

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**“Дослідження міцності будівельної арматури для виготовлення  
залізобетонних конструкцій”**

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)

Веніамін ТВЕРДИЙ  
(Ім'я та прізвище)

Керівник: к.т.н. доцент Руслан ГУМЕНЮК  
(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.

“28” квітня 2023 р.

### ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту  
Твердому Веніаміну Олеговичу

1. Тема роботи: «Дослідження міцності будівельної арматури для виготовлення залізобетонних конструкцій»

Керівник роботи: Гуменюк Руслан Васильович, к.т.н., доцент

Затверджена наказом по університету від 28.04.2023 року № 133/к-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 15.01.2024 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів виробництва та розрахунків технологічного обладнання; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; Методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Огляд методик оцінки міцності та тріщиностійкості сталюї термічно зміцненої арматури;

2. Методики оцінки міцності та тріщиностійкості арматурних термонапружених прутків;

3. Результати експериментальних досліджень;

4. Охорона праці та захист населення;

5. Економічна ефективність результатів роботи;

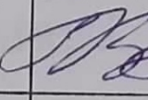
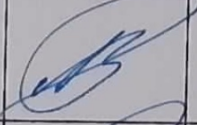
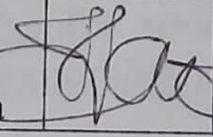
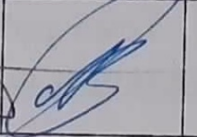
Висновки і пропозиції;

Бібліографічний список.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: технічні можливості відомої установки СМЖ-129Б для електротермічного зміцнення арматурних сталей; загальний вигляд установки СМЖ-129Б для подовження методом електронагріву гарячекатаної арматури періодичного профілю; схема малогабаритної лабораторної установки для термонагріву пруткової арматури; технічні характеристики малогабаритної лабораторної установки; експериментальні вимірювання температури по довжині прутків із сталі 35ГС та 25Г2С на малогабаритній установці; результати досліджень арматурних стрижнів з електротермічним попереднім напруженням; зведені результати розрахунку енергетичних і техніко-економічних показників роботи установки.

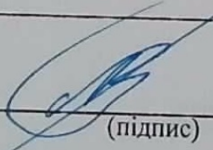
6. Консультанти розділів роботи

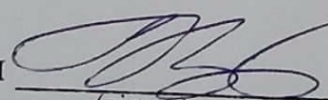
Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3,5	Гуменюк Р.В., к.т.н., доц. кафедри машинобудування	28.04.23 		Вик.
4	Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва			Вик.

7. Дата видачі завдання: 28.04.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	Виконання розділу: «Огляд методик оцінки міцності та тріщиностійкості арматури»	28.04.23- 15.06.23	Вик.
2.	Виконання другого розділу: «Методики оцінки міцності та тріщиностійкості»	16.06.23- 15.08.23	Вик.
3.	Виконання розділу: «Результати експериментальних досліджень»	16.08.23- 08.11.23	Вик.
4.	Виконання розділу: «Охорона праці та захист населення»	09.11.23- 11.12.23	Вик.
5.	Виконання розділу: «Економічна ефективність результатів роботи»	12.12.23- 3.01.24	Вик.
6.	Завершення оформлення розрахунково- пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому	4.01.24- 15.01.24	Вик.

Студент  (підпис) Веніамін ТВЕРДИЙ

Керівник роботи  (підпис) Руслан ГУМЕНЮК

УДК 629.979:664.69

Дослідження міцності будівельної арматури для виготовлення залізобетонних конструкцій.

Твердий В.О. - Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування. Дубляни, Львівський національний університет природокористування, 2024.

82 с. текст. част., 32 рис., 10 табл., 23 джерел інформації.

Розглянуто методику, конструкції зразків та схеми їх навантаження для дослідження міцності термонапружених сталевих стержнів, які використовуються для виготовлення залізобетонних конструкцій.

