

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
Фізичний факультет  
Кафедра фізики низьких температур

«Допущено до захисту»  
В.о. зав. кафедри фізики  
низьких температур  
проф. Шкловський В.О. \_\_\_\_\_  
«\_\_\_» травня 2024 р.

Оцінка «\_\_\_\_\_»  
Голова ЕК,  
д-р фіз.-мат. наук, с.н.с.  
Сорокін О. В. \_\_\_\_\_  
«24» травня 2024 р.

ПЕТУХОВ Михайло Олександрович

**Дослідження механізму тріщиноутворення за допомогою камери *insitu***

Дипломна робота на здобуття  
освітнього ступеня «Магістр» за  
спеціальністю 104 – «Фізика та  
астрономія»  
освітня програма – «Фізика»

Науковий керівник:  
канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри  
фізики низьких температур  
ЛЕБЕДЄВ Сергій

Консультант:  
TERENTYEV Dmitry  
Head of Expert Group  
Structural Materials

Рецензент:  
канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри  
фізики твердого тіла  
ШУРІНОВ Роман

Харків 2024

## АНОТАЦІЯ

Петухов М.О. Дослідження механізму тріщиноутворення за допомогою камери *insitu* – Рукопис.

Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» з галузі знань 10 природничі науки за спеціальності 104 – «фізика та астрономія» Харківський національний університет імені В.Н Каразіна, Харків 2024.- 29 с, Іл.16.

У роботі виконано дослідженням впливу температури при процесі навантаження на процес шийкоутворення та руйнування при одновісній деформації на розтяг зразків зі сплаву мідь-хром-цирконій (CuCrZr). На основі оброблення даних знятих камерою *insitu* при проведенні експериментів в SCK·CEN - Бельгійського ядерного центра з визначення напруження розтягу циліндричних зразків. Нагрів зразків при проведенні експериментів використовувалося для емуляції радіаційному опроміненні матеріалу, яке крім зміни дефектної структури матеріалу дає також нагрів. З метою визначення можливості використання даного матеріалу в якості кандидата при виготовленні теплообмінників на його основі при будівництві експериментального термоядерного реактора.

*Ключові слова:* інженерне навантаження, справжнє навантаження, механічні випробування, шийкоутворення, напруження, одновісна деформація, розтяг, поперечний перетин, максимальне навантаження, моделювання геометрії\ шийки.

## ANNOTATION

Petukhov M.O. **Study of the crack formation mechanism using an insitu camera** - Manuscript.

Thesis for obtaining the educational and qualification level "Master" in the field of knowledge 10 natural sciences with the specialty 104 - "physics and astronomy" V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv 2024.- 29 p., Illustration 16.

The thesis examines the influence of temperature during the loading process on the process of neck formation and fracture during uniaxial deformation on the tensile strength of copper-chromium-zirconium (CuCrZr) alloy samples. Based on the processing of data captured by an insitu camera during experiments at SCK·CEN - the Belgian nuclear center for determining the tensile stress of cylindrical samples. Heating of samples during experiments was used to emulate radiation-irradiated material, which, in addition to changing the defective structure of the material, also causes heating. In order to determine the possibility of using this material as a candidate for the manufacture of heat exchangers based on it during the construction of an experimental thermonuclear reactor.

*Keywords:* engineering load, true load, mechanical tests, necking, stress, uniaxial strain, tension, cross-section, maximum load, neck geometry modeling.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>5</b>
<b>1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....</b>	<b>7</b>
<b>2. МЕТОДИКА ТА ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Зразки та дані про експеримент .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.Відеозйомка та обробка відеоматеріалу.....</b>	<b>21</b>
<b>3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1. Обговорення деформаційних кривих .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2. Моделювання процесів шийкоутворення .....</b>	<b>26</b>
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>28</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>29</b>

## ВСТУП

Світове використання енергії атома стало символом прогресу та процвітання людства. Початком мирного використання ядерної енергії прийнято вважати 26 липня 1954, коли запрацювала перша в світі атомна електростанція (АЕС). Потужність першої атомної електростанції складала всього 5 МВт(ел). Будівництво та введення в експлуатацію першої АЕС породило надії на отримання людством екологічно чистої енергії з практично необмеженими ресурсними можливостями. Ця подія продемонструвала, що енергію атома можна перетворити на джерело енергії, що дозволяє забезпечити все людство практично невичерпним альтернативним джерелом енергії.

Шлях розвитку ядерної енергетики від наукової ідеї до безпечного повсякденного застосування був сповнений подій, відзначених як великими успіхами, і невдачами. Успіхи у підвищенні отримання енергетичної потужності атомних електростанцій людством найчастіше сприймаються як зрозумілі й на серйозному рівні сприймаються лише вузьким колом фахівців. Невдачі, що відбуваються у вивченні та освоєнні ядерної енергії, на жаль, часто ведуть до жертв серед робітників, локальних і загально планетних екологічних катастроф. В даний час вивчення та розробка заходів щодо безпечного отримання енергії мирного атома йде на рівні з новітніми розробками в галузі термоядерного синтезу.

Для більш детального вивчення відтворення ядерного синтезу та напрацювання досвіду створено проект Міжнародний Експериментальний Термоядерний Реактор (International Thermonuclear Experimental Reactor) [1].

Одними з основних апаратів технологічного процесу отримання чистої енергії в ядерних реакторах поруч із самим реактором є теплообмінне обладнання – теплообмінники. Теплообмінники в ланцюзі апаратів ядерних реакторів дозволяють відокремити "заражені радіацією" середовища від "чистих". Так само теплообмінники є пристроями, що дозволяють підвищити

надійність роботи ядерного реактора і ККД передачі теплової енергії між ділянками АЕС.

Виходячи з чого матеріали з яких виконується теплообмінне обладнання атомних станцій повинно і проходить ретельний аналіз та вивчення при різних факторах, які можуть на нього впливати: високі температури, механічні навантаження, агресивність середовищ, опромінення. А також повинні мати наступні характеристики: висока теплопровідність, механічна стійкість, стійкість до корозійного зношування та стійкість до інтенсивного опромінення.

В якості такого матеріалу у дипломній роботі розглядається сплав мідь-хром-цирконій (CuCrZr). Цей сплав складається з трьох видів металів і має багато переваг, таких як висока твердість, відмінний опір зносу, висока температура розм'якшення і висока стійкість до розтріскування.

## 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Проведення випробувань на розтяг здійснюється шляхом застосування поздовжнього або осьового навантаження з певною швидкістю розтягування стандартного зразка з відомими розмірами які включають довжину зразка, площу поперечного перерізу, перпендикулярну напрямку навантаження до руйнування.

### Методи знаходження поперечного зрізу зразка.

#### 1.1 Середньозважений метод

Середньозважений метод застосовується при одновісному розтягування зразків до утворення шийки з наступним руйнуванням. Даний метод вимагає чіткої ідентифікації меж верхньої і нижньої частини для справжньої функції напруги-деформації після витягування та виражає відношення напруга-деформація як середньозважене (середнього подовження) значення цих двох меж.

#### 1.2 Метод кінцевих елементів (FEM)

Даний метод за допомогою FEM був проаналізований С. Кугенером [1].

Метод кінцевих елементів (FEM) прийнятий як загальний інженерний інструмент, щодо вирішення задач машинобудування. Метод кінцевих елементів в основному пов'язаний із рішенням завдань про лінійну пружність, в який модуль пружності «Е» і коефіцієнт Пуассона « $\nu$ » є єдиними матеріальними константами.

В іншому прикладі, в якому враховується пластична поведінка матеріалів, є великі деформації малих контактів в роз'ємах з високою щільністю. При цьому під час проведення випробувань великі пластичні деформації дають неоднорідний результати.

Також відомо, що при проведенні випробувань на розтяг рівномірне подовження зразку припиняється в момент, коли навантаження розтягування досягає певного максимуму матеріалу. На цьому етапі випробувань у зразка утворюється шийка.

Напружений стан матеріалу зразка при випробуваннях поступово змінюється від простого одновісного розтягу до складного стану трьохвісної напруги для круглого стержня або двовісної напруги для плоского зразка. Оскільки при початку шийкоутворення руйнується одновісне напружений стан, визначення справжнього

ставлення напруга-деформація після початку звуження стає неможливим стандартним випробуванням.

