

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

***МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА
КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ***

Методичні вказівки до виконання
практичних робіт з курсу

для студентів спеціальності
132 «Матеріалознавство»,
освітньо-кваліфікаційного рівня **бакалавр**

Кропивницький, ЦНТУ 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

***МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА
КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ***

Методичні вказівки до виконання
практичних робіт з курсу

для студентів спеціальності
132 «Матеріалознавство»,
освітньо-кваліфікаційного рівня **бакалавр**

Затверджено на засіданні кафедри
«Експлуатація та ремонт машин»
Протокол № 12 від 20.04.2022р.

Кропивницький, ЦНТУ 2022

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. – 58 с.

Укладачі: д.т.н., доц. І.В. Шепеленко
к.т.н., доц. М.В. Красота

Відповідальний за випуск І.В. Шепеленко

Рецензент: д.т.н., проф. Є.К. Солових

Комп'ютерний набір та верстка: І.В. Шепеленко

© Механічні властивості та конструкційна
міцність матеріалів
Укладачі: І.В.Шепеленко, М.В.Красота, 2022

З М І С Т

	стор.
Загальні вказівки до виконання практичних робіт	3
Практична робота №1	
Експериментальне визначення механічних характеристик...	4
Практична робота №2	
Визначення механічних характеристик матеріалів за допомогою статичних випробувань на одновісний розтяг ...	12
Практична робота №3	
Побудова істинних та умовних діаграм деформації матеріалів за умов одновісного стискання	17
Практична робота №4	
Визначення механічних характеристик матеріалів за допомогою випробувань на закручування	24
Практична робота №5	
Визначення механічних характеристик матеріалів за результатами випробувань на статичний згин	30
Практична робота №6	
Визначення механічних характеристик матеріалів за результатами динамічних випробувань на згин	37
Практична робота №7	
Вибір метода визначення і проведення випробувань твердості.....	45
Практична робота №8	
Експериментальне дослідження окрихчення матеріалів концентраторами напружень.....	52
Література.....	57

Загальні вказівки до виконання практичних робіт

Практичні роботи з дисципліни «Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів» є обов'язковими для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр денної форми навчання.

Метою практичних робіт за даною дисципліною є формування у студентів ряду компетентностей:

- Здатності застосовувати професійні знання й уміння на практиці;
- Здатності застосовувати стандартні методи розрахунку рівня властивостей протягом конструюванні матеріалів та виробів;
- Здатності застосовувати методи стандартних випробувань щодо визначення фізичних, хімічних, структурних та механічних властивостей вихідних матеріалів та готових виробів.

При цьому після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

знання:

- комплексу характеристик, що визначають механічні властивості матеріалів;
- суті методів експериментального визначення основних механічних характеристик конструкційних матеріалів;
- методик визначення рівня механічних характеристик матеріалу придатного для застосування в певних експлуатаційних умовах.

уміння:

- проводити дослідження механічних характеристик матеріалів;
- формулювати вимоги щодо рівня механічних властивостей матеріалу в залежності від умов його навантаження в конструкції.

досвід:

- підготовки зразків для механічних випробувань;
- проведення основних видів механічних випробувань;
- розрахунку рівня основних механічних характеристик матеріалів за результатами механічних випробувань.

Слід пам'ятати, що всі роботи, без винятку, повинен проробити кожен студент і здати викладачу звіти з практичних робіт під час одержання екзаменаційної оцінки. На кафедрі «Експлуатація та ремонт машин» проводяться консультації та є графік додаткових занять, на яких студенти відробляють пропущені заняття, або виконують завдання, що не встигли зробити на основному занятті.

Практична робота №1

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Мета роботи: - вивчити основні поняття стосовно базових методик випробування механічних характеристик матеріалів, ознайомитися з основними типами дослідницької апаратури.

Загальні відомості

Механічні випробування призначені для експериментального визначення механічних характеристик матеріалів. За їх допомогою вирішуються наступні основні задачі:

- визначення загальноприйнятих стандартних характеристик механічних властивостей, що використовуються для порівняльної оцінки механічної поведінки різних матеріалів;
- визначення властивостей матеріалів в умовах, максимально наближених до умов роботи виготовлених з них виробів та конструкцій.

Згідно з сучасними уявленнями, рівень механічних характеристик визначається трьома групами факторів:

- матеріалом - його хімічним і фазовим складом, структурою;
- тілом - його розмірами та формою (наявністю розрізів, станом поверхні, тощо);
- умовами навантаження - запасом пружної енергії, швидкістю і повторюваністю навантаження, тощо.

В деяких випадках вплив двох останніх чинників є незначним і тоді головним чином проявляються властивості матеріалу (наприклад, при співставленні твердості вдавлюванням). Але в більшості випадків необхідне врахування всіх факторів. Наприклад, суттєво різні результати можуть бути отримані при аналізі шліфа і поверхні зламу, стрічки і масивного зразка з одного й того ж матеріалу, при виявленні властивостей матеріалу при кімнатній та високій температурах, тощо.

Одновісний розтяг - найрозповсюдженіша схема механічних випробувань. За результатами випробувань на одновісний розтяг будується первинна діаграма в координатах «навантаження – видовження», яка є основою для розрахунку стандартних (паспортних) механічних характеристик матеріалів.

Стиск використовується для випробувань малопластичних матеріалів. Найбільш часто використовується одновісний стиск, під час якого стискаюче

напруження прикладається до осі циліндричного зразка та будується діаграма в координатах «навантаження – скорочення».

Згин - одна з найпростіших схем навантаження. Використовують два методи випробувань: навантаження зразка через жорстку траверсу двома однаковими силами, прикладеними на рівній відстані від опор (4-точковий згин) та навантаження зосередженою силою, що прикладена по середині пробігу зразка між опорами (3-точковий згин). Первинна діаграма будується в координатах «навантаження - стріла прогину».

Закрут - здійснюється двома різними по величині та протилежно спрямованими крутильними моментами, які прикладаються до кінців зразка перпендикулярно до його поздовжньої осі. Діаграму кручення будують в координатах «крутильний момент - кут закручування».

Обладнання, прилади та інструменти

1. Прилад для вимірювання навантажень.
2. Прилад для вимірювання переміщень.

Інструментом для проведення механічних випробувань є випробувальна машина. Предметом випробування є зразок для механічних випробувань. Результатами випробувань є діаграми в координатах: «навантаження – видовження» (первинна), «напруження - відносна деформація» (умовна) та істинна діаграма зміцнення.

Для вимірювання сили опору зразка деформації використовують декілька типів пристроїв. Найбільш поширені з них - важільні, маятникові, торсіонні, електротензометричні силовимірювачі та месдозы. Важільні та маятникові силовимірювачі застосовують при невеликих швидкостях деформування (до 20 - 40 мм/хв) та повільній зміні величини навантаження. Схеми машин з гідравлічним приводом та такими силовимірювачами наведено на рис. 1.1.

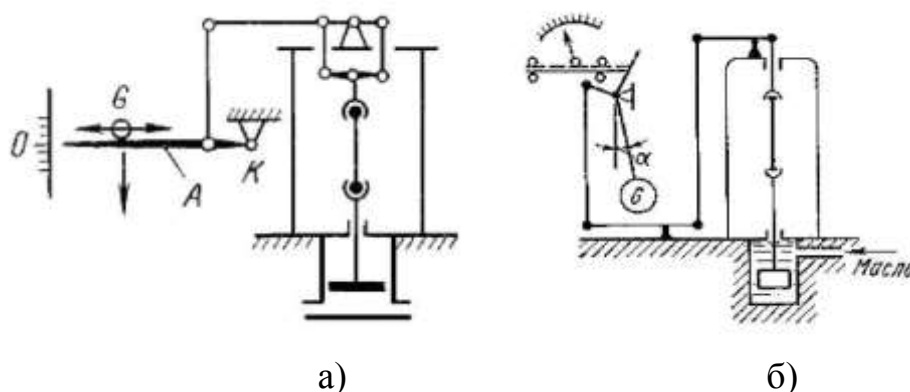


Рис.1.1. Схема машини з гідравлічним приводом та важільним (а) й маятниковим (б) силовимірювачем [3]: G - рухомий вантаж, А - важіль, К - вісь важелю

В інших умовах внаслідок великої інерційності обох типів приладів результати вимірювань будуть мати значні похибки. Наприклад, внаслідок різкого збільшення навантаження на зразок маятник за інерцією підніметься вище положення рівноваги, виникнуть коливання, які хоч і затухають, але призводять до появи значних похибок в результатах. Набагато нижчу інерційність мають месдоза та торсіонні силівимірювачі, що зазвичай використовуються в гідравлічних машинах. В месдозі зусилля на зразку вимірюють манометром, переміщення стрілки якого пропорційне силі, що діє на рідину.

В торсійному силівимірювачі до закріпленого з одного боку циліндричного стрижня через перпендикулярний важіль передається зусилля, яке пропорційне діючому на рідину.

В перших найпростіших машинах для механічних випробувань силівимірювання зазвичай здійснювалось за допомогою маятникового силівимірювача чи месдоза. Головний недолік цих методів вимірювання, окрім інерційності, - складність переведення отриманої інформації в електричний сигнал. Тому подальший розвиток одержали ті методи реєстрації навантаження, які за допомогою різних фізичних явищ перетворюють механічні переміщення динамометра в електричний сигнал.

Загальний принцип дії таких приладів наступний: датчик сили (або силомір), що являє собою жорстку пружну рамку (скобу) розташовується в силовому ланцюзі між захватом та зразком. Пружні переміщення перетворюються певним чином в електричний сигнал та фіксуються пристроєм реєстрації.

До недавнього часу для такого перетворення найбільш часто використовувався тензорезисторний ефект, що пов'язаний зі зміною активного електроопору провідника за механічної дії на нього. Електротензометричні силівимірювачі використовують на машинах зі всіма типами приводів, вони компактні та мають високу точність вимірювань. На рис. 1.2 наведено схему резисторного тензодатчику.

Такий датчик складається з тонкої проволочки чи фольги з високим коефіцієнтом тензочутливості (відношення зміни електричного опору до відносного видовження), яка певним чином розташована на паперовій підкладці (рис. 1.2, а). Датчик наклеюють на головку зразка, до якої прикріплюють нерухомий захват машини. При розтягу зразка в головках виникають пружні напруження та відповідні деформації, які викликають пропорційну зміну електричного опору тензодатчику. Для реєстрації зміни опору датчик включають до схеми електричного мосту (рис. 1.2, б).

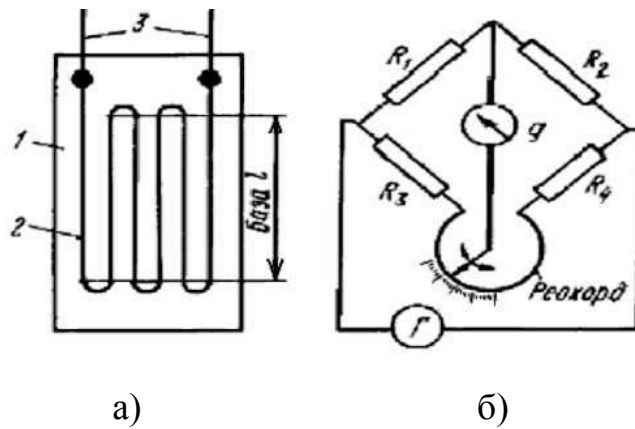


Рис.1.2. Резисторний тензодатчик: а - принципова схема (1 – паперова підкладинка, 2 – плоска решітка з проволочи чи фольги, 3 – виводи), б – схема вимірювання навантажень за допомогою моста Уїтсона (R_1 – резисторний датчик, R_2 – компенсаційний датчик, $R_3 = R_4 \gg R_1 = R_2$, G – джерело струму, g – індикатор підсилювача)

Широко використовуються також датчики з ємкісними та індукційними перетворювачами. В останні роки найчастіше користуються п'єзодатчиками. В цих датчиках поле внутрішніх механічних напружень викликає зміщення зарядів, які знімаються електродами.

Величина навантаження повинна визначатися з точністю до 0,5 найменшої поділки індикатора силовимірювального механізму. Діапазон навантажень при випробуваннях обирають таким чином, щоб сили опору зразка деформації, по яких будуть визначатися характеристики міцності, були не менше 0,1 шкали обраного діапазону і не нижче 0,04 граничного навантаження випробувальної машини. За цих умов бажано, щоб максимальна сила опору зразка знаходилася в другій половині шкали. Саме за такого вибору діапазону навантажень буде забезпечена найбільша точність розрахунку характеристик властивостей матеріалу.

Для побудови діаграми в координатах “навантаження - переміщення” в кожний момент часу змінній величині навантаження слід поставити у відповідність значення переміщення (зміну лінійних розмірів зразка). Для вирішення цієї задачі розроблено ряд методів.

В найпростішому випадку побудови діаграми “сила - навантаження” враховують умови незмінності швидкості переміщення захвату. У зв'язку з цим на приймаючий пристрій, що імітує зростання деформації, подається сигнал, який зростає пропорційно тривалості випробування. Протягом запису на шлейфовий осцилограф незмінність швидкості деформації імітує незмінність швидкості обертання двигуна, який подає діаграмну стрічку. Недолік такого методу полягає в тому, що в цьому випадку неможливо виміряти пружні

характеристики зразків, оскільки пружна деформація динамометра, який стоїть в силовому ланцюзі, значно перевищує пружну деформацію самого зразка.

Щоб подолати цей недолік, використовують різні методи тензовимірювання. Найточніші з тензодатчиків - оптичні (лазерні, інтерференційні, голографічні тощо). На рис. 1.3 наведено схему вимірювання кута закручування при випробуваннях на закрут за допомогою дзеркального тензометра Мартенса.

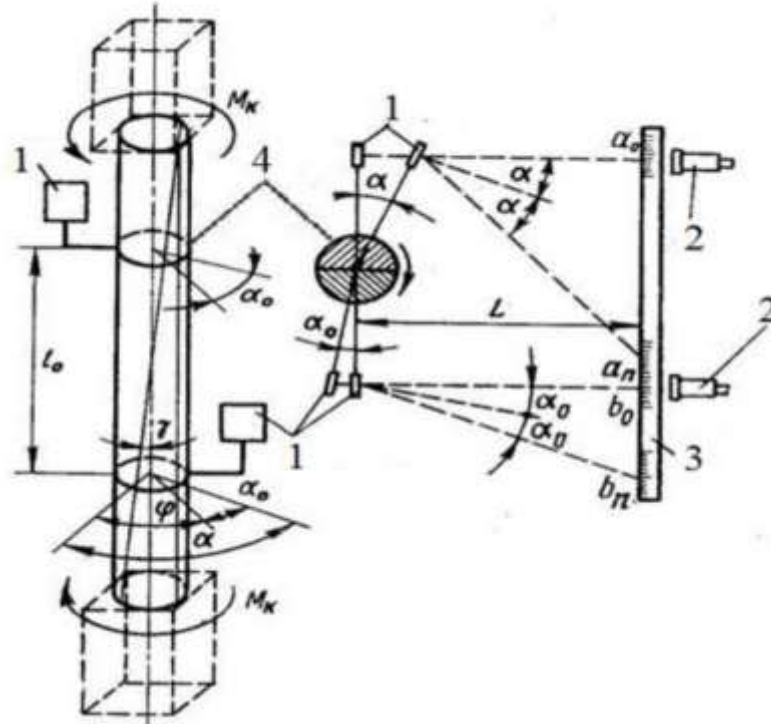


Рис.1.3. Схема вимірювань за допомогою тензометра Мартенса: 1 - дзеркала, що закріплені на границі розрахункової зони зразка, 2 - зорові труби, 3 - шкали, 4 - зразок

Проте, одержану цими методами інформацію складно перетворювати в електричний сигнал, тому найбільш поширені на даний час методи виміру деформації побудовані на перетворенні величини переміщення в електричний сигнал. Для цього у механічний щуп, що кріпиться на зразок, монтується відповідний індуктивний, ємнісний чи тензорезисторний перетворювач, який в кожний момент часу передає електричний сигнал пропорційний переміщенню.

Електричні сигнали з блоків навантаження та переміщення ідуть або на записуючий прилад безпосередньо для побудови діаграми «навантаження – переміщення», або через аналоговий перетворювач поступають у комп'ютер, що значно спрощує подальший аналіз.

Зразки для механічних випробувань.

Оскільки більшість механічних характеристик матеріалів не є їх константами, то умови проведення випробувань суттєво впливають на результати. Тому порівняння властивостей матеріалів, визначених за різних умов може привести до хибних висновків. Для можливості отримання істинної величини тої чи іншої властивості, необхідно виконання певних умов проведення випробувань [1]:

- забезпечення відтворюваності результатів у разі багаторазових випробувань, що можуть бути виконані в різних лабораторіях;
- забезпечення максимального відображення властивостей матеріалу, а не впливу умов випробувань.