Запропоновано процес виготовлення циліндричних зразків з кільцевими концентраторами та метод утворення кільцевих тріщин, а також отримані результати міцності на тріщиностійкість циліндричних зразків з кільцевими концентраторами.

Розроблено та виготовлено лабораторний зразок малогабаритного пристрою для електротермічного зміцнення та контролю температури сталевих прутків довжиною 1,5 м зі сталі 35ГС та 25Г2С на час нагрівання (30 с, 90 с та 180 с).

Проаналізовано виробничі небезпеки при експлуатації обладнання та створено логіко-імітаційну модель виникнення травм.

Розраховано енергетичні та техніко-економічні показники запропонованого технічного рішення.

## ЗМІСТ

Стор.

ВСТУП	
1 ОГЛЯД МЕТОДИК ОЦІНКИ МІЦНОСТІ ТА ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ СТАЛЬНОЇ ТЕРМІЧНО ЗМІЦНЕНОЇ АРМАТУРИ.....	8
1.1 Напружено-деформівний стан сталюї термічно зміцненої арматури та обладнання для її зміцнення.....	8
1.2 Огляд методик для визначення міцності та тріщиностійкості конструкційних сталей і термонапруженої арматури.....	14
1.3 Вплив попереднього навантаження на тріщиностійкість арматурних сталей.....	27
2. МЕТОДИКИ ОЦІНКИ МІЦНОСТІ ТА ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ АРМАТУРНИХ ТЕРМОНАПРУЖЕНИХ ПРУТКІВ.....	30
2.1 Коефіцієнти $K_1$ інтенсивності напружень для циліндричного зразка арматурної сталі з кільцевою тріщиною.....	30
2.2 Технологія виготовлення циліндричних зразків з арматурних прутків.....	35
2.3 Спосіб зародження кільцевої тріщини в металевому циліндричному зразку.....	37
3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	41
3.1 Лабораторна установка для термічного зміцнення малодіаметральної арматури електронагрівом.....	41
3.2 Визначення температури по довжині арматурного прутка.....	44
3.3 Визначення втомної міцності термонапружених прутків арматурних сталей 35ГС і 25Г2С.....	49
3.4 Статична тріщиностійкість $K_c$ термонапружених прутків арматурних сталей 35ГС і 25Г2С.....	51
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ.....	54
5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	67
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	69
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	70

## ВСТУП

Проблема забезпечення надійності та довговічності залізобетонних елементів конструкцій (плит, ригелів, прогонів, колон) у будівельній галузі невіддільна від впровадження нових технологій підвищення їх міцності та надійності з урахуванням реальних умов експлуатації.

Аналіз руйнування термічно напружених сталевих прутків показує, що його основними причинами є дефекти типу тріщин або слабкий опір матеріалу поширенню тріщин, а також наявність концентрації напруги, яка на практиці виникає на рівнях, значно нижчих за міцність або текучість.

Особливу увагу слід приділити дослідженню його напружено-деформованого стану, а також розробці методів визначення тріщиностійкості  $K_C$  ( $K_{1C}$ ) по довжині термічно напружених сталевих прутків після попереднього електронагрівання та деформування.

Водночас зміни міцності термічно напружених сталевих прутків із нових марок А400С і А800С зі сталі 35ГС і 25Г2С по довжині, особливо розтріскувальної стійкості  $K_C$  ( $K_{1C}$ ), до кінця не вивчені.

Не вистачає методів контролю температури по довжині сталевих прутків із термічною напругою та шаблону для випробування зразків на стійкість до тріщин, які б допомогли визначити якість даної марки необробленого сталевого прокату. Саме актуальність окресленої проблеми зумовлює вибір теми кваліфікаційної роботи, визначення її мети та завдань теоретичного та практичного характеру.