Деформація при одновісному розтягу може бути виражена як:

$$e = \frac{(L_f - L_0)}{L_0},$$

де:

- $L_0$  - вихідна довжина недеформованого зразка;
- $L_f$  - довжина деформованого зразка.

Виходячи з попереднього виразу, тіло деформується під прикладеним навантаженням та при  $L_f = 2L_0$  деформація при розтягуванні складає 100%.

Прикладена сила на одиницю площі поперечного перерізу, навантаження стає напругою, « $s$ ». Для рівномірної деформації її можна визначити як:

$$s = \frac{F}{A_0},$$

де:

- $F$  - сила, що діє перпендикулярно поперечним перерізом;
- $A_0$  - початкова площа поперечного перерізу.

Напруга « $s$ », відносно недеформованої конфігурації зразка, називається інженерною напругою. При цьому, якщо скорочення площі поперечного перерізу велике, визначення напруги в інженерних мережах стає недоречним. При визначенні точнішої величини напруги необхідно використовувати миттєву площу поперечного перерізу « $A$ » зразка:

$$\sigma = \frac{F}{A},$$

Визначення напружень « $\sigma$ » засноване на миттєвої конфігурації матеріалу називається істинним стресом. Вживання інженерних кривих напруги-деформації корисне тільки для малих деформацій. Також необхідно відзначити, що рівняння (3) справедливе тільки для рівномірної деформації тобто коли напруга в кожній точці перетину зразка однакова.

Для випадків коли напруга в точках зразка нерівномірна (неоднорідна), величина напруги визначається як:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta F}{\Delta A} \right), (1)$$

В зв'язку зі значними складнощами вимірювання  $\Delta F$  і  $\Delta A$  в рівнянні (1), напруга « $\sigma$ » розглядається виключно як визначення та має переважно теоретичне значення. Виходячи з цього напруга « $\sigma$ » можна отримати безпосередньо, тільки коли деформація однорідна, вимірюючи силу і відповідну площу поперечного перерізу.

Після того як деформація перестає бути однорідною, може бути виміряна тільки середня напруга, а розподіл напруження по площі перетину зразка не може бути визначений експериментально. Це являє собою головну проблему, яка виникає при спробах отримати істинний стрес під час випробувань.

### **1.3 Метод справжнього ставлення (корекції)**

Метод справжнього ставлення - для отримання еквівалентної деформації на горловині шийки зразка потрібно тільки виміряти миттєвий розмір мінімальної площі перетину.

При розробці методу Бриджмен припустив, що для отримання еквівалентної деформації на горловині потрібно тільки виміряти миттєвий розмір мінімального перетину.

Перевірка цього методу ускладнена, тому що справжня напруга після шийки неможливо виміряти безпосередньо, але є припущення, згідно з якими теорія корекції заслуговує на докладніше вивчення.

Загальновідомо: якщо радіус найменшого поперечного перерізу «а» і радіус кривизни шийки «R» (рис.1) точно виміряні, метод корекції Бриджмена може визначити справжнє співвідношення напруга/деформація за межами шийки в стержні зразка. Також необхідно зазначити, що з декількох обставин метод корекції Бриджмена не просто використовувати на практиці бо корекція вимагає серії випробувань з різними навантаженнями для визначення радіуса кривизни «R» і мінімального радіуса «а», які одночасно важко виміряти з достатньою точністю.

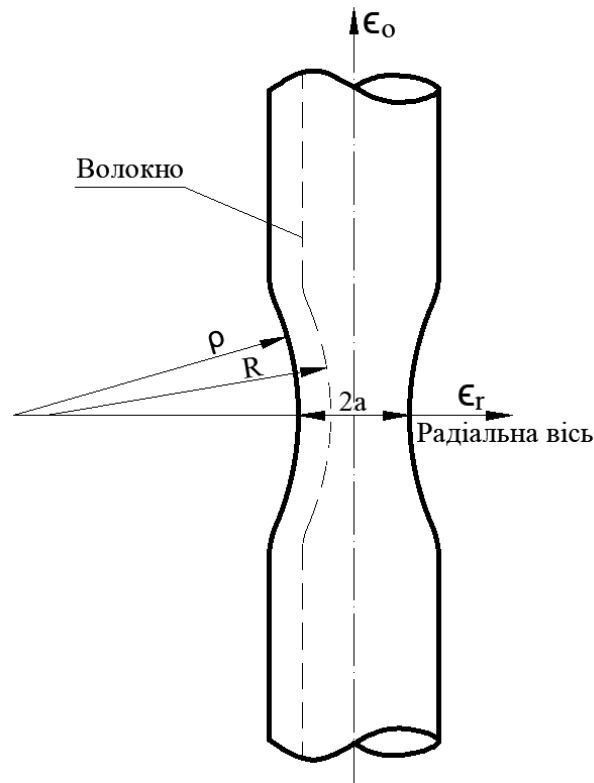


Рис.1. Ілюстрація зменшення діаметра стрижня.

Де:

- $\rho$  - радіус кривизни лінії сітки;
- $r$  - радіус фактичного поперечного перерізу.
- $a$  - радіус найменшого поперечного перерізу;
- $R$  - радіус кривизни шийки.

Дифузне витягування зразка починається, при досягненні максимального навантаження розтягу. Дифузне витягування може закінчуватися переломом (розривом) зразка, але частіше супроводжується іншим процесом нестабільності - локалізованим звуженням тонких смужок. Цей процес нестабільності характеризується явищем коли шийка являє собою вузьку смужку, нахилена під кутом до осі зразка, як показано на рис. 2.

Під час формування локалізованого звуження ширина зразка трохи стискається, а товщина уздовж смуги звуження швидко зменшується. Після цього відбувається руйнування (розрив) зразка.

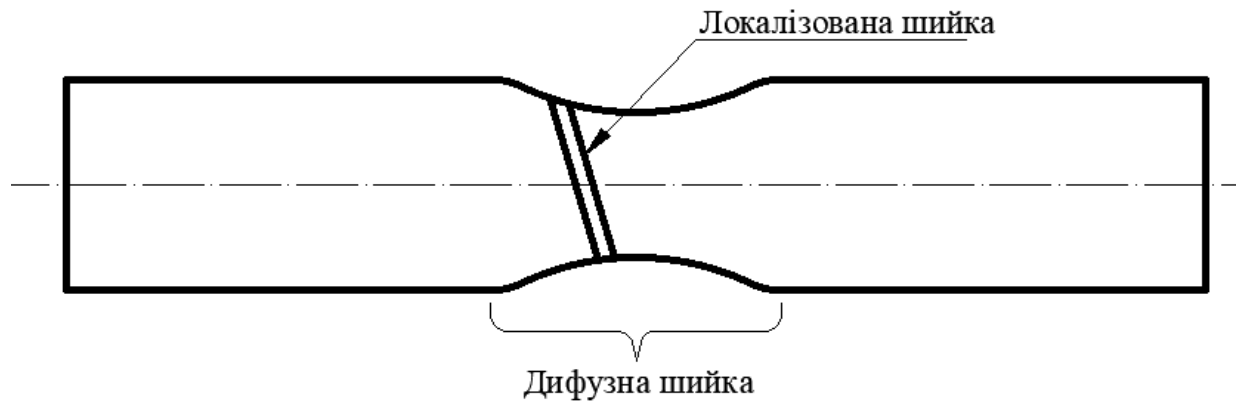


Рис. 2. Ілюстрація різниці між локалізованою і дифузійною шийками при зменшенні товщини зразка з тонкої смуги.

#### 1.4 Зважений середній метод

В процесі випробування коли починається локальне звуження, розподіл деформацій при мінімальному поперечному перерізі стає дуже неоднорідним. При цьому середня осьова деформація може бути значно менше максимальної осьової деформації при мінімальному перетині. Таким чином, навіть якщо відомий миттєвий розмір мінімальної секції, еквівалентна деформація ще не визначена.

При обробці результатів вимірювання був запропонований новий метод прогнозування функцій напруги/деформації з інженерних даних, запропонований метод має значні переваги, щодо інших методів досліджень. За цим методом використовують середньозважені значення верхньої і нижньої меж кривих напруг, за що його і назвали середнім методом. Використання середнього методу виявило непридатність методу корекції Бриджмена для точного визначення дійсних функцій напруги-деформації у зразках смугах після звуження.