Умови, що забезпечують таку відтворюваність та зіставність результатів називають умовами подібності механічних випробувань. Існує три умови подібності:

- геометрична (форма та розміри зразка);
- механічна (схема та швидкість прикладання навантажень);
- фізична (зовнішні фізичні умови).

В разі необхідності отримання зіставних даних про властивості різних матеріалів, виконання умови фізичної подібності ускладнюється. Наприклад, співставлення механічних властивостей за однакової температури для матеріалів з температурами плавлення, що суттєво відрізняються немає фізичного сенсу. Тому, для металевих матеріалів найбільш правильно проводити порівняння при однакових гомологічних температурах (тобто, співвідношеннях температури випробування до температури плавлення матеріалу).

Окрім вищезгаданих трьох умов подібності для максимального відображення властивостей матеріалу велике значення має методика виготовлення зразка, яка має бути такою, щоб зразок мав структуру, ідентичну до структури матеріалу відповідної деталі.

Для забезпечення виконання всіх вимог розміри, форма та методика виготовлення зразків регламентуються стандартами.

Зразок повинен мати таку форму, щоб у певній частині його об'єму розподіл напружень був однаковим (так звана робоча частина зразка). Краще всього цій вимозі задовольняють зразки циліндричної форми (хоча іноді використовують й прямокутні зразки). Стандарти регламентують не тільки абсолютні розміри зразків, але і співвідношення між розмірами, щоб при переході з одного розміру на інший не змінювався напружений стан. У зв'язку з

цим стандартні зразки називають пропорційними. Зовнішній вигляд ряду зразків для механічних випробувань на розтяг наведено на рис.1.4.

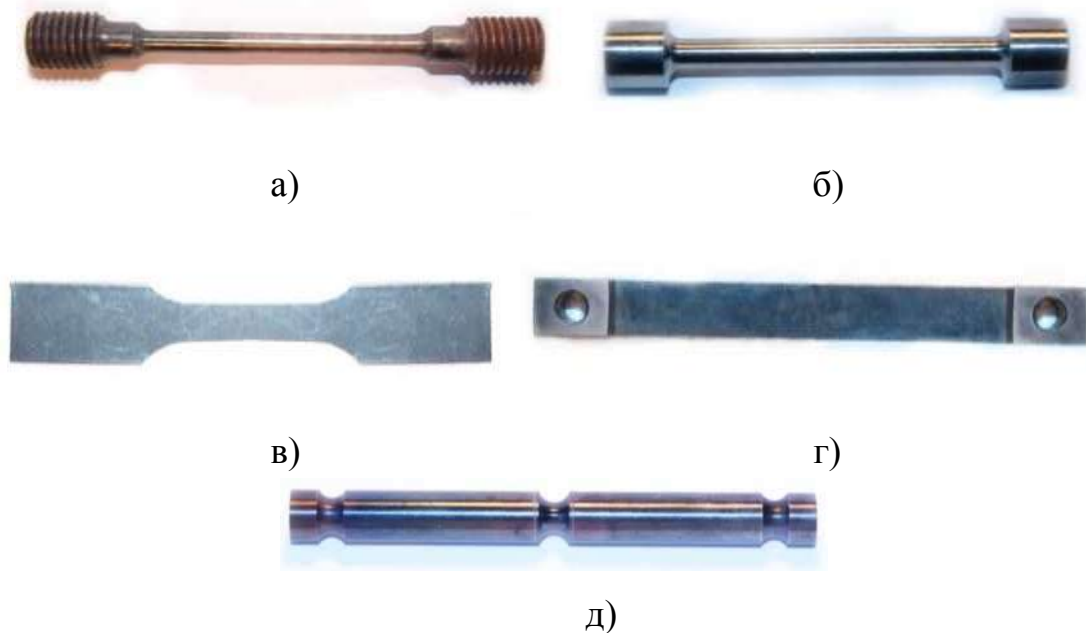


Рис.1.4. Зовнішній вигляд зразків для випробувань на розтяг: а – для високотемпературних випробувань, б – для випробувань при нормальних умовах, в – зразок з прямокутним перерізом, г – для низькотемпературних випробувань, д – зразок з концентратором напружень

Зразок розміщується в силовому ланцюзі за допомогою системи захватів та тяг. Захвати забезпечують жорстке кріплення та нерухомий стан зразка при навантаженні. Тяги через систему шарнірів запобігають перекосу у ланцюзі навантаження. Зовнішній вигляд захватів наведено на рис. 1.5.



Рис.1.5. Захвати різної форми

Кожен зразок перед випробуванням маркують, вимірюють і розмічають. Маркування наносять поза межами робочої довжини зразка. Діаметр циліндричних зразків d_0 варто вимірювати з точністю не нижче 0,01 мм при

$d_0 < 10$ мм і $0,05$ мм при $d_0 > 10$ мм. З такою ж точністю необхідно вимірювати товщину плоских зразків a_0 , відповідно при $a_0 < 2$ мм і $a_0 > 2$ мм. Початкова розрахункова довжина зразка l_0 в межах робочої довжини обмежується неглибокими кернами чи рискама з точністю до 1% від величини l_0 .

Усі розміри після випробування визначають з точністю не нижче $0,1$ мм. Для одержання більш точних результатів використовують інструментальні мікроскопи. Кожен розмір варто вимірювати кілька разів. Наприклад, ДСТУ EN 10002-1:2006 зобов'язує робити вимірювання діаметра в середині і по краях робочої частини зразка з наступним визначенням середнього значення, по якому й розраховують площу поперечного перерізу.

Послідовність виконання роботи

1. Проаналізувати вихідні характеристики, опис будови та принцип дії приладу для вимірювання навантаження.
2. Проаналізувати вихідні характеристики, опис будови та принцип дії приладу для вимірювання переміщень.

Аналіз результатів повинен включати:

- опис принципу дії, переваг та недоліків вимірювача навантаження;
- опис принципу дії, переваг та недоліків вимірювача переміщень;
- перелік вимог до проведення випробувань для отримання достовірних результатів.

Контрольні питання

1. Основні типи механічних випробувань.
2. Чому на універсальній випробувальній машині можна виконувати декілька типів випробувань?
3. Опишіть основні типи приладів навантаження.
4. Які існують основні типи приладів для вимірювання деформації?
5. Які існують основні типи приладів для вимірювання навантаження?
6. Які вимоги висуваються до зразків при одновісних випробуваннях?
7. Що таке умови подібності та чому необхідно їх дотримуватися при проведенні випробувань?
8. Яких правил необхідно дотримуватися для отримання достовірних результатів випробувань?

Практична робота №2

ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ОДНОВІСНИЙ РОЗТЯГ

Мета роботи: – за результатами випробувань стандартних зразків на статичний одновісний розтяг визначити характеристики міцності та пластичності матеріалів.

Загальні відомості

На сьогоднішній день найбільш поширеними механічними випробуваннями матеріалів є випробування на одновісний розтяг, оскільки вони дозволяють у межах одного методу отримати механічні характеристики в умовах пружного та пластичного деформування матеріалу, а також значення напруження руйнування та величини критичної деформації. До переваг цього виду механічних випробувань слід також віднести його простоту та досить високу точність визначення напружень та деформацій.

Методи випробувань на розтяг є стандартизованими. Існують окремі стандарти на випробування для кімнатної температури (ДСТУ EN 10002-1:2006), для підвищених (ДСТУ EN 10002-5:2006) і низьких та криогенних температур (ДСТУ 7305:2013). В даних стандартах сформульовані визначення характеристик, що оцінюються протягом випробування, подані типові форми і розміри зразків, описані основні вимоги до устаткування, методика проведення випробування і розрахунку результатів.

Обговорені в стандартах основні вимоги до методики випробувань на одновісний розтяг варто розглядати як мінімальні. При виконанні, наприклад, дослідницьких робіт вони можуть бути значно підвищені. Дотримання стандартної методики випробувань особливо важливо на виробництві у тих випадках, коли результати є критерієм якості продукції чи її паспортними характеристиками.

Безпосередньо в процесі випробувань записуються діаграми розтягу зразка в координатах «навантаження (P) – видовження (U)». Для полікристалічних матеріалів всі можливі форми цих кривих можна розділити на три типи (рис. 2.1). Діаграма типу I характерна для зразків, що руйнуються без суттєвої пластичної деформації. Діаграма типу II характерна для зразків, що рівномірно деформуються аж до руйнування. Діаграма типу III є найпоширенішою і характерна для зразків, в яких перед руйнуванням відбувається локалізація пластичної деформації – формується «шийка».

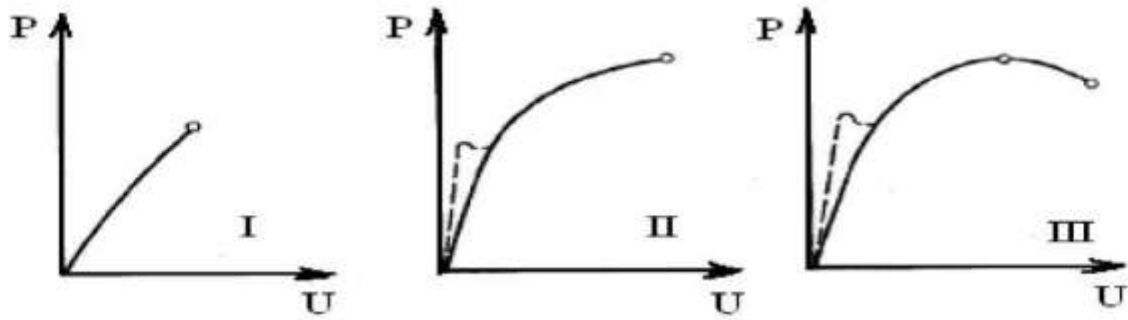


Рис.2.1. Типи первинних діаграм випробувань зразків на одновісний розтяг

В залежності від властивостей матеріалу ці діаграми можуть мати “зуб” та “поличку” плинності, або монотонне зростання напруження при переході від пружної до пластичної деформації матеріалу (рис. 2.2). Ці діаграми є вихідними для побудови діаграм деформації та визначення характеристик міцності і пластичності, які в залежності від методики обробки експериментальних даних поділяються на умовні та істинні (рис. 2.3). Відмінність між істинними та умовними діаграмами полягає в тому, що перші побудовані в координатах «істинне напруження (S) – істинна деформація (e)», а другі – в координатах «умовне напруження (σ) – відносне видовження (δ)».

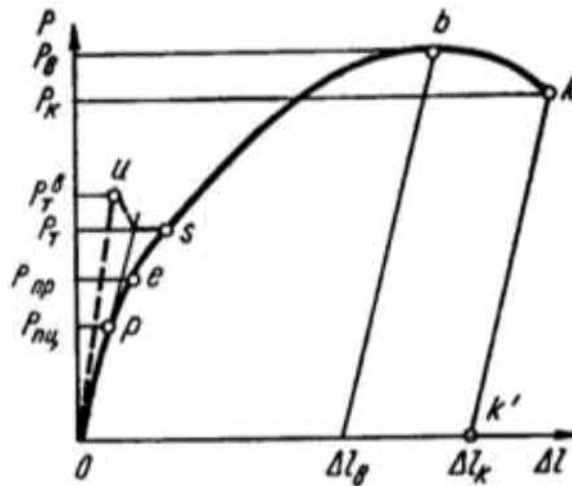


Рис.2.2. Діаграми розтягу зразка з зубом та поличкою плинності чи без зубу та полочки плинності

В умовах одновісного розтягу істинні напруження завжди перевищують умовні, оскільки при їх визначенні враховується зменшення площі поперечного перерізу зразка.

Проте, за малих пружно-пластичних деформацій істинні та умовні напруження практично співпадають (рис. 2.3). В області деформацій за межею

плинності істинні та умовні діаграми суттєво відрізняються. Це обумовлено тим, що істинні діаграми характеризують механічні властивості матеріалу, а умовні слугують лише для їх оціночного (попереднього) виявлення.

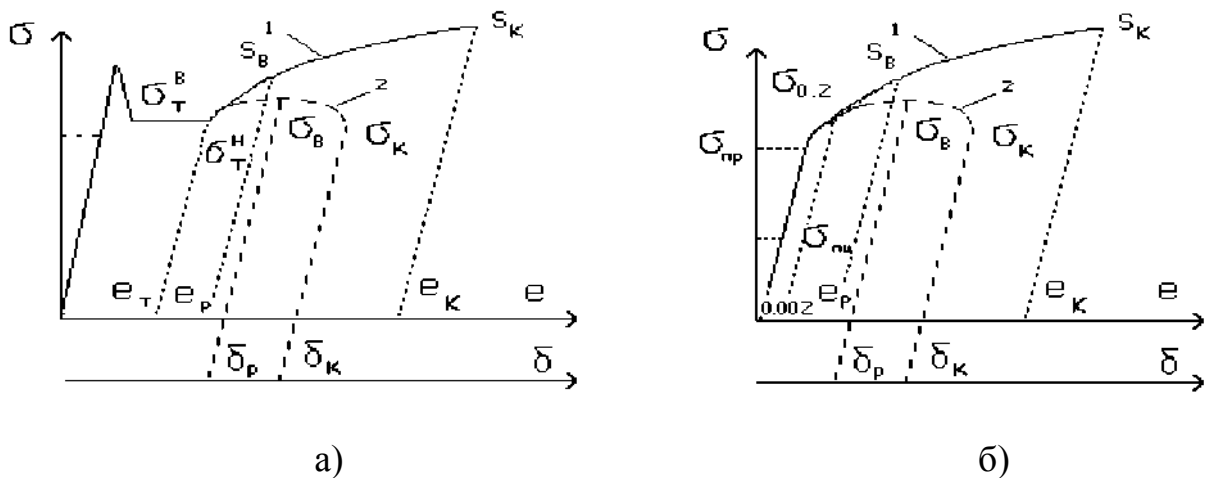


Рис.2.3. Істинні (1) та умовні (2) діаграми деформації матеріалу: а) із зубом та полочкою плинності, б) без зубу та полочки плинності

Для випробувань на статичний одновісний розтяг найчастіше використовують розривні машини з механічним або гідравлічним приводом. Перевага цього типу машин полягає в тому, що вони здатні підтримувати постійну швидкість деформування зразка, що необхідно для коректного визначення характеристик міцності та пластичності матеріалів. Зазвичай при стандартних статичних випробуваннях швидкість деформації матеріалу обирають рівною $\sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Для випробувань на розтяг використовують зразки з робочою частиною у формі циліндра (циліндричні зразки) чи стрижня з прямокутним перерізом (плоскі зразки). На рис. 2.4 представлено схематичні зображення найбільш розповсюджених стандартних зразків для випробувань при кімнатній (а-в), підвищених (г) і низьких (д) температурах. Крім основної робочої частини, більшість зразків мають головки різної конфігурації для кріплення в захватах. Конфігурація і розміри головок визначаються конструкцією захватів. Основними розмірами зразка є:

- 1) робоча довжина l – частина зразка між його ділянками з постійною площею поперечного перерізу чи головками для захватів;
- 2) початкова розрахункова довжина l_0 – ділянка робочої довжини, на якій визначається видовження;
- 3) початковий діаметр робочої частини d_0 для циліндричних зразків та початкова товщина a_0 і ширина b_0 робочої частини для плоских зразків.

За співвідношенням між довжиною робочої частини (бази) зразка l_0 та її діаметром d_0 стандартні зразки поділяються на п'ятикратні ($l_0/d_0=5$) та десятикратні ($l_0/d_0=10$). При випробуванні зразків із крихких матеріалів допускається співвідношення $l_0/d_0=2,5$.

