

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# **МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ**

## **ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 132 «Матеріалознавство»,  
освітньою програмою «Металофізичні процеси та їх  
комп'ютерне моделювання»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2019

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

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 1 від 26.09.2019 р.)  
за поданням Вченої ради Інженерно-фізичного факультету (протокол № 6/19 від 25.06.2019 р.)*

Навчальне видання

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

### **ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

**Укладачі:** *Холявко Валерія Вікторівна, канд. техн. наук, доцент*  
*Владимирський Ігор Анатолійович, канд. техн. наук*

**Відповідальний**

**редактор:** *Балахонова Н.О., канд. фіз.-мат. наук*

**Рецензент:** *Подрезов Ю.М., доктор фіз.-мат. наук, професор*  
*Інститут проблем матеріалознавства ім І.М. Францевича*  
*НАН України*

Лабораторний практикум призначено для студентів спеціальності 132 – «Матеріалознавство». Він допоможе набутти компетентностей щодо практичного виконання основних стандартизованих механічних випробувань та визначення рівня відповідних властивостей матеріалів та їх експлуатаційних характеристик. У практикумі наведено необхідні теоретичні відомості для підготовки до кожної лабораторної роботи та покрокова інструкція до їх виконання. Перелік запитань до самопідготовки після кожної роботи допоможе підготуватися до її здачі. Представлені шаблони протоколів лабораторних робіт дозволять студентам швидко та якісно оформити роботи. У вступі наведені загальні правила написання висновків.

Видання може використовуватися студентами будь-яких матеріалознавчих спеціальностей.

**УДК 620.178.4/.6: 539.563: 620.172.251.1: 620.171.34**

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

© В. В. Холявко, І. А. Владимирський, 2019

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>4</b>
<b>Правила техніки безпеки.....</b>	<b>7</b>
<b>Оформлення протоколу та порядок захисту роботи.....</b>	<b>10</b>
<b>РОЗДІЛ 1. Механічні властивості матеріалів.....</b>	<b>11</b>
<b>Лабораторна робота № 1 – експериментальне визначення механічних характеристик за допомогою механічних випробувань.....</b>	<b>11</b>
<b>Лабораторна робота № 2 – визначення механічних характеристик матеріалів за допомогою статичних випробувань на одновісний розтяг.....</b>	<b>24</b>
<b>Лабораторна робота № 3 – побудова істинних та умовних діаграм деформації матеріалів за умов одновісного стискання.....</b>	<b>38</b>
<b>Лабораторна робота № 4 – визначення механічних характеристик матеріалів за допомогою випробувань на закручування.....</b>	<b>46</b>
<b>Лабораторна робота № 5 – визначення механічних характеристик матеріалів за результатами випробувань на статичний згин.....</b>	<b>54</b>
<b>Лабораторна робота № 6 – визначення механічних характеристик матеріалів за результатами динамічних випробувань на згин.....</b>	<b>62</b>
<b>РОЗДІЛ 2. Конструкційна міцність матеріалів.....</b>	<b>70</b>
<b>Лабораторна робота № 7 – визначення характеристик міцності та в'язкості матеріалів шляхом низькотемпературних випробувань на одновісний розтяг.....</b>	<b>70</b>
<b>Лабораторна робота № 8 – експериментальне дослідження окрихчення матеріалів концентраторами напружень.....</b>	<b>76</b>
<b>Перелік літератури .....</b>	<b>81</b>
<b>Додатки.....</b>	<b>85</b>
<b>Додаток А.....</b>	<b>85</b>
<b>Додаток Б.....</b>	<b>87</b>
<b>Додаток В.....</b>	<b>91</b>
<b>Додаток Г.....</b>	<b>94</b>
<b>Додаток Д.....</b>	<b>100</b>
<b>Додаток Е.....</b>	<b>103</b>
<b>Додаток Ж .....</b>	<b>105</b>
<b>Додаток К.....</b>	<b>109</b>
<b>Термінологічний покажчик.....</b>	<b>113</b>

## ВСТУП

Даний лабораторний практикум складається з циклу лабораторних робіт, присвячених експериментальним методам визначення основних механічних характеристик матеріалів за допомогою випробувань з одновісним навантаженням зразка. Ці роботи входять до дисципліни «Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів» і можуть бути використані студентами всіх матеріалознавчих спеціальностей як денної, так і заочної форм навчання.

Метою лабораторних робіт в даній навчальній дисципліні є формування у студентів ряду компетентностей:

- Здатності застосовувати професійні знання й уміння на практиці;
- Здатності організовувати свою діяльність, працювати автономно та у команді;
- Здатності оформлювати та представляти результати діяльності державною та іноземною мовою;
- 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.

Ступінь готовності студента до виконання роботи оцінюється за результатами експрес-тесту до якого включені питання стосовно інформації, необхідної для свідомого виконання відповідних досліджень. Студент без протоколу лабораторної роботи до складання тесту не допускається. В разі незадовільного виконання експрес-тесту студент до виконання роботи не допускається та повинен відпрацювати її в інший час, встановлений викладачем.

В додатках до даного практикуму наведені підготовлені шаблони протоколів лабораторних робіт. Покрокова інструкція щодо обробки експериментальних даних сприятиме отриманню достовірних результатів. Наведені шаблони таблиць даних допоможуть ефективно та швидко виконати всі розрахунки.

Студенти до початку роботи повинні ознайомитися з теоретичними відомостями за допомогою даного практикуму та конспекту лекцій й роздрукувати відповідний протокол лабораторної роботи. Протягом виконання експерименту всі дані заносяться у відповідні графи таблиць протоколу. Після закінчення експерименту студенти самостійно виконують необхідні розрахунки, заповнюють всі таблиці, визначають рівень похибок розрахованих значень, будують графічні залежності (вручну або з застосуванням відповідного програмного забезпечення) та формулюють і охайно записують висновки. Якщо студент не зміг виконати вчасно експериментальну частину роботи, він не допускається до захисту лабораторної роботи без її відпрацювання. Захист лабораторної роботи проводиться у визначений викладачем час.

Для правильного формулювання висновків доцільно скористатися наступними рекомендаціями:

- висновки пишуться по пунктах;
- скорочення слів у висновках не допускається;
- кожен пункт повинен містити не лише інформацію щодо встановленого факту, а і його аналіз за наступною схемою:



- перший висновок після кожної роботи повинен вказувати на те, чи опанована відповідна методика досліджень та в чому це полягає. Це може бути сформульовано, наприклад, наступним чином:

«1. Протягом виконання лабораторної роботи була опанована методика (назва), що дозволило отримати достовірні результати стосовно рівня (яких саме) властивостей (вказати яких саме матеріалів)»;

«1. В процесі виконання лабораторної роботи була опанована методика експериментального визначення (зазначити яких параметрів), що дозволило з незначними похибками (при можливості вказати похибку) встановити їх рівень для (вказати яких саме матеріалів)»;

Протягом перебування в лабораторії та виконання лабораторних робіт необхідно дотримуватися правил техніки безпеки, викладених нижче.

# **ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

## **1. Загальні правила безпеки**

1.1. Протягом занять студенти повинні дотримуватися правил поведінки, розкладу навчальних занять та графіку виконання робіт.

1.2. Під час занять студенти мають виконувати правила пожежної безпеки, особистої гігієни, тримати в чистоті робоче місце, знати місця розташування первинних засобів пожежогасіння.

1.3. В разі виникнення надзвичайної ситуації чи нещасного випадку необхідно негайно сповістити про це викладача або лаборанта і діяти у відповідності до ситуації, що склалася (надати першу допомогу постраждалому, покинути приміщення тощо).

1.4. Студенти, що допустили порушення правил техніки безпеки чи інструкції по виконанню роботи відстороняються від виконання лабораторної роботи, притягаються до відповідальності і з усіма студентами проводиться повторний інструктаж з техніки безпеки.

### **1.5. Забороняється:**

- приходити до лабораторії у верхньому одязі;
- вживати їжу чи напої в приміщенні лабораторії;
- розмовляти по мобільному телефону;
- класти сумки та інші особисті речі на столи та лабораторне устаткування.

## **2. Правила безпеки перед початком роботи**

2.1. До виконання лабораторних робіт допускаються лише ті студенти, що пройшли інструктаж з техніки безпеки та мають відповідний запис у журналі обліку, який підтверджується особистими підписами студентів.

2.2. Перед початком роботи необхідно ознайомитися зі змістом, порядком проведення та особливостями безпечного виконання лабораторної роботи, отримати у лаборанта зразки для випробувань.

2.3. Підготувати до роботи робоче місце, забрати сторонні предмети. Прилади та обладнання розташувати таким чином, щоб унеможливити їх падіння чи перекидання.

**2.4. Забороняється:**

- вмикати лабораторне устаткування без дозволу лаборанта або викладача;
- тримати на робочому місці предмети, що не потрібні протягом виконання завдання.

**3. Вимоги безпеки в процесі виконання роботи**

3.1. Потрібно дбайливо ставитися до приладів та устаткування, що забезпечить їх надійну роботу і унеможливить нещасні випадки.

3.2. Потрібно точно виконувати всі настанови викладача чи лаборанта, без його дозволу не виконувати самостійно будь-які дії.

3.3. Слідкувати за справністю всіх кріплень в приладах, не нахилятися низько над тими частинами машин та механізмів, що рухаються.

3.4. Наявність напруги в електричному ланцюгу перевіряти лише за допомогою приладів.

3.5. Не допускати максимального навантаження вимірювальних пристроїв.

3.6. Користуватися інструментами з ізольованими ручками.

3.7. Протягом роботи з рідинами не смакувати їх, не розбризкувати та не розливати.

3.8. Протягом роботи з лінзами працювати обережно та акуратно, не направляти їх на легкозаймисті предмети.

**3.9. Забороняється:**

- виконувати роботу за відсутності викладача чи лаборанта;
- залишати без нагляду працююче обладнання;
- доторкатися до елементів електричного обладнання, що знаходяться під напругою.

**4. Правила безпеки по закінченню роботи**

4.1. Після закінчення виконання лабораторної роботи необхідно вимкнути обладнання.



4.2. Навести порядок на робочому місці, здати викладачу чи лаборанту зразки та інші матеріали, що використовувалися.

4.3. Отримати у викладача відмітку про виконання експериментальної частини роботи.

#### **4.4. Забороняється:**

- залишати без нагляду працююче обладнання;
- виходити з лабораторії без дозволу викладача чи лаборанта.

### **5. Правила безпеки в аварійних ситуаціях**

5.1. В разі виявлення несправності в роботі електричних приладів, що знаходяться під напругою (підвищеному їх нагріванні, появі іскріння, запаху горілої ізоляції тощо) необхідно одразу вимкнути джерело живлення та повідомити викладача чи лаборанта.

5.2. У випадку розбиття лабораторного посуду чи скляних приладів не збирати уламки незахищеними руками, а використати віник і совок.

5.3. У випадку розливання легкозаймистої рідини або її займанні негайно повідомити про це викладача чи лаборанта та діяти у відповідності до його наказів.

5.4. У випадку розливання хімічних речовин виконати кроки для їх нейтралізації та промити великою кількістю води.

5.5. В разі виникнення пожежі негайно повідомити про це викладача та лаборанта і покинути приміщення у встановленому порядку.

5.6. В разі травмування себе або оточуючих повідомити викладача та надати постраждалим першу допомогу. За необхідності викликати швидку допомогу.

## **ОФОРМЛЕННЯ ПРОТОКОЛУ ТА ПОРЯДОК ЗАХИСТУ РОБОТИ**

Для допуску до лабораторної роботи кожен студент повинен мати у роздрукованому вигляді протокол лабораторної роботи (див. додатки). Чітко виконуючі наведені у протоколі інструкції, студент проводить випробування та заносить отримані первинні результати до відповідних таблиць.

Їх обробка здійснюється за вказаними в протоколі формулами вручну або за допомогою програмного забезпечення. Результати також вносяться до таблиць в протоколі. Аналіз отриманих даних наводиться у висновках. Необхідні графічні залежності вклеюються в протокол.

Захист лабораторної роботи здійснюється у визначений викладачем час. Оцінювання виконується у відповідності до рейтингового критерію оцінювання знань, наведеного у робочій програмі кредитного модулю.

## РОЗДІЛ 1. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

### Лабораторна робота № 1

#### Експериментальне визначення механічних характеристик за допомогою механічних випробувань

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

#### Теоретичні відомості

**Основні визначення та поняття.** Механічні випробування призначені для експериментального визначення механічних характеристик матеріалів. За їх допомогою вирішуються наступні основні задачі [1]:

- 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 [2]:

- 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.

Найбільш часто матеріали випробовуються за простими механічними схемами: розтяг, стиск, згин, закрут [3].

*Одновісний розтяг* – найрозповсюдженіша схема механічних випробувань. За результатами випробувань на одновісний розтяг будується первинна діаграма в координатах “навантаження – видовження”, які 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”.

*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.

**Класифікація видів механічних випробувань.** Всі види механічних випробувань можна класифікувати за рядом ознак [1]-[3]. Найбільш поширені типи класифікацій наведено в табл. 1.1.

**Таблиця 1.1. Класифікація видів механічних випробувань**

<b>Тип класифікації</b>	<b>Вид випробування</b>	<b>Примітки</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Схеми напруженого та деформованого станів	1) лінійний	- одновісний розтяг - одновісний стиск
	2) плоский	- двохвісний розтяг - двохвісний стиск - різнойменний плоский стан
	3) об'ємний	- тривісний розтяг - тривісний стиск - різнойменний об'ємний стан
Спосіб навантаження зразка	1) деформація з заданою швидкістю та вимірювання сил опору цій деформації	- майже всі статичні методи
	2) використання постійного навантаження з вимірюванням деформації, що виникає	- випробування на повзучість, довготривалу міцність, сповільнене руйнування
Характер зміни навантаження з часом	1) статичні	- повільно зростають від нуля до максимуму
	2) динамічні	- миттєво зростають
	3) циклічні	- багаторазова зміна напрямку або величини
Характер діючих навантажень	1) статичні (розтяг, стиск, згин, закрут)	- плавна зміна навантажень при повільній швидкості деформування, тривалість: секунди-хвилини
	2) динамічні (найчастіше згин)	- різка зміна навантажень та висока швидкість деформування, тривалість: 0,01 – 0,001сек
	3) випробування на повзучість та довгочасну міцність	- оцінюють жароміцність матеріалу, тривалість: до сотень годин
	4) випробування на твердість	- неруйнівні випробування в декількох місцях одного зразка, час: <60 сек

Продовження табл. 1.1

1	2	3
	5) втомні (граничне напруження, яке витримує зразок без руйнування за визначену кількість циклів навантаження)	- багаторазове змінне навантаження, тривалість: 1-10000 год.
Температура випробування	1) висока (до 1473 K)	- зразок гріють в термостаті
	2) нормальна (кімнатна)	
	3) низька (273 K – 173 K)	Суміші для охолодження: 273 K > T > 213 K – етиловий спирт + сухий лід 213 K > T > 173 K – етиловий спирт + рідкий N <sub>2</sub>
	4) наднизька (173 K – 4 K)	Суміші для охолодження: 173 K > T > 77 K – рідкий азот нижче 77 K – спеціальні методи

**Інформація про випробувальні засоби.** Випробувальні машини бувають універсальними, спеціалізованими та цільовими [1]. *Універсальні* машини в основному використовуються для наукових досліджень. Вони мають таку конструкцію, яка дозволяє реалізацію різних видів навантажень. На *спеціалізованих* машинах проводять контрольні приймальні випробування матеріалів для визначення стандартних механічних характеристик у відповідності до національних та міжнародних стандартів. На *цільових* машинах проводять випробування конкретних видів продукції в умовах наближених до експлуатаційних.

Всі типи випробувальних машин можна класифікувати за типом механізму навантаження, силовимірювача та напрямку прикладання навантаження. Типова класифікація випробувальних машин представлена на рис. 1.1.

Будь-яка випробувальна машина складається із силової системи (системи навантаження) та приладів і пристроїв реєстрації. Схему універсальної випробувальної машини та зовнішній вигляд машини «INSTRON 8802» представлено на рис. 1.2.



Рис. 1.1. Класифікація випробувальних машин [4]

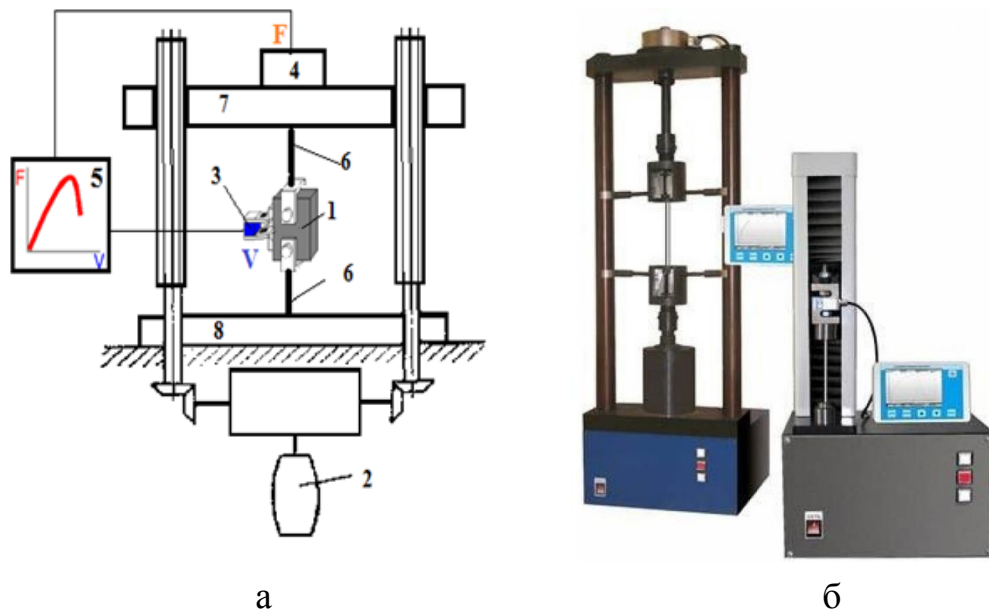


Рис. 1.2. Схема (а) та зовнішній вигляд (б) універсальної випробувальної машини [4]: 1 – зразок, 2 – пристрій навантаження, 3 – датчик деформації, 4 – датчик навантаження, 5 – діаграмний пристрій, 6 – захват, 7 – рухома траверса, 8 – нерухома траверса, 9 – захисна камера, 10 – блок керування рухом камери та рухомої траверси

**Типи пристроїв навантаження.** Пристроєм навантаження у випробувальній машині є привід. За типом передачі навантаження класифікуються машини: з механічним приводом (схожим на домкрат),

механоелектричним (приводом від електромотора) та гідравлічним (переміщення захвату здійснюється від поршня гідроциліндру). Основні характеристики машин з різними типами приводів наведено в табл. 1.2.

*Таблиця 1.2. Класифікація випробувальних машин за типом привода [4]*

Характеристика	Типи приводів		
	механічний	гідравлічний	електричний
<b>Величина навантаження</b>	0,1 – 0,15 МН	0,5 – 1,0 МН	> 1 МН
<b>Швидкість навантаження</b>	10 <sup>-2</sup> мм/с	Від мм/с до 10 м/с	> 10 м/с
<b>Частота коливачь навантаження</b>	1 – 5 Гц	до 150 – 200 Гц	500 Гц – електромагнітний 5000 Гц – електродинамічний 10000 Гц – магнітострикційний

**Пристосування для вимірювання та реєстрації навантаження.** Для вимірювання сили опору зразка деформації використовують декілька типів пристроїв [1], [3]. Найбільш поширені з них – важільні, маятникові, торсіонні, електротензометричні силовимірювачі та месдози. 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. 1.3.

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 месдози та торсіонні силовимірювачі, що зазвичай використовуються в гідравлічних машинах. В месдозі зусилля на зразку вимірюють манометром, переміщення стрілки якого пропорційне силі, що діє на рідину.