#### 1.5 Метод чисельного аналізу встановлення п'ятої стадії істинної напруги-деформації.

Згідно з встановленням п'ятої стадії істинної моделі напруга-деформація для сталей марок A992 і 350W [2], яка може фіксувати і в тому числі постулювати поведінку конструкційної сталі перед руйнуванням.

При проектуванні та аналізі будівельних конструкцій, а також у дослідженнях можливості використання конструкційної сталі найчастіше використовують метод кінцевих елементів (FE-) та інші методи чисельного аналізу.

Рисунок 3 демонструє атипову інженерну стійкість до деформації (суцільна лінія) [3], де напруга розраховується як поділене навантаження на вихідну площу поперечного перерізу зразка, а інженерний стрес розраховується як відношення кінцевої довжини зразка до початкової зміна довжини зразка на початкову довжину зразка.

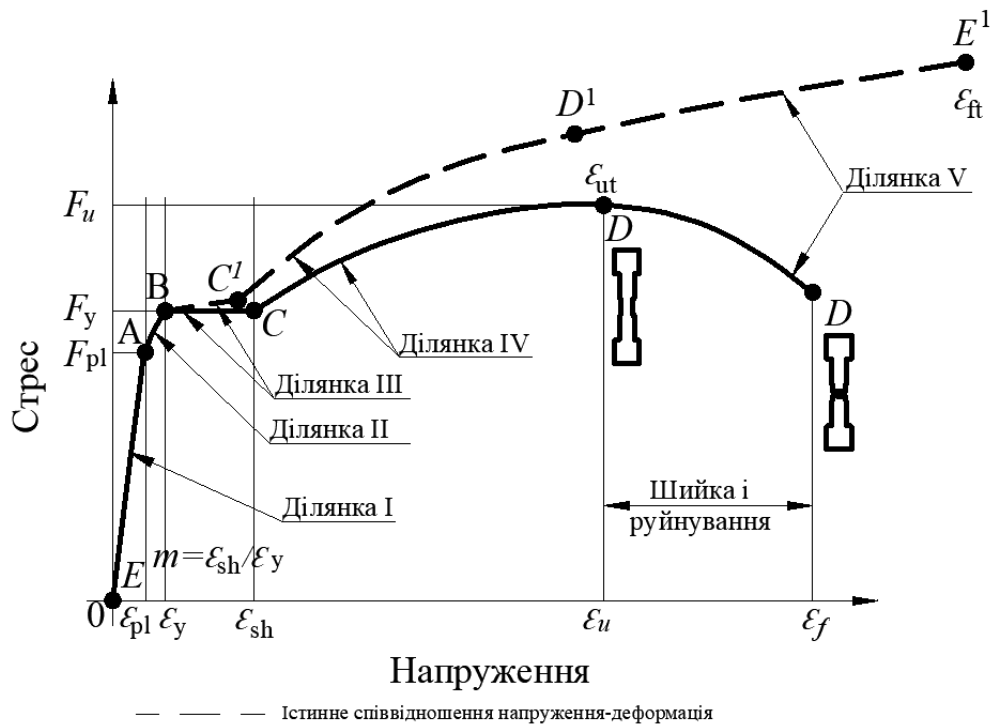


Рис 3. Технічне напружене-деформування зразка та запропонована модель справді напруженої деформації матеріалу.

Розрахунки, які не враховують зміни площі при збільшенні навантаження, використовуються для зручності вимірювання та постійно знаходяться в діапазоні пружності (Ділянка-I) та показують діапазон деформаційного зміцнення (Ділянка-IV) та діапазон розм'якшення деформації (Ділянка-V). Встановлена на основі миттєвих розмірів деформування тестового зразка величина напруги/деформації, відома як відношення напруга, істинна деформація показана на рис. 3 як штрихова лінія. Застосовувані для практичних цілей інженерні та справжні відношення збігатимуться аж до межі плинності. Проте вищезгадані відношення розходяться. На

рис. 3 показані якісні відмінності між інженерними відношеннями напруга-деформація та справжнім співвідношенням навантажень.

На рисунку 4 наведено типову модель FE, яку використовують для відтворення стандартного тесту та пов'язаної з ним відмови через ший з наступним переломом [4].

Також на рис. 4 показані граничні умови, що використовуються моделі FE.

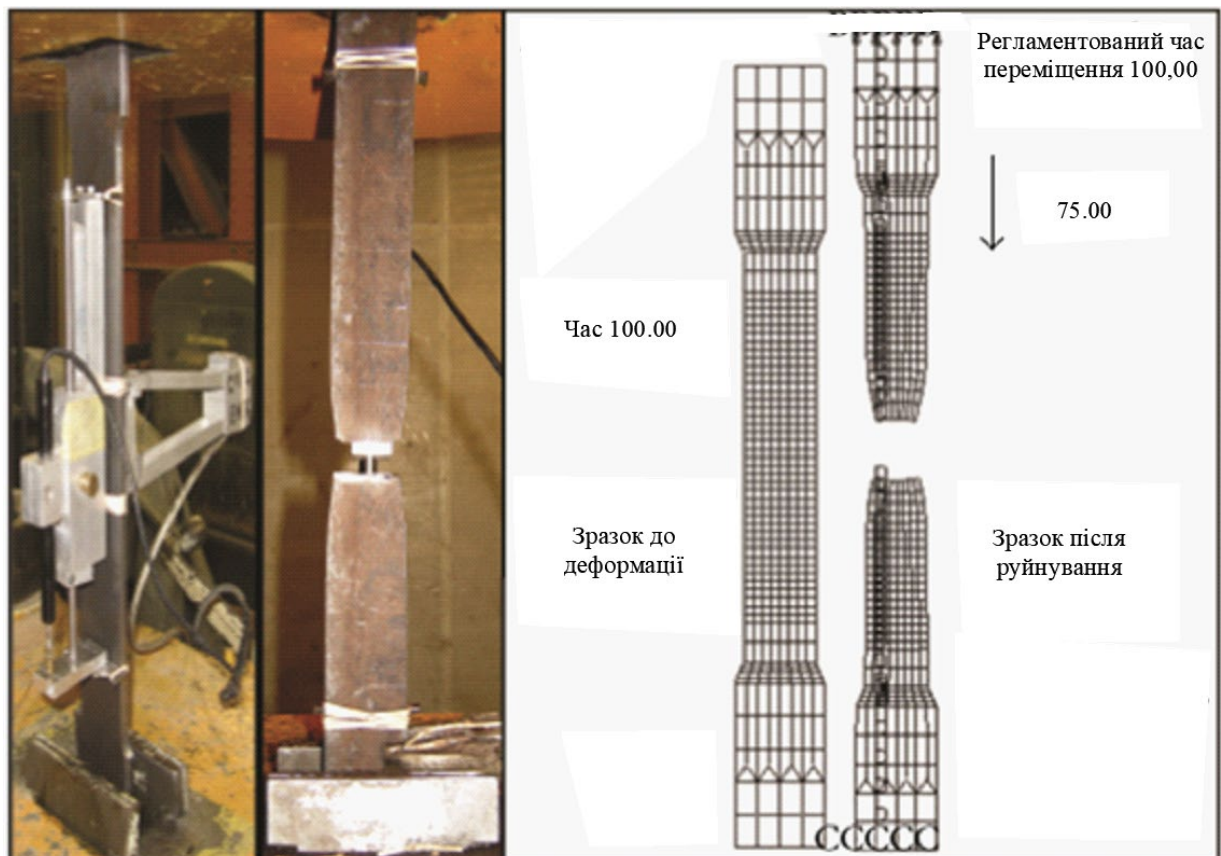


Рис.4. Порівняння тестового зразка із результатами моделювання FE.

При необхідності побудови моделі за методом кінцевих елементів, для всіх досліджень сталевих конструкцій та елементів, побудовані моделі FE вимагають реалістичних співвідношень матеріалу типу напруга-деформація, які можуть уловлювати тріщини сталі. Так як випробування на одновісне розтягування забезпечують інженерні стрес-технічні результати деформації, які не є точними, особливо в діапазоні деформаційного зміцнення та в діапазоні кінцевої міцності. Завдяки цьому дослідженню розроблено справжнє співвідношення напружено-справжньої деформаційної залежності для конструкційних сталей загалом та для марок сталі A992 та 350W зокрема.