**Мета роботи** – Оцінка міцності та тріщиностійкості термічно зміцнених сталевих прутків на основі ефективних методів контролю температури нагріву та вимірювання міцності.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Проаналізувати проблемні ситуації в практиці та науці та визначити методи оцінки міцності термонапружених сталевих прутків.
2. Запропонувати методику оцінки міцності і статичної тріщиностійкості термонапружених сталевих прутків.
3. Провести дослідження міцності термічно напружених сталевих прутків довжиною 1,5 метра;
4. Розробити заходи забезпечення техніки безпеки та захисту населення;
5. Розрахувати економічну ефективність запропонованого технічного рішення.

# 1 ОГЛЯД МЕТОДИК ОЦІНКИ МІЦНОСТІ ТА ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ СТАЛЬНОЇ ТЕРМІЧНО ЗМІЦНЕНОЇ АРМАТУРИ

У цій главі представлено огляд літератури, присвячений дослідженням міцності та тріщиностійкості термічно напружених сталей, які використовуються у виробництві залізобетонних конструктивних елементів (колон, плит, ригелів, прогонів) для будівництва споруд, будівель, цивільного та промислового виробництва.

Зокрема, описано обладнання та пристрої, необхідні для зміцнення з електронагріванням та охолодженням затискачами, а також різні методи визначення міцності матеріалу та тріщиностійкості на основі критеріїв міцності механіки руйнування. Рішення пружнопластичних задач у теорії тріщин і задач температурних з урахуванням залишкових напруг при нагріванні. Презентація типів лабораторних зразків та схем їх деформування для визначення основних властивостей конструкційної сталі та тріщиностійкості термонапруженої арматури ( $K_{1C}$ ).

Особливу увагу приділено визначенню тріщиностійкості ( $K_{1C}$ ) за осьовим режимом розтягу циліндричних зразків з кільцевими тріщинами в термічно зміцнених матеріалах. Показано також вплив попереднього натягу на стійкість до розтріскування термічно напружених сталей.

На основі аналізу відповідної літератури зроблено висновки для проведення такого дослідження, сформульовано цілі та завдання реалізації, які будуть розкриті в наступних розділах.

## 1.1. Напружено-деформівний стан сталюї термічно зміцненої арматури та обладнання для її зміцнення

Переважає більшість елементів конструкцій у сучасному будівництві (плити, колони, ферми, прогони) виготовляються зі сталевих прутків, які піддаються електротермічному напруженню, що створює термічні напруги.



Тому на практиці при будівництві та експлуатації залізобетонних конструкцій, заповнених термічно напруженими сталевими стержнями, необхідно точніше враховувати напружено-деформований стан цих температурних елементів.

Маючи це на увазі, ми розглянемо причини температурних навантажень і деформацій у термонапружених матеріалах. За законами термодинаміки відомо, чи змінюється температура твердого тіла (прутка) внаслідок нагрівання. Потім він розтягується і стискається, охолоджуючись. Цю зміну довжини прутка можна виразити такою формулою [7]:

$$\Delta l = a_t L (t - t_o), \quad (1.1)$$

де  $L$  – довжина прутка арматури, м;  $a_t$  – коефіцієнт лінійного температурного розширення металу (КЛТР),  $1/град$ ;  $t - t_o$  – зміна температури нагрівання,  $^{\circ}C$ ;  $t_o$  – початкова температура нагріву;  $t$  – кінцева температура нагріву. Коефіцієнт  $a_t$  дорівнює зміні довжини досліджуваного арматурного прутка при зміні температури нагріву на  $1^{\circ}C$ .

З формули (1.1) знайдемо відносну температурну деформацію:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{L} = a_t T, \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon_t$  – відносна температурна деформація металу,  $T = t - t_o$  – величина зміни температури металу між початковим значенням і кінцевим значенням.

Якщо сталеві прутки нагріти рівномірно, щоб вони могли вільно розтягуватися або стискатися, зміни температури не спричинять виникнення внутрішніх напруг. Якщо стрижень міцно закріплений, в ньому будуть виникати температурні напруги внаслідок нагрівання. Слід також зазначити, що в суцільному незатягнутому прутку при нерівномірному нагріванні можуть виникати температурні напруги. У разі неоднорідних твердих тіл температурні напруги виникають навіть при рівномірних умовах нагріву, оскільки у випадку стикових зварних швів температурні напруги визначаються відмінностями у фізико-механічних властивостях матеріалів. Для прикладу візьмемо зміни модуля пружності  $E$ , Па, коефіцієнт Пуасона  $\nu$  та коефіцієнт лінійного теплового розширення металу  $\alpha_t$ ,  $1/град$ . і т. д.