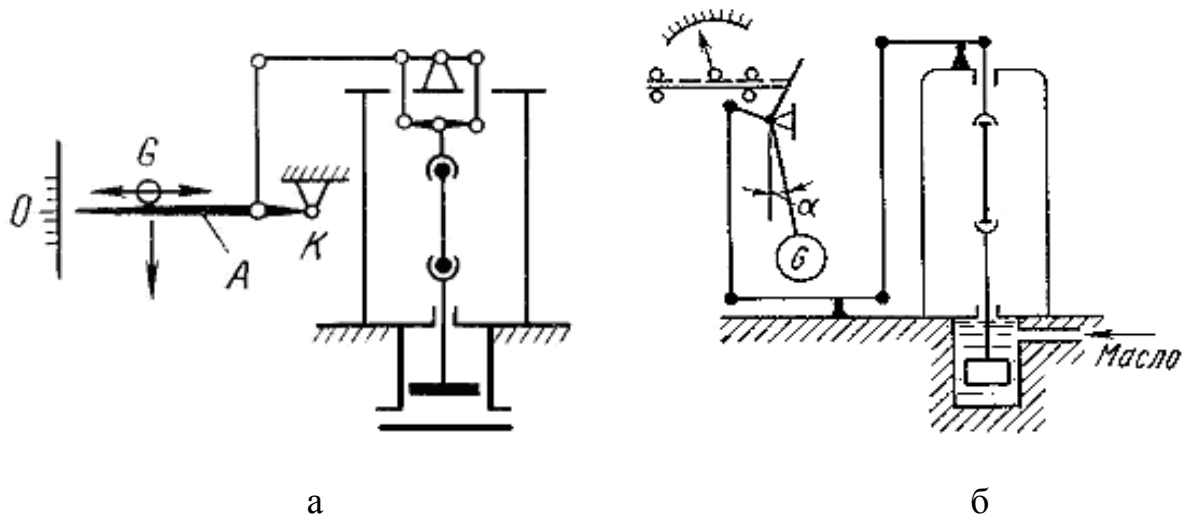


Рис. 1.3. Схема машини з гідравлічним приводом та важільним (а) й маятниковим (б) силовимірювачем [3]:  $G$  – рухомий вантаж,  $A$  – важіль,  $K$  – вісь важеля

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

В перших найпростіших машинах для механічних випробувань силовимірювання зазвичай здійснювалось за допомогою маятникового силовимірювача 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 силовимірювачі використовують на машинах зі всіма типами приводів, вони компактні та мають високу точність вимірювань. На рис. 1.4 наведено схему резисторного тензодатчику.

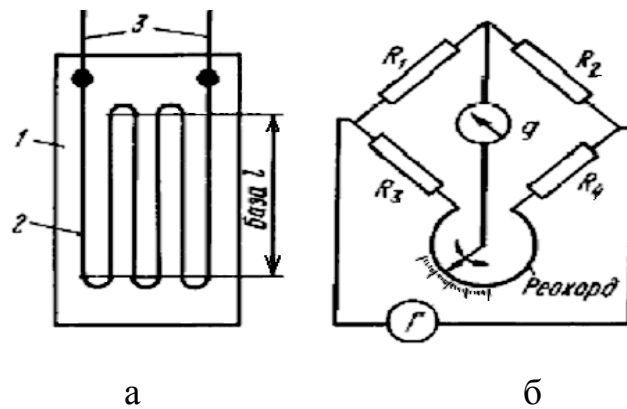


Рис. 1.4. Резисторний тензодатчик [4]: а – принципова схема (1 – паперова підкладка, 2 – плоска решітка з проволочки чи фольги, 3 – виводи), б – схема вимірювання навантажень за допомогою моста Уїтсона ( $R_1$  – резисторний датчик,  $R_2$  – компенсаційний датчик,  $R_3=R_4 \gg R_1=R_2$ ,  $G$  – джерело струму,  $g$  – індикатор підсилювача)

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. 1.4, 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. 1.4, б).

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.

**Пристосування для вимірювання та реєстрації деформації.** 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. 1.5 наведено схему вимірювання кута закручування при випробуваннях на закрут за допомогою дзеркального тензометра Мартенса.

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.

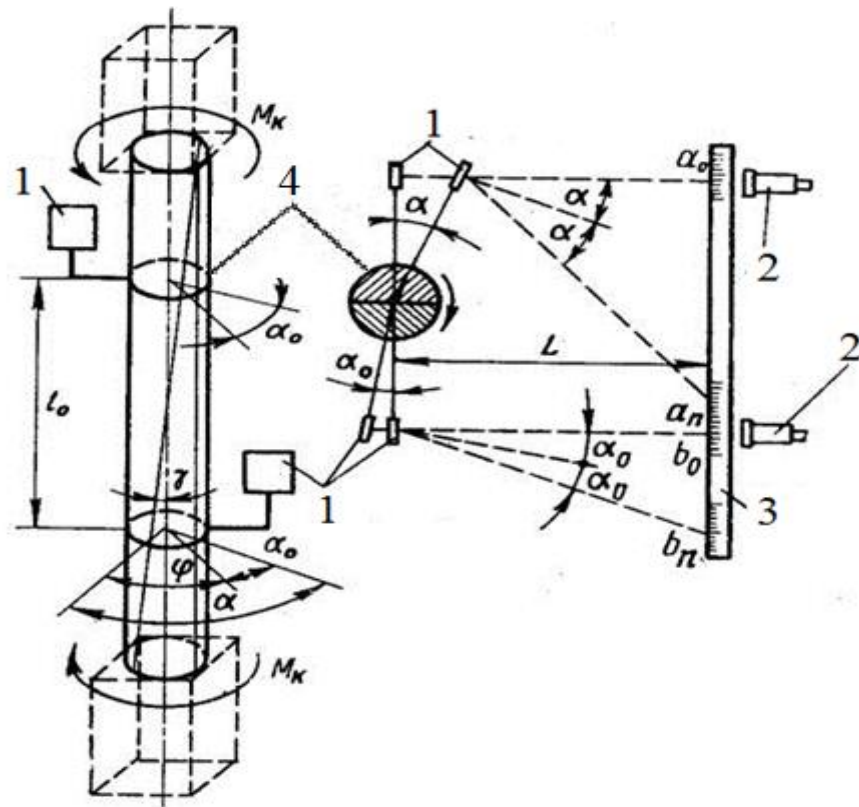


Рис. 1.5. Схема вимірювань за допомогою тензометра Мартенса [4]: 1 – дзеркала, що закріплені на границі розрахункової зони зразка, 2 – зорові труби, 3 – шкали, 4 – зразок

**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 [1], [3]:

- 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.

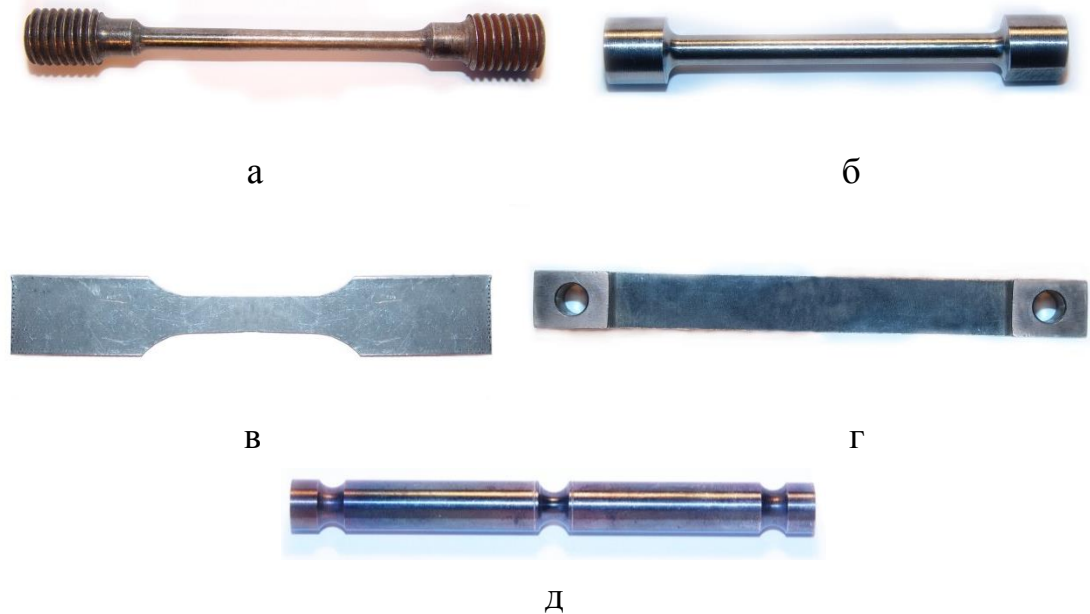
Для забезпечення виконання всіх вимог розміри, форма та методика виготовлення зразків регламентуються стандартами.

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.1.6.

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. 1.7.

Кожен зразок перед випробуванням маркують, вимірюють і розмічають. Маркування наносять поза межами робочої довжини зразка. Діаметр циліндричних зразків  $d_o$  варто вимірювати з точністю не нижче 0,01 мм при  $d_o \leq 10$  мм і 0,05 мм при  $d_o > 10$  мм. З такою ж точністю необхідно вимірювати товщину плоских зразків  $a_o$ , відповідно при  $a_o \leq 2$  мм і  $a_o > 2$  мм. Початкова розрахункова довжина зразка  $l_o$  в межах робочої довжини обмежується неглибокими кернами чи рисками з точністю до 1% від величини  $l_o$ .



*Рис. 1.6. 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*



*Рис.1.7. Захвати різної форми*

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 [5].

### **Хід виконання роботи**

Інструкції до виконання роботи наведено у додатку А.

**Питання для самоконтролю:**

1. Дайте визначення основним типам 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?

**Література:** [1] с. 20-22, 149-155, 161-162; [2] с. 134-136.

## Лабораторна робота №2

### Визначення механічних характеристик матеріалів за допомогою статичних випробувань на одновісний розтяг

**Мета роботи:** навчитись визначати істинні та умовні характеристики міцності та пластичності матеріалів за результатами випробувань стандартних зразків на статичний одновісний розтяг.

#### Теоретичні 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 [5]-[7]. 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) [2]. 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».

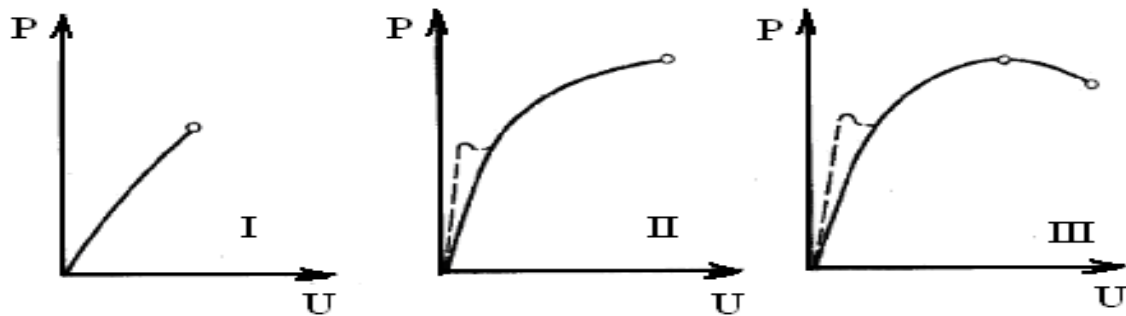


Рис. 2.1. Типи первинних діаграм випробувань зразків на одновісний розтяг [2]

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 ( $\sigma$ ) – відносне видовження ( $\delta$ )”.

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.

Визначення механічних характеристик матеріалів  
за допомогою статичних випробувань на одновісний розтяг

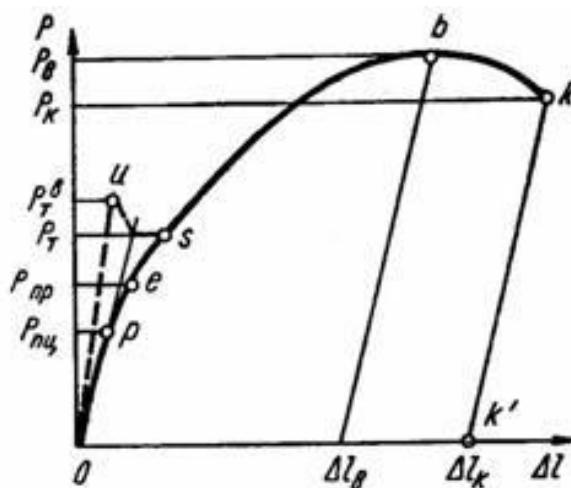


Рис. 2.2. Діаграми розтягу зразка з зубом та поличкою плинності чи без зубу та полички плинності [3]

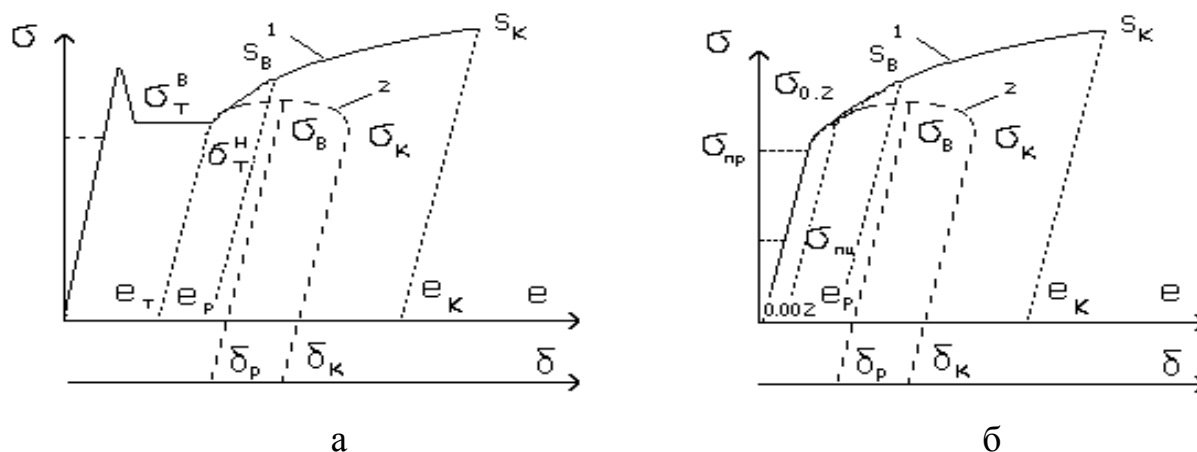


Рис. 2.3. Істинні (1) та умовні (2) діаграми деформації матеріалу [4]: а) із зубом та поличкою плинності, б) без зубу та полички плинності

### Методика випробувань та розрахункові співвідношення

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  $\sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

### *Зразки для випробувань на розтяг*

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 [1], [3]. 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  $l_0/d_0=2,5$ .

### *Вимоги до високо- та низькотемпературних випробувань*

До методики проведення випробувань на розтяг при підвищених і низьких температурах висувають ряд специфічних вимог [6]-[7]. Протягом високотемпературних випробувань нагрівальні пристрої (термостати і печі різноманітних конструкцій) повинні забезпечувати рівномірне нагрівання зразка в межах розрахункової довжини і підтримку заданої температури у встановлених межах протягом усього часу випробування. Рекомендується, щоб довжина робочого простору печі була як мінімум у п'ять разів більше початкової розрахункової довжини зразка (рис. 2.5,а).

Протягом високотемпературних випробувань необхідно приділяти особливу увагу надійності кріплення головок зразків у захватах, інакше можливе виникнення значної похибки результатів внаслідок деформації, вислизання головок із захватів і передчасного розриву зразків в головках, що розм'якшуються при нагріванні.

Визначення механічних характеристик матеріалів  
за допомогою статичних випробувань на одновісний розтяг

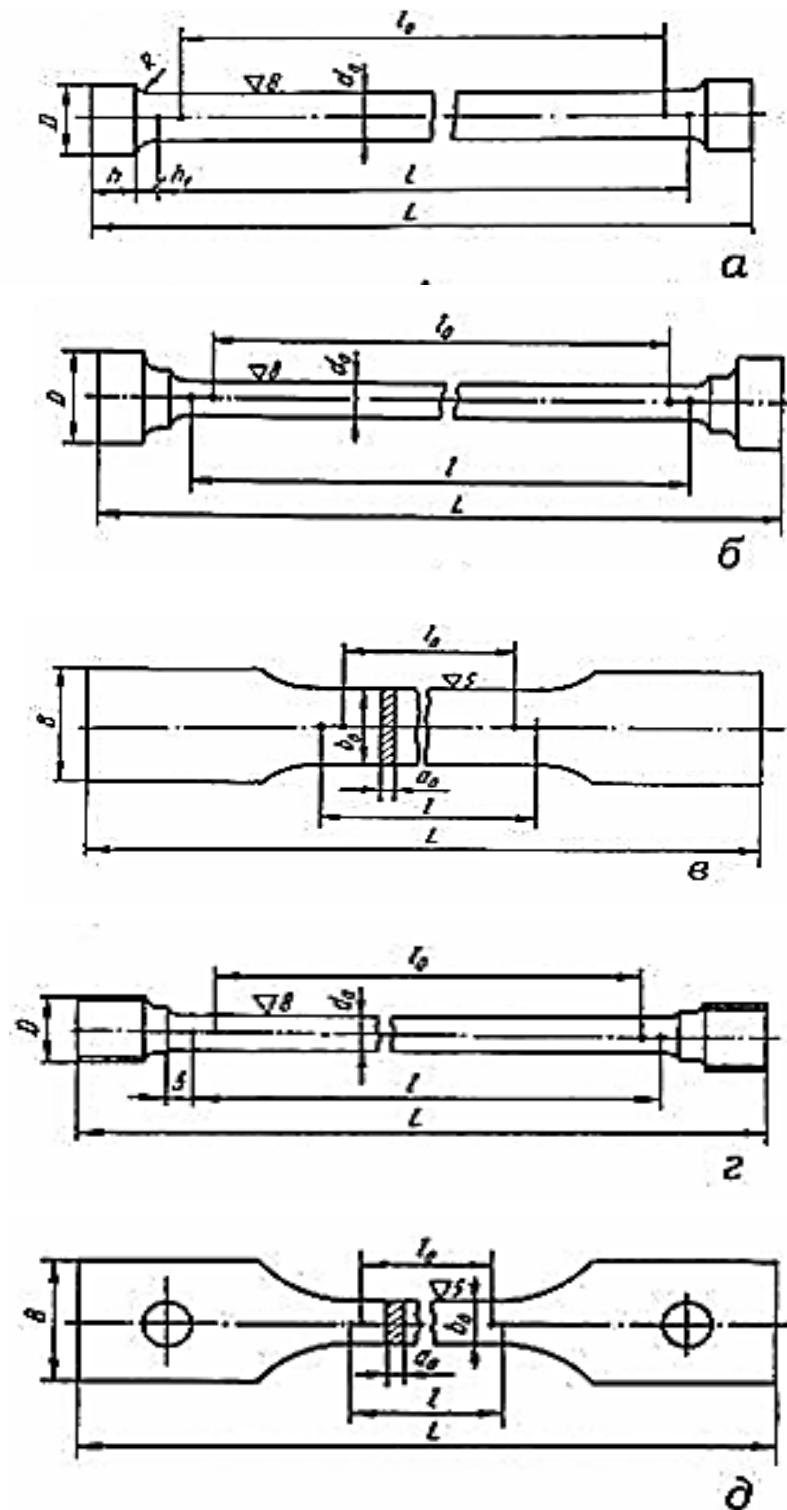


Рис. 2.4. Зразки для механічних випробувань матеріалів на статичний одновісний розтяг [4]: а-б) циліндричні зразки для випробувань при кімнатній температурі, в) плоский зразок для випробувань при кімнатній температурі, г) циліндричний зразок для випробувань при підвищених температурах, д) плоский зразок для випробувань при низьких температурах

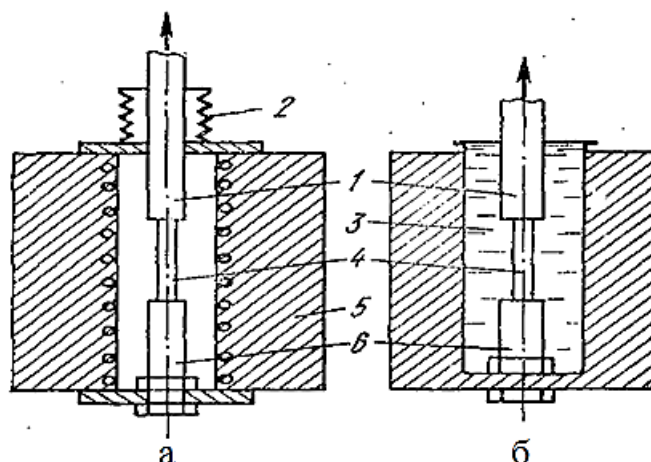


Рис. 2.5. Схеми випробувань на розтяг при підвищених (а) і низьких температурах (б) [4]: 1 – рухомий захват; 2 – сильфон; 3 – кріостат з холодоагентом; 4 – зразок; 5 – піч; 6 – нерухомий захват

Тому за високотемпературних випробувань використовують найчастіше циліндричні зразки з різьбовими головками, чи плоскі з отвором, у яке вставляють поперечний стрижень, що проходить крізь захвати (рис. 2.4, г,д). Точність підтримки температури зразка тим менша, чим більшою є температура. До 873 К ця точність не повинна бути нижче  $\pm 3$  К, від 873 до 1173 К –  $\pm 4$  К, від 1173 до 1473 К –  $\pm 6$  К. Час витримки при температурі випробування, а також швидкість нагрівання можуть мати істотний вплив на механічні властивості. Зазвичай зразки витримують 5 – 30 хв. Швидкість нагрівання до заданої температури, як правило, повинна бути мінімальною.

За підвищених температур на властивості багатьох металів також сильно впливає склад оточуючої зразок атмосфери. Зокрема, протягом нагрівання, витримки і у процесі випробування можлива взаємодія матеріалу зразка з газами повітря. За рахунок окиснення, насичення азотом чи воднем, механічні властивості можуть суттєво змінюватися. Тому у разі високотемпературних випробувань часто необхідним є використання вакуумних печей або захисних атмосфер, наприклад інертних газів (найчастіше використовують аргон). Тяги захватів при цьому вводять у робочий простір печі через спеціальні пристрої – сильфони (поз. 2 на рис. 2.5,а), що дозволяють захватам переміщуватися без розгерметизації внутрішнього об'єму печі.