Завдяки створенню в роботі [5] ступінчастих справжніх конститутивних моделей напружено-істинної деформаційної залежності для конструкційних сталей на основі чисельного моделювання, відкаліброваного за результатами експериментальних випробувань на одновісне розтягування. У запропонованій моделі використовується статечний закон у діапазоні деформаційного зміцнення та середньозважений статечний закон у кінцевому інтервалі. Завдяки комбінаціям експериментальних та численних методів моделювання було встановлено справжні параметри напружено-справжньої деформаційної залежності. Засновані на чисельному аналізі напруги та деформації при руйнуванні для стандартних купонів відрізняються менш ніж на 5% відповідних результатів експериментів. Запропонований матеріальний конститутивний зв'язок був додатково перевірений шляхом аналізу навантажувально-деформованого стану методом кінцевих елементів, з відповідними експериментальними результатами для перфорованих купонів напруги.

## **Реальна міцність зразків**

### **1.6 Дослідження реальної міцності зразків.**

Для витримування навантажень випробовуваних матеріалом при терміні служби у виробі або конструкції необхідно мати необхідну жорсткість і міцність. Для визначення параметрів жорсткості та міцності проводяться випробування на розтягування. [1] Випробування визначення вищевказаних параметрів проводять шляхом докладання осьової, поздовжньої або комбінації даних навантажень до стандартного зразка з відомими початковими параметрами зразка, які включають: довжину зразка, площа поперечного перерізу перпендикулярну напрямку навантаження руйнування. Результатами випробувань ставали оцінювання наступних значень: межа плинності при розтягуванні, відсоток подовження та зменшення площі перерізу зразка, деформацію руйнування, а також модуль Юнга при випробуванні зразка одновісного навантаження, що розтягує. Обробка результатів показує, що властивості сталевих елементів не залежать від товщини та руйнуються при однакових значеннях напруги та деформації. При цьому був зроблений висновок про те, що максимальні справжні значення напруги майже на 15% перевищують максимальні значення механічних навантажень, у той час як

максимальні значення руйнування деформації на 1,5% менше максимальних значень відмови від механічних деформацій. Випробування на розтягування проводять шляхом поздовжнього або осьового навантаження з певною швидкістю розтягування стандартного зразка розтягування з відомими розмірами, включаючи довжину датчика та площу поперечного перерізу, перпендикулярну напрямку навантаження до руйнування.

### 1.7 Співвідношення навантаження і деформацій.

При накладенні зовнішнього навантаження, що розтягує, в період випробувань, очікуються пружні пластичні деформації.

Спочатку, пружна деформація станеться з металом, що призведе до лінійної залежності навантаження та розтягування. Розрахунок інженерного навантаження та інженерних деформацій буде здійснюватися з використанням цих двох параметрів з метою встановлення залежності, як показано на рисунку 5, з урахуванням рівнянь 2 та 3 наступним чином:

$$\sigma_E = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon_E = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

де

- $\sigma_E$  - інженерна напруга.
- $\varepsilon_E$  - інженерний стрес.
- $P$  - зовнішня осьова навантаження розтягу.
- $A_0$  - вихідна площа поперечного перерізу зразка.
- $L_0$  - вихідна довжина зразка.
- $L_f$  - кінцева довжина зразка.

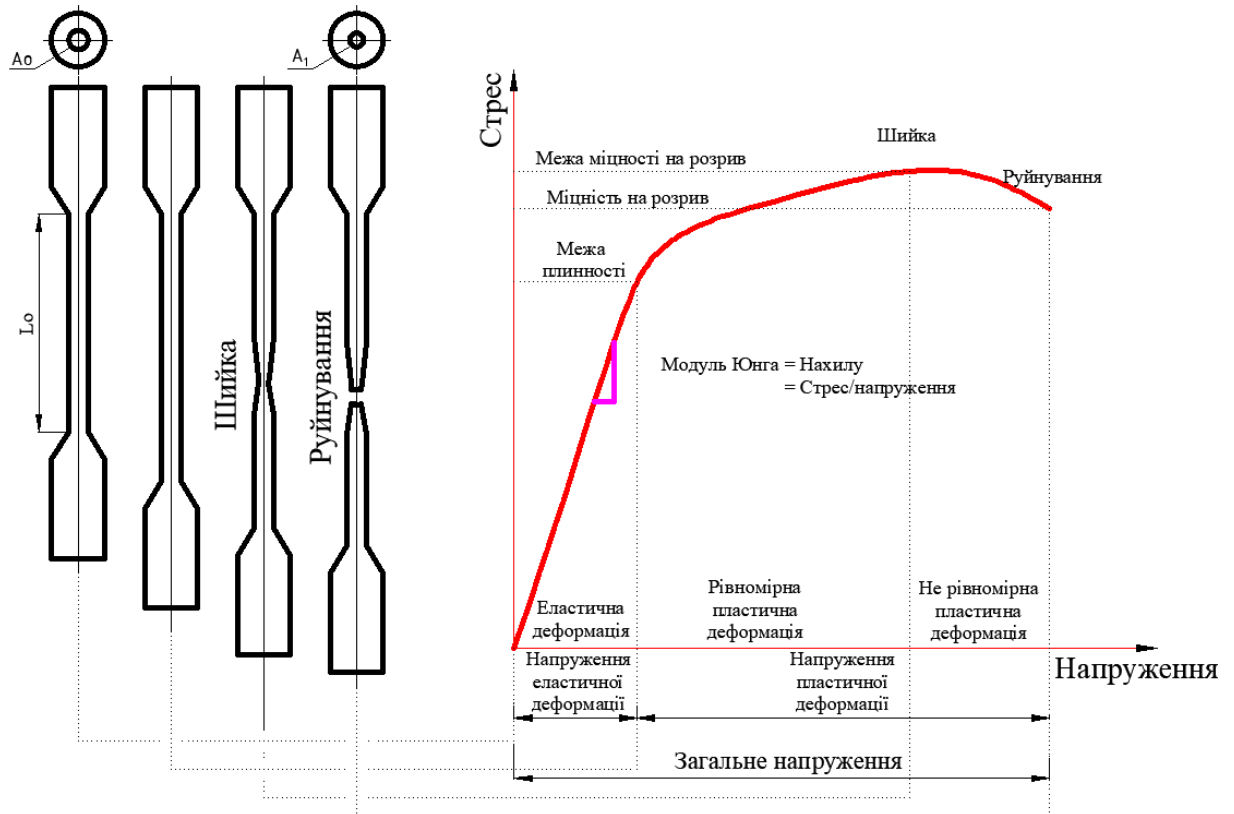


Рис.5. Напружено-деформований стан при одновісному навантаженні розтягування [1]

При пружній деформації інженерна напруга-деформація слідує закону Гука, а нахил кривий показує модуль Юнга ( $E$ ) рівняння 4:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

Точка плинності матеріалу для таких металів, як сталь, особливо низьковуглецева, або заліза, або в молибдені та полікристалічному титані часто розташована безпосередньо на кривому навантаженні розширення (рис. 6).

Подовження межі плинності вказує на верхню межу плинності, за якою слідує різке зниження напруги або навантаження до досягнення нижньої точки межі плинності. Подовження зразка продовжується при подовженні межі плинності без значної зміни рівня напруги.