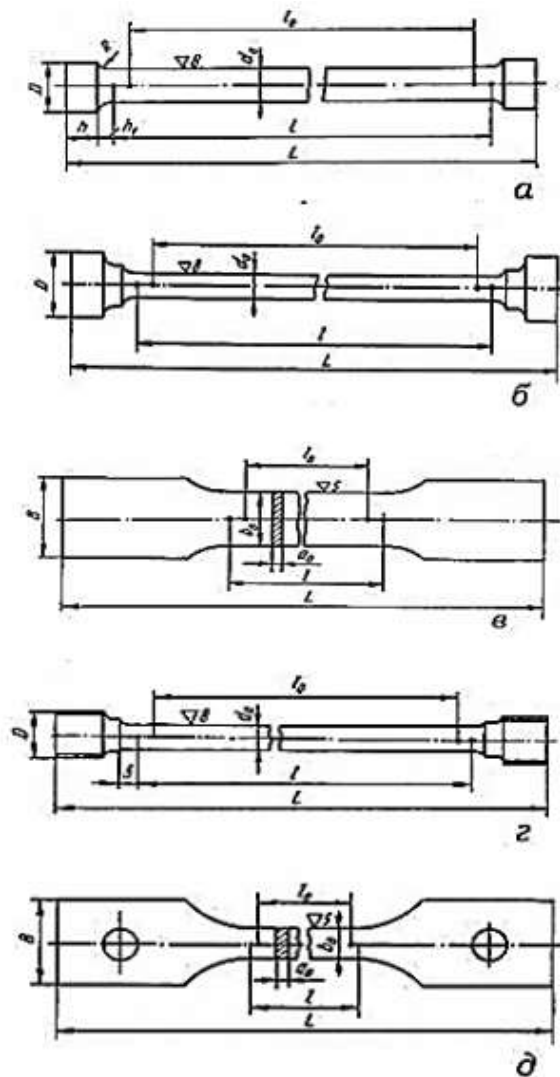


Рис.2.4. Зразки для механічних випробувань матеріалів на статичний одновісний розтяг: а-б) циліндричні зразки для випробувань при кімнатній температурі, в) плоский зразок для випробувань при кімнатній температурі, г) циліндричний зразок для випробувань при підвищених температурах, д) плоский зразок для випробувань при низьких температурах

Обладнання, прилади та інструменти

1. Розривна машина.
2. Зразки для випробувань на розтяг.

Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись з конструкцією та принципом роботи універсальної випробувальної машини (розривної машини).

2. Виміряти розміри зразка. Встановити зразок в захваті розривної машини та провести випробування, записати діаграму розтягу зразка.

3. Розрахувати істинні та умовні напруження і деформації та інші необхідні механічні характеристики.

4. Побудувати істинну та умовну діаграми деформації (на одному графіку).

5. Розрахувати похибки визначення основних механічних характеристик σ_T^B , σ_B , S_k , e_p , ψ_k .

6. Зробити висновки щодо рівня міцності, пружності, пластичності та здатності до деформаційного зміцнення досліджуваного матеріалу.

Аналіз результатів повинен включати:

Матеріал: _____.

Розміри зразка: $L_0 =$ _____ мм, діаметр зразка $d_0 =$ _____ мм.

Умови навантаження: одновісний статичний розтяг, швидкість навантаження $v_H = 2$ мм/хв.

Абсолютні похибки вимірів:

- зусиль (P_T^H , P_{max} , P_k) ± 1 Н;

- діаметр зразка $d_0 \pm 0,01$ мм;

- бази $L_0 \pm 0,01$ мм;

- діаметр зразка в місті зламу $d_k \pm 0,05$ мм;

- рівномірного видовження $\Delta L_p \pm 0,05$ мм.

Контрольні питання

1. Які характеристики міцності та пластичності можливо визначити за результатами випробувань на одновісний розтяг?

2. Чому на ділянці «0 – σ_T » криві умовної та істинної деформації зразка співпадають, а далі – ні?

3. Чим відрізняються процеси пластичної деформації матеріалу до та після межі міцності?

4. Поясніть причину відмінності ходу кривих істинної та умовної деформації зразка після досягнення межі міцності матеріалу.

5. Чому істинна крива деформації набагато довша за умовну криву?

6. Чому виникає на деформаційній кривій «зуб» та поличка плинності?

Практична робота №3

ПОБУДОВА ІСТИННИХ ТА УМОВНИХ ДІАГРАМ ДЕФОРМАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ЗА УМОВ ОДНОВІСНОГО СТИСКАННЯ

Мета роботи: – визначати характеристики міцності та пластичності за результатами випробувань стандартних зразків на статичний одновісний стиск.

Загальні відомості

Схема одновісного стиску характеризується високим коефіцієнтом м'якості (часткою стискаючих напружень у загальному розподілі напружень в матеріалі) ($\alpha=2$) у порівнянні з розтягом ($\alpha=0,5$), тому випробуванням на стиск доцільно піддавати крихкі матеріали. На практиці за випробуваннями на стиск оцінюють механічні властивості чавуну та інших крихких сплавів.

Лінійність схем напруженого і деформованого станів за одновісного стискання і розтягування обумовлює близькість характеристик опору малим деформаціям одного матеріалу, випробовуваного за двома методами. Але після переходу до істотної пластичної деформації (при напруженнях вище межі плинності) схема одновісного стиску в реальних випробуваннях порушується і фіксовані характеристики міцності суттєво відрізняються від визначених при випробуваннях на розтяг. Даний ефект пов'язаний з тертям по опорних поверхнях зразка. У разі збільшення стискання на торцевих поверхнях зразка виникають сили тертя, спрямовані по радіусах до його центру, які перешкоджають деформації в горизонтальному напрямку. В результаті зразок набуває характерної бочкоподібної форми (рис. 3.1), а схема напруженого стану ускладнюється і стає різною в різних точках зразка (рис. 3.2): в точках 1 і 2 виникає схема об'ємного стиску, а в точці 3 - різнойменний плоский напружений стан.

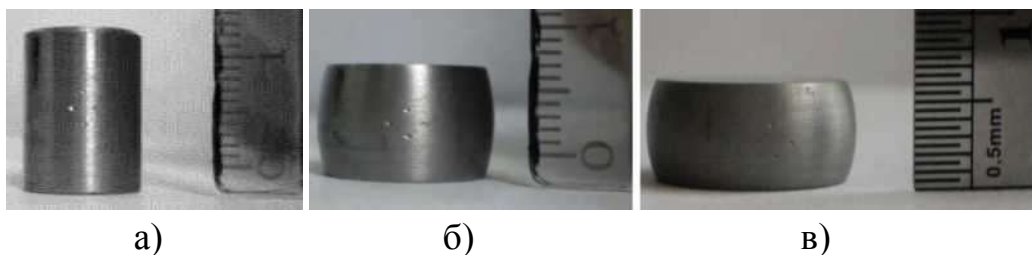


Рис.3.1. Зовнішній вигляд зразка зі сталі 45 при випробуваннях на стиск: а) вихідний стан, б) після навантаження 20 т, в) після навантаження 31,5 т

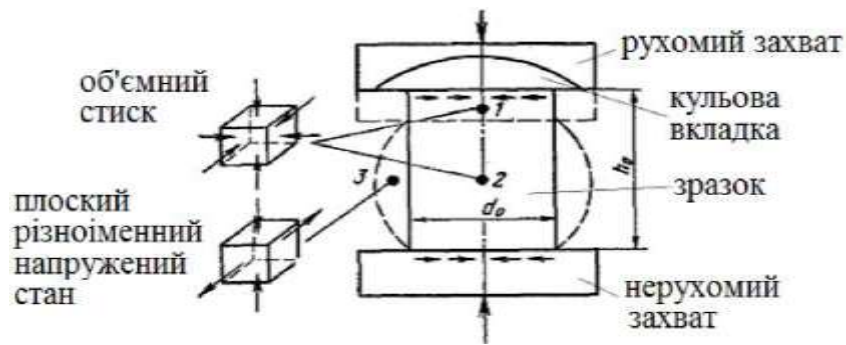


Рис.3.2. Схема розподілу навантажень по висоті зразка при випробуваннях на стиск

В процесі випробування на стиск випробувальна машина фіксує первинну діаграму – залежність зусилля P від зменшення висоти зразка (абсолютної деформації) Δh . Вид діаграми стискування є різним для матеріалів, що руйнуються (рис. 3.3, крива 1) і не руйнуються (рис. 3.3, крива 2) внаслідок випробування. На відміну від випробувань на розтяг, протягом стискування можливе руйнування не будь-яких матеріалів - досить пластичні метали і сплави при стискуванні розплющуються в тонкі пластини і не руйнуються при максимально можливих зусиллях випробувальної машини.

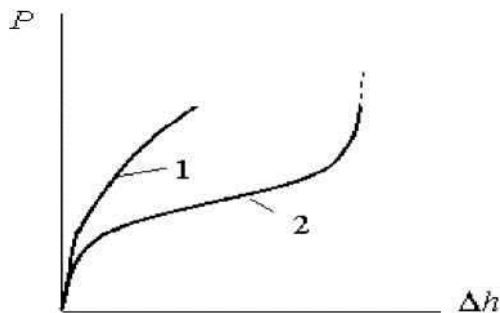


Рис.3.3. Первинні діаграми стиску матеріалів, що руйнуються (1) і не руйнуються (2) при випробуванні

Випробування на одновісний стиск проводять на тих самих машинах, що і на розтяг. Зразок установлюють на опорну плиту в нижньому захваті і стискають рухомих захватом. Для усунення можливого перекосу зразка стискаючі зусилля варто передавати на нього за допомогою певного направляючого пристосування, наприклад кульової вкладки в верхньому захваті (рис. 3.2).

Чим меншим є відношення висоти зразка до його діаметру, тим більш вираженим є вплив контактної тертя на результати випробувань. Виходячи з цих позицій, варто було б проводити випробування на як можливо більш

довгих зразках (рис. 3.4, а). Але в процесі стискання довгих зразків важко уникнути їхнього повздовжнього вигину. Для підвищення точності визначення характеристик опору малим деформаціям рекомендується використовувати подовжені зразки (рис. 3.4, а) зі співвідношенням довжини до діаметру $h_0=8d_0$. Головки у таких зразках забезпечують їх стійкість на опорних плитах і запобігають вигину. Як показує досвід, оптимальною для циліндричного зразка є величина відношення h_0/d_0 в межах 1–3. Форми зразків, що застосовуються у випробуваннях на стиск наведено на рис. 3.4. Іноді для визначення модуля нормальної пружності протягом стискання, меж пружності і пропорційності використовують плоскі зразки у виді пластин товщиною 2–5 мм, довжиною 100 і шириною 20 мм. Вони випробуються в спеціальних пристосуваннях, що забезпечують їхню повздовжню стійкість.

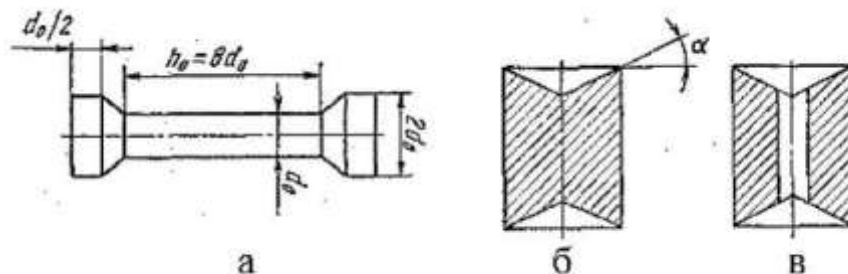


Рис.3.4. Можливі форми зразків для випробування на стиск: а) циліндричний подовжений зразок з головками для прецизійних вимірювань, б) стандартний зразок, в) зразок з видаленою серцевиною для випробувань крихких матеріалів

Неоднорідність напруженого стану за висотою зразка на практиці не враховують, розраховуючи характеристики міцності при стиску за допомогою тих самих формул, що і для випробувань на розтяг $\sigma_i = P_i / F_i$. Це надає додаткову умовність визначенням властивостям. Тому для підвищення точності отриманих результатів намагаються зменшити сили тертя на опорних поверхнях зразка, що досягається одним з наступних способів, чи їх поєднанням:

- введенням різних мастил (вазелін, солідол) і прокладок (тефлон, просочений парафіном фільтрувальний папір) між торцевими поверхнями зразка і опорних плит;

- використанням підкладок і зразків з конічною поверхнею на торцях (рис. 3.4, б). Кути конусності α підбирають таким чином, щоб $\text{tg } \alpha$ дорівнював коефіцієнту тертя;

- крім конусності, у зразку іноді роблять центральний отвір, що усуває концентрацію напружень на вістрі конуса й дозволяє випробовувати крихкі матеріали (рис. 3.4, в).

Але цілком усунути контактні сили тертя і забезпечити у зразку лінійний напружений стан протягом всього випробування не вдається. Це принциповий недолік випробувань на стиск.

Характер руйнування зразків при випробуваннях на стиск, окрім рівня крихкості матеріалу, залежить від величини контактних сил тертя. Якщо вони великі, то зазвичай спостерігається руйнування шляхом зрізу (рис. 3.5,а), якщо ж вони незначні, то фіксується руйнування відривом (рис. 3.5,б).

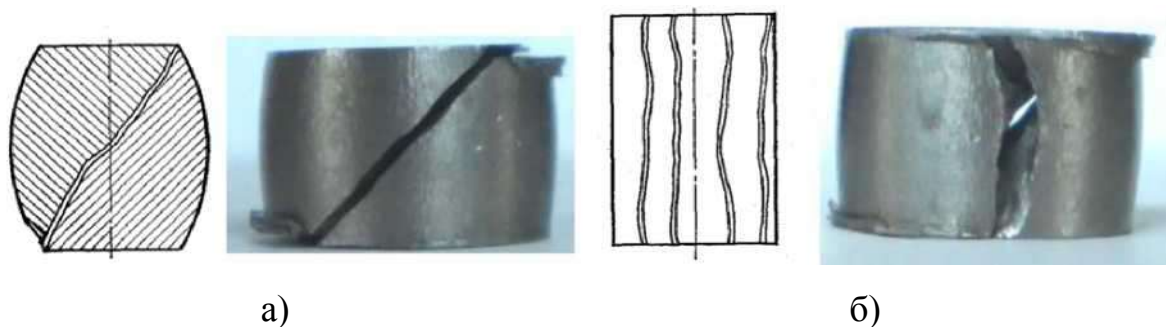


Рис.3.5. Схеми руйнування та зовнішній вигляд зразків після руйнування шляхом зрізу (а) і відриву (б) при випробуваннях на стиск

З використанням первинної кривої, яку будує випробувальна машина в процесі навантаження зразка, визначають умовні межі пропорційності, пружності, плинності і міцності. Зрозуміло, що умовну межу міцності матеріалів, що не руйнуються протягом стискання, визначити неможливо. Методика визначення властивостей міцності за діаграмою стиску цілком аналогічна методиці для випробування на розтяг.

Для прецизійного визначення меж пропорційності, пружності і плинності використовують, як і при випробуваннях на розтяг, тензometri. Розрахунок нормальних і дотичних напружень у разі стиску і розтягу проводять аналогічним чином. Внаслідок пластичної деформації в процесі стискання зменшується довжина і збільшується площа перерізу зразка. Отже, замість вимірюваних протягом розтягування δ і ψ , як характеристики пластичності протягом стискання можна визначати відносне скорочення:

$$\varepsilon_k = \left(\frac{h_0 - h_k}{h_0} \right) 100\% , \quad (3.1)$$

і відносне розширення:

$$\psi_k = \left(\frac{F_k - F_0}{F_0} \right) 100\%, \quad (3.2)$$

де h_0 і h_k – початкова і кінцева висота зразка;

F_0 і F_k – початкова і кінцева площі поперечного перерізу.

Звідси видно, що у разі стискання, на протизагу розтягу, $S < \sigma$, тому що $F > F_0$. Оскільки початкова довжина зразка за одновісного розтягування є найменшою в порівнянні з кожною наступною довжиною протягом видовження, а протягом стискання - навпаки, найбільшою в порівнянні з подальшою довжиною, то за умови однакових змін розмірів відносна деформація у разі розтягування виявляється значно більшою, ніж в разі стискання. Наприклад, подвійній довжині зразка у разі розтягування відповідає відносна деформація 100%, тоді як двократне зменшення довжини у разі стискання відповідає деформації 50%.

Діаграми істинних напружень у разі стискання будують зазвичай в координатах « $S - \varepsilon$ » (рис. 3.6, крива 1), хоча як міру деформації більш правильно було б використовувати істинний стиск [1]:

$$e_{cr} = \int_h^{h_0} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_0}{h}. \quad (3.3)$$

Враховуючи умови незмінності об'єму протягом пластичного деформування, істинна деформація може бути розрахована через зміну в площі поперечного перерізу за формулою:

$$\varepsilon = \ln \frac{l_0}{l_k} = \ln \frac{F_0}{F_k} = 2 \ln \frac{d_0}{d_k}, \quad (3.4)$$

де F_0 та F_k – початкова та кінцева площі поперечного перерізу зразка, відповідно;

d_0 та d_k – початковий та кінцевий діаметри поперечного перерізу зразка, відповідно.