У разі низькотемпературних випробувань між захватами машини встановлюють посудину з теплоізоляційними стінками, що містить охолоджувальну рідину (рис. 2.5,б). Ємність такої кріокамери повинна бути

досить великою для того, щоб забезпечити швидке охолодження і можливість підтримки заданої температури зразка протягом усього випробування. Вид охолоджувальної рідини в залежності від необхідної температури наведено в табл. 1.1. Зміна температури охолоджувальних сумішей досягається за рахунок зміни співвідношення компонентів. Крім рідких охолоджувачів, використовуються холодильні камери з повітряною атмосферою. Допустимі відхилення від заданої температури випробування не повинні перевищувати  $\pm 2$  до 213 K і  $\pm 5$  нижче 213 K. Тривалість витримки за температури випробування зазвичай складає 10 – 20 хвилин у залежності від розміру зразка. Для вимірювання низьких температур рекомендується використовувати рідинні (не ртутні) чи термоелектричні термометри.

*Основні характеристики, що визначаються при випробуваннях на розтяг*

Механічні характеристики, що можуть бути визначені при випробуваннях на розтяг можуть бути розділені на три основні групи: характеристики міцності, пластичності та в'язкості [2].

Перехід від пружної до пластичної деформації матеріалу характеризується чотирма критичними рівнями напружень, а саме [3]:

- межею пропорційності  $\sigma_{пц}$ ;
- межею пружності  $\sigma_{пр}$ ;
- верхньою  $\sigma_T^6$  та нижньою  $\sigma_T^H$  межами плинності;
- умовною межею плинності  $\sigma_{02}$  (для матеріалів, у яких відсутній “зуб” та “поличка” плинності).

Межа пропорційності  $\sigma_{пц}$  – це максимальний рівень напружень, за якого виконується закон Гука. Його визначають як відхилення від лінійної залежності між навантаженням та загальною (пружною та пластичною) деформацією. Це відхилення вказується в позначці межі пропорційності:  $\sigma_{пц 50}$ ,  $\sigma_{пц 25}$ ,  $\sigma_{пц 10}$ .

Експериментальне визначення межі пропорційності полягає в знаходженні точки  $P_{пц}$  на діаграмі розтягу, в якій спостерігається відхилення від лінійної залежності [1]:

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}, \quad (2.1)$$

де  $F_0$  – початкова площа зразка.

В багатьох випадках  $\sigma_{\text{пц}}$  визначають за допуском (50%, 25%, 10%) на величину зміни тангенса кута нахилу дотичної до початкової ділянки кривої деформації зразка.

Межа пружності  $\sigma_{\text{пр}}$  – найбільше напруження, за якого закон Гука вже не виконується, але при знятті навантаження в зразку залишкової деформації майже не спостерігається (величина залишкової деформації, як правило – 0,005%).

Величину напруження  $\sigma_{\text{пр}}$ , яке відповідає межі пружності розраховують за формулою [1]:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пр}}}{F_0}, \quad (2.2)$$

де  $P_{\text{пр}}$  – навантаження, при якому спостерігається певна величина залишкової деформації (0,05%).

Зазвичай межі пропорційності та пружності дуже близькі одна до одної, іноді їх можна розглядати як одну точку.

Верхня  $\sigma_{\text{T}}^{\text{в}}$  та нижня  $\sigma_{\text{T}}^{\text{н}}$  межі плинності характеризують рівні напружень, за яких спостерігаються "зуб" та "поличка" плинності. "Поличці" плинності відповідає деформація, яка характеризує рівень пластичної деформації в смузі Чернова-Людєрса. Більшість ліній Чернова-Людєрса нахилені під кутом 45 – 50° до осі розтягування, тобто приблизно відповідають положенню площадок найбільших дотичних напружень. Для металів та сплавів, у яких ці особливості на діаграмах розтягу відсутні, межу плинності визначають як напруження, при якому величина деформації складає 0,2 %.

Значення верхньої та нижньої меж плинності розраховують наступним чином [1]:

$$\sigma_{\text{T}}^{\text{в}} = \frac{P_{\text{T}}^{\text{в}}}{F_0}, \quad (2.3)$$

$$\sigma_{\text{T}}^{\text{н}} = \frac{P_{\text{T}}^{\text{н}}}{F_0}, \quad (2.4)$$

де  $P_{\text{T}}^{\text{в}}$  та  $P_{\text{T}}^{\text{н}}$  – навантаження при досягненні "зуба" та "полички" плинності, відповідно.

В разі необхідності визначення умовної межі плинності використовують залежність [1]:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \quad (2.5)$$

де  $P_{0,2}$  – навантаження, якому на діаграмі розтягу відповідає величина залишкової деформації 0,2%.

Механічні властивості матеріалу при деформаціях поза межею плинності характеризуються:

- межею міцності  $\sigma_{\sigma}$ ;
- показником деформаційного зміцнення  $n$ ;
- рівномірною деформацією  $e_p$ ;
- істинним  $S_k$  та умовним  $\sigma_k$  напруженнями руйнування;
- відносним звуженням  $\Psi$ .

Межа міцності (тимчасовий опір руйнуванню)  $\sigma_{\sigma}$  – рівень напружень, який відповідає точці  $P_{max}$  на діаграмі розтягу зразка. За цього навантаження починається утворення "шийки", тобто відбувається локалізація пластичної деформації в певному перерізі зразка. Якщо в процесі розрахунків напруження враховувати зменшення площі поперечного перерізу зразка протягом пластичної деформації, то на діаграмі «напруження – деформація» зникає максимум, який відповідає  $\sigma_{\sigma}$ . Це означає, що межа міцності характеризує не механічні властивості самого матеріалу, а найбільше навантаження, яке зможе витримати даний зразок до початку руйнування. Відповідно до визначення,  $\sigma_{\sigma}$  розраховують як [1]:

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}, \quad (2.6)$$

де  $P_{max}$  – максимальне навантаження на діаграмі розтягу зразка.

Умовне напруження руйнування  $\sigma_k$  – напруження, яке відповідає точці на умовній діаграмі розтягу, в якій відбувається руйнування зразка. Визначається як відношення величини навантаження в момент руйнування до початкової площі поперечного перерізу зразка. В момент руйнування площа поперечного перерізу може бути меншою в кілька разів за початкову, тому дана характеристика не має певного фізичного змісту.



Умовне напруження руйнування розраховується за формулою [1]:

$$\sigma_K = \frac{P_K}{F_0}, \quad (2.7)$$

де  $P_K$  – навантаження в момент руйнування зразка.

Умовна деформація визначається як відповідна величина видовження.

Відносне видовження на межі плинності  $\delta_T$ , рівномірне видовження  $\delta_P$  та величина відносного видовження зруйнованого зразка  $\delta_K$  розраховуються за формулами [1]:

$$\delta_T = \frac{U_T}{l_0}, \quad (2.8)$$

$$\delta_P = \frac{U_P}{l_0}, \quad (2.9)$$

$$\delta_K = \frac{U_K}{l_0}, \quad (2.10)$$

де  $U_T$ ,  $U_P$ ,  $U_K$  – абсолютні значення відповідних видовжень (рис. 2.2),  $l_0$  – довжина робочої частини зразка (рис. 2.4).

Залежності (2.1) – (2.10) дозволяють побудувати умовну діаграму деформації (рис. 2.3).

Рівномірна деформація  $e_p$  визначає граничну величину пластичної деформації, за якої починається її локалізація в "шийці", тобто відбувається перехід від рівномірної до локалізованої деформації зразка. Рівномірна деформація розраховується за формулою [1]:

$$e_p = \ln(1 + \delta_P), \quad (2.11)$$

Істинне напруження в цій точці  $S_e$  можливо розрахувати наступним чином [1]:

$$S_B = \frac{P_{\max}}{F_0} (1 + \delta_P), \quad (2.12)$$

Істинне напруження руйнування  $S_K$  – середнє значення напружень в "шийці", за яких порушується цілісність зразка. Розраховується за формулою [1]:

$$S_K = \frac{P_K}{F_K}, \quad (2.13)$$

де  $F_K$  – площа зразка в місці зламу.

Відносне звуження  $\Psi_K$  – міра пластичної деформації матеріалу в "шийці" в момент руйнування. Відносне звуження розраховують за формулою [1]:

$$\Psi_K = 1 - \left(\frac{d_K}{d_0}\right)^2, \quad (2.14)$$

де  $d_K$  – діаметр зразка в місці зламу.

За рівнем пластичності металеві матеріали можна розділити на три групи [4]: малопластичні ( $\Psi < 0,3$ ), середньопластичні ( $0,3 < \Psi < 0,6$ ) та високопластичні ( $\Psi > 0,6$ ).

Для побудови істинної діаграми деформації (рис. 2.3) необхідно також розрахувати величину деформації в "шийці" зразка  $e_K$  за формулою [1]:

$$e_K = \ln\left(\frac{1}{1 - \Psi_K}\right), \quad (2.15)$$

Показник деформаційного зміцнення  $n$  характеризує інтенсивність деформаційного зміцнення матеріалу на ділянці від  $e_T$  до  $e_p$ , тобто при рівномірній деформації зразка. Розраховується за формулою [3]:

$$n = \frac{\lg\left(\frac{\sigma_B}{\sigma_T}\right)}{\lg\left(\frac{e_p}{e_T}\right)}, \quad (2.16)$$

де  $e_T = \delta_T$  (за відсутності "зуба" та "полички" плинності –  $e_T = 0,002$ ).

Не дивлячись на те, що явище деформаційного зміцнення характерне для всіх металевих матеріалів, вони суттєвим чином відрізняються один від одного за рівнем схильності до реалізації цього процесу. Конструктивні сплави за рівнем міцності поділяються на мало-, середньо- та високоміцні [3]. Схильність до деформаційного зміцнення можливо визначити за формою деформаційної кривої на ділянці рівномірної пластичної деформації. Чим менше різниця між рівнями  $\sigma_T$

та  $\sigma_6$ , тим менше матеріал зміцнився протягом пластичної деформації. Ранжування схильності матеріалу до деформаційного зміцнення можливо провести у відповідності до наступних граничних значень [4]:

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_B} \approx (1 \div 0,7) - \text{низькоміцні матеріали}$$

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_B} \approx (0,7 \div 0,5) - \text{середньоміцні матеріали}$$

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_B} \approx (\leq 0,5) - \text{високоміцні матеріали}$$

В процесі випробувань на розтяг можливо визначити також значення пружних модулів досліджуваного матеріалу. Найпростіше розрахувати значення модуля Юнга  $E$  та коефіцієнт Пуассона  $\mu$ .

Модуль Юнга, який є коефіцієнтом пропорційності між напруженням і деформацією в умовах пружної одновісної деформації, розраховується за формулою [2]:

$$E = \frac{P_T l_0}{F_0 U_K} = \frac{\sigma_T}{\delta_T}, \quad (2.17)$$

В свою чергу, значення коефіцієнта Пуассона, який характеризує відношення деформації в двох взаємно перпендикулярних напрямках, можна знайти за формулою [2]:

$$\mu = \frac{\Delta d l_0}{d_0 U_K} = \frac{\Delta d}{d_0 \delta_K}, \quad (2.18)$$

де  $\Delta d$  – зміна діаметру зразка в процесі випробувань на ділянці пружної деформації.

Для багатьох металів  $\mu \sim 0,25 \div 0,3$  [2]. Взагалі, коефіцієнт Пуассона змінюється в інтервалі від 0 до 0,5. Нульове значення мають матеріали, поперечний переріз яких не змінюється в процесі розтягування (наприклад, корок), а значення 0,5 мають дуже пластичні матеріали (наприклад, гума).

При визначенні похибок величин механічних характеристик, необхідно користуватися теорією похибок непрямих вимірів, відповідно до якої, відносна похибка  $\delta_U$  величини  $U$ , яка є функцією ( $x, y, \dots$ ) визначається наступним чином [4]:

$$\delta_U = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln U}{\partial x}\right)^2 \Delta x^2 + \left(\frac{\partial \ln U}{\partial y}\right)^2 \Delta y^2 + \dots}, \quad (2.19)$$

де  $\Delta x$  і  $\Delta y$  – абсолютні похибки, які визначаються шляхом безпосередніх вимірів величин  $x$  та  $y$ .

Величина абсолютної похибки  $\Delta U$  [4]:

$$\Delta U = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial x}\right)^2 \Delta x^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y}\right)^2 \Delta y^2 + \dots}, \quad (2.20)$$

$$\Delta U = \pm \delta_U \bar{U} \quad (2.21)$$

Відповідно, залежності для розрахунку похибок основних механічних характеристик  $\sigma_T^e$ ,  $\sigma_B$ ,  $S_K$ ,  $e_P$ ,  $\Psi_K$  матимуть вигляд [4]:

$$\delta_{\sigma_T^H} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_T^H}{P_{\max}}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta d_0}{d_0}\right)^2}, \quad (2.22)$$

$$\delta_{\sigma_B} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{\max}}{P_{\max}}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta d_0}{d_0}\right)^2}, \quad (2.23)$$

$$\delta_{S_K} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_K}{P_K}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta d_K}{d_K}\right)^2}, \quad (2.24)$$

$$\delta_{e_P} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_P}{U_P}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta L_0}{L_0}\right)^2}, \quad (2.25)$$

При визначенні похибки для  $\Psi_K$  зручніше спочатку розрахувати абсолютну похибку  $\Delta \Psi_K$ , а потім відносну –  $\delta_{\Psi}$  [4]:

$$\Delta \Psi = \pm 4 \sqrt{\left(\frac{\bar{d}_K}{\bar{d}_0}\right)^2 (\Delta d_K)^2 + \left(\frac{\bar{d}_K^2}{\bar{d}_0^3}\right)^2 (\Delta d_0)^2}, \quad (2.26)$$

$$\delta_{\Psi} = \frac{\Delta \Psi}{\bar{\Psi}} \quad (2.27)$$

**Хід виконання роботи**

Інструкції до виконання роботи наведено у додатку Б.

**Питання для самоконтролю:**

1. Які характеристики міцності та пластичності можливо визначити за результатами випробувань на одновісний розтяг?
2. Чому на ділянці «0 –  $\sigma_T$ » 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?

**Література:** [1] с. 146-148, 156-160, 162-167, 180-183; [2] с. 136-142.

### Лабораторна робота № 3

#### Побудова істинних та умовних діаграм деформації матеріалів за умов одновісного стискання

**Мета роботи:** навчитись визначати істинні та умовні характеристики міцності та пластичності за результатами випробувань стандартних зразків на статичний одновісний стиск. Визначити особливості випробувань на стиск порівняно з випробуваннями на розтяг. Набути практичного досвіду виконання експерименту та обробки й аналізу результатів.

#### Теоретичні 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 [1]. На практиці за випробуваннями на стиск оцінюють механічні властивості чавуну та інших крихких сплавів [2].

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 [1]. 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 [3].

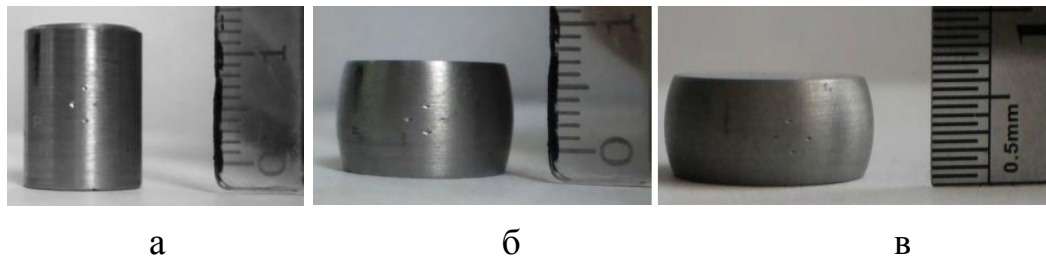


Рис. 3.1. Зовнішній вигляд зразка зі сталі 45 при випробуваннях на стиск [4]: а – вихідний стан, після навантаження 20 т, в – після навантаження 31,5 т

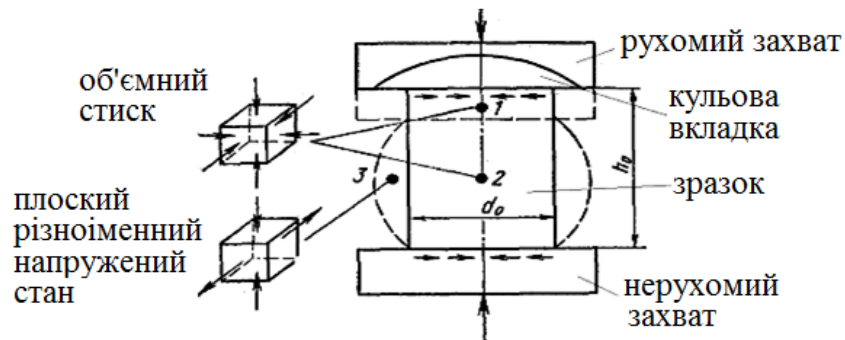


Рис. 3.2. Схема розподілу навантажень по висоті зразка при випробуваннях на стиск [4]

В процесі випробування на стиск випробувальна машина фіксує первинну діаграму – залежність зусилля  $P$  від зменшення висоти зразка (абсолютної деформації)  $\Delta h$ . Вид діаграми стискання 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 стискання можливе руйнування не будь-яких матеріалів – досить пластичні метали і сплави при стисканні розплющуються в тонкі пластини і не руйнуються при максимально можливих зусиллях випробувальної машини [1].

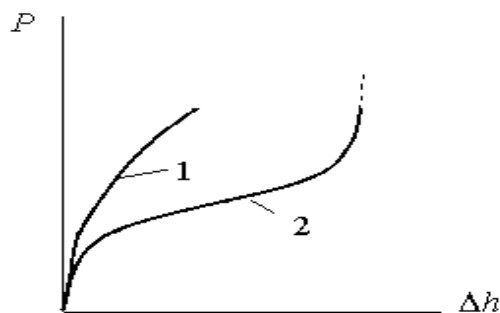


Рис. 3.3. Первинні діаграми стиску матеріалів, що руйнуються (1) і не руйнуються (2) при випробуванні [3]

### Методика випробувань та розрахункові співвідношення

Випробування на одновісний стиск проводять на тих самих машинах, що і на розтяг [1]. Зразок установлюють на опорну плиту в нижньому захваті і стискають рухомим 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 контактного 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.

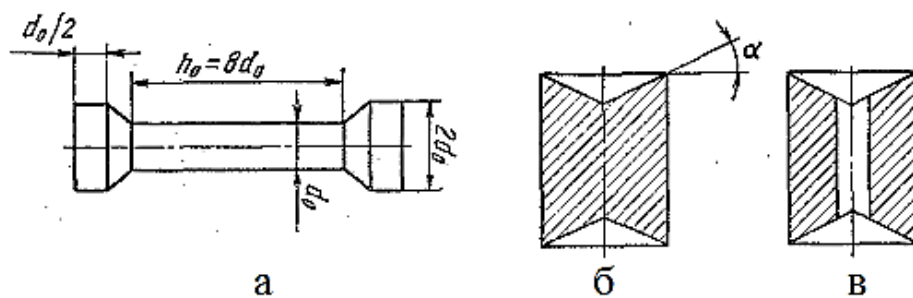


Рис. 3.4. Можливі форми зразків для випробування на стиск [4]: а) циліндричний подовжений зразок з головками для прецизійних вимірювань, б) стандартний зразок, в) зразок з видаленою серцевиною для випробувань крихких матеріалів

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 визначеним властивостям. Тому для підвищення точності отриманих результатів намагаються зменшити сили тертя на опорних поверхнях зразка, що досягається одним з наступних способів, чи їх поєднанням [1]:

- 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  $\alpha$  підбирають таким чином, щоб  $\operatorname{tg} \alpha$  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 [3]. 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).

З використанням первинної кривої, яку буде 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.

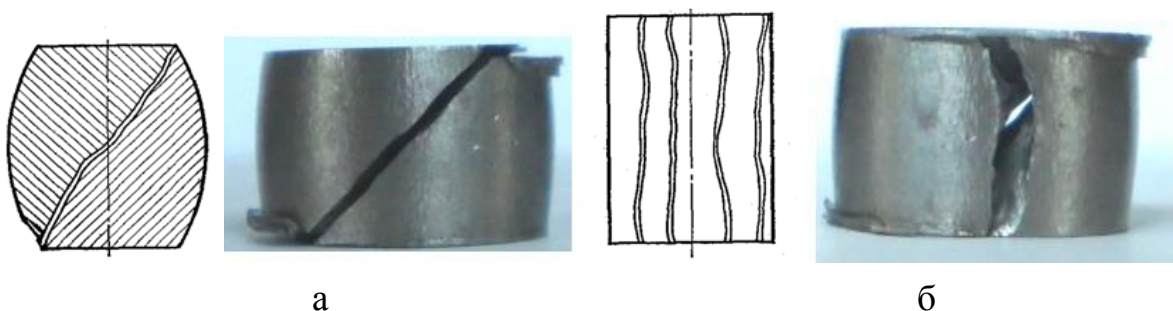


Рис. 3.5. Схеми руйнування та зовнішній вигляд зразків після руйнування шляхом зрізу (а) і відриву (б) при випробуваннях на стиск [4]

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  $\delta$  і  $\psi$ , як характеристики пластичності протягом стискання можна визначати відносне скорочення [1]:

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

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 противагу 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[3]. 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]:

$$\varepsilon_{\text{ст}} = \int_h^{h_0} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_0}{h}, \quad (3.3)$$

Враховуючи умови незмінності об'єму протягом пластичного деформування, істинна деформація може бути розрахована через зміну в площі поперечного перерізу за формулою [1]:

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

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 [1]:

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

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.