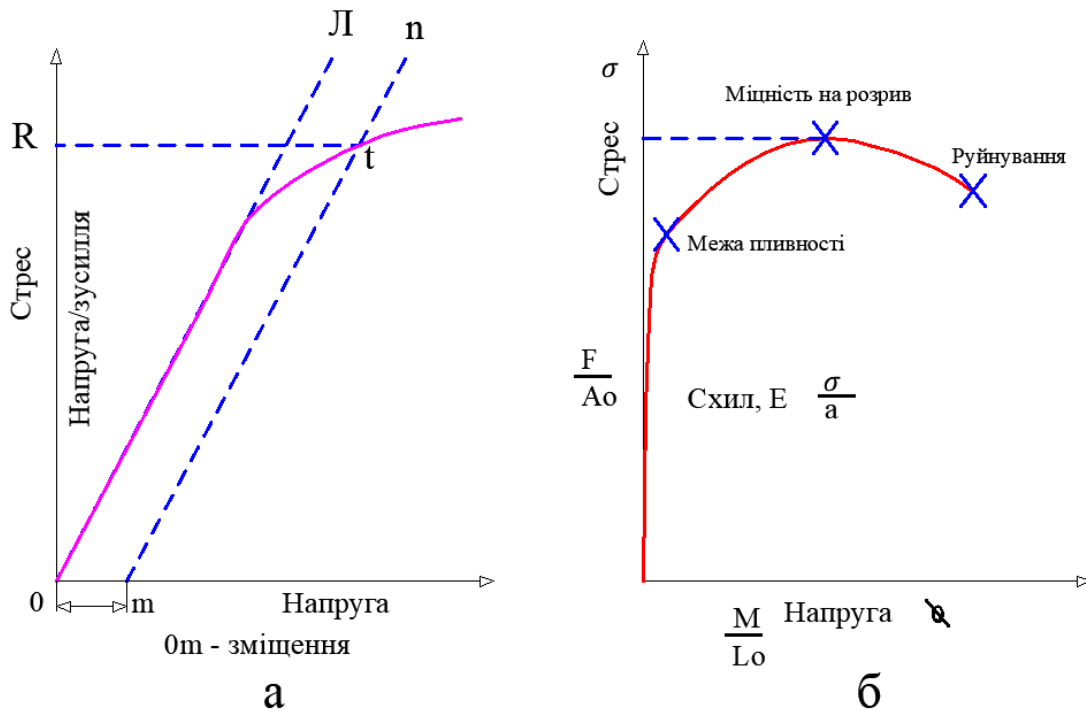


Рис.6. Визначення текучості.

Справжня деформація та справжній стрес виражаються одиницями вимірювання сили розподіленими на квадрат довжини, середня напруга на поперечному перерізі при випробуванні на розтяг, представлене величиною прикладеної сили розділеної на площу поперечного перерізу. Аналогічним чином проводиться апроксимація компонента деформації вздовж довгої осі зразка в міру зміни довжини, розділеної на контрольну вихідну довжину [1].

При обробці результатів фіксовані еталонні величини використовуються для розрізнення інженерних навантажень і деформацій переважно початкової площі поперечного перерізу або вихідної довжини. Такі визначення точні у більшості інженерних додатків через фіксовані значення площі поперечного перерізу і довжини зразка при додатку навантажень. В інших випадках, таких як випробування на розтяг, очікується суттєва зміна площі поперечного перерізу та довжини зразка. У таких випадках інженерний стрес, визначений з використанням вищезгаданого визначення (як відношення прикладеного навантаження до площі недеформованого поперечного перерізу), представляється в неточному ступені. Для вирішення цієї проблеми використовуються альтернативні методи вимірювання напруги та деформації.

### 1.8 Межі інженерного і істинного навантаження.

Справжня напруга – відношення прикладеного навантаження до миттєвої площі поперечного перерізу. Між істинною та інженерною напругою можливе існування зв'язку якщо у зразку не передбачається зміна обсягу. На підставі результатів отриманих при вимірі зроблено висновок про те, що товщина зразків не впливає на властивості сталевих матеріалів (межа плинності і модуль Юнга), руйнування таких зразків відбувається при однакових значеннях напруги та деформації рис. 7, 8. При цьому максимальні значення механічної напруги виявилися на 15% нижче, ніж максимальні дійсні значення напруги, в той час як максимальні значення міцності при механічному руйнуванні становлять 1,5% вище, ніж максимальні значення руйнування.

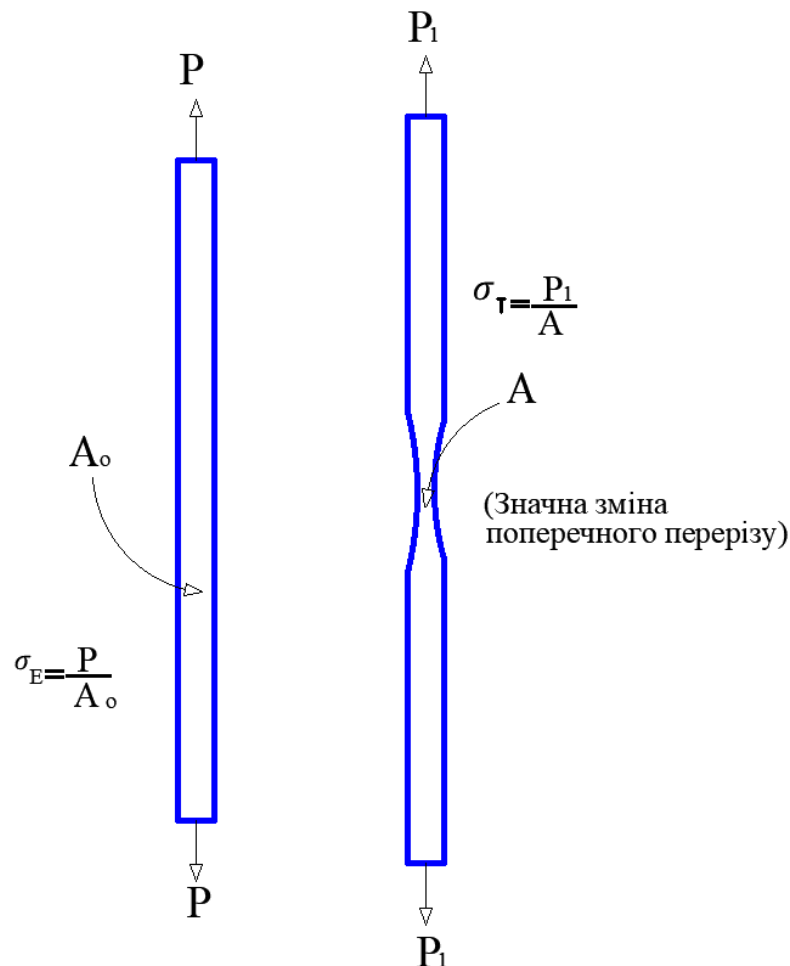


Рис.7. Початковим момент та момент початку шийкоутворення.

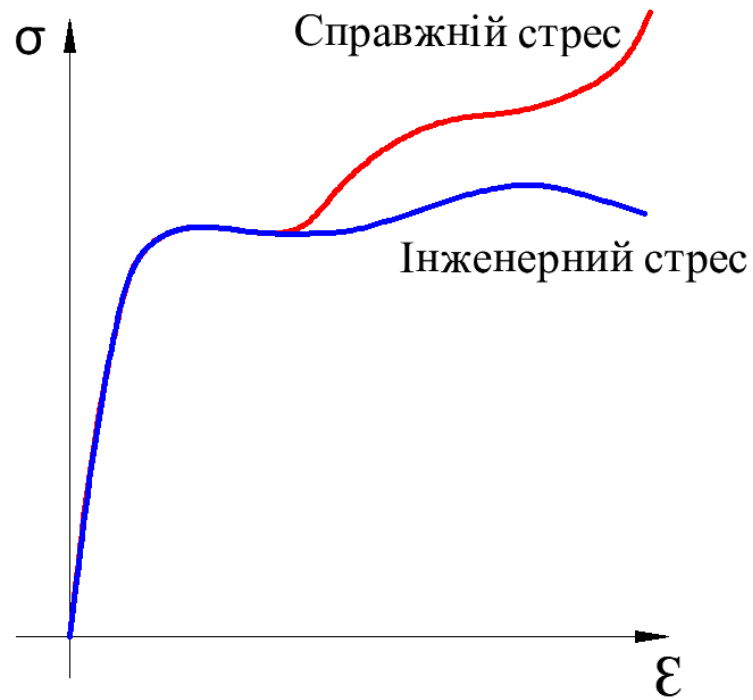


Рис.8. Крива інженерного навантаження проти кривої реального навантаження.

Дані параметри моделі напружено-справжньої деформації були встановлені шляхом зіставлення результатів чисельного аналізу з відповідними стандартними та максимальними експериментальними результатами.

## 2. МЕТОДИКА ТА ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Зразки та дані про експеримент

В лабораторії механічних випробувань інститута ядерних матеріалів ЛНМА, бельгійського ядерного дослідницького центра SCK·CEN, були проведені експерименти з визначення напруження розтягу циліндричних зразків зі сплаву мідь-хром-цирконій (CuCrZr). Експерименти проводилися на деформаційній машині Instron 1382 [8] за стандартом ASTM E8/E8M-21[7]. Для чого були виготовлені зразки спеціальної форми з різьбленням під захвати. Загальна довжина зразка 24 мм, довжина робочої частини 12мм, діаметр робочої частини 2мм. Загальний вид зразка наведено на рисунку 9.