Істинне напруження в процесі стискання може бути розраховане через початкову площу поперечного зрізу та змінне значення відносної деформації за формулою:

$$\frac{P}{F_k} = \frac{P(1 + \varepsilon)}{F_0}. \quad (3.5)$$

На рис. 3.6 крива 2 – це крива умовних напружень $\sigma - \varepsilon$, яка у разі стиску завжди має вид, якісно аналогічний діаграмі істинних напружень, оскільки на первинній діаграмі стиску ніколи немає максимуму і ділянки зниження навантаження.

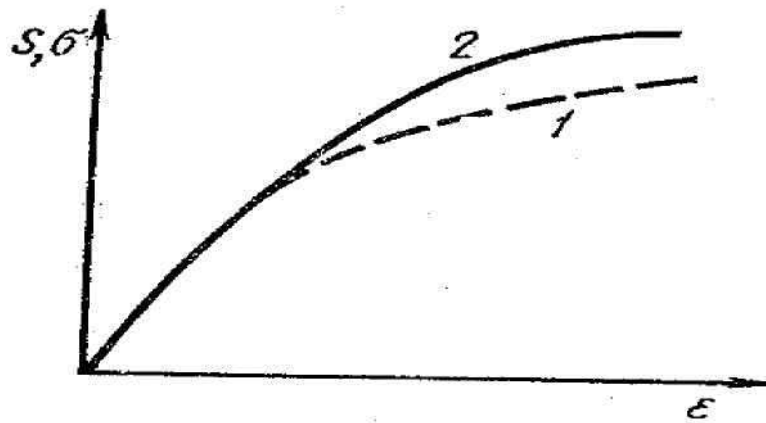


Рис.3.6. Діаграми істинних (1) і умовних (2) напружень у разі стискання

Схеми стискання використовують у технологічних пробах для оцінки деформаційної здатності напівфабрикатів і виробів. З їхньою допомогою визначають придатність чи непридатність матеріалу після деформації стиском на задану величину.

Обладнання, прилади та інструменти

1. Універсальна розривна машина.
2. Зразки для випробувань на стиск без головок.

Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись з відмінностями роботи розривної машини та методики проведення випробувань на стиск порівняно з випробуваннями на розтяг. В експерименті використовується розривна машина CERAMTEST з автоматичним записом діаграми «навантаження – переміщення». Швидкість навантаження підбирається таким чином, щоб забезпечити швидкість деформації 10^{-3} с^{-1} .

2. Після вимірювання розмірів робочої частини зразка, встановити зразок в захваті розривної машини. Зразок вимірюється мікрометром у трьох місцях (у центрі та по краях) з точністю не менше ніж 0,01 мм. Різниця у розмірах не повинна перевищувати 0,02 мм. Початкова довжина зразка вимірюється штангельциркулем або вимірюючим мікроскопом з точністю не менше 0,2 мм. Після перевірки нульового положення вимірювальної системи виконується попереднє навантаження зразка до моменту силового контакту, який фіксується вимірювальним пристроєм. Перед початком випробувань перевіряється правильність позицій всіх контрольних приладів систем навантаження та вимірювання.

3. Провести випробування. Випробування починається з запуску електричного двигуна приводу, яке виконується послідовним натисненням кнопок «Підготовка» та «Пуск». Випробування триває доки на діаграмі

навантаження почнеться різке підвищення зусилля. Випробування закінчується натисненням кнопки «Стоп».

4. Первинна інформація випробування у вигляді dat-файлів «зусилля-час» поступає з приладів випробувальної машини на комп'ютер. За допомогою спеціального програмного забезпечення (наприклад, Excel) dat-файли необхідно перетворити в первинну умовну та істинну діаграми навантаження.

5. Визначити модуль Юнга матеріалу.

6. Розрахувати похибки визначення основних механічних характеристик.

7. Зробити висновки щодо рівня визначених механічних характеристик матеріалу, величини контактних сил тертя, типу руйнування досліджуваних зразків.

Аналіз результатів повинен включати:

- встановлену величину межі плинності та межі міцності;
- встановлену величину рівномірної пластичної деформації;
- визначену величину модуля Юнга;
- заходи для забезпечення отримання достовірних результатів.

Контрольні питання

1. Чим відрізняються криві навантаження зразків у разі випробувань на стиск та розтяг?

2. Чи є на кривій «навантаження – деформація», отриманій протягом випробувань на стискання ділянка, що іде вниз? Чому?

3. Яка форма зразків для випробувань на стиск забезпечує більшу точність результатів? Чому?

4. Чи всі зразки можливо зруйнувати в процесі випробувань на стиск? Чому?

5. Чому необхідно зменшувати величину контактних сил тертя в процесі випробувань? Яким чином цього можна досягти?

6. Як відрізнити між собою зразки, що зруйнувалися зрізом та відривом?

Практична робота №4

ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИПРОБУВАНЬ НА ЗАКРУЧУВАННЯ

Мета роботи: – виконати випробування на закручування та визначати основні механічні характеристики та вид зламу матеріалів. Набути практичного досвіду виконання експерименту та обробки й аналізу результатів.

Загальні відомості

Закручування здійснюється двома різними по величині і протилежно спрямованими крутильними моментами, які прикладаються до кінців зразка в площинах, нормальних до його поздовжньої осі. У робочій частині зразка виникає різномірний плоский напружений стан з коефіцієнтом м'якості $\alpha \approx 0,8$, тобто більшим, ніж під час випробувань на розтяг. У той же час, на відміну від стиску і вигину, при випробуваннях на закрут до руйнування можливо довести будь-який матеріал.

Максимальні дотичні напруження при закручуванні діють у площинах, перпендикулярних осі зразка, найбільші ж нормальні напруження – під кутом 45° , причому $S_{max} = \tau_{max}$. Схема розподілу напружень по осі зразка представлена на рис. 4.1.

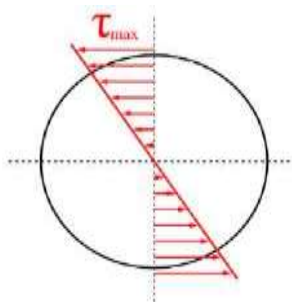


Рис.4.1. Схема розподілу найбільших напружень в поперечному перерізі зразка при випробуваннях на закручування

За аналогією з іншими статичними випробуваннями за результатами випробування на закручування визначають умовні межі пропорційності, пружності, плинності і міцності, а також істинну межу міцності. Але всі ці властивості виражають не через нормальні, а через дотичні напруження. Умовні межі пропорційності, пружності, плинності та міцності при закручуванні мають фізичний і технічний зміст, аналогічний відповідним характеристикам міцності, отриманим за інших статичних випробувань матеріалів, під час руйнування яких на первинній діаграмі навантаження не спостерігається максимуму. Для

матеріалів, у яких протягом випробувань на розтяг утворюється шийка, величини $\tau_{пл}$ і, особливо, τ_k є більш точними характеристиками граничної міцності в умовах закручування, ніж σ_e , S_e і S_k під час розтягування.

Знаючи поточні значення крутного моменту $M_{кр}$ і кута закручування зразка φ , можливо побудувати діаграму закручування в координатах « $M_{кр} - \varphi$ », загальний вид якої наведений на рис.4.2.

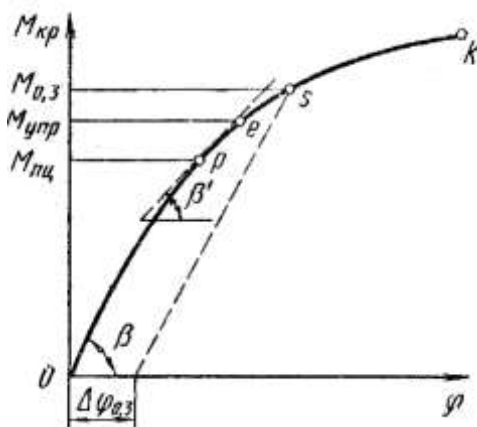


Рис.4.2. Діаграма закручування

Ця діаграма складається з ділянки пружної ($0 - P$) і пластичної деформації ($P - K$). Внаслідок відсутності місцевого звуження, спадаючої ділянки на діаграмі закручування не буває, хоча після утворення перших тріщин деформація стає нерівномірною, зосереджуючись поблизу зламу.

Після руйнування зразків зрізом або відривом виходять характерні форми зламу (рис. 4.3), за якими можна однозначно визначити тип руйнування. Це стає можливим внаслідок тотожності напруженого стану по всій довжині зразка, що скручується, від початку випробування до моменту руйнування (за одноразового закручування). Іншим важливим наслідком незмінності напруженого стану є сталість робочої довжини і поперечного перерізу зразка протягом випробування.

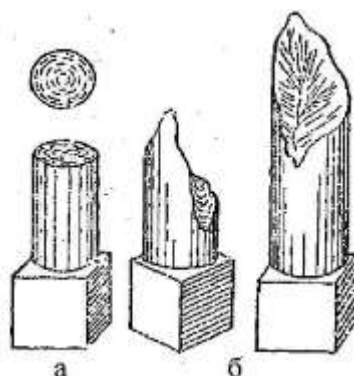


Рис.4.3. Вид зразків, зруйнованих при закруті шляхом зрізу (а) і відриву (б)

Описані особливості випробування на закручування визначають їх важливість і поширеність на практиці. Особливо часто ці випробування використовують для оцінки властивостей матеріалів дроту. Різновидом випробувань на закрут є проба на скручування дроту діаметром d менше 10 мм (ГОСТ 1545-80), або випробування на навивання (ГОСТ 10447-93).

Випробування на закручування проводять на спеціальних машинах, що повинні забезпечувати надійне центрування зразка, плавність навантаження і відсутність згинаючих зусиль, можливість досить точного завдання і вимірювання величини крутного моменту. Використовуються машини з горизонтальним і вертикальним розташуванням зразка. Максимальний крутильний момент змінюється від 60 Нм до 2 МНм (див. рис. 4.4).



а)



б)

Рис.4.4. Машини для випробування на закручування: вертикальна (а) та горизонтальна ТТМ-200 (б)

Основні вузли випробувальних машин - станина, привід, від якого обертається активний захват, силовимірювач з декількома шкалами навантажень, діаграмний механізм, лічильник оборотів і кутомір для визначення кута закруту зразка. Так, наприклад, машина для випробувань на закрут ТТМ-200 виробництва СКТБ ІПП НАН України має три вбудованих датчика крутного моменту. Блок-схему установки наведено на рис. 4.5. Крутний момент застосовується до поперечного перетину зразка за допомогою активного та пасивного захватів (похибка вимірювання – не більше $\pm 0,5\%$). Кут обертання активного захвату вимірюється прецизійним оптичним кутовим

датчиком RGH-20 з роздільною здатністю 1 мкм та кільцевим енкодером з роздільною здатністю вимірювання кута обертання – $4,07 \cdot 10^{-5}$ рад (див. рис. 4.6, а).



Рис.4.5. Блок-схема установки ТТМ-200



Рис.4.6. Зовнішній вигляд датчиків кута закручування КСИ-20 (а) та крутного моменту МА-20 (б)

Методика випробувань на закручування зразків з будь-яких матеріалів діаметром не менш 5 мм стандартизована (ГОСТ 3565-80). Зразки повинні мати циліндричну робочу частину і квадратні головки (рис. 4.3). Головки можуть бути і циліндричні, за умови наявності фасок для надійності кріплення (див. рис. 4.7).



Рис.4.7. Форма головки зразка для випробувань

Зразок з діаметром робочої частини 10 мм і робочою довжиною 100 чи 50 мм прийнятий за нормальний. Допускається використання зразків пропорційних,

геометрично подібних нормальному, а також трубчастих. Також проводяться випробування дротів різного діаметру, для чого використовується комплект прецизійних цангових та кулачкових захватів.

В процесі випробування будується діаграма в координатах «момент закручування $M_{кр}$ – кут закручування φ ».

Визначена під час випробувань на закрут межа плинності зазвичай умовна. Це дотичне напруження, якому відповідає залишковий відносний зсув на 0,3% ($\tau_{0,3}$), що еквівалентно видовженню $\epsilon=0,2\%$. Її можливо розрахувати за формулою:

$$\tau_{0,3} = \frac{M_{кр}}{W} = 16 \frac{M_{кр}}{\pi d^3}, \quad (4.1)$$

де d – діаметр робочої частини зразка;

W – момент опору, який для суцільного зразка дорівнює $\pi d^3/16$.

Формула (4.1) забезпечує достатньо точні значення в області малих пластичних деформацій, але після значної пластичної деформації вона вже непридатна. За нею знаходять усі перераховані вище властивості міцності у разі закручування, окрім істинної межі міцності. Останню визначають за формулою, що враховує виправлення на пластичну деформацію:

$$\tau_k = \frac{4}{\pi d^3} \left(3M_{кр} + \Theta \frac{dM_{кр}}{d\Theta} \right), \quad (4.2)$$

де $M_{кр}$ – найбільший крутний момент перед руйнуванням зразка;

Θ – питомий кут закручування перед руйнуванням (у радіанах на 1 мм), може бути визначений як $\Theta = (\varphi_1 - \varphi_2)/L$, де L – довжина робочої частини зразка.

Межа пропорційності в разі закручування $\tau_{пц}$ – це умовне дотичне напруження, за якого відступ від лінійної залежності між напруженнями і деформаціями досягає такої величини, коли тангенс кута β (рис. 4.2), утвореного дотичною до діаграми закруту і віссю деформацій, перевищує первинне значення на 50%.

Методика визначення $\tau_{пц}$ аналогічна описаній для границі пропорційності у разі випробувань на розтяг (див. роботу № 2).

Межа пружності у разі закручування $\tau_{пц}$ – умовне дотичне напруження, за якого зразок піддається залишковій зсувній деформації на задану величину.

Основною характеристикою пластичності при закручуванні є відносний зсув g , який можна розрахувати по формулі:

$$g = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)d}{2I_0} 100\% . \quad (4.3)$$

Величина g при цьому включає як пружну, так і залишкову деформацію. Для пластичних матеріалів, у яких внесок пружної деформації у порівнянні з пластичної відносно малий, загальний зсув можна без великої похибки прийняти за залишковий. Для малопластичних металів і сплавів при розрахунку залишкового відносного зсуву необхідно відняти з загального g , визначеного по формулі (4.3) пружний зсув $g_{пр} = (\tau_{пц} / G) 100\%$.

На стадії пружної деформації може бути визначений модуль зсуву:

$$G = \frac{32M_{кр}L}{(\varphi_1 - \varphi_2)\pi d^4} . \quad (4.4)$$

Обладнання, прилади та інструменти

1. Випробувальна машина.
2. Зразки для випробування на закрут.

Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитися з принципом роботи експериментальної установки.
2. Виміряти вихідні розміри зразка. Встановити зразок в захвати машини та провести випробування.
3. Отримати первинні дані та провести розрахунки характеристик міцності (умовна межа міцності τ_b , істинна межа міцності t_b , межа пропорційності $\tau_{пц}$, межа пружності $\tau_{пр}$, відносний зсув g , умовна межа плинності $\tau_{0,3}$) та модулю дотичної пружності G .
4. Провести розрахунки основних механічних характеристик.

Контрольні питання

1. Чи відрізняється розподіл нормальних та дотичних напружень в зразку в процесі випробувань на закручування та розтяг?
2. Які константи пружності матеріалу можливо визначити за допомогою випробування на закручування?
3. Чи змінюється форма та розміри зразка в процесі випробувань?
4. Як будуть відрізнятися відносні зсуви, виміряні у двох різних зразках, якщо матеріал першого більш пластичний, ніж другого?

Практична робота №5

ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ НА СТАТИЧНИЙ ЗГИН

Мета роботи: – оволодіти методикою випробувань на трьох-точковий та чотирьох-точковий згин, навчитись визначати механічні властивості матеріалів та розраховувати діаграму мікродеформації.

Загальні відомості

Згин - одна з розповсюджених схем навантаження, яка використовується для визначення механічних властивостей крихких та малопластичних матеріалів.

Застосування випробувань на згин обумовлено широкою розповсюдженістю цієї схеми навантаження в реальних умовах експлуатації і більшою її м'якістю в порівнянні з розтягом ($\alpha=0,7$), що дає можливість оцінювати властивості матеріалів, які крихко руйнуються за умови розтягування. Випробування на згин зручні для оцінки температур переходу з крихкого стану в пластичний (наприклад, у холодноламких ОЦК металів і інтерметалідів).

Протягом випробувань на згин застосовують дві схеми навантаження зразка, що лежить на нерухомих опорах:

- навантаження прикладається зосередженою силою на середині відстані між опорами (рис. 5.1,а) – трьох-точковий згин;
- навантаження прикладається в двох точках через жорстку траверсу на однаковій відстані від опор (див. рис. 5.1,б) – чотирьох-точковий згин.

