами (сумарно не реалізовано дев'ять вимог)	65-69
	Фрагментарне володіння проблематикою галузі. Задовільна зрозумілість відповіді (доповіді) та комунікаційна стратегія з хибами (сумарно не реалізовано 10 вимог)	60-64
	Рівень комунікації незадовільний	<60
<i>Відповідальність і автономія</i>		
<ul style="list-style-type: none"> ◆ управління складною технічною або професійною діяльністю чи проектами; ◆ спроможність нести відповідальність за вироблення та ухвалення рішень 	<p>Відмінне володіння компетенціями менеджменту особистості, орієнтованих на:</p> <p>1) управління комплексними проектами, що передбачає:</p> <ul style="list-style-type: none"> - дослідницький характер навчальної діяльності, позначена вмінням самостійно оцінювати різноманітні життєві ситуації, явища, факти, виявляти і відстоювати особисту позицію; - здатність до роботи в команді; - контроль власних дій; <p>2) відповідальність за прийняття рішень в</p>	95-100

Опис кваліфікаційного рівня	Вимоги до знань, умінь/навичок, комунікації, відповідальності і автономії	Показник оцінки
<p>у непередбачуваних робочих та/або навчальних контекстах;</p> <ul style="list-style-type: none"> ♦ формування суджень, що враховують соціальні, наукові та етичні аспекти; ♦ організація та керівництво професійним розвитком осіб та груп; ♦ здатність продовжувати навчання із значним ступенем автономії 	<p>непередбачуваних умовах, що включає:</p> <ul style="list-style-type: none"> - обґрунтування власних рішень положеннями нормативної бази галузевого та державного рівнів; - самостійність під час виконання поставлених завдань; - ініціативу в обговоренні проблем; - відповідальність за взаємовідносини; <p>3) відповідальність за професійний розвиток окремих осіб та/або груп осіб, що передбачає:</p> <ul style="list-style-type: none"> - використання професійно-орієнтовних навичок; - використання доказів із самостійною і правильною аргументацією; - володіння всіма видами навчальної діяльності; <p>4) здатність до подальшого навчання з високим рівнем автономності, що передбачає:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ступінь володіння фундаментальними знаннями; - самостійність оцінних суджень; - високий рівень сформованості загальнонавчальних умінь і навичок; - самостійний пошук та аналіз джерел інформації 	
	Упевнене володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано дві вимоги)	90-94
	Добре володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано три вимоги)	85-89
	Добре володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано чотири вимоги)	80-84
	Добре володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано шість вимог)	74-79
	Задовільне володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано сім вимог)	70-73
	Задовільне володіння компетенціями менеджменту особистості (не реалізовано вісім вимог)	65-69
	Рівень відповідальності і автономії	60-64

Опис кваліфікаційного рівня	Вимоги до знань, умінь/навичок, комунікації, відповідальності і автономії	Показник оцінки
	фрагментарний	
	Рівень відповідальності і автономії незадовільний	<60

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Метод вимірювання твердості за Брінеллем.
2. Метод вимірювання твердості за Роквеллом.
3. Метод випробування на ударний вигин.
4. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт № 9-15 із навчальних дисциплін "Опір матеріалів" і "Технічна механіка" / Андрушков В.І., Гуртовий О.Г., Тинчук С.О.
5. Методичні вказівки для студентів за напрямами підготовки: „Будівництво, „Гідротехніка (водні ресурси), „Машинобудування, „Автомобільний транспорт, „Теплоенергетика, „Гідроенергетика, „Гірництво, „Охорона праці. Загальні методичні вказівки з підготовки до проведення лабораторних робіт Лабораторні роботи: Визначення прогинів та кутів повороту /– Рівне : НУВГП, 2015. –31с.
6. Контрольные задания и методические указания к выполнению расчётно-проектировочных работ по курсу сопротивление материалов, часть 1, методические указания для студентов механических специальностей. Растяжение- сжатие стержней в системе. Плоское напряженно-деформированное состояние. Кручение круглых стержней. Геометрические характеристики / Донецк: ДонНТУ, 2003. - 80 с.
7. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "опір матеріалів" для студентів усіх спеціальностей денної та вечірньої форм навчання Затверджено на засіданні кафедри динаміки, міцності машин та опору матеріалів / Протокол №11 від 26.05.93 Укладачі В. І. Ковальчук, Д. Ю. Шпак, Г. Є. Візерська, Ю. М., Міністерство освіти і науки України Київський політехнічний інститут.

Панченко Сергій Павлович
Кіба В`ячеслав Якович

**Конспект лекції по «Механічним випробуванням матеріалів» для
бакалаврів спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

Видається в авторській редакції

Електронний ресурс Авт. арк. 3,3

Розроблено і видано в
Національному технічному університеті
«Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.