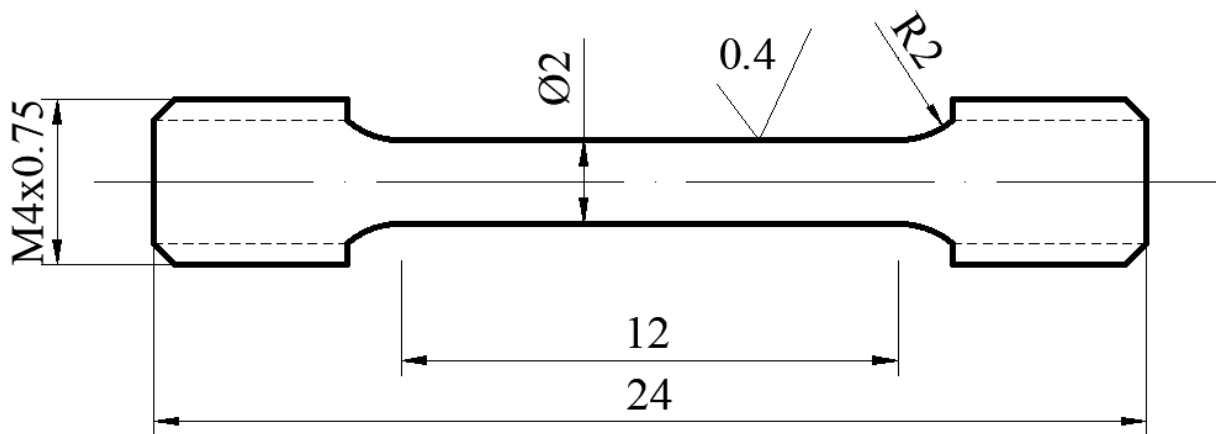


Рис. 9 Загальний вид зразка.

Проведення експериментів виконувалось з постійною швидкістю розтягу зразків, яка складала 0,15 мм/хв. Для емулювання радіаційного опромінення досліджуемого матеріалу зразки під час експериментів проводився нагрів досліджуємих зразків у тепловій камері у атмосфері повітря та деформувалися одновісним розтягом при температурах 25°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C.

## 2.2. Відеозйомка та обробка відеоматеріалу.

Відеозйомка експериментів з деформування зразків проводилась з параметрами: ISO – 100, діафрагма – 1,8, витримка – 1/100 з частотою кадрів 30 на секунду, в якості відео фіксуючого обладнання використовувалась камера фотоапарату Canon 60D з об'єктивом Canon Macro Lens 100mm 1:2,82.

Експерименти проводилися з постійною швидкістю та навантаженням.

Відео записи експериментів опрацьовувалось та розкладалося на кадри з інтервалом від 5 до 10 секунд в залежності від часу тривалості випробування при проведенні окремого експерименту. Розкладання відеозапису на кадри було виконане за допомогою програми Adobe After Effect.

Після цього за допомогою програмного комплексу Adobe Photoshop інструментом лінійка вимірювався найменший діаметр шийки зразка з подальшим розрахунком поперечного перетину та побудовою графіків залежності поперечного перетину зразка від часу від часу випробування у програмі OriginPro. Графіки інженерного та дійсного стресу також будувались в програмі OriginPro, при цьому графіки реального стресу будувались на основі даних отриманих при вимірюванні поперечного перетину зразків за допомогою відеозйомки.

Етапи проведення вимірювань наведені на рисунку 10.

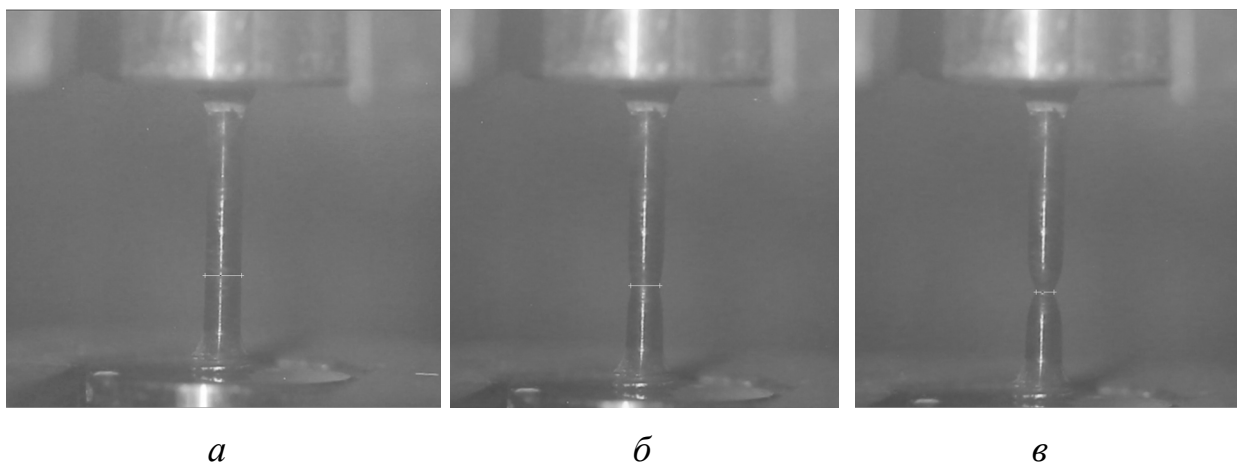


Рис. 10 Вимірювання поперечного перетину зразка при обробці кадрів зйомки експерименту: *a* - початок формування шийки, *б* - момент чітко вираженої сформованої шийки, *в* - початок руйнування зразка.

При проведенні вимірювань, отримані результати заносилися автоматично в базу даних журналу вимірювань програми Adobe Photoshop, після цього з журналу вимірювань було сформовано файл з результатами обробки кадрів експерименту в цілому. За допомогою сформованого файлу з результатами вимірів була отримана залежність діаметру шийки зразка від часу. Після обчислення поперечного перетину зразків в зоні найменшого діаметру була отримана залежність поперечного перетину зразків від часу тривалості експерименту.

В подальшому при обробці результатів вимірювань було запропоноване вимірювання кривизни шийки зразка при деформації за допомогою кільця вписаного кола в дотичну до шийки.

В продовж одного експерименту діаметр кола вимірювався 5-7 разів через рівні проміжки часу для усіх температур за допомогою програми CorelDRAW. Діаметр кільця підбирався таким чином щоб повністю повторював контур шийки зразка.

Вимірюване кільце вписаного кола наведено на рисунку 11.

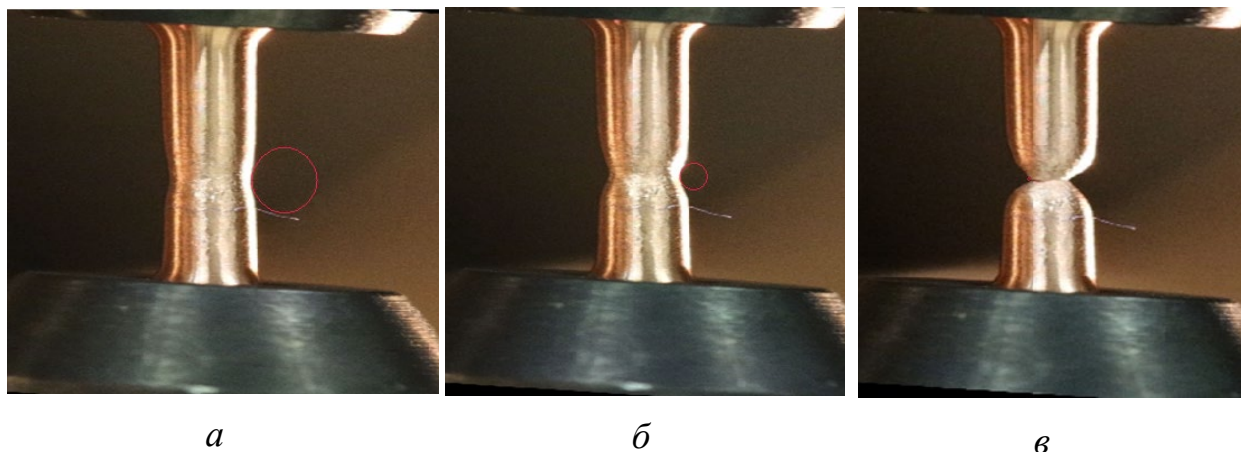


Рис. 11 Вимірювання кривизни шийки за допомогою кільця вписаного кола в дотичну до шийки: *a* - початок формування шийки, *б* - момент чітко вираженої сформованої шийки, *в* - початок руйнування зразка.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1. Обговорення деформаційних кривих

Результати експериментів представлені у вигляді кривих залежностей навантаження інженерного та справжнього від подовження зразка CuCrZr при різних температурах представлені на рис. 12.