Експериментально першу схему реалізувати набагато простіше, тому вона і знайшла найбільше застосування. Варто враховувати, що друга схема «чистого вигину» у багатьох випадках забезпечує більш надійні результати, оскільки в даному випадку максимальний згинаючий момент виникає на визначеній ділянці довжини зразка, а не в одному перетині, як при використанні першої схеми (див. рис. 5.1,б).

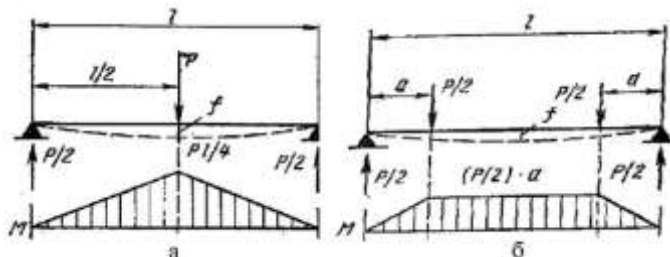


Рис.5.1. Схеми трьох-точкового згину (а) і чотирьох-точкового згину (б) з епюрами згинаючого моменту M

У зразку, що згинається, створюється неоднорідний напружений стан, що залежить від геометрії зразка і способу навантаження (рис. 5.2). При чистому згині вузьких зразків із прямокутним перетином напружений стан у кожній точці можна вважати лінійним.

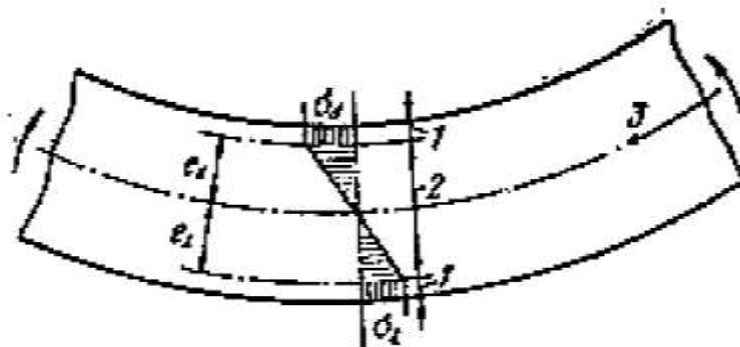


Рис.5.2. Розподіл напружень у симетричному поперечному перерізі при згині зразка: 1 – пластична деформація; 2 – пружна деформація; 3 – нейтральна вісь

Трьох-точковий згин забезпечує розподіл згинаючих моментів по довжині зразка за законом трикутника. За цих умов найбільший момент виникає на середині робочої частини зразка L і дорівнює:

$$M = \frac{PL}{4}. \quad (5.1)$$

В другому випадку розподіл згинаючих моментів відповідає закону трапеції. На відрізку центральної частини зразка між точками прикладання навантаження L момент має сталі значення:

$$M = \frac{Pa}{2}, \quad (5.2)$$

де a – відстань від опори до місця прикладання навантаження. За симетричної схеми навантаження, як правило, виконується співвідношення $L=2a$.

Умовні нормальні напруження за результатами випробувань на згин можливо розрахувати за формулою:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (5.3)$$

де M – згинаючий момент;

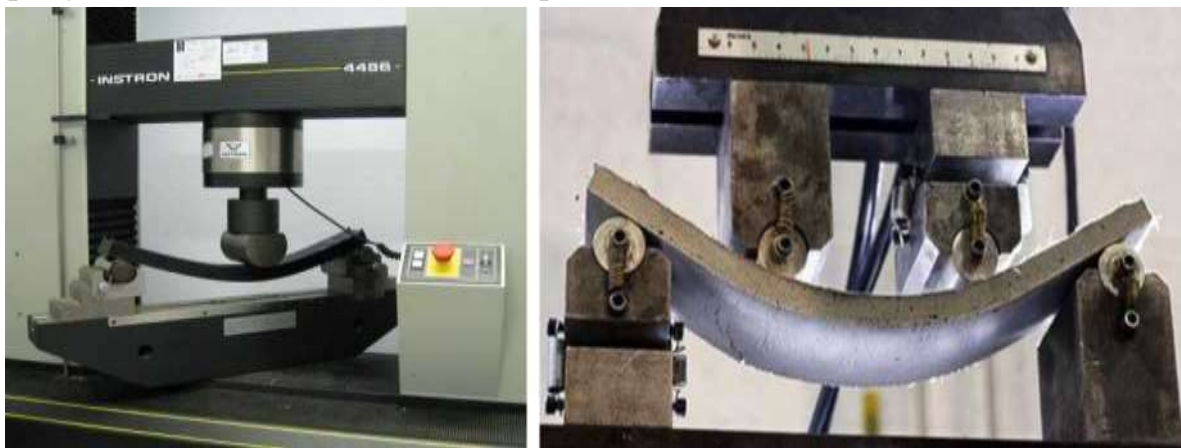
W – момент опору перерізу вигину.

Первинна інформація про механічну поведінку зразка в процесі згинання отримується у вигляді діаграми в координатах «навантаження P – стріла прогину f ». За трьох-точкового згинання перерахунок стріли прогину в

деформацію ускладнений, оскільки кінцева деформація залежить не тільки від стріли прогину, але також від товщини зразка і радіуса згинаючого стрижня. Тому остаточна інформація за трьох-точкового згину дається у вигляді діаграми «напруження - стріла прогину». За цією діаграмою розраховуються межа плинності на згин та стріла прогину в момент руйнування матеріалу.

Випробування на згин можна проводити на будь-якій універсальній випробувальній машині у відповідності до стандарту ДСТУ 180 7438:2005 [14]. Зразок встановлюють на опорну плиту в нижньому захваті і деформують згинаючим ножем, що кріпиться у верхньому захваті машини (див. рис. 5.3). Швидкість переміщення рухомого захвату випробувальної машини 0,2 мм/сек.

Для зменшення тертя з опорами, на яких лежить зразок, можливе використання роликів-підшипників. Зразок згинається при опусканні верхнього чи підйомі нижнього захвату. Зовнішній вигляд робочого вузла універсальних випробувальних машин наведено на рис. 5.3.



а)

б)

Рис.5.3. Зовнішній вигляд робочого вузла (положення захватів та зразка) при трьох-точковому [15] (а) і чотирьох-точковому згині [16] (б) зразка

Зразки для випробувань на згин не мають головок. Це ще одна перевага в порівнянні з розтягом, оскільки виготовлення зразків з головками, особливо з крихких матеріалів, значно складніше. На згин випробують зазвичай прямокутні стрижні розміром $3,5 \times 5 \times 50$ мм [3], [14]. Для визначення властивостей виливків з чавуну використовують циліндричні зразки діаметром 30 ± 1 і довжиною 340 чи 650 мм (при відстані між опорами 300 і 600 мм відповідно). Для дослідницьких цілей випробування на згин зазвичай проводять на циліндричних зразках із $d_o = 2 - 10$ мм і відстанню між опорами $l > 10d_o$ та плоских зразках з висотою $h = 1 - 3$ мм, шириною $b = 3 - 15$ мм і $t \geq 10h$. Для оцінки характеристик конструкційної міцності рекомендується застосування

зразків великого перетину (до 30×30 мм). Перед випробуванням зразок вимірюється мікрометром у трьох місцях (у центрі та по краях) з точністю не менше ніж 0,01 мм. Різниця у розмірах на повинна перевищувати 0,02 мм. Початкова довжина зразка вимірюється штангельциркулем або вимірюючим мікроскопом з точністю не гірше 0,2 мм.

На зразок встановлюється датчик переміщення, після чого зразок розміщується в силовому ланцюзі випробувальної машини. Проводяться перевірки нульового положення вимірювальної системи по каналу зусилля та по каналу деформації. Перед початком випробувань перевіряється правильність позицій всіх приладів систем навантаження та вимірювання.

Навантаження відбувається до моменту руйнування зразка або до досягнення граничного значення зусилля чи деформації. В обох випадках у разі досягнення граничних умов відбувається автоматичне розвантаження зразка. Зупинка випробувальної машини відбувається автоматично. На екрані комп'ютера з'являється первинна діаграма та таблиця результатів з основними механічними характеристиками матеріалу.

Для більшості матеріалів діаграма згину виглядає так, як показано на рис. 5.4. Руйнування зразка може відбутися в будь-якій точці діаграми. Якщо матеріал крихкий, то крива обривається в точці *b* [3]. У пластичних матеріалів точка максимуму на діаграмі часто збігається з появою першої тріщини. Іноді утворення тріщин супроводжується різкими спадами навантаження на правій частині діаграми (штрих-пунктирна лінія на рис. 5.4).

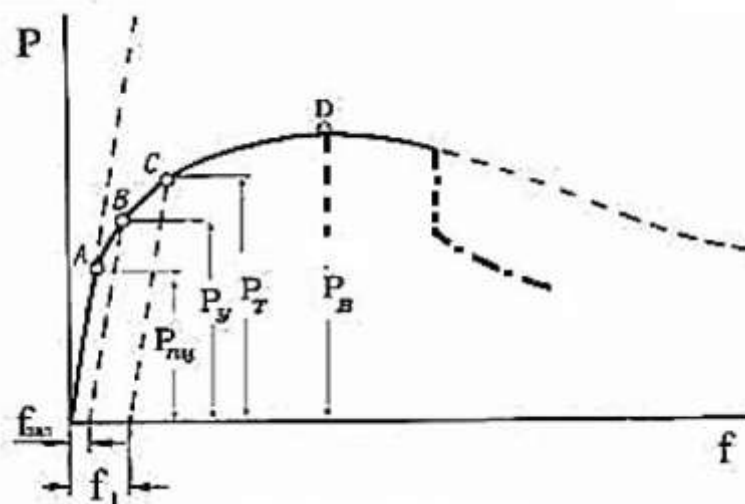


Рис.5.4. Типова діаграма згину [3]

Для пружного стану та для малих пластичних деформацій розрахунок нормальних напружень у верхньому перерізі зразка виконується для трьох-

точкового та чотирьох-точкового згину згідно формул (5.1-5.3), наступним чином, відповідно [1]:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{PL}{4W}, \quad (5.4)$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{PL}{2W}. \quad (5.5)$$

Враховуючи, що для зразка, який має прямокутний переріз з висотою h та шириною b момент опору в обох випадках дорівнює, $W = bh^2/6$, а для циліндричних зразків – $W = \pi d^3/32$, то у випадку трьох-точкового згину остаточно одержуємо [1]:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{PL}{4W} = \frac{3PL}{2bh^2}, \quad (5.6)$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{PL}{2W} = \frac{8PL}{\pi d^3}. \quad (5.7)$$

При чотирьох-точковому згині існує однозначний зв'язок між стрілою прогину та деформацією, який описується виразом [1]:

$$\varepsilon = \frac{4hf}{I_0^2}, \quad (5.8)$$

де ε – деформація;

f – стріла прогину;

l_0 – відстань, на якій вимірюється стріла прогину.

За результатами випробувань на згин, з використанням формул (5.6 - 5.8) можливо розрахувати значення модулю Юнга [3]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{3Pl_0^2}{8bh^3f}. \quad (5.9)$$

Як характеристику пластичності при випробуваннях на згин, крім f , часто використовують кут загибу β , що є додатковим до 180° щодо кута згину α (рис. 5.5, б). Кут β зростає в міру підвищення деформаційної здатності матеріалу, а кут α зменшується.

Простота випробування на згин і наочність одержуваних характеристик пластичності привели до розробки ряду технологічних проб, що застосовуються в заводських умовах [17]. Схеми відповідних випробувань наведені на рис. 5.5. Задача всіх цих проб – оцінити пластичність деформованих напівфабрикатів, виливків і виробів (листів, труб, дроту й ін.) передбачає вигин зосередженою силою плоских зразків із прокату, кувань і виливків, що поміщаються на двох опорах (рис. 5.5,а).

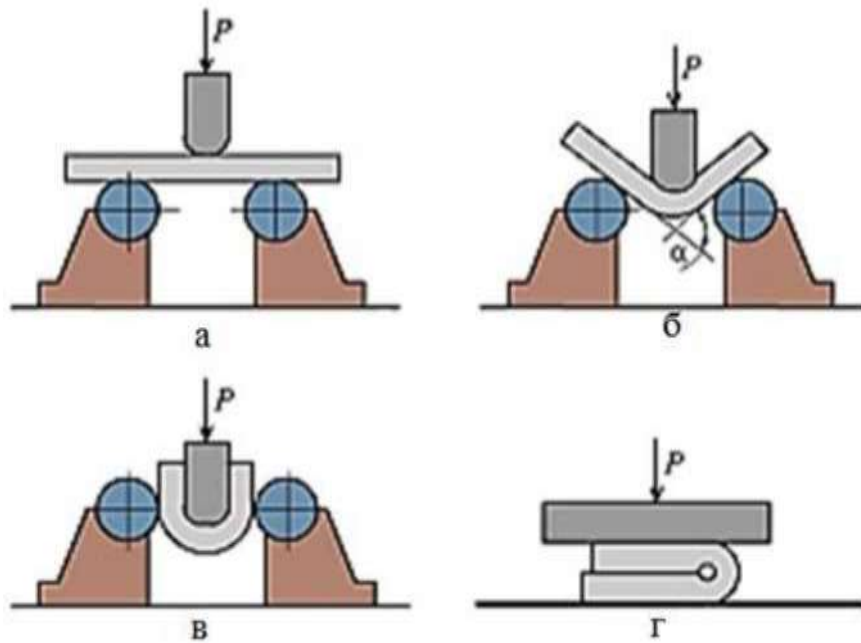


Рис.5.5. Схеми технологічних проб на згин: а - зразок перед випробуванням; б - загин до визначеного кута; в - загин до паралельності сторін; г - загин до зіткнення сторін [3]

Критерієм придатності продукції може бути:

- заданий кут загину зразків β (рис. 5.5,б);
- поява першої тріщини після згину на кут β , рівний чи більший заданого;
- можливість згину пластини до паралельності (рис. 5.5,в) чи зіткнення сторін (рис. 5.5,г).

Існують також проби на перегин листа, стрічки (ГОСТ 13813-68) [18] і дроту (ГОСТ 1579-93) [19], у яких фіксують задане число перегинів або кількість перегинів, після яких з'явилися тріщини або зразок зруйнувався.

Протягом випробувань на згин, як і у випадку випробувань на стиск, досить пластичні матеріали можуть не зруйнуватися. Зразок при цьому загинається аж до паралельності його частин, розташованих по обох сторонах від згинаючого пристрою. Матеріали, що руйнуються за згинання, можуть попередньо деформуватися на різну величину.

Обладнання, прилади та інструменти

1. Універсальна машина.
2. Зразки для випробувань на згин.

Послідовність виконання роботи

1. Виміряти розміри зразка для випробувань. Встановити на зразок датчик переміщення.

2. Встановити зразок в силовий ланцюг випробувальної машини, перевірити нульове положення вимірювальної системи та провести випробування.

3. За отриманою первинною діаграмою, використовуючи відповідні формули, розрахувати всі необхідні механічні характеристики матеріалу та його модуль Юнга.

4. Зробити висновки щодо рівня пластичності, крихкості та міцності досліджуваного матеріалу.

Аналіз результатів повинен включати:

- діаграму «напруження-стріла прогину»;
- величину пластичності;
- модуль Юнга;
- параметри діаграми напружень;
- оцінку достовірності отриманих результатів.

Контрольні питання

1. Яка з схем проведення випробувань на статичний згин забезпечує отримання більш точних результатів?

2. Як відрізняється форма кривої на діаграмі згину крихкого та більш пластичного зразка?

3. Чи будь-який зразок можливо зруйнувати протягом випробувань на статичний згин?

4. Кут загибу у більш пластичного зразка буде меншим чи більшим?

5. Чому використовують кут загибу, а не кут згину як характеристику пластичності?

6. Назвіть області практичного застосування випробувань на статичний згин.

Практична робота №6

ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ЗГИН

Мета роботи: – ознайомитися з конструкцією машини та методиками визначення ударної в'язкості матеріалів.