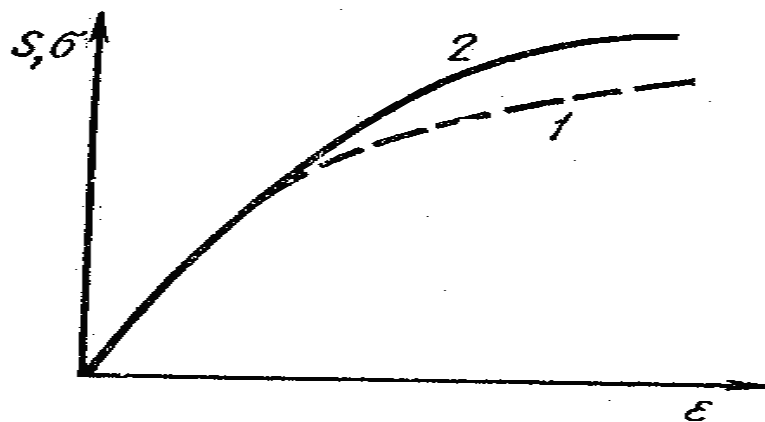


Рис. 3.6 – Діаграми істинних (1) і умовних (2) напружень у разі стискання [3]

Результати проведеного аналізу вихідних експериментальних даних наведено на рис. 3.7.

Побудова істинних та умовних діаграм деформації матеріалів при одновісному стисканні

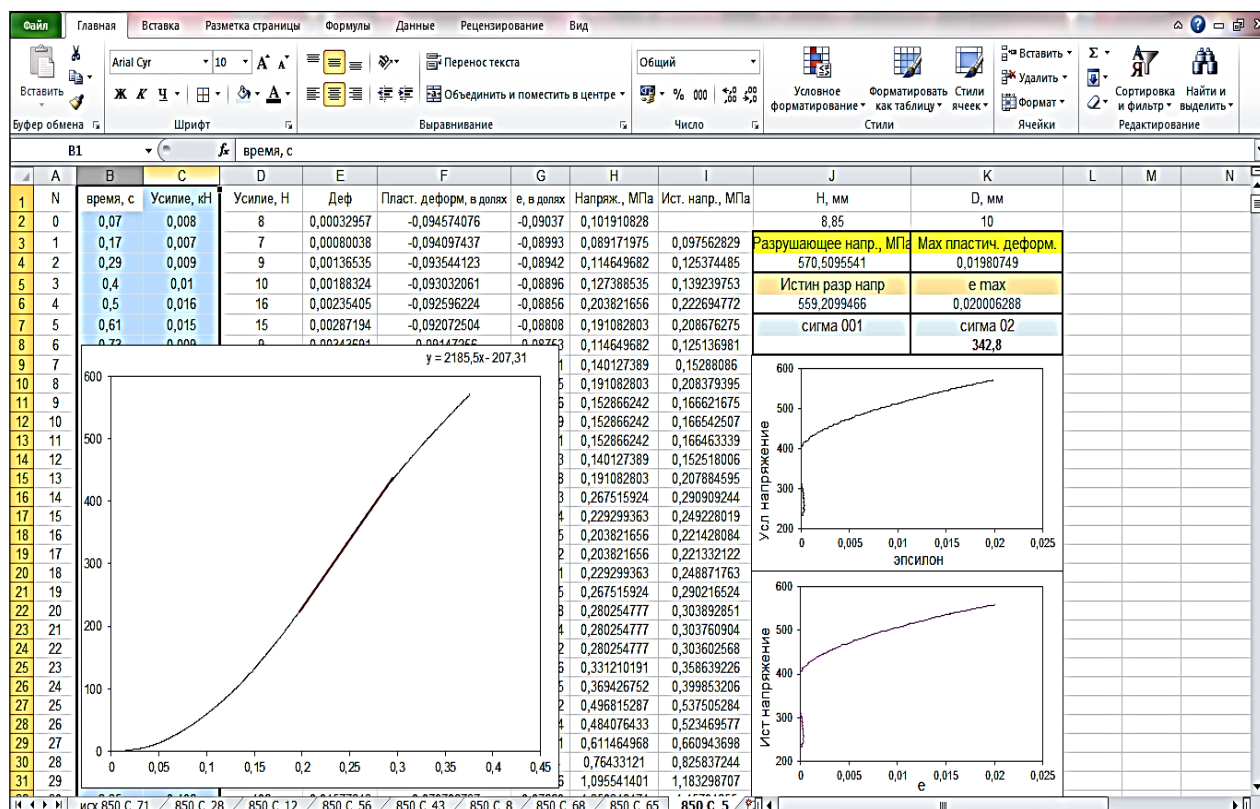


Рис. 3.7. Вигляд робочого файлу для розрахунків: синім виділені колонки, в які скопійовано дані з dat-файлу (первинні дані)

Значення характеристик міцності у разі стискання, особливо межі міцності, зазвичай значно вище, ніж за випробувань на розтяг. Наприклад, за даними Е.М. Савицького, межа міцності рідкоземельних металів у разі стискання в 2–3 рази вище, ніж у разі розтягу, що видно з табл. 3.1.

Табл. 3.1 Межі міцності рідкоземельних металів, визначені при випробуваннях на розтяг і стиск [2]

Матеріал	Межа міцності при випробуваннях на розтяг, МПа	Межа міцності при випробуваннях на стиск, МПа
Ітрій	230	800
Лантан	130	293
Церій	110	300

Схеми стискання використовують у технологічних пробах для оцінки деформаційної здатності напівфабрикатів і виробів [8]. З їхньою допомогою

визначають придатність чи непридатність матеріалу після деформації стиском на задану величину.

### **Хід виконання роботи**

Інструкції до виконання роботи наведено у додатку В.

### **Питання для самоконтролю:**

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?

**Література:** [1] с. 186-190; [2] с. 143-144.

## Лабораторна робота № 4

### Визначення механічних характеристик матеріалів за допомогою випробувань на закручування

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

#### Теоретичні відомості

Закручування здійснюється двома різними по величині і протилежно спрямованими крутильними моментами, які прикладаються до кінців зразка в площинах, нормальних до його поздовжньої осі [1], [9]. У робочій частині зразка виникає різномісний 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  $45^\circ$ , причому  $S_{max} = \tau_{max}$ . Схема розподілу напружень по осі зразка представлена на рис. 4.1.

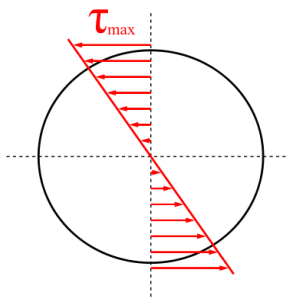


Рис. 4.1. Схема розподілу найбільших напружень в поперечному перерізі зразка при випробуваннях на закручування [4]

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 [3]. Умовні межі пропорційності, пружності, плинності і 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  $\tau_{\text{плц}}$  і, особливо,  $\tau_k$  є більш точними характеристиками граничної міцності в умовах закручування, ніж  $\sigma_b$ ,  $S_e$  і  $S_k$  під час розтягування.

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

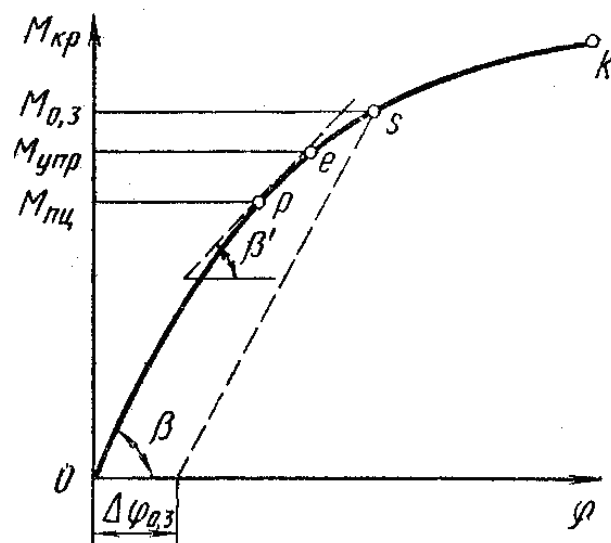
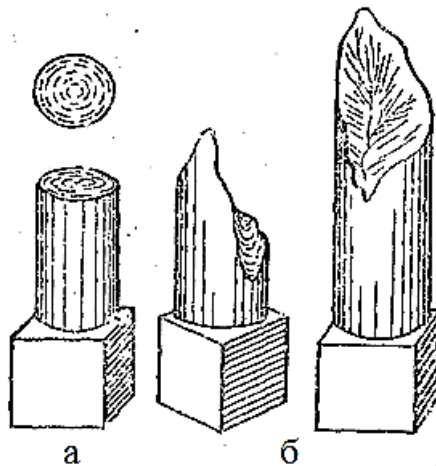


Рис. 4.2. Діаграма закручування [3]

Ця діаграма складається з ділянки пружної (0 – Р) і пластичної деформації (Р – К). 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) [3]*

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) [10], або випробування на навивання (ГОСТ 10447-93) [11].

### **Методика випробувань та розрахункові співвідношення**

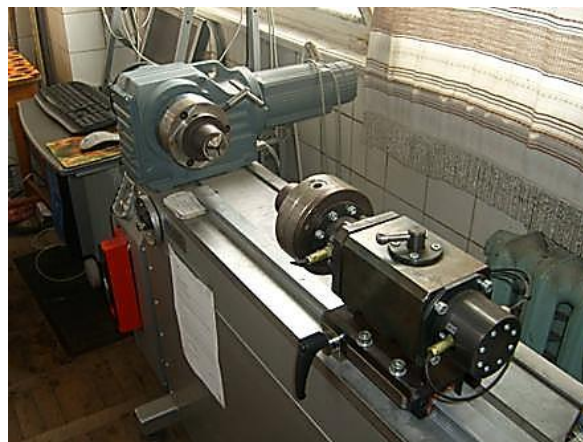
Випробування на закручування проводять на спеціальних машинах, що повинні забезпечувати надійне центрування зразка, плавність навантаження і відсутність згинаючих зусиль, можливість досить точного завдання і вимірювання величини крутного моменту. Використовуються машини з горизонтальним і вертикальним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

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)





а



б

Рис. 4.4. Машини для випробування на закручування: вертикальна [12] (а) та горизонтальна ТТМ-200 [13] (б)

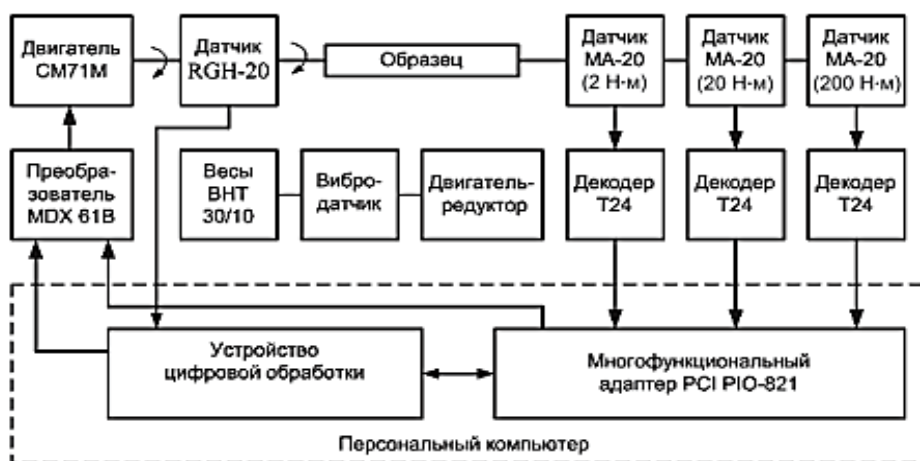


Рис. 4.5. Блок-схема установки ТТМ-200 [13]



а



б

Рис. 4.6. Зовнішній вигляд датчиків кута закручування RGH-20 (а) та крутного моменту MA-20 (б) [13]

Методика випробувань на закручування зразків з будь-яких матеріалів діаметром не менш 5 мм стандартизована (ГОСТ 3565–80) [9]. 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  $\varphi$ ».

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 [1]:

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

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 [1]:

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

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

$\Theta$  – 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  $\beta$  (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  $\tau_{пр}$  – 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 [1]:

$$g = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)d}{2l_0} 100\%, \quad (4.3)$$

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 [1]:

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

Для виконання всіх вищенаведених розрахунків, в тому числі і для проведення графічних побудов використовують програмне забезпечення “TorsionTest”, що іде в комплекті з випробувальною машиною (див. рис.4.8).

Для оперативного контролю результатів розрахунку в графічному вікні програми можуть бути показані характерні лінії і точки:

- лінія пружності;
- лінія пропорційності;
- лінія плинності;
- крутний момент на межі пропорційності;
- крутний момент на межі плинності;
- крутний момент на межі міцності.

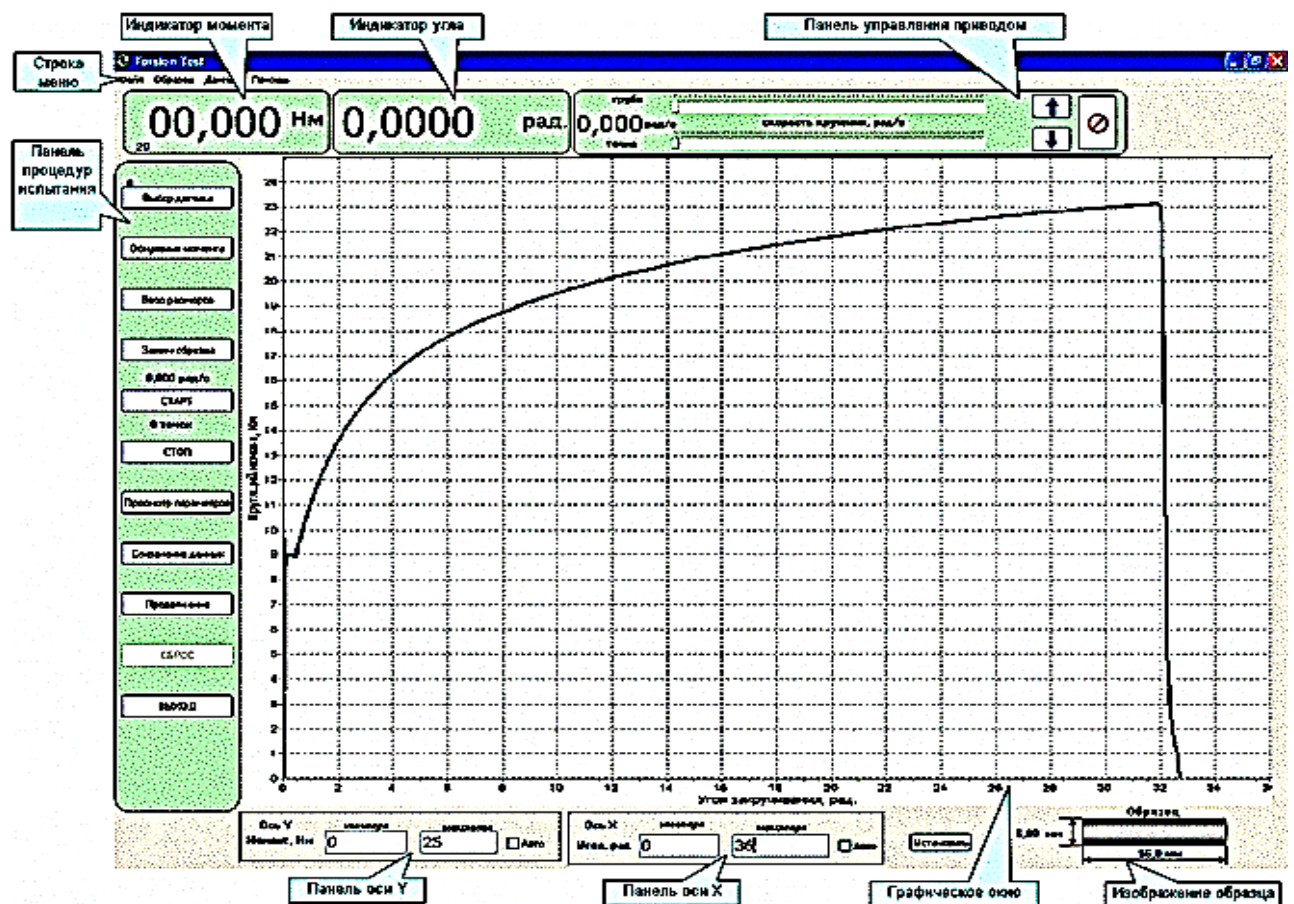


Рис. 4.8. Графічний інтерфейс програми “TorsionTest” [13]

## Хід виконання роботи

Інструкції до виконання роботи наведено у додатку Г.

**Питання для самоконтролю:**

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

**Література:** [1] с. 195-201; [2] с. 144-147.

## Лабораторна 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.

#### Теоретичні відомості

Згин – одна з розповсюджених схем навантаження, яка використовується для визначення механічних властивостей крихких та малопластичних матеріалів [1].

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 [1], [3];
- навантаження прикладається в двох точках через жорстку траверсу на однаковій відстані від опор (див. рис. 5.1,б) – чотирьох-точковий згин [1], [3].

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).

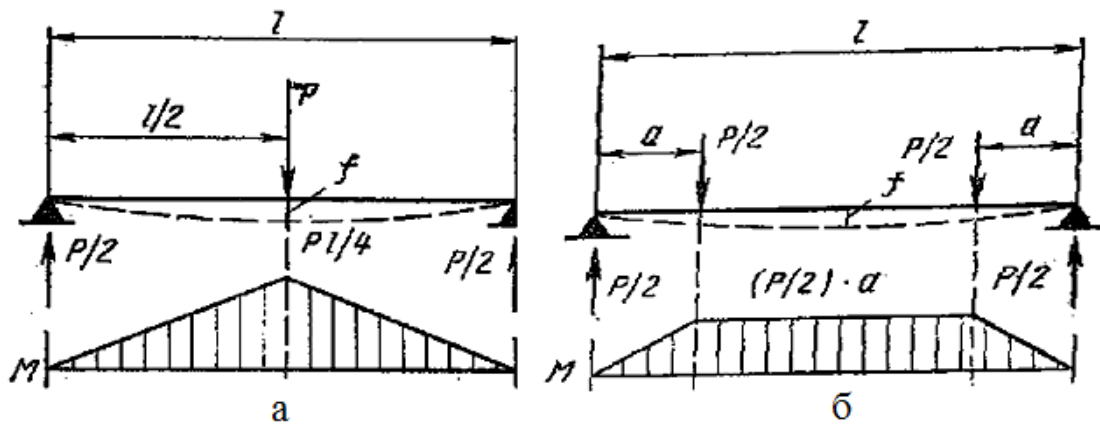


Рис. 5.1. Схеми трьох-точкового згину (а) і чотирьох-точкового згину (б) з епюрами згинаючого моменту  $M$  [3]

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.

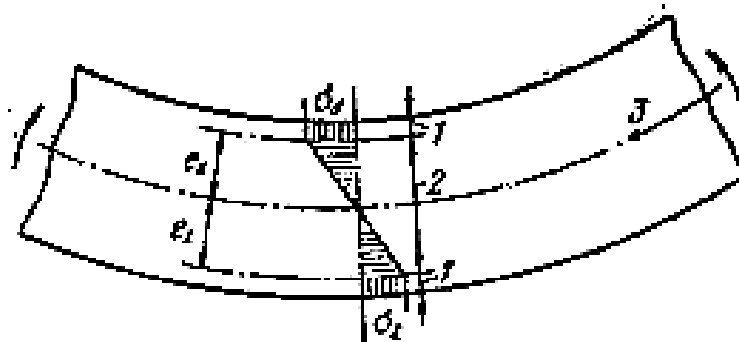


Рис. 5.2. Розподіл напружень у симетричному поперечному перерізі при згині зразка [1]: 1 – пластична деформація; 2 – пружна деформація; 3 – нейтральна вісь

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 [1]:

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

В другому випадку розподіл згинаючих моментів відповідає закону трапеції. На відрізку центральної частини зразка між точками прикладання навантаження  $L$  момент має сталі значення [1]:

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

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 [1]:

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

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.