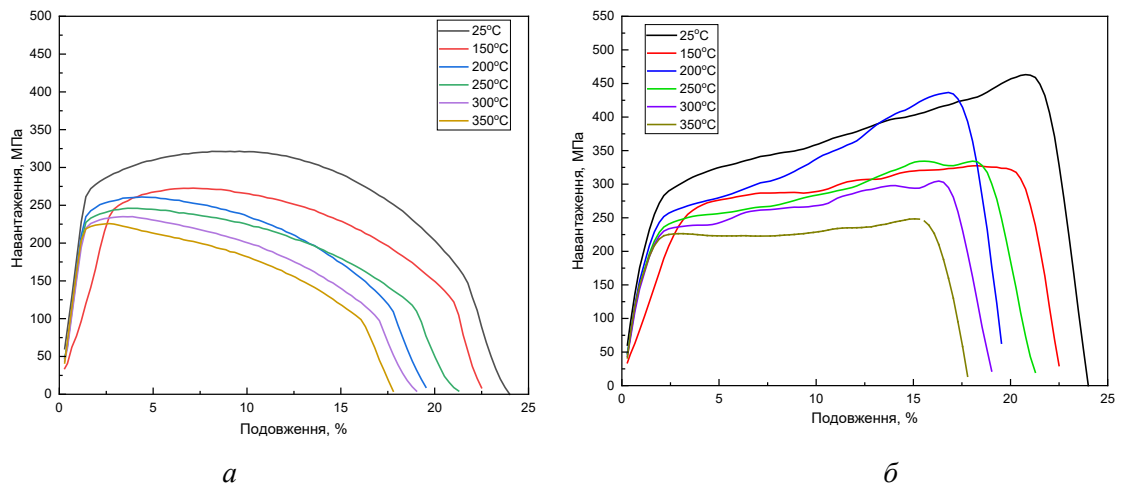


Рис. 12. Графіки залежності інженерного (а) та справжнього (б) навантаження зразків CuCrZr від подовження.

Під інженерним навантаженням тут мається на увазі, що площа поперечного перетину під час проведення одновісної деформації розтягом залишається постійною, тоді як при справжньому навантаженні поперечний перетин змінюється, а саме зменшується у часі. З даних графіків після їх аналізу можна побачити, що при розрахунку справжнього навантаження зразків, точка максимального навантаження збільшується в область більших значень, та точка перегину кривих здвигається в область більших подовжень зразків. Ці результати представлені на рис. 13.

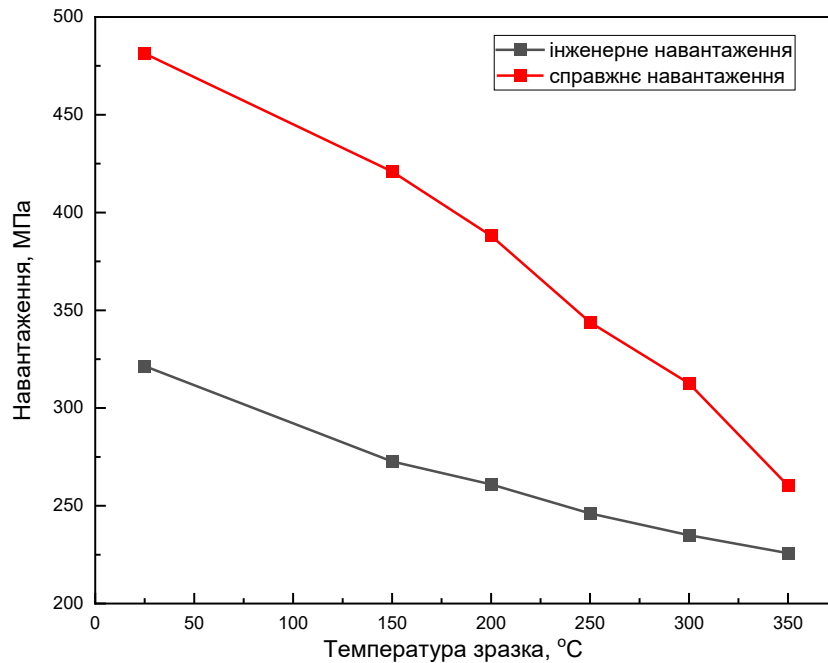


Рис. 13. Графік залежності максимального навантаження зразків CuCrZr від температури.

З графіку на рис.13 ймовірно можна зробити наступні припущення. Зразки при вимірюванні їх справжнього поперечного перетину впродовж всього експерименту витримують при кімнатних температурах в 1,75 разу більше навантаження та ця різниця зменшується в область зростання температур, так вже при 150°C різниця становить вже 1,5 рази, а при температурі деформування зразка 300°C можна бачити різницю всього в 1,1 рази. Це ймовірно може свідчити про те, що при нагріванні пластичність зразків зменшується та можливо починають діяти інші механізми деформування після початку шийкоутворення.

Якщо подивитися на графіки на яких для порівняння побудовані справжні та інженерні навантаження для температури випробування на одновісне розтягнення зразків 25°C та 350°C, які представлені на рисунку 14.

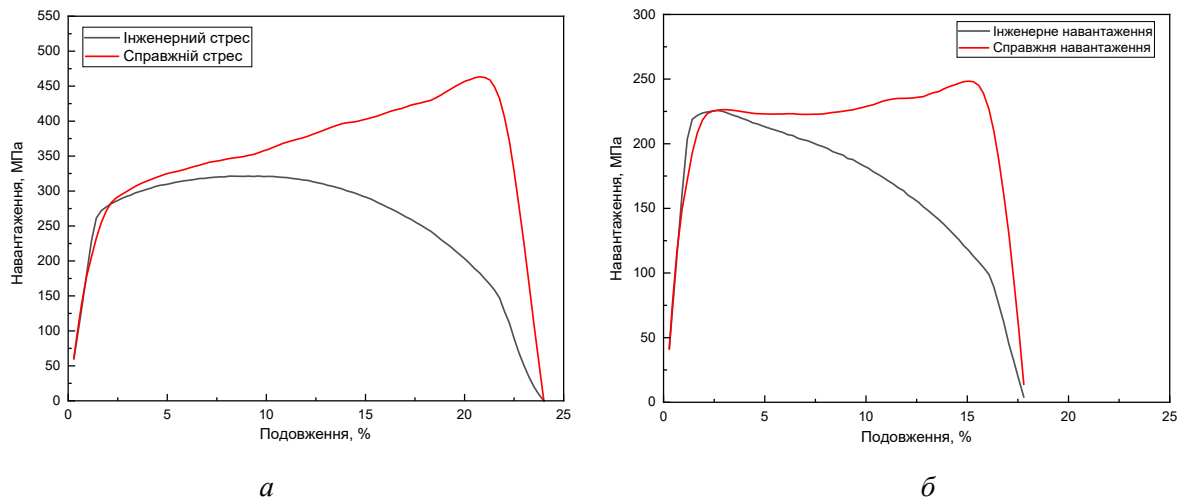


Рис. 14. Криві інженерного та справжнього навантаження для температури зразка *a* – 25 °С та *б* – 350 °С.

З цього рисунку можна бачити, що форма кривої як для справжнього так і для інженерного навантаження змінюється. Якщо двинитися на криві навантаження для температури випробування 25°C можна бачити що для інженерного навантаження після межі плинності навантаження небагато зростає до максимального значення а потім починає плавно зменшуватися майже до руйнування зразків, в той час як справжнє навантаження зростає до 22 % та лише після цього стрімко спадає, цей перелом можна спостерігати також і на кривій інженерного навантаження. Інша ситуація відбувається при температурі випробування зразку 350°C. Після межі плинності справжнє навантаження дещо зменшується, але все ж таки після подовження на 7 % починає не швидко зростати до приблизно 16% після цього є перегин кривої та вона стрімко спадає, тоді як інженерне навантаження зразу після межі плинності починає стрімко зменшуватися, що вірогідно вказує на те що матеріал при такій температурі стає не таким пластичним, та також як і при справжньому навантаженні після приблизно 16% починає швидко спадати.