Загальні відомості

Швидкості деформування та деформації протягом динамічних випробувань набагато більші за статичні. Так, стандартні випробування на статичний згин зазвичай виконують зі швидкістю деформування 0,01 м/с, а швидкість деформації – 0,1 с⁻¹, в той самий час, протягом динамічних випробувань ці показники дорівнюють 3-5 м/с та 100 с⁻¹, відповідно [2, 3]. Динамічні випробування застосовують для визначення здатності матеріалів переносити ударні навантаження та для виявлення їх схильності до крихкого руйнування. Характер змін пластичності та в'язкості матеріалів зі збільшенням швидкості деформування залежить від типу руйнування – зрізом або відривом. Якщо в заданих умовах матеріал руйнується шляхом відриву, то опір руйнуванню малий в процесі переходу від статичного до динамічного навантаження. В цьому випадку пластичність з ростом швидкості деформування зменшується. Якщо руйнування відбувається шляхом зрізу, то опір руйнуванню суттєво зростає з прискоренням деформації, а пластичність може або не змінюватися, або зростати.

Динамічні (ударні) випробування класифікують наступним чином [1, 3]:

- за видом деформації (розтяг, стиск, згин);
- за кількістю ударів (одноразові, багаторазові);
- за температурою (при нормальній, підвищеній, низькій).

Динамічні випробування на згин надрізаних зразків є найбільш жорсткими серед стандартних випробувань ($\alpha < 0,5$). Для оцінки температури крихко- в'язкого переходу ($T_{вк}$) ці випробування застосовують у тих випадках, коли статичні методи не дозволяють виявити цю температуру (зразки пластичні аж до глибоких від'ємних температур) [3]. Корисні вони і для оцінки цієї температури у матеріалів, що можуть піддаватися ударним навантаженням під час експлуатації. Нарешті, ударні випробування широко використовують для визначення «максимальної» $T_{вк}$. Дійсно, перехід у крихкий стан в умовах динамічного навантаження відбувається за більш високих температур, ніж протягом статичних випробувань. Тому оцінка схильності до крихкого руйнування в найбільш жорстких умовах становить окремий інтерес.

Динамічні випробування на згин проводять на зразках з надрізом. У серійних динамічних випробуваннях на згин зразків з надрізом єдина вихідна характеристика випробування – ударна в'язкість.

Ударна в'язкість – це складна, комплексна характеристика, що залежить від сукупності властивостей міцності і пластичності матеріалу [2, [20]. Робота, що витрачається на пластичну деформацію і руйнування, визначається площею під діаграмою динамічного згину. Її величина буде тим більша, чим вище пластичність і рівень напруження плинності протягом усього випробування.

Діаграма деформації зазвичай протягом динамічних випробувань не записується.

Характеристики пластичності – стрілу прогину і кут загибу – легко визначити, склавши дві половини зруйнованого зразка таким самим чином, як в разі випробувань на статичний згин [1, 4].

В процесі ударних випробувань на згин зразків з надрізом напруження і пластична деформація концентруються в обмеженій частині об'єму зразка навколо надрізу. Саме в даній області проходить поглинання практично всієї роботи удару. На рис. 6.1 представлені границі області поширення пластичної деформації за різної глибини надрізу. Можна бачити, що ширина цієї області є порівняною з висотою перетину зразка і збільшується в міру зменшення глибини надрізу. Чим глибшим і гострішим є надріз і більшою є ширина перетину, тим більшою є величина всіх трьох нормальних напружень, які діють навколо надрізу та меншою є робота деформації [2, 3].

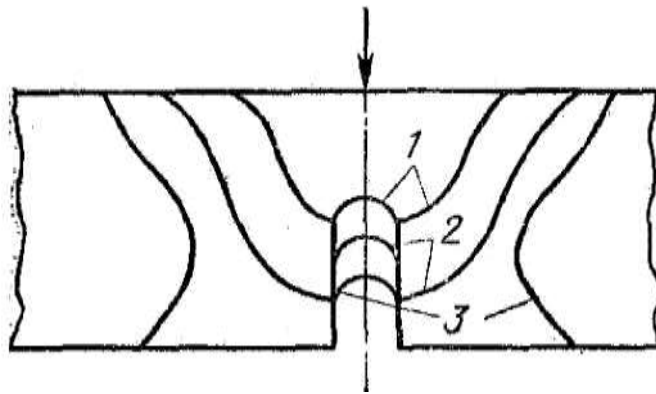


Рис.6.1. Области (1, 2, 3) поширення пластичної деформації при різній глибині надрізу [3]

Як вже відзначалося, одним з найважливіших завдань ударних випробувань є оцінка схильності матеріалів до крихкого руйнування. Це завдання виконується за допомогою побудови температурної залежності

ударної в'язкості і визначення температури крихко-в'язкого переходу. Можливі три типи кривих залежності «ударна в'язкість – температура» [3, 20] (рис. 6.2).

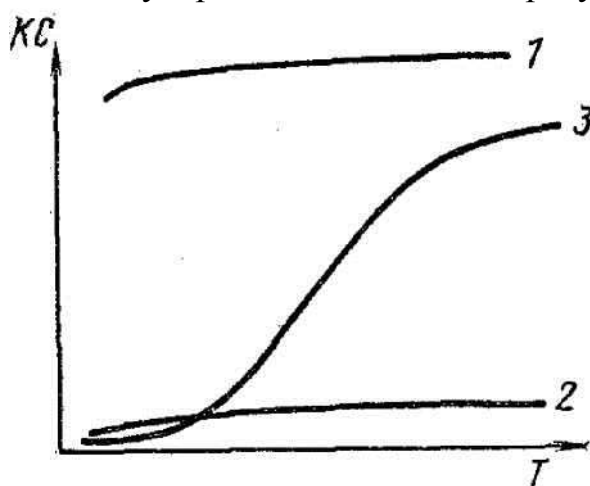


Рис.6.2. Типи температурних залежностей ударної в'язкості [3]

Крива 1 характерна для в'язких, навіть за низьких температур, матеріалів, наприклад металів (мідь, алюміній) і сплавів (аустенітні сталі) з ГЦК ґратками. Крива 2 спостерігається під час випробувань крихких у широкому діапазоні температур матеріалів, наприклад загартованих на мартенсит сталей. Нарешті, крива 3 характеризується температурним інтервалом в'язко-крихкого переходу, по ній можна оцінити $T_{вк}$. Такий тип кривих залежності ударної в'язкості від температури типовий для металів з ОЦК і ГЦП ґратками, багатьох сталей з ферито-перлітною структурою. Знаючи $T_{вк}$ і робочу температуру T_p досліджуваного матеріалу, можливо оцінити його температурний запас в'язкості за формулою [20]:

$$\chi = \frac{(T_p - T_{вк})}{T_p}. \quad (5.1)$$

Чим більше χ , тим меншою є небезпека крихкого руйнування.

Ударна в'язкість позначається двома літерами – КС. Стандартна розмірність ударної в'язкості [Дж/м²] або [Дж/см²]. У залежності від виду концентратора в зразку в позначення ударної в'язкості вводиться третій індекс (U, V чи T). Наприклад, KCV – ударна в'язкість, визначена на зразку з V-подібним концентратором за кімнатної температури.

Оскільки крихкий і в'язкий характер руйнування внаслідок ударного згинання чітко розрізняються за видом зламу (блискучий кристалічний або матовий волокнистий), $T_{вк}$ можливо визначати за структурою зламу. За температуру в'язко-крихкого переходу приймають температуру появи у зламі

перших ділянок крихкого руйнування. Можлива також оцінка $T_{вк}$ як температури, що відповідає рівним часткам крихких і в'язких ділянок руйнування в зламі.

В умовах динамічних навантажень закон подібності не діє, тому протягом проведення таких випробувань необхідно дотримуватися жорсткої уніфікації як розмірів зразків, так і умов випробувань [1, 21].

Основним зразком за ГОСТ 9454-78 є стрижень з квадратним перерізом 10×10 мм та довжиною 55 мм (рис. 6.3). Зразки мають посередині довжини надрізи різної форми глибиною 2 мм з радіусом заокруглення 1 мм. Розрізняють зразки Шарпі (U-подібний концентратор), Менаже (V-подібний концентратор) та з втомною тріщиною (Т-подібний концентратор).

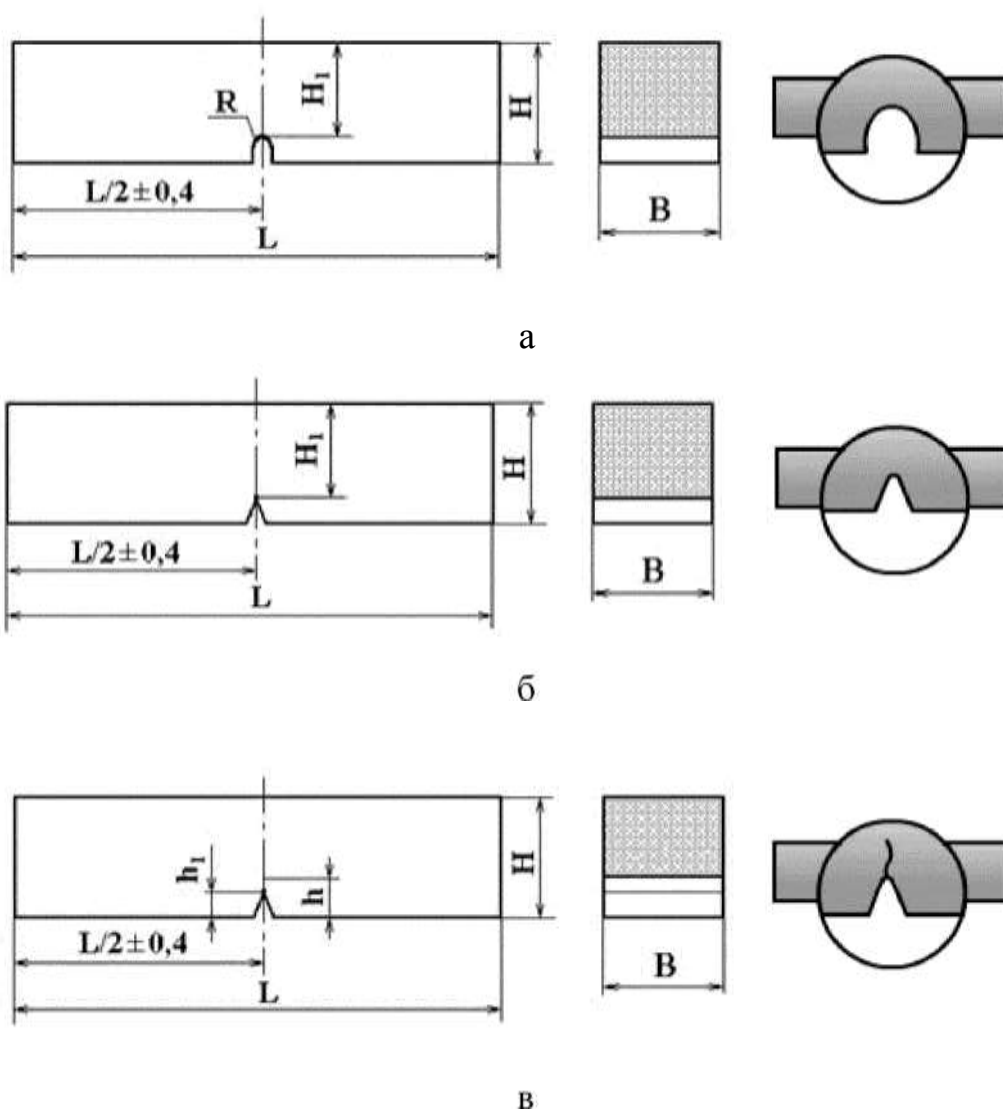


Рис.6.3. Зразки для випробувань на ударну в'язкість [21]: а - з U-подібним концентратором, б - з V-подібним концентратором, в - з T-подібним концентратором

Зразки Шарпі використовують в промисловості за умов контролю якості матеріалів згідно стандарту ДСТУ EN 10045-1:2006 [22]. Допускається використання зразків з шириною $B=7,5$; 5 і 2 мм. В останньому випадку висота $H=8$ мм.

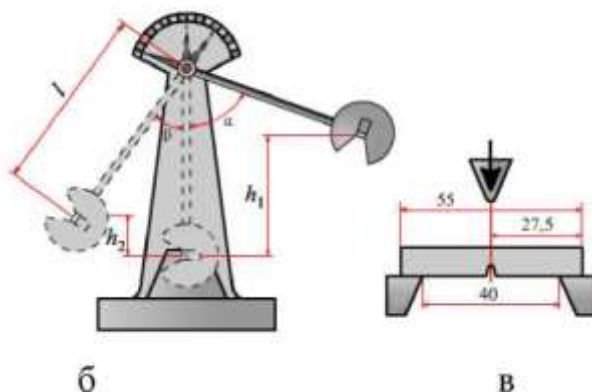
Зразки Менаже використовуються протягом контролю металічних матеріалів для відповідальних конструкцій. Зразки мають ті ж габарити і відрізняються тільки геометрією надрізу.

Зразки з Т-подібним концентратором застосовують для матеріалів особливо відповідальних конструкцій. Довжина L цих зразків також становить 55 мм, а висота перетину $H=11$ мм при $B=10$; $7,5$ чи 5 мм. Допускається застосування зразків з $B=2$ мм і $H=9$ мм, $B=H=10$ мм і $B=H=25$ мм. В останньому випадку $L=140$ мм. За умови випробування зразків з $L=55$ мм відстань між опорами повинна складати 40 мм.

Випробування на згин проводять на маятникових копрах із граничною енергією, що не перевищує 300 Дж [23]. Зовнішній вигляд та схема випробування наведені на рис. 6.4.



а



б

в

Рис.6.4. Зовнішній вигляд [24] (а) та схема маятникового копра [25] (б) й напрямок нанесення удару по зразку [25] (в)

Зразок кладуть горизонтально в спеціальний шаблон, який забезпечує знаходження надрізу чітко в середині прольоту між опорами. Удар наносять з боку, протилежного до надрізу, у площині, перпендикулярній повздовжній осі зразка. Згинаючий ніж має перетин у виді трикутника з кутом при вершині 30° і радіусом заокруглення 2 мм.

Маятник копра закріплюється у вихідному верхньому положенні. За шкалою фіксується кут підйому маятника α . Потім закріплюючий засов виймають, маятник вільно падає під власною вагою, ударає зразок, згинає і руйнує його, піднімаючись щодо вертикальної осі копра на кут β . Цей кут тим менший, чим більша робота K , витрачена маятником на деформацію і руйнування зразка. Швидкість копра u_k [м/с], у момент удару по зразку залежить від висоти підйому H : $u_k = (2gH)^{1/2}$, де g – прискорення вільного падіння.

Величина роботи деформації і руйнування визначається різницею потенційних енергій маятника в початковий (після підйому на кут α) і кінцевий (після злету на кут β) моменти випробувань: $K = P(H-h)$, де P – вага маятника, H і h – висоти підйому і злету маятника.

Якщо довжина маятника L , то $h = L(1 - \cos\beta)$, $H = L(1 - \cos\alpha)$ і, отже [3]:

$$K = PL(\cos\beta - \cos\alpha). \quad (6.2)$$

Ця формула і слугує для розрахунку роботи деформації. Шкала копра може бути проградуєвана в одиницях роботи, якщо вихідний кут підйому маятника фіксований.

Частина енергії удару витрачається на струс копра і фундаменту, подолання опору повітря, на тертя в підшипниках і у вимірювальному пристрої, на зминання зразка на опорах і під ножем, на передачу енергії уламкам зразка і на пружну деформацію штанги маятника [23]. На копрах, застосовуваних протягом звичайних випробувань металів, більшість цих втрат не піддається обліку, у результаті одержувані значення роботи виявляються завищеними на кілька відсотків. Особливо великі втрати енергії при розбіжності осі удару і середини надрізу на зразку. Тому величини ударної в'язкості, визначені на різних копрах, можуть відрізнятися один від одного на 10–30%. Точність визначення роботи зламу є тим вищою, чим менше перевищення запасу роботи маятника над роботою деформації і руйнування зразка. Тому випробування необхідно проводити із забезпеченням мінімального кута β після руйнування зразка.

Знаючи повну роботу деформації і руйнування K , можливо розрахувати основну характеристику, що одержується в результаті розглянутих випробувань – ударну в'язкість [3]:

$$КС = \frac{K}{F}, \quad (6.3)$$

де F – площа поперечного перерізу зразка в місці надрізу до випробування.

Ударні випробування, як і статичні, можливо проводити за низьких та підвищених температур. Методика цих випробувань регламентована стандартами. За ГОСТ 9454–78 [21] випробування на динамічний згин за низьких температур виконують з використанням тих самих зразків, що і за кімнатної. Зразок витримують у рідкому холодоагенті не менш ніж 15 хвилин за температури на $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ нижче заданої, потім виймають з ванни, встановлюють на копр і негайно випробовують. Аналогічна методика використовується і протягом високотемпературних випробувань [21]. Попереднє нагрівання зразків рекомендується проводити в муфельних печах, за необхідності в нейтральній атмосфері, перегріваючи зразок щодо заданої температури на $3\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в залежності від її абсолютної величини. За таких умов тривалість установки зразка з моменту виймання з печі до удару маятника повинна бути не більше 3-5 с.