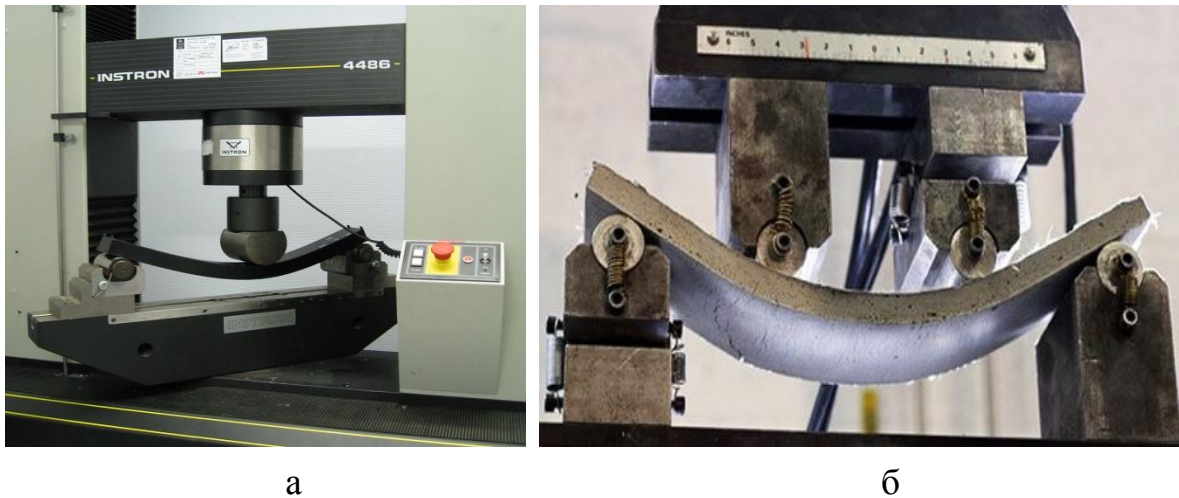
### **Методика випробувань та розрахункові співвідношення**

Випробування на згин можна проводити на будь-якій універсальній випробувальній машині (наприклад, див. рис. 1.2) у відповідності до стандарту ДСТУ ISO 7438:2005 [14]. Зразок встановлюють на опорну плиту в нижньому захваті і деформують згинаючим ножом, 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 роликотидшипників. Зразок згинається при опусканні верхнього чи



підйомі нижнього захвату. Зовнішній вигляд робочого вузла універсальних випробувальних машин наведено на рис. 5.3.



*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 3,5x5x50 мм [3], [14]. Для визначення властивостей виливків з чавуну використовують циліндричні зразки діаметром  $30 \pm 1$  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  $d_0 = 2 - 10$  мм і відстанню між опорами  $l \geq 10d_0$  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 30x30 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 штангелем-циркулем 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).

Відомі величини навантажень  $P_{пц}$ ,  $P_{пр}$ ,  $P_T$ ,  $P_B$  дозволяють визначати межі пропорційності, пружності, плинності і міцності при згині.

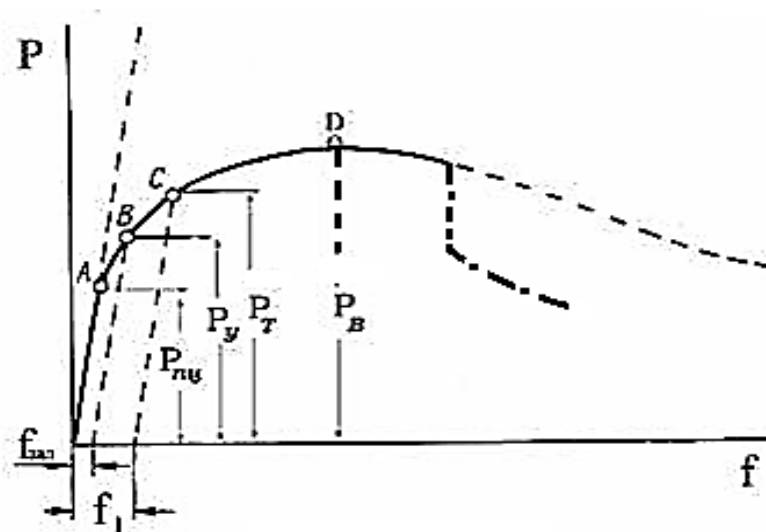


Рис. 5.4. Типова діаграма згину [3]

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]:

$$\varepsilon = \frac{4hf}{l_0^2}, \quad (5.8)$$

де  $\varepsilon$  – 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  $\beta$ , що є додатковим до  $180^\circ$  щодо кута згину  $\alpha$  (рис. 5.5, б). Кут  $\beta$  зростає в міру підвищення деформаційної здатності матеріалу, а кут  $\alpha$  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).

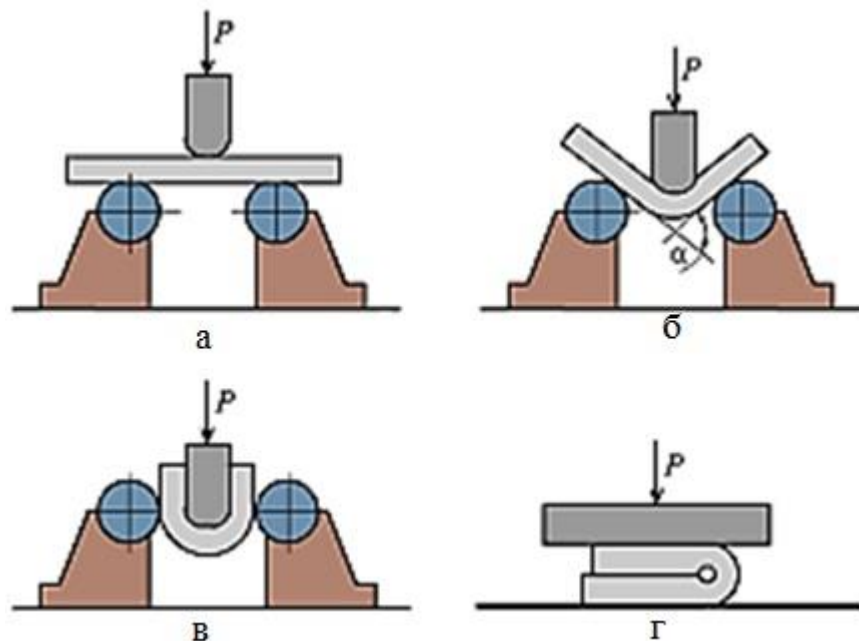


Рис. 5.5. Схеми технологічних проб на згин: а – зразок перед випробуванням; б – загин до визначеного кута; в – загин до паралельності сторін; г – загин до зіткнення сторін [3]

Критерієм придатності продукції може бути:

- заданий кут загину зразків  $\beta$  (рис. 5.5,б);
- поява першої тріщини після згину на кут  $\beta$ , 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.

### Хід виконання роботи

Інструкції до виконання роботи наведено у додатку Д.

**Питання для самоконтролю:**

1. Яка з схем проведення випробувань на статичний згин забезпечує отримання більш точних результатів? Чому?
2. Як відрізняється форма кривої на діаграмі згину крихкого та більш пластичного зразка? Якою буде крива за умови випробування надпластичних матеріалів?
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.

**Література:** [1] с. 190-195; [2] с. 147-149.

## Лабораторна 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. Набути практичного досвіду виконання експерименту та обробки й аналізу результатів.

#### Теоретичні 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 –  $0,1 \text{ с}^{-1}$ , в той самий час, протягом динамічних випробувань ці показники дорівнюють 3-5 м/с та  $100 \text{ с}^{-1}$ , 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].

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).

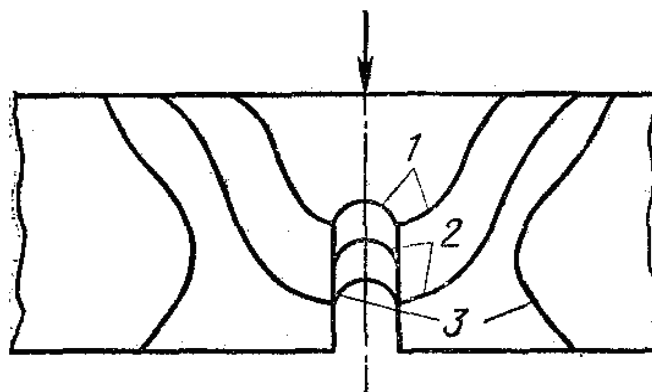


Рис. 6.1. Области (1, 2, 3) поширення пластичної деформації при різній глибині надрізу [3]

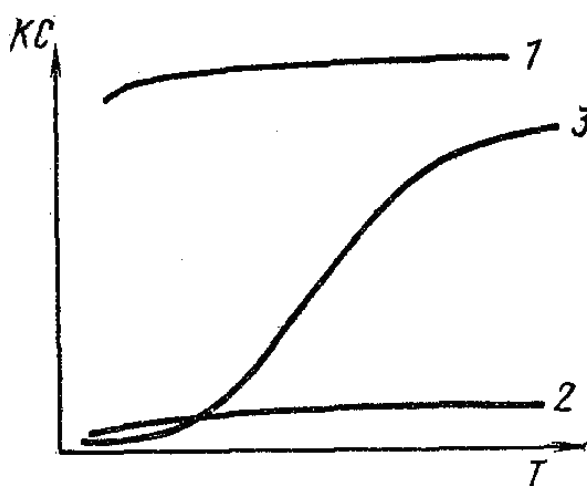


Рис. 6.2. Типи температурних залежностей ударної в'язкості [3]

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]:



$$\chi = \frac{(T_p - T_{BK})}{T_p}, \quad (6.1)$$

Чим більше  $\chi$ , тим меншою є небезпека крихкого руйнування.

Ударна в'язкість позначається двома літерами – КС. Стандартна розмірність ударної в'язкості [Дж/м<sup>2</sup>] або [Дж/см<sup>2</sup>]. У залежності від виду концентратора в зразку в позначення ударної в'язкості вводиться третій індекс ( $U$ ,  $V$  чи  $T$ ). Наприклад, КС $V$  – 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),  $T_{BK}$  можливо визначати за структурою зламу. За температуру в'язко-крихкого переходу приймають температуру появи у зламі перших ділянок крихкого руйнування. Можлива також оцінка  $T_{BK}$  як температури, що відповідає рівним часткам крихких і в'язких ділянок руйнування в зламі.

### **Методика випробувань та розрахункові співвідношення**

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 10х10 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 ( $T$ -подібний концентратор).

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.

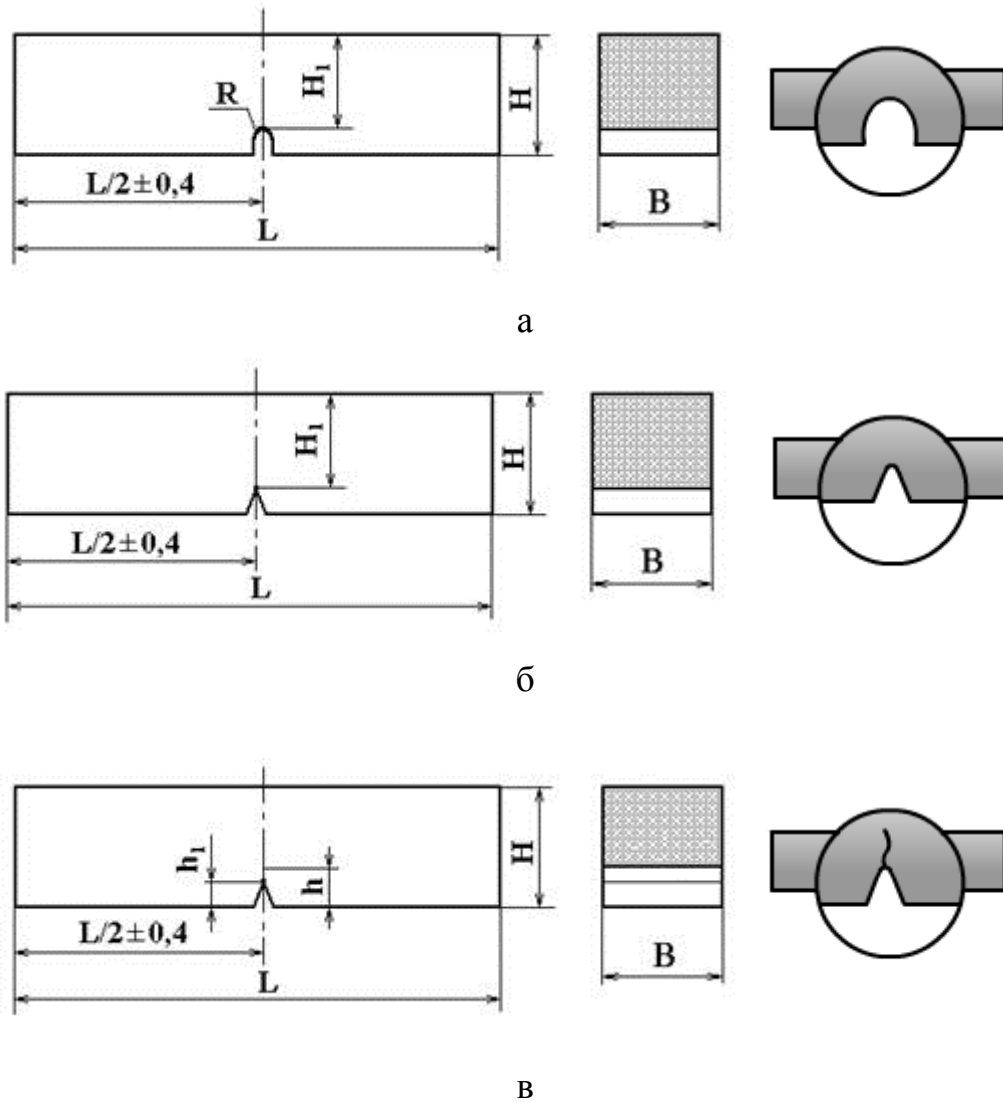


Рис. 6.3. Зразки для випробувань на ударну в'язкість [21]:

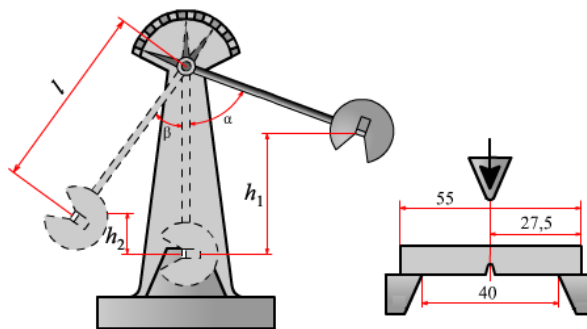
а – з U-подібним концентратором, б – з V-подібним концентратором, в – з T-подібним концентратором

Зразки 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 маятнікового 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  $30^\circ$  і радіусом заокруглення 2 мм.

Маятник копра закріплюється у вихідному верхньому положенні. За шкалою фіксується кут підйому маятника  $\alpha$ . Потім закріплюючий засов виймають, маятник вільно падає під власною вагою, ударяє зразок, згинає і руйнує його, піднімаючись щодо вертикальної осі копра на кут  $\beta$ . 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  $\alpha$ ) і кінцевий

(після злету на кут  $\beta$ ) 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  $\beta$  після руйнування зразка.

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

$$KC = \frac{K}{F}, \quad (6.3)$$

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 2–6°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  $3 - 50^{\circ}\text{C}$  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,  $\text{KCT}^{-60}$  – ударна в'язкість, визначена на зразку з Т-подібним концентратором за температури  $-60^{\circ}\text{C}$ .

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,  $\text{КСU}^{+100} 150/3/7,5$  – ударна в'язкість, визначена на зразку з U-подібним концентратором за температури  $100^{\circ}\text{C}$  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  $\text{KCT}^{+100}$ ).

### **Хід виконання роботи**

Інструкції до виконання роботи наведено у додатку Е.

### **Питання для самоконтролю:**

1. Як змінюється опір руйнуванню матеріалів протягом зростання швидкості деформування? Від чого це залежить?
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? Які області їх застосування?
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?

**Література:** [1] с. 234-242; [2] с. 153-157.

## РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ

### Лабораторна робота № 7

#### Визначення характеристик міцності та в'язкості матеріалів шляхом низькотемпературних випробувань на одновісний розтяг

**Мета роботи:** опанувати методику проведення низькотемпературних випробувань на одновісний розтяг та навчитися визначати мінімальний рівень крихкої міцності і коефіцієнт в'язкості матеріалу.

#### Теоретичні відомості

Одним з найбільш небезпечних видів руйнування матеріалів є крихке (квазікрихке) руйнування, оскільки порушення цілісності елементів конструкцій в цьому випадку відбувається з швидкістю близькою до половини швидкості поширення звукових хвиль у твердому тілі [3].

Здатність матеріалів протидіяти крихкому руйнуванню визначається рівнем його в'язкості. На сьогоднішній день найбільш універсальною характеристикою в'язкості металів та конструкційних сплавів є коефіцієнт в'язкості  $K_B$ , оскільки за допомогою цієї характеристики можливо оцінити рівень в'язкості матеріалів не лише в умовах одновісного розтягу, але і при складному напруженому стані, а також в неоднорідних силових полях, що створюються концентраторами напружень різних типів, включаючи і тріщини втоми [20], [26]. За визначенням [20]:

$$K_B = \frac{R_{mc}}{\sigma_T}, \quad (7.1)$$

де  $R_{mc}$  – мінімальний рівень крихкої міцності (опір мікросколу);

$\sigma_T$  – межа плинності.

Відповідно до існуючих теоретичних уявлень, величина  $R_{mc}$  визначає мінімальний рівень макронапружень розтягу, за якого зародкові тріщини втрачають рівновагу, тобто починається їх катастрофічне зростання [26]. Експериментально встановлено, що мінімальний рівень крихкої міцності  $R_{mc}$  не залежить від температури випробувань, швидкості деформації і незначним чином

зміцнюється під час переходу від одно- до тривісного розтягу. Крім того,  $R_{mc}$  є структурно чутливою характеристикою, оскільки його величина залежить від лінійних розмірів феритних або перлітних зерен, діаметру цементитних частинок чи неметалевих включень тощо. За напруження мікросколу зародкова тріщина, розміри якої в цьому випадку дорівнюють розмірам зерна, має достатню кількість енергії, щоб пройти границю зерна без зупинки та зростати до повного руйнування зразка.

Залежність (7.1) відображає основну концепцію сучасних уявлень щодо фізичної природи квазікрихкого руйнування металів, відповідно до якої пластична деформація є необхідною умовою виникнення зародкових тріщин (елементарних "носіїв" квазікрихкого руйнування), а втрата їх рівноваги пов'язана з критичним рівнем напружень розтягу [20].

Аналіз рівняння (7.1) свідчить, що зменшення в'язкості металу за умови зниження температури випробувань, або збільшення швидкості навантаження обумовлене зростанням  $\sigma_T$  під дією цих факторів. В неоднорідних силових полях, створених концентраторами, величина напруження плинності зростає завдяки ефекту перенапруження, що також призводить до окрихчення металу.

Якщо  $K_\sigma = 1$  матеріал стає крихким та мікроскол, який виник на межі плинності призводить до руйнування. Якщо  $K_\sigma > 1$ , то в матеріалі спочатку починається пластична деформація, він зміцнюється та лише потім відбудеться в'язке руйнування. При  $K_\sigma < 1$  матеріал переокрихчений. Таким чином, чим більшим є коефіцієнт в'язкості, тим вищі можливості матеріалу опиратися виникненню мікросколу [26].

Внаслідок зниження температури зовнішнього середовища різко зростає імовірність крихкого руйнування. Виділяють температурний інтервал, в якому відбуваються швидкі зміни рівня таких механічних характеристик, як межа плинності, напруження руйнування, звуження. Це явище називається в'язко-крихким переходом та спостерігається в ОЦК та ГЦП матеріалах в інтервалі температур від 293 К до 50 К. Ознаками наявності переходу є сукупність наступних факторів [20]:

- напруження руйнування  $S_k$  зменшується в 1,5 рази;
- відносне звуження  $\Psi$  зменшується на порядок (від 0,5-0,8 до 0,02-0,05);
- відбувається зміна морфології фактографічної поверхні (від ямок до фасеток сколу).

Найчастіше для опису залежності рівня механічних характеристик від температури використовують поняття «температура в'язко-крихкого переходу  $T_{вк}$ » [3, 20]. За неї приймають температуру за якої в зламі ознаки в'язкого та крихкого руйнування присутні в рівній мірі. Температура в'язко-крихкого переходу не є константою. Вона суттєво залежить від структури матеріалу та умов випробувань.

За температур, менших  $T_{вк}$  руйнування відривом відбувається раніше, ніж пластична деформація – наявні ознаки крихкого руйнування. За температур більших  $T_{вк}$  пластична деформація передує руйнуванню – присутні ознаки в'язкого руйнування.

### **Методика випробувань та розрахункові співвідношення**

Для визначення міцності та в'язкості металів і конструкційних сплавів, використовуються розривні машини, які обладнані кріокамерами (див. рис. 7.1).

Дослідження проводяться за допомогою випробувань на одновісний розтяг за низьких температур. Інтервал температур випробувань від 77 К до 293 К. Зразок охолоджується рідким азотом та його парами. В першому випадку азот заливають в кріокамеру, що дозволяє знизити температуру зразка до 77 К. Більш високі температури отримують, пропускаючи пари азоту крізь кріокамеру протягом певних проміжків часу. Температура зразка контролюється за допомогою термопар.