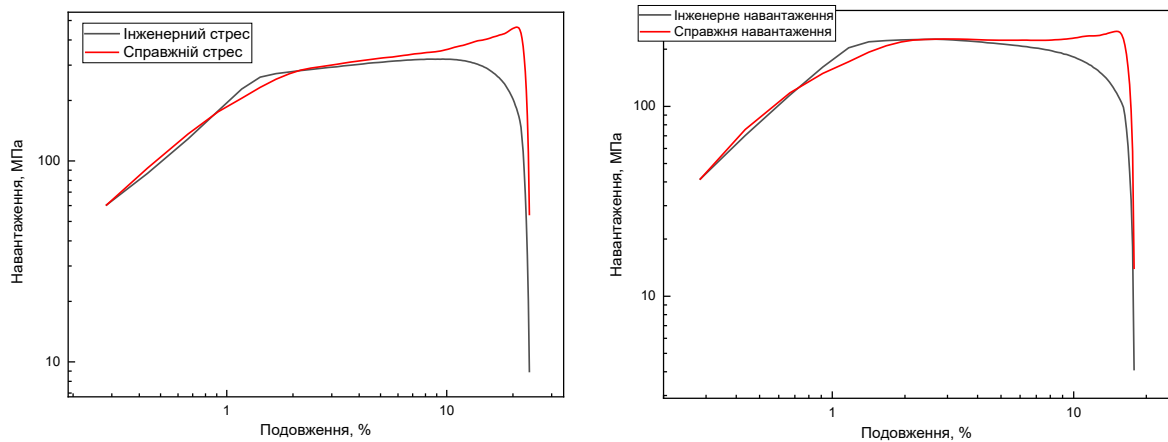


Рис. 15. Криві інженерного та справжнього навантаження для температури зразка  $a - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  та  $b - 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  в логарифмічних координатах.

Якщо побудувати криві навантаження в логарифмічних координатах рис. 15, можна побачити що справжнє навантаження при температурі випробування зразка  $25^{\circ}\text{C}$  складається з 4-ох явно виражених областей з різними кутами нахилу. Тоді як при температурі випробування зразка  $350^{\circ}\text{C}$  явно можливо виділити лише 3 області. Все це вірогідно свідчить про різні механізми деформації зразків при температурі  $25^{\circ}\text{C}$  та  $350^{\circ}\text{C}$ , а саме з температурою. Кількість механізмів зменшується. Все це гарно можна побачити лише з кривих справжнього навантаження, тоді як криві інженерного навантаження мають приблизно одну форму в логарифмічних координатах.

### 3.2. Моделювання процесів шийкоутворення

При подальшому обговоренні результатів експериментів на одновісне розтягування знятих за допомогою відеокамери, було звернута увага на те що геометричні форми шийки мають різні форми при різних температурах. Було запропоновано виміряти кривизну закруглення шийки зразку наложивши в програмі обробки зображень дотичне коло та таким самим способом виміряти кривизну шийки в залежності від температури при якій проводилися експерименти на одновісне дослідження та від ступеню деформації зразків. Дані результати наведені на рис. 16.

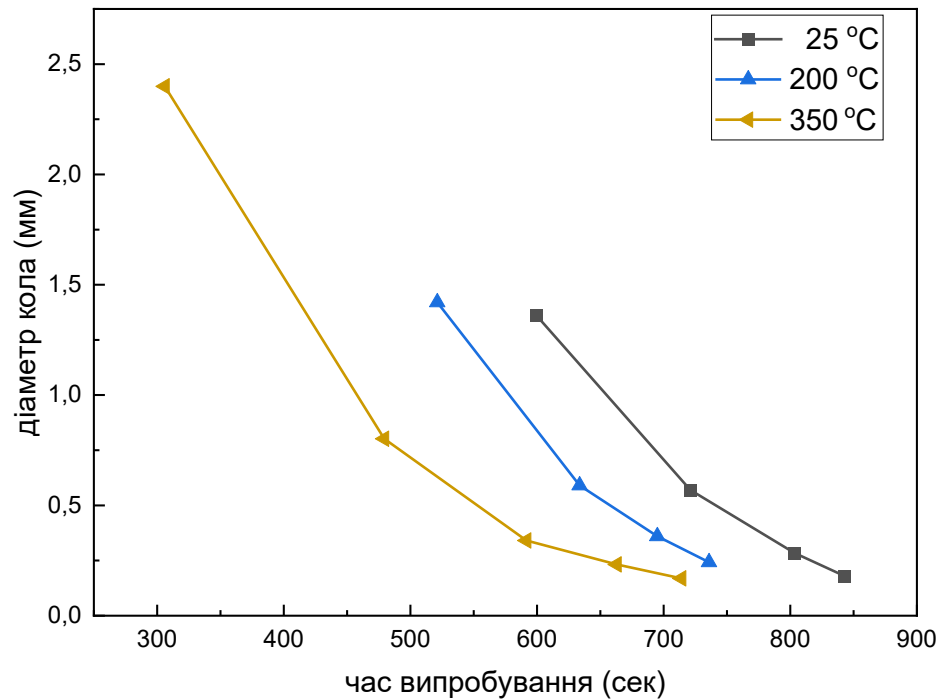


Рис. 16 Графік залежності діаметру кола дотичного до шийки зразку CuCrZr продеформованого при різних температурах

Як можна бачити з рис. 16 для температур 25°C, 200°C та 350°C, є чітка кореляція між температурою та початком шийкоутворення. При збільшенні температури зразок деформується менше часу та як можна бачити це з рис. 12 в нього зменшується подовження. Також при збільшенні температури можна бачити, що початок шийкоутворення починається раніше та в зразку шийка, як область локалізованої деформації має більшу довжину при збільшенні температури, але в той самий час зразок деформується менший час, що вірогідно каже про те, що в нього зменшується пластичність.

## ВИСНОВКИ

Експериментальна дипломна робота буда спрямована на вивчення механізмів руйнування CuCrZr, а також порівняння їх властивостей під дією різних температур. З отриманих результатів випливають наступні висновки.

1. Встановлено, що механізми шийкоутворення зразків залежать від температури випробувань, а саме при температурі 350°C працює 3 механізми деформування на відміну від 4-х механізмів при температурі 25°C.

2. Проаналізовано залежність геометричної форми шийки при деформації зразків в залежності від двох чинників, а саме від температури та ступеня деформації.

3. Показано, що довжина області локалізованої деформації, так званої шийки, збільшується при зростанні температури випробування зразка.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. William F. Hosford, *Mechanical Behavior of Materials*, 2nd ed, Cambridge University Press, 2010, ISBN-13 978-0-511-65836-5.
2. V. Phillipps, Tungsten as material for plasma-facing components in fusion devices. *J. Nucl. Mater.* 415 (1) (2011) pp. 2-9.
3. H. Gietl, A. v Muller, JW. Coenen, M. Decius, D. Ewert, T. Hoschen, Ph. Huber, M. Milwich, J. Riesch, R. Neu, Textile preforms for tungsten fiber-reinforced composites, *Journal of Composite Materials* 2018, Vol. 52(28) 3875–3884.
4. Shuhua Liang, Long Chen, Zhangxiao Yuan, Yang Li, Juntao Zou, Peng Xiao, Longchao Zhuo, Infiltrated W–Cu composites with combined architecture of hierarchical particulate tungsten and tungsten fibers, *Materials Characterization* Volume 110, December 2015, Pages 33-38.
5. J. Habainy, Y. Dai, Y. Lee, S. Lyengar, Mechanical properties of tungsten irradiated with high-energy protons and spallation neutrons, *J. Nucl. Mater.* 514 (2) (2019) pp. 189-195.
6. Umberto M. Ciucani, L. Haus, H. Gietl, J. Riesch, W. Pantleon Microstructural evolution in single tungsten fiber-reinforced tungsten composites during annealing: recrystallization and abnormal grain growth, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 543, January 2021, 152579.
7. ASTM E8/E8M-21: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
8. <https://www.instron.com/en/products/testing-accessories/grips/wire-cable/w-5074m>.