Для позначення ударної в'язкості, визначеній за пониженій чи підвищеній температурах, використовується цифровий індекс, що відповідає температурі випробування. Наприклад, КСТ⁶⁰ – ударна в'язкість, визначена на зразку з Т-подібним концентратором за температури $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У стандарті [21] також рекомендується при позначенні ударної в'язкості вказувати максимальну енергію удару маятника [Дж], глибину концентратора у випробуваному зразку [мм], і його ширину [мм]. Наприклад, КСУ⁺¹⁰⁰ 150/3/7,5 – ударна в'язкість, визначена на зразку з U-подібним концентратором за температури $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ на копрі з максимальною енергією удару маятника 150 Дж з використанням концентратора глибиною 3 мм і шириною зразка 7,5 мм. Якщо використовується копр з максимальною енергією удару маятника 300 Дж і зразок шириною 10 мм із глибиною концентратора 2 мм, то ці дані в позначення ударної в'язкості не вводяться (записується просто КСТ⁺¹⁰⁰).

Обладнання, прилади та інструменти

1. Маятниковий копр.
2. Зразки з V-подібним концентратором.

Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитися з принципом роботи маятнікового копра та його технічними параметрами.

2. Виміряти розміри зразків та занести їх до протоколу, включно з типом надрізу. Експериментально визначити необхідний кут підйому маятника копра.

3. Провести випробування.

4. Розрахувати ударну в'язкість, визначити кут загибу.

5. Повторити випробування при температурах -100°C , 100°C , 200°C , 300°C , 400°C .

6. Побудувати графічну залежність ударної в'язкості від температури. Визначити температуру в'язко-крихкого переходу.

7. Зробити висновки щодо рівня в'язкості матеріалу та наявності в'язко-крихкого переходу в досліджуваному матеріалі.

Аналіз результатів повинен включати:

- рівень ударної в'язкості матеріалу;

- характер зміни рівня тріщиностійкості з температурою;

- оцінка наявності в'язко-крихкого переходу в досліджуваному інтервалі температур;

- засоби забезпечення отримання достовірних результатів випробувань.

Контрольні питання

1. Як змінюється опір руйнуванню матеріалів протягом зростання швидкості деформування?

2. В яких випадках застосовують динамічні випробування на згин?

3. Як збільшити точність визначення ударної в'язкості матеріалу?

4. Чим відрізняються між собою зразки Шарпі, Менаже та з Т-подібним концентратором?

5. Як визначити рівень в'язкості матеріалу та характер її зміни за формою кривої в координатах «КС - Т»?

6. Як позначається ударна в'язкість матеріалів, отримана на різних випробувальних машинах та за різних температур випробування?

Практична робота №7

ВИБІР МЕТОДА ВИЗНАЧЕННЯ І ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ ТВЕРДОСТІ

Мета роботи – вивчити основні методи та прилади для визначення твердості: освоїти основи вибору метода та методики випробування твердості конкретних зразків та виробів.

Загальні відомості

Під твердістю матеріалу розуміють здатність матеріалу чинити опір деформуванню та руйнуванню під дією місцевих контактних зусиль (ДСТУ 2825-94). При кількісній оцінці твердості використовують певні індентори та зусилля.

З врахуванням простоти випробувань, невеликих витрат часу та праці порівняно з іншими методами, можливості визначення характеристики безпосередньо на виробах, випробування твердості широко використовується для контролю якості термічної обробки. Відбитки індентора на поверхні виробів, в окремих випадках, не впливають на їх працездатність.

Методи визначення твердості розподіляються на дві групи: статичні та динамічні. До статичних відносяться методи з повільним зростанням зусилля, яке діє на індентор: метод Брінеля, Роквела (Супер-Роквела), Вікерса, мікротвердості. Ці методи найбільш поширені. В деяких випадках визначення твердості за їх допомогою неможливе, тому використовують динамічні методи: метод Шора та метод Польді.

Підготовка зразків (виробів). Вірогідність значень твердості в першу чергу залежить від правильності підготовки зразків (виробів). Вона повинна виключати зміну структури та властивостей, передбачати вилучення дефектного поверхневого шару, що виник при попередніх технологічних операціях. При відбиранні проб для випробувань керуються ГОСТ 7564-97. При виготовленні зразків не повинно бути розігрівання поверхневого шару при вирізанні проб, при шліфуванні та поліруванні, неприпустимий наклеп від фрезерування, точіння, шліфування.

Вимоги до шорсткості поверхні, на якій визначається твердість, залежить від розмірів індентора та зовнішнього зусилля. З їх зменшенням знижується також глибина проникнення індентора і зростають вимоги до шорсткості поверхні. Тому перед випробуванням твердості на приладах Вікерса та мікротвердомірах зразки шліфують та полірують. В решті випадків обмежуються шліфуванням зразків.

Зовнішнє зусилля та товщина зразків повинні бути такими, щоб виключити вигинання на опорній поверхні та продавлювання поверхневого зміцненого шару після наклепу, ХТО, поверхневого гартування. Опорна та робоча поверхня зразків повинні бути паралельними.

Навантаження прикладається перпендикулярно випробуваній поверхні. Коли при плоских опорних столиках цю вимогу важко виконати, то використовують фасонні столики. Спеціальні пристосування, що дозволяють фіксувати вироби, в т.ч. і довгі, виготовляють для конкретних виробів і використовують замість столиків.

При використанні методів Брінеля, Роквела, Вікерса визначають макротвердість тобто величину, на яку впливають всі структурні складові. Мікротвердість дозволяє судити про властивості окремих фаз та структурних складових.

Таким чином, випробування твердості проводиться різноманітними методами, вибір конкретного метода залишається за конструктором, залежить від форми та розмірів виробів, виду термічної обробки, твердості матеріала, виду твердості (макро- чи мікротвердості).

Визначення твердості за методом Брінеля (ГОСТ 9012-59). Під час випробування вдавлюється куля певного діаметра під дією постійного зусилля впродовж фіксованого часу. Після цього вимірюють діаметр відбитка, по додатку 2 або за допомогою рівняння 5.1 визначають твердість по Брінелю, МПа

$$HB = \frac{2P}{\left(\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)\right)}, \quad (7.1)$$

де P – навантаження на індентор, Н;

D – діаметр кулі, мм;

d – діаметр відбитка, мм.

При відомих P , D , HB орієнтовна глибина відбитка t визначається за формулою:

$$HB = \frac{2P}{\left(\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)\right)}. \quad (7.1)$$

Матеріали кулі – загартована сталь (для випробування зразків з твердістю не вище $HB 4500$ МПа) або WC (твердість не вище $HB 6500$ МПа).

Діаметр відбитка вимірюється в двох взаємоперпендикулярних напрямках, за результатами вимірів визначається d . Діаметри відбитків повинні знаходитися в межах $0,2D < d < 0,6D$. При порушенні цієї вимоги випробування

вважається недійсним і повторюється при скорегованому стандартному зусиллі. Відстань від центра відбитка до краю зразка повинна бути не менше $2,5d$ ($3d$ для матеріалів з $HV < 350$ МПа), відстань між центрами відбитків не менше $4d$ ($6d$ для матеріалів з $HV < 350$ МПа).

В табл.7.1 приведені рекомендації з вибору навантаження, діаметра кулі та витримки під навантаженням в залежності від матеріалу, твердості, товщини зразка.

Таблиця 7.1 – Рекомендації щодо умов випробування твердості за Брінелем

Матеріал	Інтервал твердості, МПа	Товщина зразка, мм	Співвідношення між P та D	Діаметр D , мм	Навантаження, P кН(кг)	Витримка під навантаженням, с
Чорні метали	1400-4500	від 6 до 3 від 4 до 2 менше 2	$P=0,294 D^2$ ($P=30 D^2$)	10 5 2,5	29,4(3000) 7,35(750) 1,84(187,5)	10
Теж	до 1400	більше 6 від 6 до 3 менше 3	$P=0,098 D^2$ ($P=10 D^2$)	10 5 2,5	9,81(1000) 2,45(250) 0,61(62,5)	30
Кольорові метали (сплави)	вище 1300	від 6 до 3 від 3 до 2 менше 2	$P=0,294 D^2$ ($P=30 D^2$)	10 5 2,5	29,4(3000) 7,35(750) 1,84(187,5)	30
Теж	350-1300	від 9 до 6 від 6 до 3 менше 3	$P=0,098 D^2$ ($P=10 D^2$)	10 5 2,5	9,81(1000) 2,45(250) 0,61(62,5)	30
Теж	80-350	вище 6 від 6 до 3 менше 3	$P=0,0245 D^2$ ($P=2,5 D^2$)	10 5 2,5	2,45(250) 0,61(62,5) 0,15(15,6)	60

Із табл.7.1 можна зробити висновок, що при виконанні закону подібності $P_1 / D_1^2 = P_2 / D_2^2 = P_3 / D_3^2$ при випробуванні твердості одного матеріалу на різних зразках отримують порівнювані результати.

Мінімальні товщини зразків при умові, що товщина зразка не менше десятикратної глибини відбитка, приведені в табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Мінімальна товщина зразків

Діаметр D , мм	Навантаження P	Мінімальна товщина зразків, мм, при HV , МПа										
		100	200	300	400	800	1000	1500	2000	3000	4000	6000
2,5	0,61	-	-	2,0	1,3	1,0	0,8	0,5	0,4	0,3	-	-
2,5	1,84	-	-	-	-	-	2,4	1,6	1,2	0,8	0,6	0,5
5,0	0,61	4,0	2,0	1,0	0,7	-	-	-	-	-	-	-
5,0	2,45	-	-	-	-	2,0	1,6	1,1	-	-	-	-
5,0	7,35	-	-	-	-	-	-	3,2	2,4	1,6	1,2	1,0
10,0	2,45	-	8,0	4,0	2,6	-	-	-	-	-	-	-
10,0	9,81	-	-	-	-	4,0	3,2	2,1	-	-	-	-
	29,40	-	-	-	-	-	-	6,4	4,8	3,2	2,4	1,9

Визначення твердості за методом Роквела. Умови проведення випробувань регламентовані ГОСТ 9013-59 (HRC, HRB, HRA) та ГОСТ 22975-78 (HRN₁₅, HRN₃₀, HRN₄₅, HRT₁₅, HRT₃₀, HRT₄₅). При випробуванні твердості в поверхню зразків впроваджується індентор під дією двох зусиль: попереднього P₀ (98,1 Н) та основного P₁. Загальне навантаження P=P₀+P₁.

Індентори – алмазний конус з кутом при вершині 120° або сталева загартована куля діаметром 1,588 мм (1/16 дюйма). Твердість по Роквелу виражається в одиницях умовної шкали і визначається як різниця глибин проникнення індентора після попереднього (P₀) та основного (P₁) навантаження.

$$\text{HRC(HRA)} = 100 - e, \quad (7.3)$$

де $e = (h_1 - h_0) / 0,002$;

h_1 – глибина проникнення під дією основного зусилля;

h_2 – глибина проникнення під дією попереднього зусилля.

$$\text{HRB} = 130 - e. \quad (7.4)$$

Остання літера в аббревіатурі твердості визначає умови випробування:

HRA – індентор - алмазний конус, P₀=98 Н, P₁=490 Н, P=588 Н;

HRB – індентор - сталева куля, P₀=98 Н, P₁=883 Н, P=981 Н;

HRC – індентор - алмазний конус, P₀=98 Н, P₁=1373 Н, P=1471 Н.

Дані про мінімальну товщину зразків для визначення твердості по Роквелу приведені в табл.7.3.

Таблиця 7.3 – Мінімальна товщина зразків для визначення твердості по Роквелу

Число твердості HR	Шкала			Число твердості HR	Шкала		
	A	B	C		A	B	C
	Мінімальна товщина, мм				Мінімальна товщина, мм		
20	-	-	1,5	67	-	1,2	0,7
25	-	2,0	1,4	70	0,7	1,2	-
30	-	1,9	1,3	80	0,5	1,0	-
40	-	1,7	1,2	90	0,4	0,8	-
50	-	1,5	1,0	100	-	0,7	-
60	-	1,3	0,8				

Для деяких виробів зусилля P 588, 981 та 1471 Н великі, так як приводять до продавлювання поверхневого, наприклад, азотованого шару або стінок виробів. В цих випадках використовують прилад Супер-Роквел, в якому попереднє зусилля P₀=29,4 Н, а загальне зусилля 147, 294 або 441 Н. В табл.7.4 приведені дані про шкали приладу Супер-Роквел.

Таблиця 7.4 – Шкали приладу Супер-Роквел

Навантаження, H (кг)		Шкала твердості			
Попереднє	Загальне	N		T	
		Індентор	Позначення твердості	Індентор	Позначення твердості
29,4(3)	147(15)	Алмазний конус, $\alpha=120^\circ$	HRN ₁₅	Сталева куля, $d=1/16''$	HRT ₁₅
29,4(3)	294(30)		HRN ₃₀		HRT ₃₀
29,4(3)	441(45)		HRN ₄₅		HRT ₄₅

Визначення твердості за методом Вікерса (ГОСТ 2999-75). Індентор – алмазна чотиригранна піраміда з кутом при вершині $\alpha=136^\circ$. Навантаження – 9,8-980 Н, тривалість дії зусилля 10-15 с. На поверхні зразка залишається квадратний в плані відбиток, діагоналі якого d_1 та d_2 використовуються для розрахунків d , твердості по (7.5) або по таблицям.

$$HV = P / F = 2P \cdot \sin(\alpha / 2) / d^2 = 1,8544P / d^2, \quad (7.5)$$

де P – зусилля, Н;

d – діагональ відбитка, мм.

Невелике навантаження, мала глибина відбитка, визначення діагоналі відбитка за допомогою мікроскопа вимагають ретельної підготовки поверхні зразків, в т.ч. і полірування. В табл.7.5 наведені умови вибору навантаження при визначенні твердості по методу Вікерса.

Таблиця 7.5 – Умови проведення випробування твердості по методу Вікерса

Товщина зразка, мм	Інтервал твердості HV, МПа			
	250-500	500-1000	1000-3000	3000-9000
	Навантаження, Н			
0,3-0,5	-	-	-	49-98
0,5-1,0	-	-	49-98	98-196
1,0-2,0	49-98	49-98	98-196	196 і більше
2,0-4,0	98-196	196-294	196-490	до 981
>4,0	106 і більше	294 і більше	490 і більше	до 981

В додатку до ГОСТ 2999-75 приведена таблиця твердості по Вікерсу в залежності від діагоналі відбитка та зусилля.

Визначення мікротвердості. Метод регламентований ГОСТ 9450-76. Індентори – алмазні, різної геометрії: чотиригранна піраміда з квадратною основою, тригранна піраміда з основою в вигляді рівностороннього трикутника, чотиригранна піраміда з ромбічною основою, біциліндричний індентор.

Поверхня зразків – полірована ($Ra < 0,32$ мкм по ГОСТ 2789-73), без наклепу, зміни структури. При визначенні мікротвердості структурних складових зразки перед випробуванням щавляться. При випробуванні використовують навантаження 0,049, 0,098, 0,196, 0,490, 0,981, 1,962, 4,905 Н. Витримка під навантаженням не менше 3 с. Вибір місця визначення твердості та вимірювання розмірів відбитків проводиться за допомогою мікроскопа. В залежності від навантаження та вида індентора по таблицям або за рівнянням (7.6) визначають мікротвердість. Для чотиригранної піраміди з квадратною основою мікротвердість H , H/mm^2

$$H_{\square} = 1,854P / d^2, \quad (7.6)$$

де P – навантаження на індентор, Н;

d – середнє арифметичне значення довжини обох діагоналей квадратного відбитка, мм.

Визначення твердості по Шору (ГОСТ 23273-78). Відноситься до динамічних методів визначення твердості, його використовують для випробувань твердості крупногабаритних виробів (прокатних валків, валів турбін, дисків, великомодульних зубчатих колес), коли іншими методами визначити твердість неможливо. Метод базується на пружній віддачі випробуваним матеріалом бойка, який вільно падає з постійної висоти 140 мм. В сталевий боек циліндричної форми вмонтований алмазний індентор зі сферичною поверхнею радіусом 1,25 мм.