На основі цих даних будуються температурні залежності  $\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_T^H$ ),  $S_K$ ,  $\psi_K$  і знаходиться мінімальне напруження квазікрихкого руйнування  $R_{mc}$  в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу (рис. 7.2). Величина коефіцієнта в'язкості  $K_B$  розраховується за формулою (7.1).



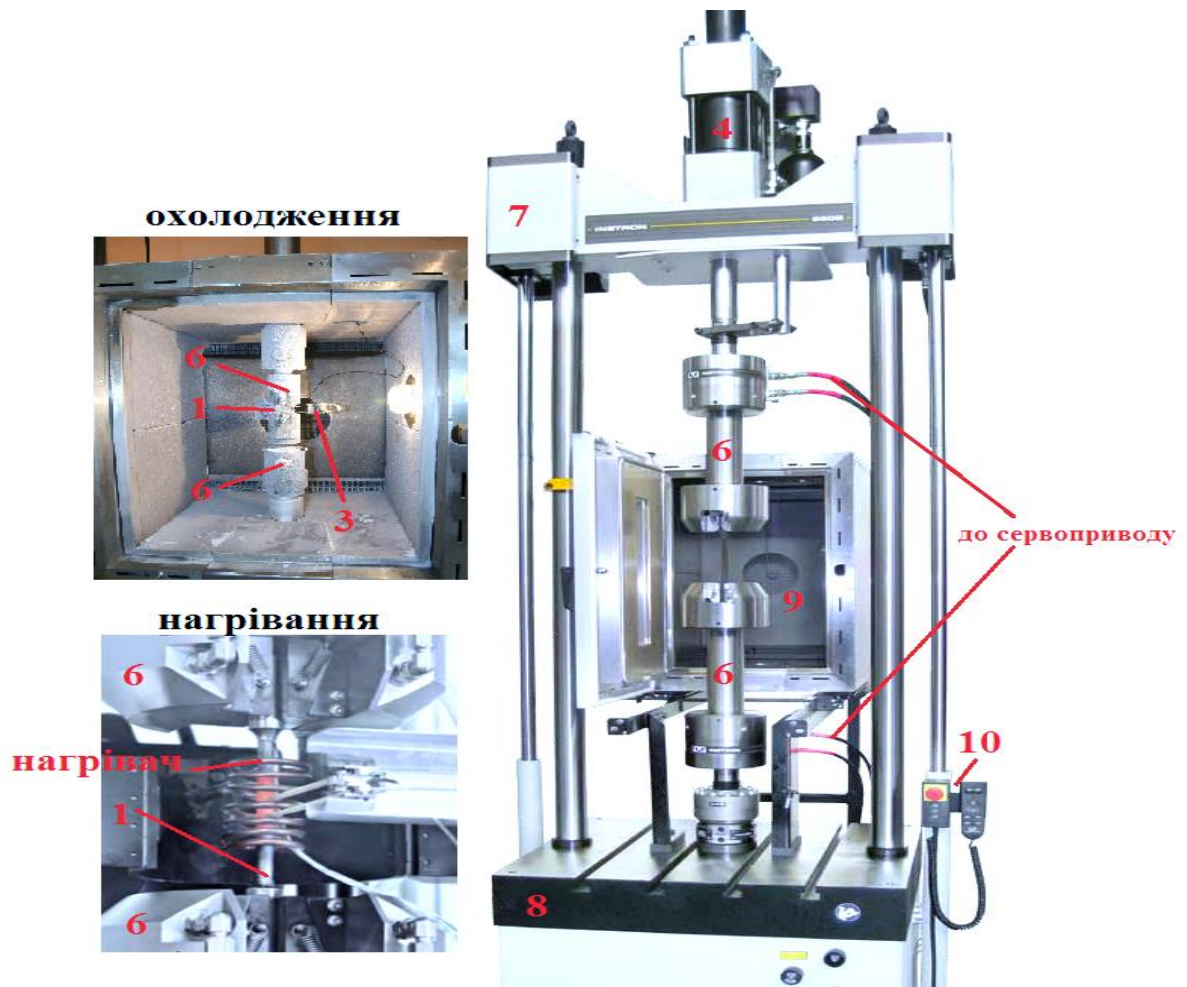


Рис. 7.1. Зовнішній вигляд випробувальної машини INSTRON-8802: 1 – зразок, 2 – пристрій навантаження, 3 – датчик деформації, 4 – датчик навантаження, 5 – діаграмний пристрій, 6 – захват, 7 – рухома траверса, 8 – нерухома траверса, 9 – захисна камера, 10 – блок керування рухом камери та рухомої траверси

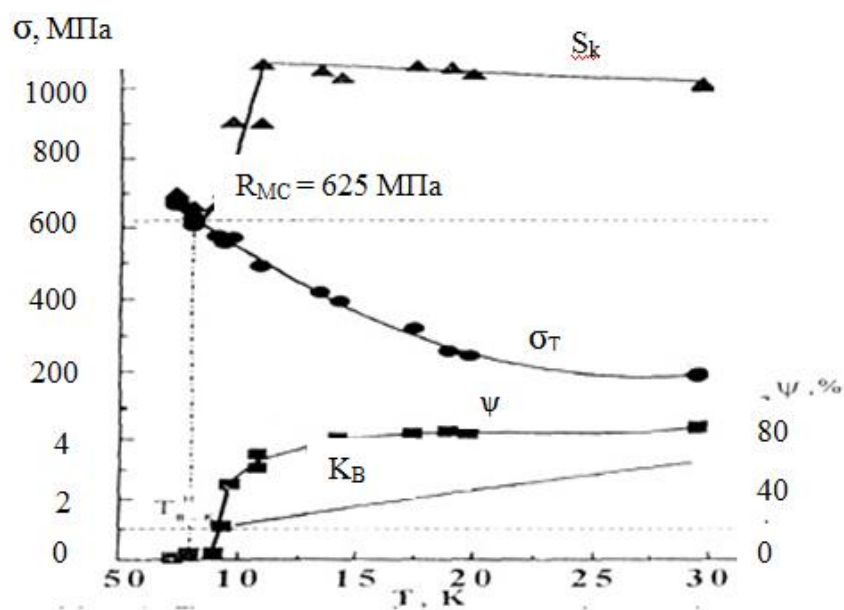


Рис. 7.2. Температурні залежності механічних характеристик заліза [26]

В процесі визначення похибок величин механічних характеристик необхідно користуватися теорією похибок посередніх (непрямих) вимірів. Вираз для визначення відносної похибки  $\sigma_{0,2} (\sigma_T^H)$  за низькотемпературних випробувань має вигляд [27]:

$$\delta_{\sigma_{0,2}} = \sqrt{\left(\frac{b1}{a1+b1T}\right)^2 \Delta T^2 + 4\left(\frac{\Delta d_0}{d_0}\right)^2}, \quad (7.2)$$

де  $a1$  та  $b1$  – коефіцієнти лінійної інтерполяції температурної залежності  $\sigma_{0,2}$  в інтервалі температур в'язко-крихкого переходу;  $d_0$  – початковий діаметр зразка;  $d_0$  – абсолютна похибка визначення діаметру зразка. Типові значення:  $\Delta T = \pm 2$  К,  $\Delta d_0 = \pm 0,01$  мм,  $T = 77$  К.

Похибка для  $R_{mc}$  розраховується наступним чином [27]:

$$\delta_{R_{MC}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_k}{\bar{P}_k}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta d_k}{\bar{d}_k}\right)^2}, \quad (7.3)$$

де  $\bar{P}_k$  – середнє значення зусилля руйнування зразка при  $T_{BK}$ ;  $\bar{d}_k$  – середнє значення діаметра зразка в місці зламу за цієї температури.

Відносна похибка визначення  $K_B$  складає [27]:

$$\delta_{K_B} = \sqrt{(\delta_{R_{MC}})^2 + (\delta_{\sigma_{0,2}})^2}. \quad (7.4)$$

Для приблизної оцінки рівня опору мікросколу та коефіцієнта в'язкості за відсутності можливості експериментального їх визначення можливо скористатися виразами [26]:

$$R_{MC} = \frac{\sigma_B}{1-\psi^2}, \quad (7.5)$$

$$K_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \left( \frac{1}{1-\psi^2} \right). \quad (7.6)$$

Розрахунки за даною формулою проводяться за температур, далеких від  $T_{BK}$ , похибка має становити не більше 30%.

### **Хід виконання роботи**

Інструкції до виконання роботи наведено у додатку Ж.

### **Питання для самоконтролю:**

1. Що таке опір мікросколу та які його основні характеристики?
2. Чому зі зниженням температури характеристики пластичності зменшуються?
3. Який фізичний зміст коефіцієнту в'язкості матеріалів?
4. Які існують ознаки наявності в матеріалі в'язко-крихкого переходу?
5. Чому не у всіх матеріалах спостерігається в'язко-крихкий перехід?
6. Як визначити температуру в'язко-крихкого переходу?

**Література:** [1] с. 211-214; [2] с. 162-163; [4].

## Лабораторна 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  $E_m$ .

#### Теоретичні 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  $\sigma_{NT}$  або руйнування  $\sigma_{NF}$ .

В умовах в'язкого руйнування номінальне напруження загальної плинності  $\sigma_{NT}$  дещо перевищує  $\sigma_T$ , 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  $\sigma_T$ . Температура, за якої  $\sigma_{NF} = \sigma_T$  визначається як температура холодноламкості зразка з концентратором  $T_X$  (рис. 8.1).

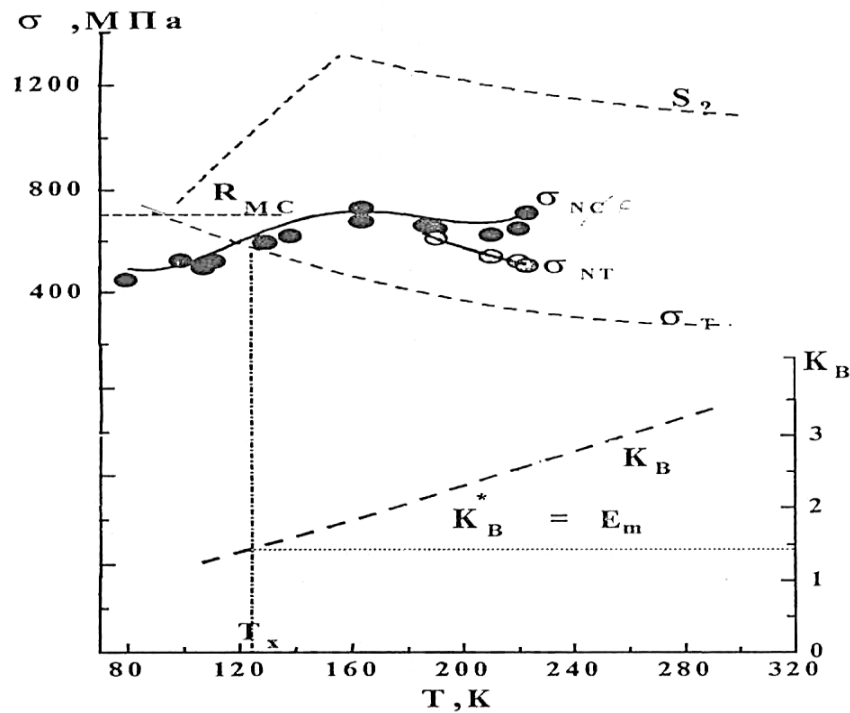


Рис. 8.1. Температурні залежності характеристик плинності і руйнування зразків з концентраторами напружень (суцільні лінії) та механічних властивостей  $\alpha$ -Fe при одновісному розтягу (переривчасті лінії) [28]

Окрихуюча 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.

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  $\sigma_{NF} \leq \sigma_{0.2}$ ) [28]:

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

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]:

$$E_m = K_B \text{ (за умови } T = T_X), \quad (8.4)$$

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.

### Методика та розрахункові співвідношення

Для експериментального визначення тримкості зразків з концентраторами напружень та окрихчуючої 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  $\Delta L$ ».



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  $\sigma_{NF}$ , які діють в мінімальному перерізі зразка в момент руйнування. За наявності "полички" плинності також розраховується величина напруження загальної плинності  $\sigma_{NT}$ .

Номінальне навантаження руйнування  $\sigma_{NF}$  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  $\sigma_{NT}$  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  $K_B$  за цієї температури (рис. 8.1). З цією метою будується температурна залежність номінального напруження руйнування зразка з концентратором  $\sigma_{NF}$ , на яку наноситься залежність  $\sigma_T$  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  $a_I$  і  $b_I$  – коефіцієнти лінійної інтерполяції температурної залежності  $\sigma_T$  навколо температури холодноламкості  $T_X$ ;

$d_o$  – початковий діаметр не надрізаного (гладкого) зразка;

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

$\delta R_{MC}$  – відносна похибка визначення опору мікросколу.

### **Хід виконання роботи**

Інструкції до виконання роботи наведено у додатку К.

### **Питання для самоконтролю:**

1. Що таке тримкість зразка?
2. Як впливає на тримкість зразка поява конструктивного концентратора?  
Чому?
3. Що таке температура холодноламкості? Як вона відрізняється від температури в'язко-крихкого переходу?
4. Який фізичний зміст  $E_m$  – окрихчуючої дії концентратора напружень?
5. Що таке Нейберівський коефіцієнт концентрації напружень?
6. Який мінімальний коефіцієнт в'язкості повинен бути у матеріалів, з яких виготовляють деталі конструкцій? Чому?

**Література:** [2] с. 162-163; [5].



## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

### Використана 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 (EN 10002-1:2001, IDT): ДСТУ EN 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 (EN 10002-5:1991, IDT): ДСТУ EN 10002-5:2006 [Текст]. – Чинний від 2007-07-01. – Держспоживстандарт України. – 28 с.
7. Метали. Метод випробування на розтяг металів і сплавів за низьких та криогенних температур: ДСТУ 7305:2013 [Електронний ресурс]. – Чинний від 2014-01-01. – Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=59397](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=59397). – Дата доступу 10.03.2019. – Повний текст за окрему плату.
8. Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний: Межгосударственный стандарт ГОСТ 7564-97 [Електронний ресурс]. – Чинний від 1999-01-01. – Режим доступу: [https://znaytovar.ru/gost/2/GOST\\_756497\\_Prokat\\_Obshhie\\_pra.html](https://znaytovar.ru/gost/2/GOST_756497_Prokat_Obshhie_pra.html). – Дата доступу 10.03.2019. – Повний текст за окрему плату.
9. Металлы. Метод испытания на кручение: ГОСТ 3565-80 [Текст]. – Введен в действие 1980-08-11. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. – 17 с.

10. Проволока. Метод испытания на скручивание: ГОСТ 1545-80 [Текст]. – Введен в действие 1982-07-01. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам. – 3 с.
11. . 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.
12. Torsion Test of Steel Sample [видеозапис]: Испытание стандартного образца на кручение / ФГБОУВПО «Московский государственный индустриальный университет». – Москва, 2012. – Тривалість 8:07. – Режим доступу: <https://youtu.be/nwaRDbWUSvU>. – Дата доступу 10.03.2019. – Вільний доступ.
13. 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.
14. Матеріали металеві. Випробування на згин (ISO 7438:1985, IDT): ДСТУ ISO 7438:2005 [Електронний ресурс]. – Чинний від 2007-06-01. – Режим доступу: [http://ksv.do.am/GOST/DSTY\\_ALL/DSTY1/dsty\\_iso\\_7438-2005.pdf](http://ksv.do.am/GOST/DSTY_ALL/DSTY1/dsty_iso_7438-2005.pdf). – Дата доступу 10.03.2019. – Вільний доступ.
15. Випробування на згинання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Випробування\\_на\\_згинання](https://uk.wikipedia.org/wiki/Випробування_на_згинання). – Дата доступу 10.03.2019.
16. Эластичный бетон: характеристики и виды [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nastroike.com/stroitelnye-materialy/elasticznyj-beton-harakteristiki-i-vidy>. – Дата доступу 10.03.2019.
17. Матеріали металеві. Метод випробування на згин (ГОСТ 14019-2003 (ИСО 7438:1985), IDT): ДСТУ ГОСТ 14019:2004 [Електронний ресурс]. – Чинний від 2007-06-01. – Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=51760](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=51760). – Дата доступу 10.03.2019. – Повний текст за окрему плату.
18. 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.
19. Проволока. Метод испытания на перегиб: ГОСТ 1579-93 [Електронний ресурс]. – Чинний від 1997-01-01. – Режим доступу: <http://internet-law.ru/gosts/gost/2846/>. – Дата доступу 10.03.2019. – Повний текст за окрему плату.

20. Мешков Ю.Я. Физические основы разрушения стальных конструкций / Ю.Я. Мешков. – К.: Наукова думка, 1981. – 240 с.
21. 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.
22. Матеріали металеві. Випробування на ударний вигин за Шарпі. Частина 1. Метод випробування (EN 10045-1:1990, IDT): ДСТУ EN 10045-1:2006 [Електронний ресурс]. – Чинний від 2007-07-01. – Режим доступу: [http://document.ua/materiali-metalevi\\_viprobuvannja-na-udarnii-vigin-za-sharpi-nor27901.html](http://document.ua/materiali-metalevi_viprobuvannja-na-udarnii-vigin-za-sharpi-nor27901.html). – Дата доступу 10.03.2019. – Повний текст за окрему плату.
23. Копры маятниковые. Технические условия: ГОСТ 10708-82 [Текст]. – Введен в действие 1983-07-01. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 8 с.
24. Копер маятниковый МК-300 (аналог ИО 5003) с пневмоподъемом молота [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://unitechnology.ru/catalog/kopry-mayatnikovye/koper-mayatnikovyy-mk-300-analog-io-5003-s-pnevmapodemom-molota>. – Дата доступу 10.03.2019.
25. Разрушающие испытания [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://ndtgrad.ru/article\\_99\\_razrushayoushie-ispytaniya.htm](http://ndtgrad.ru/article_99_razrushayoushie-ispytaniya.htm). – Дата доступу 10.03.2019.
26. Котречко С.А. Физические основы оценки вязкости конструкционных сталей / С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, Г.С. Меттус // ФММ. – 1992. – № 11. – С. 135-140.
27. Теорія похибок і обробка результатів вимірювань у фізичній лабораторії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zfftt.kpi.ua/images/books/TheorOfErrors.pdf>. – Дата доступу 10.03.2019.
28. 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.

### **Рекомендована література**

1. Бернштейн М.Л. Механические свойства металлов / М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский // М.: Metallurgiya, 1979. – 496 с.
2. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: навч. посібник / С.С. Дяченко. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. – 226 с.
3. Мешков Ю.Я. Физические основы разрушения стальных конструкций / Ю.Я. Мешков. – К.: Наукова думка, 1981. – 240 с.
4. 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.
5. Гуль Ю.П. Структура и механические свойства металлов и сплавов: Учебное пособие / Ю.П. Гуль, В.С. Чмелева – Днепропетровск: НМетАУ, 2005. – 40 с.

## ДОДАТКИ

### ПРОТОКОЛ

#### Лабораторної роботи №1

Студента _____	групи _____
Допуск _____	Підпис _____
	викладача _____
Захищено з _____	Підпис _____
оцінкою _____ Дата _____	викладача _____

#### Тема роботи:

#### Експериментальне визначення механічних характеристик за допомогою механічних випробувань

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

#### Обладнання та устаткування

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

#### Хід 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.

**Висновки:** \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

## ПРОТОКОЛ

### Лабораторної роботи №2

Студента \_\_\_\_\_ групи \_\_\_\_\_  
Допуск \_\_\_\_\_ Підпис \_\_\_\_\_  
викладача \_\_\_\_\_  
Захищено з \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_ Підпис \_\_\_\_\_  
оцінкою \_\_\_\_\_ викладача \_\_\_\_\_

### Тема роботи:

#### Визначення механічних характеристик матеріалів за допомогою статичних випробувань на одновісний розтяг

**Мета роботи:** навчитись визначати істинні та умовні характеристики міцності та пластичності матеріалів за результатами випробувань стандартних зразків на статичний одновісний розтяг.

#### Обладнання та устаткування

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

#### Хід виконання роботи

1. Ознайомитись з конструкцією та принципом роботи універсальної випробувальної машини (розривної машини).
2. Виміряти розміри зразка. Встановити зразок в захвати 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  $\sigma_t$ ,  $\sigma_s$ ,  $S_k$ ,  $e_p$ ,  $\Psi_k$ .
6. Зробити висновки щодо рівня міцності, пружності, пластичності та здатності до деформаційного зміцнення досліджуваного матеріалу.