При випробуванні м'яких матеріалів більша частина кінетичної енергії бойка з індентором витрачається на пластичну деформацію зразка, менша повертається бойку і відкидає його вгору. При ударі бойка об поверхню зразків з великою твердістю менша частина енергії витрачається на пластичну деформацію матеріала, а більша на підйом бойка. Висота відскока бойка автоматично фіксується і використовується для оцінки твердості.

В залежності від розмірів зразків (виробів) використовують два варіанта проведення випробувань:

- зразки невеликих розмірів розташовують на столику приладу;
- при випробуванні великогабаритних виробів основну частину приладу знімають зі стійки, притискують до поверхні виробів, а потім проводять випробування.

Величини твердості *HB*, *HR*, *HV*, *HS* не мають точного (фіксованого) співвідношення. Разом з тим на практиці виникає необхідність в переведенні твердості з одного метода в інший. Для цього використовують таблиці орієнтовних співвідношень твердості, визначених різними методами.

Обладнання, прилади та інструменти

Набір зразків для визначення твердості, дані про матеріали зразків, їх термічну обробку, параметри холодної пластичної деформації; прилади для вимірювання твердості; ТШ-2, ТК-2, ТКС-2, ТП-2, ПМТ-3; інструкції по роботі на приведених приладах; набори зразкових мір твердості.

Послідовність виконання роботи

1. Вивчити інструкції по роботі на приладах для визначення твердості та познайомитись з їх конструкцією.

2. Для заданих зразків вибрати та обґрунтувати метод випробування твердості і виконати випробування.

3. Обробити результати випробувань, виконати аналіз результатів, використавши при цьому дані про хімічний склад матеріалів зразків та їх структуру.

Зміст звіту повинен вміщувати:

- коротке описання основних методів визначення твердості;
- результати випробування твердості (проміжні та кінцеві), статистична обробка експериментальних даних;
- співставлення розрахункових та табличних значень твердості;
- аналіз значень твердості з використанням даних про структуру та хімічний склад матеріалів зразків.

Контрольні питання

1. Методика проведення випробувань та визначення твердості по Брінелю.

2. Фактори, що впливають на вибір зусилля, діаметра індентора при проведенні випробувань на ТШ-2. Одиниці фізичних величин твердості.

3. Призначення приладів ТК-2, ТКС-2, навантаження. Індентори, порядок проведення випробувань та визначення твердості.

4. Підготовка зразків для випробування твердості на приладах ТШ-2, ТК-2. Особливості підготовки зразків для випробувань на ТП-2 та ПМТ.

Практична робота №8

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОКРИХЧЕННЯ МАТЕРІАЛІВ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ

Мета роботи: оволодіти методикою проведення низькотемпературних випробувань зразків з концентраторами напружень та навчитися експериментально визначати тримкість зразка з концентратором напружень і величину окрихчуючої дії концентраторів E_m .

Загальні відомості

Концентрація напружень є одним з основних факторів, що впливає на міцність та пластичність матеріалу в конструкції і призводить до катастрофічних руйнувань силових елементів конструкцій. За типом концентратори напружень поділяються на [2]:

- конструктивні концентратори (отвори, вирізи, галтельні переходи, тощо);
- дефекти металургійного та технологічного походження (неметалеві включення, непровари, механічні пошкодження поверхні металу);
- дефекти, що виникають в процесі експлуатації виробу (тріщини втоми).

Тримкістю зразка з концентратором напружень називають його здатність витримувати навантаження без макроскопічних пластичних деформацій, або без порушення цілісності зразка. У випадках, коли значення коефіцієнта в'язкості матеріалу вище 1,4, конструктивні концентратори напружень не можуть призвести до раптового руйнування виробу [2].

Тримкість зручно вимірювати в номінальних (середніх) напруженнях плинності σ_{NT} або руйнування σ_{NF} .

В умовах в'язкого руйнування номінальне напруження загальної плинності σ_{NT} дещо перевищує σ_T , що обумовлено ефектом перенапруження в вершині концентратора, який викликаний наявністю дво-тривісного розтягу в області дії концентратора [28].

Перехід від в'язкого руйнування до крихкого в умовах концентрації напружень характеризується падінням номінальних напружень руйнування до величин, менших σ_T . Температура, за якої $\sigma_{NF} = \sigma_T$ визначається як температура холодноламкості зразка з концентратором T_X (рис. 8.1).

Окрихчуюча дія концентраторів напружень полягає в тому, що в'язкий ($K_B > 1$) при одновісному розтягу метал руйнується крихко в умовах локального дво-тривісного розтягу в області дії концентратора напружень. Кількісно вона характеризується параметром E_m [28]:

$$E_m = \frac{Q}{K_{ss}} \left(\frac{e_i}{e_T} \right)^n, \quad (8.1)$$

- де Q – перенапруження в локальній області навколо концентратора;
 K_{ss} – коефіцієнт, що характеризує масштабний ефект, який обумовлений локалізацією процесу руйнування в малих об'ємах біля надрізу;
 e_i – інтенсивність локальних пластичних деформацій (еквівалентна деформація);
 n – показник деформаційного зміцнення матеріалу.

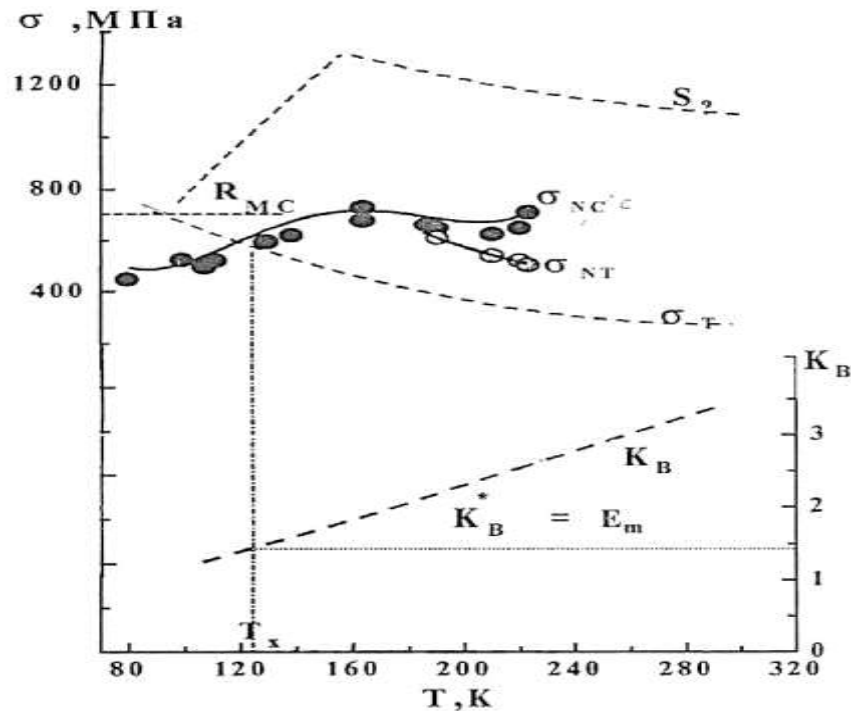


Рис.8.1. Температурні залежності характеристик плинності і руйнування зразків з концентраторами напружень (суцільні лінії) та механічних властивостей α -Fe при одновісному розтягу (переривчасті лінії) [28]

Відповідно до рівняння (8.1) окрихчення металу в умовах концентрації напружень обумовлено жорсткістю напруженого стану і в значній мірі залежить від величини локальної пластичної деформації, а також схильності металу до деформаційного зміцнення.

Для конструкційних концентраторів в першому наближенні (за умови $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$) [28]:

$$E_m = 1,15 K_t^{\frac{2n}{1+n}}, \quad (8.2)$$

де K_t – Нейберівський коефіцієнт концентрації напружень, який розраховується за формулою [28]:

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{R}}, \quad (8.3)$$

де t – розмір концентратора;

R – радіус при вершині концентратора.

Руйнування за температури холодноламкості описується залежністю [28]:

$$E_m = K_B \left(\text{за умови } T = T_x \right). \quad (8.4)$$

Таким чином, експериментальне визначення E_m полягає в знаходженні температури холодноламкості T_x та значенні коефіцієнта в'язкості K_B за цієї температури. Визначення T_x потребує проведення випробувань зразків з концентраторами напружень, а для побудови температурної залежності K_B достатньо провести випробування на одновісний розтяг стандартних гладких (не надрізаних) зразків.

Для експериментального визначення тримкості зразків з концентраторами напружень та окрихуючої дії конструктивних концентраторів використовуються універсальні розривні машини, які обладнані кріокамерами. Температурний інтервал механічних випробувань становить від 77 К до 293 К. Зразки – циліндричні з кільцевими надрізами (рис. 8.2). Швидкість навантаження не більше 2 мм/хв. Зразок охолоджується рідким азотом та його парами. Температура зразка контролюється за допомогою термопари. В процесі експерименту автоматично записується діаграма розтягу зразка в координатах «прикладене зусилля P – видовження зразка ΔL ».



Рис.8.2. Зовнішній вигляд циліндричного зразка з концентратором напружень

Після випробувань зразка вимірюється його діаметр d_k в місці зламу. Ці дані дозволяють для кожної температури випробування визначити середню величину напружень σ_{NF} , які діють в мінімальному перерізі зразка в момент руйнування. За наявності «полички» плинності також розраховується величина напруження загальної плинності акт.

Номінальне навантаження руйнування знаходиться за формулою [28]:

$$\sigma_{NF} = \frac{P_{NF}}{F_k}, \quad (8.5)$$

де P_{NF} – навантаження руйнування;

F_K – площа поперечного перерізу зразка в місці зламу.

Напруження загальної плинності $a_{кт}$ розраховується [28]:

$$\sigma_{NT} = \frac{P_{NT}}{F_0}, \quad (8.6)$$

де P_{NT} – навантаження на «поличці» плинності;

F_0 – початкова площа мінімального перерізу зразка.

Для експериментального визначення параметра E_m необхідно знайти температуру холодноламкості T_x і значення K_e за цієї температури (рис. 8.1). З цією метою будується температурна залежність номінального напруження руйнування зразка з концентратором акр, на яку наноситься залежність σ_T матеріалу від температури. Знаходиться температура T_x , за якої ці криві перетинаються.

Відносна похибка визначення E_m [27]:

$$\delta E_m = \sqrt{(\delta R_{MC})^2 + \left(\frac{b_1}{a_1 + b_1 T_x}\right)^2 \Delta T^2 + 4 \left(\frac{\Delta d_0}{d_0}\right)^2 \Delta d_0^2}, \quad (8.7)$$

де a_1 і b_1 – коефіцієнт лінійної інтерполяції температурної залежності σ_T навколо температури холодноламкості T_x ;

d_0 – початковий діаметр не надрізаного (гладкого) зразка;

Δd_0 – абсолютна похибка його визначення діаметра не надрізаного (гладкого) зразка (типові значення похибок: $\Delta T = \pm 2$ К, $\Delta d_0 = \pm 0,01$ мм);

δR_{MC} – відносна похибка визначення опору мікросколу.

Обладнання, прилади та інструменти

1. Універсальна випробувальна машина з криокамерою.
2. Охолоджувальна суміш.
3. Зразки для випробувань з концентратором напружень.

Послідовність виконання роботи

1. Виміряти за допомогою інструментального мікроскопа максимальний і мінімальний діаметри зразка та радіус надрізу.
2. Записати діаграми деформування зразків в інтервалі температур 77 К-293 К.
3. Розрахувати σ_{NT} та σ_{NF} та побудувати їх температурні залежності. На цей графік нанести залежності σ_T та K_B від температури.
4. Визначити температуру холодноламкості T_x та величину $E_m^{позр}$ при цій температурі.
5. Оцінити відносну похибку величини $E_m^{позр}$.

6. Розрахувати значення $E_m^{теор}$.

7. Оцінити похибку розрахунків.

Аналіз результатів повинен включати:

- графіки температурних залежностей σ_{NT} , σ_{NF} та σ_T і K_B ;
- результати розрахунків та експериментального визначення E_m ;
- граничну температуру почату експлуатації виробу з даним концентратором;
- висновки, щодо рівня несівної здатності зразка з даним концентратором та його окрихуючої дії на матеріал.

Контрольні питання

1. Що таке тримкість зразка?
2. Як впливає на тримкість зразка поява конструктивного концентратора?
3. Що таке температура холодноламкості?
4. Який фізичний зміст E_m –окрихуючої дії концентратора напружень?
5. Який мінімальний коефіцієнт в'язкості повинен бути у матеріалів, з яких виготовляють деталі конструкцій?

Література

1. Геллер Ю.А. Материаловедение: методы анализа, лабораторные работы и задачи / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. - М.: Металлургия, 1984. - 384 с.
2. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: навч. посіб. / С.С. Дяченко. - Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. - 226 с.
3. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: учебник для вузов. 2-е изд. / В.С. Золоторевский. - М.: Металлургия, 1983. - 352 с.
4. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів. Частина I. Основні види механічних випробувань: методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для студентів напряму підготовки 6.050403 «Інженерне матеріалознавство» денної та заочної форм підготовки / Уклад. В.В. Холявко, Ю.М. Подрезов. - К.: КАПРІ, 2010. - 80 с.
5. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (ЕК 10002-1:2001, ГОТ): ДСТУ ЕК 10002- 1:2006 [Текст]. - Чинний від 2007-07-01. - Держспоживстандарт України. - 40 с.
6. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 5. Метод випробування за підвищених температур (ЕК 10002-5:1991, ГОТ): ДСТУ ЕК 10002-5:2006 [Текст]. - Чинний від 2007-07-01. - Держспоживстандарт України. - 28 с.
7. Металлы. Метод испытания на кручение: ГОСТ 3565-80 [Текст]. - Введен в действие 1980-08-11. - М.: Государственный комитет СССР по стандартам. - 17 с.
8. Проволока. Метод испытания на скручивание: ГОСТ 1545-80 [Текст]. Введен в действие 1982-07-01. - М.: Государственный комитет СССР по стандартам. - 3 с.
9. Проволока. Метод испытания на навивание: ГОСТ 10447-93 [Текст]. Введен в действие 1995-01-01. - Минск: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. - 4 с.
10. Универсальная установка ТТМ-200 для проведения испытаний на кручение / А.В. Дроздов, В.В. Кутняк, А.Н. Неговский, Д.Г. Вербило // Проблемы прочности. - 2014. - № 3. - С. 169-175.
11. Металлы. Метод испытания на перегиб листов и лент толщиной менее 4 мм: ГОСТ 13813-68. Межгосударственный стандарт [Текст]. - Дата введения 1969.01.01.- М.: ИПК Издательство стандартов. - 6 с.
12. Мешков Ю.Я. Физические основы разрушения стальных конструкций / Ю.Я. Мешков. - К.: Наукова думка, 1981. - 240 с.

13. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах: ГОСТ 9454-78 [Текст]. - Введен в действие 1979-01-01. - М.: ИПК Издательство стандартов. - 12 с.

14. Копры маятниковые. Технические условия: ГОСТ 10708-82 [Текст]. - Введен в действие 1983-07-01. - М.: ИПК Издательство стандартов. - 8 с.

15. Котречко С.А. Физические основы оценки вязкости конструкционных сталей / С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, Г.С. Меттус // ФММ. - 1992. - № 11. - С. 135-140.

16. Котречко С.А. Модель разрушения стали в условиях концентрации напряжений / С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, Г.С. Меттус // Проблемы прочности. - 1992. - № 12. - С. 52-57.

17. Бернштейн М.Л. Механические свойства металлов / М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский // М.: Металлургия, 1979. - 496 с.

18. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: навч. посібник / С.С. Дяченко. - Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. - 226 с.

19. Мешков Ю.Я. Физические основы разрушения стальных конструкций / Ю.Я. Мешков. - К.: Наукова думка, 1981. - 240 с.

20. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: Справочник / А.А. Лебедев, Б.И. Ковальчук, Ф.Ф. Гигиняк, В.П. Ламашевский // 3-е изд., перераб. и доп.. - К.: Издат. дом «Ин Юре», 2003. - 539 с.

21. Гуль Ю.П. Структура и механические свойства металлов и сплавов: Учебное пособие / Ю.П. Гуль, В.С. Чмелева - Днепропетровск: НМетАУ, 2005. - 40 с.

22. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів. Лабораторний практикум: навч. посіб. для студ. спеціальності 132 «Матеріалознавство», освітньої програми «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. В. Холякко, І. А. Владимирський. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 116 с.

23. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Механічні властивості матеріалів та конструкційна міцність виробів” для студентів спеціальності 132 “Матеріалознавство” денної та заочної форм навчання / Укл.: І.М. Лазечний, О.В. Климов, В.Ф. Череп. – Запоріжжя, ЗНТУ, 2017. – 74 с.