### Результати розрахунків

Матеріал: \_\_\_\_\_

Розміри зразків: база  $L_0 =$  \_\_\_\_\_ мм, діаметр зразка  $d_0 =$  \_\_\_\_\_ мм

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

Абсолютні похибки вимірів:

- зусиль ( $P_m^H, P_{max}, P_K$ )  $\pm 1$  Н
- діаметра зразка  $d_0 \pm 0,01$  мм
- бази  $L_0 \pm 0,1$  мм
- діаметра зразка в місті зламу  $d_K \pm 0,05$  мм
- рівномірного видовження  $\Delta L_p \pm 0,05$  мм

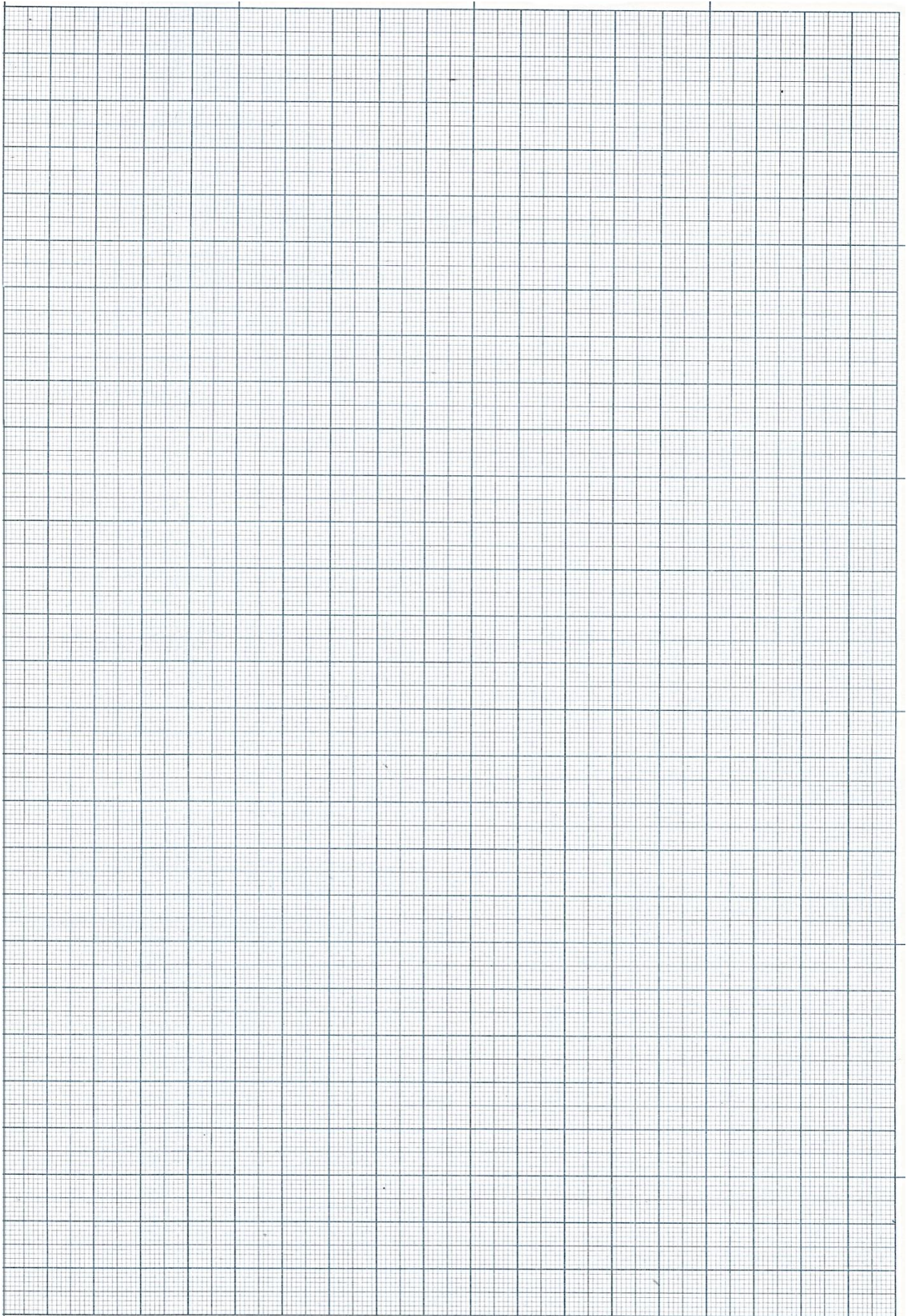
### Вихідні дані

$P_{pc},$ кН	$P_{np},$ кН	$P_m^6,$ кН	$P_{0,2},$ кН	$P_{max},$ кН	$P_K,$ кН	$\Delta U_m,$ мм	$\Delta U_p,$ мм	$\Delta U_K,$ мм	$d_K,$ мм

### Результати розрахунків

$\sigma_{пц},$ МПа	$\sigma_{пр},$ МПа	$\sigma_T^B,$ МПа	$\sigma_{02},$ МПа	$\sigma_B,$ МПа	$\sigma_K,$ МПа	$\delta_T,$	$\delta_p,$	$\delta_K,$
				$S_B,$ МПа	$S_K,$ МПа	$e_T$	$e_p$	$e_K$
$\Psi_K,$ %	n	$\sigma_{02}/\sigma_B$	$E,$ МПа	$\delta_{\sigma_m^H},$ %	$\delta_{\sigma_B},$ %	$\delta_{S_K},$ %	$\delta_{e_p},$ %	$\delta_{\Psi},$ %





### **Аналіз результатів повинен включати:**

- встановлені значення меж плинності, міцності та руйнування;
- рівень пластичності досліджуваного матеріалу;
- схильність матеріалу до деформаційного зміцнення;
- рівень зміцнення матеріалу;
- величину модуля Юнга;
- точність отриманих результатів та заходи щодо її забезпечення.

### Висновки:

[illegible]

## ПРОТОКОЛ

### Лабораторної роботи № 3

Студента _____	групи _____
Допуск _____	Підпис _____
	викладача _____
Захищено з _____	Підпис _____
оцінкою _____ Дата _____	викладача _____

### Тема роботи:

#### Побудова істинних та умовних діаграм деформації матеріалів за умов одновісного стискання

**Мета роботи:** навчитись визначати істинні та умовні характеристики міцності та пластичності за результатами випробувань стандартних зразків на статичний одновісний стиск. Визначити особливості випробувань на стиск порівняно з випробуваннями на розтяг. Набути практичного досвіду виконання експерименту та обробки і аналізу результатів.

### Обладнання та устаткування:

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

### Хід 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  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

2. Після вимірювання розмірів робочої частини зразка, встановити зразок в захват 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 штангелю-циркулем 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.

#### **Покрокова інструкція до виконання розрахункової частини роботи:**

1) відкрити первинну діаграму стискання у координатах «зусилля – час» за допомогою програми Excel;

2) занести у відкритий файл інформацію щодо геометрії досліджуваного зразку (діаметр та висоту циліндру);

3) перерахувати наявні значення зусиль (дані у кН) в Н шляхом множення відповідних значень на 1000;

4) розрахувати масив значень відносної деформації шляхом ділення поточного переміщення на вихідну висоту зразка. Переміщення визначається множенням швидкості стискання (2,5 мм/хвилина) на поточне значення часу. В розрахунках швидкість стискання необхідно використовувати в мм/с;

5) розрахувати відносне напруження шляхом ділення поточного значення зусилля на вихідну площу поперечного перерізу зразка;

6) побудувати умовну діаграму «напруження – відносна деформація», відкладаючи по вісі абсцис значення відносної деформації, а по вісі ординат – відповідні відносні напруження;

7) на побудованій діаграмі визначити прямолінійну ділянку, що відповідає області пружної деформації зразка. Для цього визначити початкові і кінцеві точки необхідного відрізка і між ними побудувати лінію тренду. Визначити і записати рівняння лінії тренду, яке відповідає фізичному рівнянню  $\sigma = E_{\text{умовне}}\epsilon + b$ , де  $E_{\text{умовне}}$  – умовний модуль пружності системи «машина-зразок» для відповідних розмірів випробуваного зразка;

8) визначити пластичну деформацію шляхом віднімання від розрахованої сумарної деформації пружної складової. Тобто необхідно провести розрахунки за формулою  $\epsilon_{\text{пласт}} = \epsilon - (\sigma - b)/k$ . Де  $\sigma$ ,  $b$ ,  $k$  – параметри розрахованого рівняння лінії тренду;

9) визначити з умовної діаграми стискання стандартні механічні характеристики. Для визначення границі текучості необхідно знайти в колонці з масивом пластичної деформації значення 0,002 і виявити відповідну цьому значенню величину напруження. Руйнуюче напруження визначити по останній точці на діаграмі;

10) побудувати умовну діаграму навантаження без урахування пружної частини;

11) розрахувати істинне напруження і істинну деформацію;

12) побудувати істинну діаграму «напруження – відносна деформація»

13) визначити величину модуля Юнга.

14) роздрукувати першу сторінку розрахунків з розміщеними на ній графіками пружної деформації, умовної та істинної діаграми деформації

#### **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.

#### **ВИСНОВКИ:** \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

## ПРОТОКОЛ Лабораторної роботи № 4

Студента _____	групи _____
Допуск _____	Підпис _____ викладача
Захищено з _____	Підпис _____
оцінкою _____	викладача _____
Дата _____	

### Тема роботи:

#### Визначення механічних характеристик матеріалів за допомогою випробувань на закручування

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

#### Обладнання та устаткування

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

#### Хід 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  $\tau_b$ , 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 за допомогою програми «**TorsionCalc**»:

##### 1. Розрахунок модуля зсуву:

Для розрахунку модуля зсуву при закручуванні необхідно, перш за все, на експериментальній діаграмі виділити початкову лінійну (пружну) ділянку. Для цього в програмі "TorsionCalc" передбачено розтягування діаграми по осях кута закручування (X) і крутного моменту (Y). Потім необхідно ввести мінімальне значення моменту (зазвичай 0), що визначає початок лінійної ділянки і

максимальне значення моменту, що фіксує кінець цієї ділянки. Далі для вибраної ділянки діаграми програма "TorsionCalc" методом найменших квадратів визначає коефіцієнт  $K_{\text{пр}}$  (рівний тангенсу кута нахилу лінійної ділянки):

$$K_{\text{пр}} = \frac{\Delta M}{\Delta \varphi},$$

де  $\Delta M$  - приріст моменту, Нм;  $\Delta \varphi$  - приріст кута, рад.

Програма "TorsionCalc" надає можливість показу розрахованої лінії (лінії пружності) в графічному вікні з метою експрес оцінки відповідності розрахунку отриманим експериментальним даним (зелена лінія на Рис. Г.1).

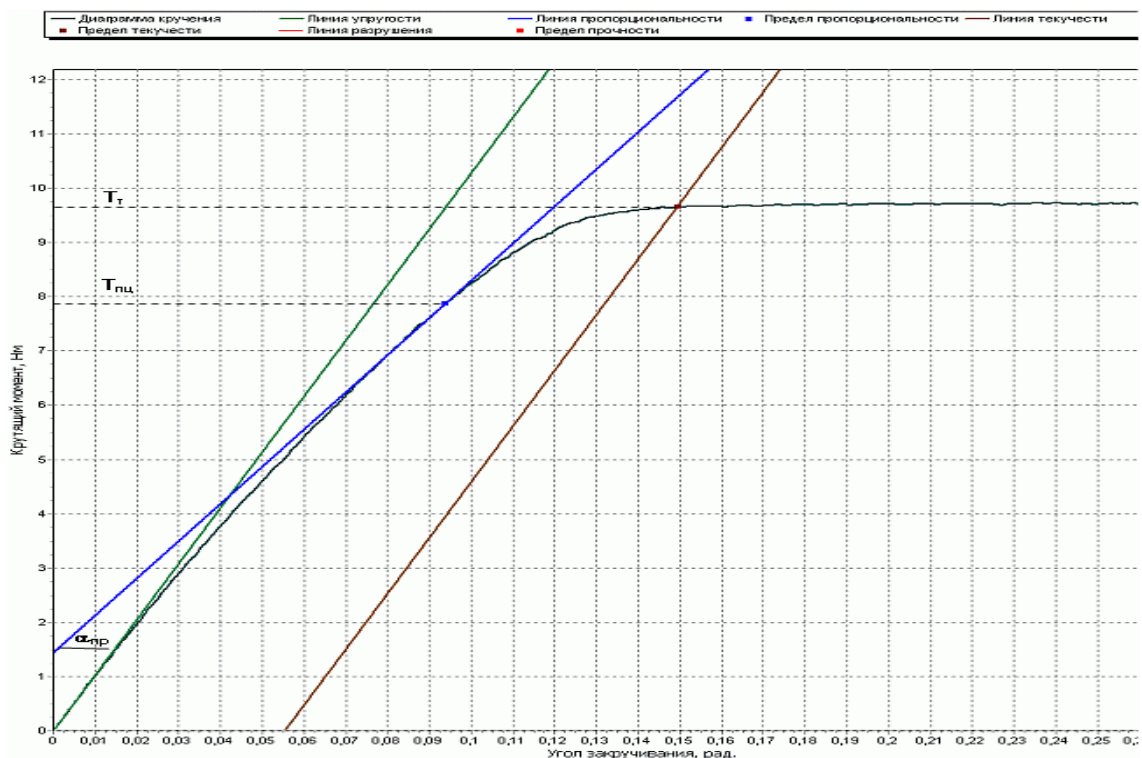


Рис. Г.1. Вікно з розрахунковими та експериментальними даними [13]

Модуль пружності при крученні (модуль зсуву)  $G$  в МПа обчислюється за формулою (4.4), або  $G = K_{\text{пр}} \cdot \frac{32 L}{\pi d^4}$ :

## 2. Визначення межі пропорційності

З урахуванням коефіцієнта  $K_{\text{пр}}$ , визначається кут нахилу допоміжної лінії:

$$\alpha_{\text{пр}} = 1,5 \arctg(K_{\text{пр}}) - 45^{\circ}$$

Паралельно цій лінії проводиться дотична (лінія пропорційності) в зоні появи нелінійності на діаграмі (синя лінія на рис.Г.1). Ордината точки дотику відповідає моменту при межі пропорційності  $\tau_{\text{пл}}$ . Межа пропорційності при крученні в МПа обчислюється за формулою (4.1).

### 3. Визначення межі текучості

Спочатку визначається кут закручування, що відповідає залишковій деформації у  $\tau = 0,3 \%$  за формулою:  $\varphi = \frac{2\tau \cdot L}{d \cdot 100}$ . На діаграмі крутіння проводиться лінія плинності (коричнева крива на рис. Г.1) паралельна лінії пружності, але зміщена вправо на кут закручування  $\varphi$ , відповідний залишковій деформації. Ордината точки перетину лінії плинності і діаграми крутіння є значенням моменту при межі плинності  $M_t$ . Межа текучості при крученні обчислюється за формулою (4.1).

### 4. Визначення умовної межі міцності

Умовна межа міцності при закручуванні в МПа обчислюється за формулою, аналогічній (4.1), лише крутний момент береться максимальний

### 5. Визначення істинної межі міцності

Для визначення істинної межі міцності необхідно визначити параметри кінцевої ділянки діаграми закручування перед руйнуванням зразка. У програмі "TorsionCalc" передбачено введення значень мінімального кута (початок ділянки) і максимального кута закручування (кінець ділянки). За експериментальними даними, що потрапляють в цю ділянку, методом найменших квадратів знаходиться похідна  $\left(\frac{dM}{d\varphi}\right)$  (червона лінія на рис. Г.1). Істинна межа міцності при закручуванні в МПа обчислюється за формулою:

$$\tau_B = \frac{4}{\pi d^3} \left[ 3M_k + \varphi_k \left( \frac{dM}{d\varphi} \right)_k \right]$$

де  $\varphi_k$  - кут закручування при руйнуванні зразка.

### 6. Визначення максимального залишкового зсуву

Максимальний залишковий зсув (залишкова деформація), якщо його величина не перевищує 0,1 рад, обчислюється за формулою:

$$\tau_{max} = \frac{\varphi_k \cdot d}{2L}$$

При великій деформації максимальний залишковий зсув визначається за формулою:

$$\tau_{max} = \arctg \frac{\varphi_k \cdot d}{2L}$$

5. Зробити висновки щодо рівня пластичності досліджуваного матеріалу та механізму його руйнування.

6. Розрахувати похибки визначення основних механічних характеристик.

7. Зробити висновки щодо рівня міцності, пружності, пластичності досліджуваного матеріалу.



### Результати розрахунків

Матеріал: \_\_\_\_\_

Умови навантаження: швидкість обертання \_\_\_\_\_

Абсолютні похибки вимірів:

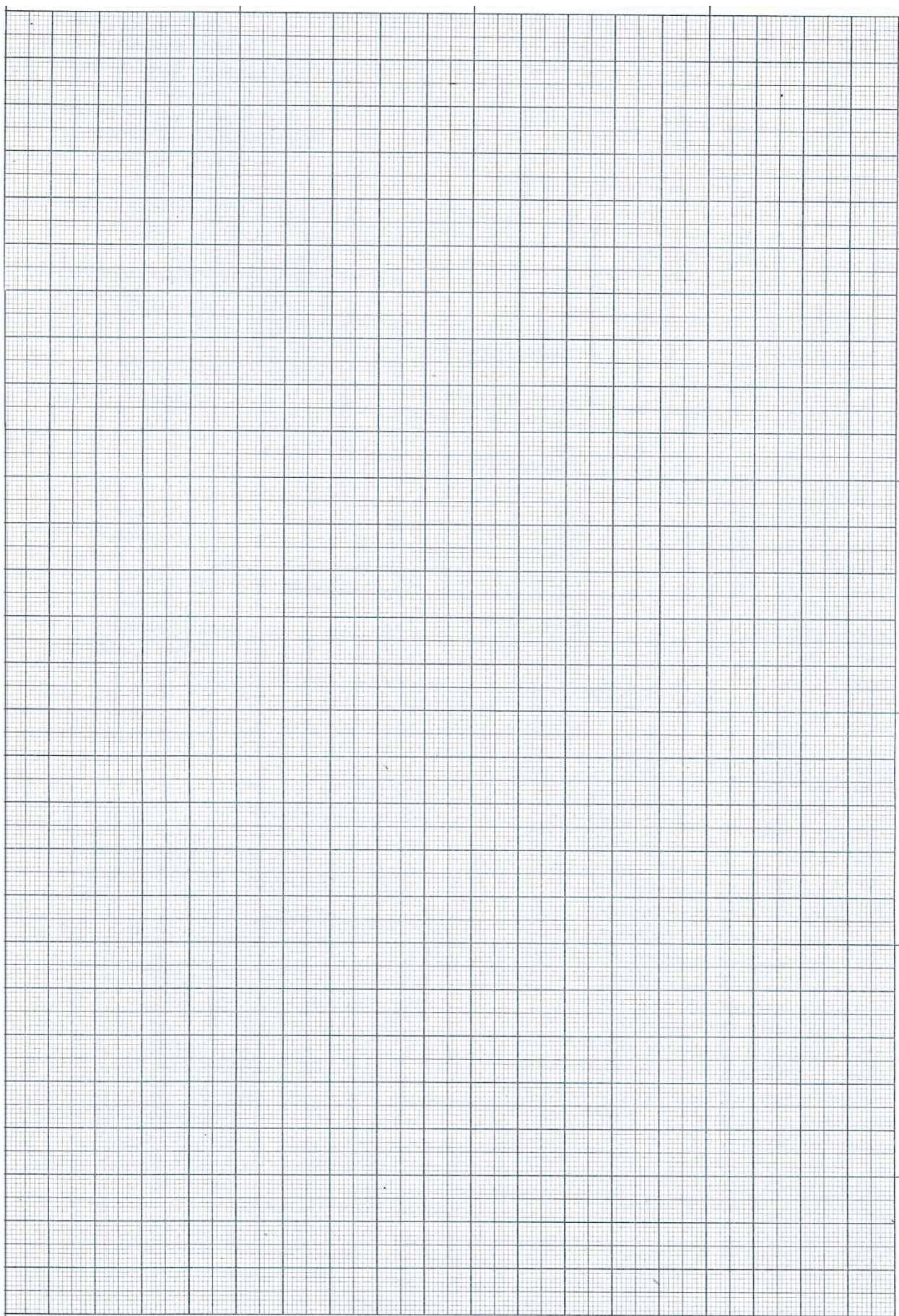
- зусиль ( $P_T^H$ ,  $P_{max}$ ,  $P_K$ )  $\pm 1$  Н
- діаметра зразка  $d_0 \pm 0,01$  мм
- бази  $L_0 \pm 0,1$  мм
- діаметра зразка в місті зламу  $d_k \pm 0,05$  мм

### Вихідні дані

Діаметр зразка, мм	Довжина робочої частини, мм

### Результати розрахунків

$\tau_{шц}$ , МПа	$\tau_{пр}$ , МПа	$\tau_{03}$ , МПа	$\tau_{03,розр}$ , МПа	$t_v$ , МПа	$g$ ,	$g_{пр}$	$G$ , ГПа
<b>Похибки</b>							



**Аналіз результатів повинен включати:**

- діаграму навантаження;
- рівні меж плинності, міцності матеріалу;
- рівень пластичності;
- величину пружних характеристик;
- точність отриманих результатів.

**Висновки:** \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---

**ПРОТОКОЛ**  
**Лабораторної роботи № 5**

Студента _____	групи _____
Допуск _____	Підпис _____
	викладача _____
Захищено з _____	Підпис _____
оцінкою _____	викладача _____
Дата _____	

**Тема роботи:**

**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.

**Обладнання та устаткування:**

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

**Хід виконання роботи:**

2. Виміряти розміри зразка для випробувань. Встановити на зразок датчик переміщення.
3. Встановити зразок в силовий ланцюг випробувальної машини, перевірити нульове положення вимірювальної системи та провести випробування.
4. За отриманою первинною діаграмою, використовуючи відповідні формули, розрахувати всі необхідні механічні характеристики матеріалу та його модуль Юнга.
5. 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.

**Висновки:** \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

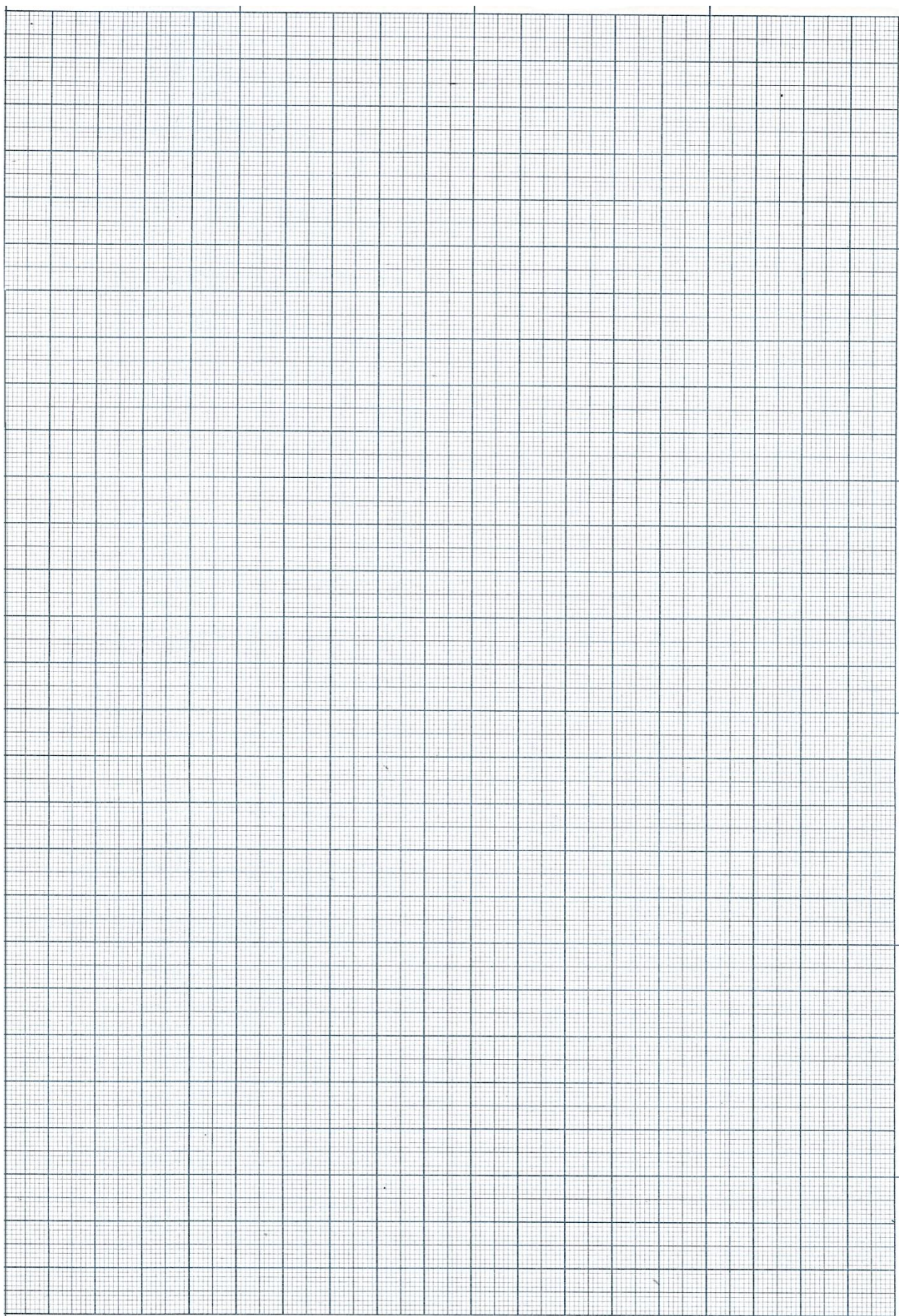
---

---

---

---





## ПРОТОКОЛ

### Лабораторної роботи № 6

Студента _____	групи _____
Допуск _____	Підпис _____
	викладача _____
Захищено з _____	Підпис _____
оцінкою _____ Дата _____	викладача _____

### Тема роботи:

#### Визначення механічних характеристик матеріалів за результатами динамічних випробувань на згин

**Мета роботи:** ознайомитися з конструкцією машини та методиками визначення ударної в'язкості матеріалів. Набути практичного досвіду виконання експерименту та обробки й аналізу результатів.

#### Обладнання та устаткування

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

#### Хід 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  $-100^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$ .
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;

Визначення механічних характеристик матеріалів  
при динамічних випробуваннях на згин

- характер зміни рівня тріщиностійкості з температурою;
- оцінка наявності в'язко-крихкого переходу в досліджуваному інтервалі температур;
- засоби забезпечення отримання достовірних результатів випробувань.

**Висновки:** \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---



## ПРОТОКОЛ

### Лабораторної роботи № 7

Студента _____	групи _____
Допуск _____	Підпис викладача _____
Захищено з оцінкою _____	Дата _____
	Підпис викладача _____

#### Тема роботи:

#### Визначення характеристик міцності та в'язкості матеріалів шляхом низькотемпературних випробувань на одновісний розтяг

**Мета роботи:** опанувати методику проведення низькотемпературних випробувань на одновісний розтяг та навчитися визначати мінімальний рівень крихкої міцності і коефіцієнт в'язкості.

#### Обладнання та устаткування

1. Універсальна випробувальна машина з кріокамерою.
2. Охолоджувальна суміш.
3. Зразки для випробувань на розтяг за низьких температур.

#### Хід виконання роботи

1. Ознайомитись з пультом керування розривної машини та будовою кріокамери.
2. Виміряти довжину робочої частини (базу) та діаметр зразка;
3. Встановити зразок в захват розривної машини та подати в кріокамеру пари азоту, або залити рідкий азот.
4. Контролюючи температуру зразка, досягти заданої її величини. Витримати за цієї температури зразок протягом 5-7 хвилин і провести випробування, записавши діаграму розтягу зразка.
5. Виміряти за допомогою інструментального мікроскопа діаметр зразка в місці зламу. Оцінити похибку визначення  $d_k$ .
6. Розрахувати значення  $\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_T^H$ ),  $S_K$ ,  $\psi$  та побудувати їх температурні залежності.

Визначення характеристик міцності та в'язкості матеріалів шляхом низькотемпературних випробувань на одновісний розтяг

7. Визначити величину мінімального рівня крихкої міцності  $R_{mc}$  та побудувати температурну залежність коефіцієнта в'язкості  $K_B$ .

8. Провести оцінювальні розрахунки рівнів  $R_{mc}$  та  $K_B$  та порівняти зі значеннями отриманими графічно.

9. Встановити наявність/відсутність в'язко-крихкого переходу та визначити температуру  $T_{вк}$ .

10. Зробити висновки стосовно рівня визначених характеристик.

### Результати розрахунків

**Матеріал:** \_\_\_\_\_

**Розміри зразків:** база  $L_0$ =\_\_\_\_\_ мм, діаметр зразка  $d_0$ =\_\_\_\_\_ мм

**Умови навантаження:** швидкість навантаження  $U_H$ =2 мм/хв.

**Абсолютні похибки вимірів:**

- зусиль ( $P_{0,2}$ ,  $P_{max}$ ,  $P_K$ )  $\pm 1$ Н
- діаметра зразка  $d_0 \pm 0,01$  мм
- бази  $L_0 \pm 0,1$  мм
- діаметра зразка в місті зламу  $d_K \pm 0,05$  мм
- рівномірного видовження  $\Delta L_p \pm 0,05$  мм
- температури зразка  $T \pm 2$ К

### Вихідні дані

	$T, K$	$P_{0,2}, KН$	$P_{max}, KН$	$P_K, KН$	$L_p, мм$	$d_K, мм$

## Результати розрахунків

	$T, K$	$\sigma_T^H, \text{МПа}$	$S_k, \text{МПа}$	$\Psi, \%$	$n$	$K_\sigma$

$R_{mc}$ експ, МПа	$R_{mc}$ розр, МПа	$K_\sigma$ розр	$K_\sigma$ експ

## Максимальні похибки

$\delta \sigma_m^H, \%$	$\delta R_{mc}, \%$	$\delta K_\sigma, \%$	$\delta \Psi, \%$

**Аналіз результатів повинен включати:**

- аналіз графіків температурних залежностей  $\sigma_{0,2} (\sigma_T^H)$ ,  $S_k$ ,  $\Psi$ ,  $K_B$ ;
- графічне визначення та розрахунок  $R_{MC}$ ,  $K_B$ ;
- оцінки похибки розрахунків;
- висновки щодо рівня міцності та в'язкості випробуваних сплавів та точності отриманих результатів.

**Висновки:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

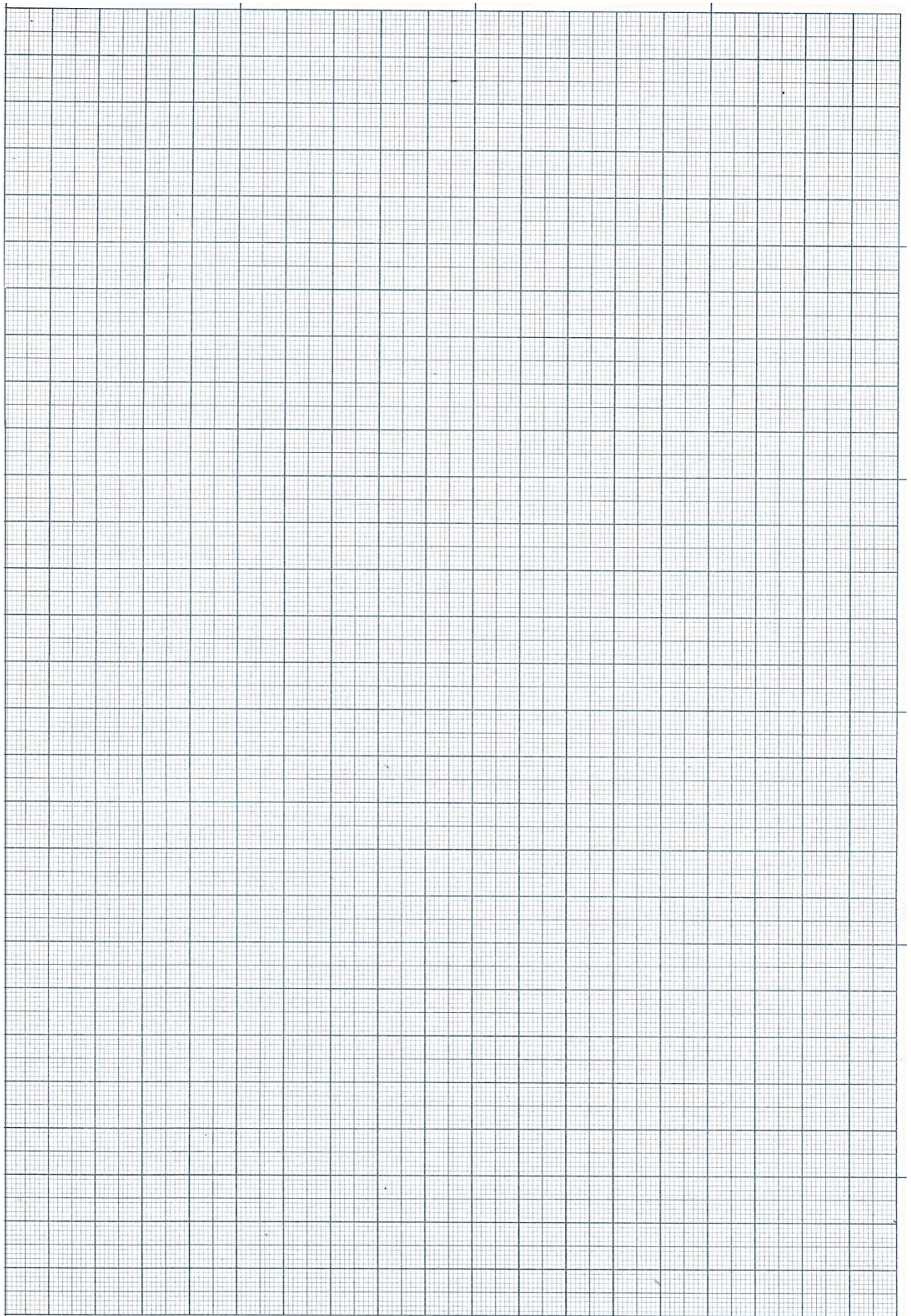
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Визначення характеристик міцності та в'язкості матеріалів  
шляхом низькотемпературних випробувань на одновісний розтяг



## ПРОТОКОЛ Лабораторної роботи № 8

Студента \_\_\_\_\_ групи \_\_\_\_\_  
Допуск \_\_\_\_\_ Підпис \_\_\_\_\_  
викладача \_\_\_\_\_  
Захищено з \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_ Підпис \_\_\_\_\_  
оцінкою \_\_\_\_\_ викладача \_\_\_\_\_

### Тема роботи:

### Експериментальне дослідження окрихчення матеріалів концентраторами напружень

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

### Обладнання та устаткування

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

### Хід 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  $\sigma_{NT}$  та  $\sigma_{NF}$  та побудувати їх температурні залежності. На цей графік нанести залежності  $\sigma_T$  та  $K_B$  від температури.
4. Визначити температуру холодноламкості  $T_X$  та величину  $E_m^{розр}$  при цій температурі.
5. Оцінити відносну похибку величини  $E_m^{розр}$ .
6. Розрахувати значення  $E_m^{теор}$ .
7. Оцінити похибку розрахунків.

**Результати розрахунків****Матеріал:** \_\_\_\_\_**Концентратор:**  $D = \text{_____ mm}$ ,  $t = \text{_____ mm}$ ,  $R = \text{_____ mm}$ ,  $\alpha = \text{_____}$ **Умови навантаження:** швидкість навантаження  $U_H = 2 \text{ мм/хв.}$ **Абсолютні похибки вимірів:**

- зусиль ( $P_K$ )  $\pm 1 \text{ Н}$
- діаметра зразка  $d_0 \pm 0,01 \text{ мм}$
- діаметра зразка в місці зламу  $d_K \pm 0,05 \text{ мм}$
- температури зразка  $T \pm 2 \text{ К}$

**Вихідні дані**

	$T, \text{ К}$	$P_{NT}, \text{ КН}$	$P_{NF}, \text{ КН}$	$d_0, \text{ мм}$	$d_K, \text{ мм}$	$n$

**Результати розрахунків**

$T, \text{ К}$							
$\sigma_{NF}, \text{ МПа}$							
$\sigma_{NT}, \text{ МПа}$							
$\Psi, \%$							

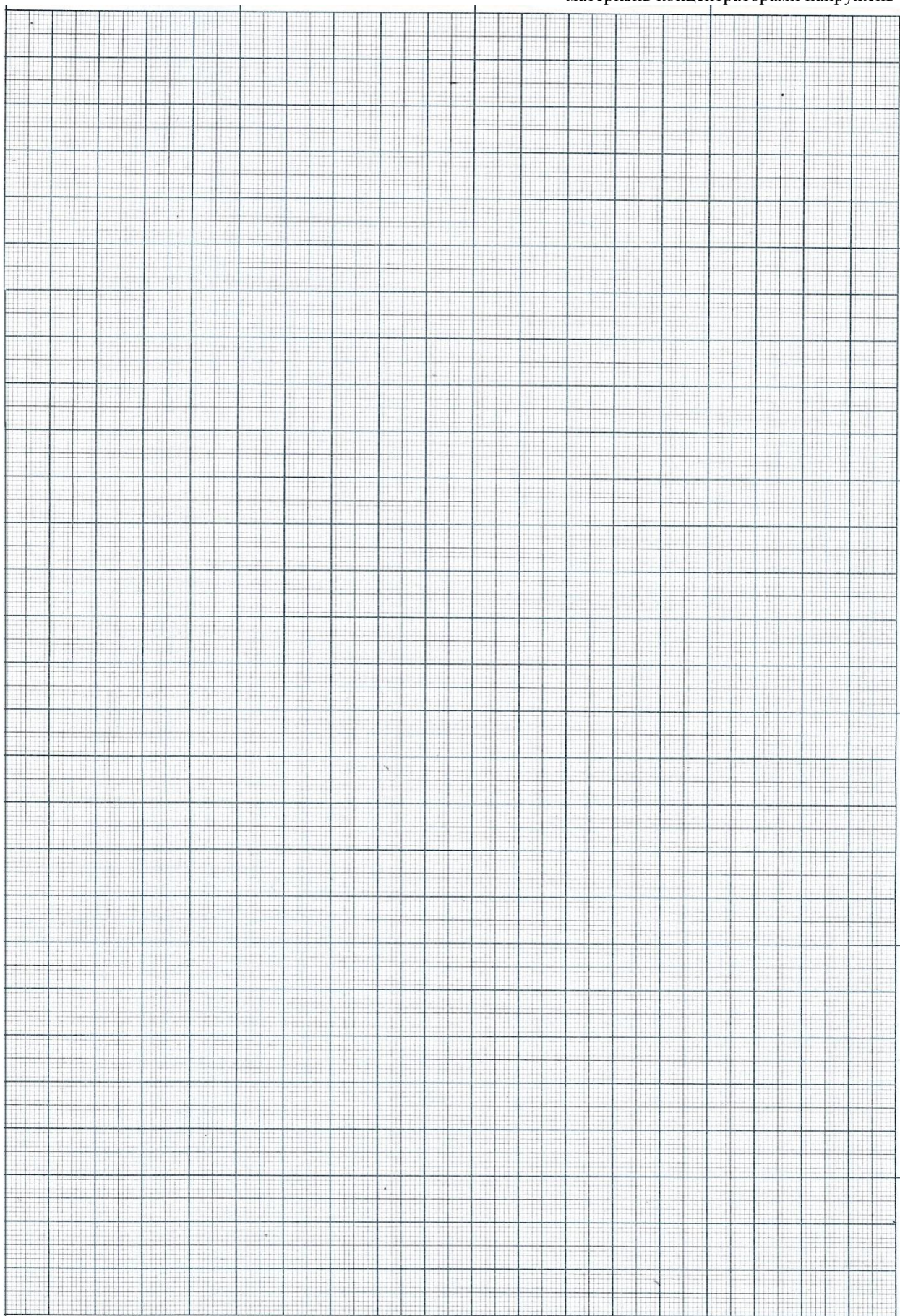
$$E_m^{\text{розр}} =$$

$$E_m^{\text{теор}} =$$

$$\delta E_m^{\text{розр}} =$$

$$\delta E_m^{\text{теор}} =$$





### **Аналіз результатів повинен включати:**

- графіки температурних залежностей  $\sigma_{NT}$ ,  $\sigma_{NF}$  та  $\sigma_T$  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 окрихчуючої дії на матеріал.

### Висновки:

[illegible]



## ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ ПОКАЖЧИК

Верхня межа плинності	30	Модуль Юнга	35
Випробувальні машини	14	Момент опору	53
Відносне звуження	34	Несівна здатність зразка	81
Відносне розширення	43	Нижня межа плинності	30
Відносне скорочення	43	Одновісний розтяг	23
Відносний зсув	55	Опір мікросколу	74
Гомологічна температура	20	Питомий кут закруту перед	
Діаграма розтягу	24	руйнуванням	53
Закрут	48	Показник деформаційного	
Згин	56	зміцнення	35
Зразок з Т-подібним		Полярний момент інерції	
концентратором	70	перетину	53
Зразок Менаже	70	Рівномірна деформація	33
Зразок Шарпі	70	Стріла прогину	58
Істинна діаграма деформації	24	Температура холодноламкості	82
Істинне напруження руйнування	34	Температурний інтервал в'язко-	
Коефіцієнт в'язкості	74	крихкого переходу	68
Коефіцієнт Пуассона	36	Тимчасовий опір руйнуванню	32
Концентратор напружень	81	Трьох-точковий згин	56
Крутний момент	49	Ударна в'язкість	66
Кут загину	62	Умова подібності механічних	
Кут закручування зразка	49	випробувань	20
Маятниковий копр	70	Умовна деформація	33
Межа міцності	32	Умовна діаграма деформації	24
Межа пропорційності	30	Умовна межа плинності	30
Межа пропорційності при	53	Умовне напруження руйнування	33
закруті межа пружності	30	Чотирьох-точковий згин	56
Межа пружності при закруті	54		

Навчальне видання

Холявко Валерія Вікторівна  
Владимирський Ігор Анатолійович

# **МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ**

**ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**