З процесу опору матеріалу можна знати, що якщо довжина  $L$  прутка змінюється на певну величину приросту  $\Delta l$ , його поперечний переріз створюватиме нормальне силове напруження.

Цей приріст  $\Delta l$  можна визначити за такою формулою:

$$\Delta l = \frac{\sigma L}{E}, \quad (1.3)$$

де  $\sigma$  – нормальна силова напруга, Па;  $E$  - модуль пружності металу прутка, Па.

Для жорсткого затискання прутка, згідно з виразом (1.1), збільшення довжини  $\Delta l$  внаслідок зміни температури усувається дією силового напруження, показаного у рівнянні (1.3), таким чином, жорстке затискання кінця стрижня може бути записується у вигляді рівняння:

$$\alpha_t l (t - t_0) = \frac{\sigma l}{E}, \quad (1.4)$$

Температурне напруження в будь-якому перерізі по довжині арматурного прутка можна знайти за наступною формулою:

$$\sigma = -\alpha_t E (t - t_0) = -\alpha_t E T, \quad (1.5)$$

де  $T = t - t_0$  – зміна температури прутка,  $t_0$  – початкова температура нагріву,  $t$  – кінцева температура нагріву.

Для випадку, коли ми отримуємо термічно напружені сталеві прутки шляхом одночасного нагрівання та охолодження, вся довжина прутка знаходиться під силовим навантаженням, тому температурна напруга та деформація накопичуватимуться до силової напруги та деформації [4], які будемо досліджувати більш детально експериментально.

За цим принципом заводи-виробники проектують і виготовляють технічне обладнання для арматурного прокату.

Коротко опишемо природу електротермічного натягу в лабораторних умовах. Наведемо рекомендовані режими електронагріву для окремих категорій будівельного прокату, а також контроль режимів їх нагріву, а також наведемо найпоширеніші пристрої, що використовуються для виробництва гарячекатаного прокату.

*Натяг арматурних прутків електронагрівом* здійснюється за допомогою електричного струму. Розігріті електричним струмом сталеві прутки розтягуються на певну довжину, а потім кріпляться до упорів піддону або опалубки. Після охолодження в закріплених сталевих прутках виникають задані напруження, які відчуває майбутній затверділий бетон. Нагрівання прутка можна проводити, як зазначено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Рекомендовані режими електронагріву для прутків арматурних сталей

Клас сталі	Марка сталі	Діаметр, мм	Температура нагріву, °С		Тривалість нагріву $t$ , хв.
			рекомендована	максимально допустима	
А-3В	25Г2С	20-40	350	450	0,5-10
	37ГС	20-40	350	450	0,5-III;
А-4	80С	10-18	400	600	0,5-10
	20×Г2Ц	10-32	400	500	0,5-10
Ат-4К	20×ГС2	10-28	400	450	0,5-10
		10-28	400	450	0,5-10
		10-28	400	450	0,5-10
Ат-6	20ГС	10-28	400	450	0,5-10
	20ГС2	10-28	400	450	0,5-10
Ат-5	20ГС	10-28	400	450	0,5-10
	20ГС2	10-28	400	450	0,5-10
	10ГС2	10-28	400	450	0,5-10
	08Г2С	10-28	400	450	0,5-10
А-5	23×2Г2Т	10-32	400	500	0,5-10
Вр-2	-	4	-	350	0,1-0,5
		5		400	0,15-0,8
		6		450	0,2-1

Контроль за режимом нагріву арматури здійснюється збільшенням довжини прутка на величину  $\Delta l$  або за допомогою термоелектричного термометра [7]. Термоелектричний натяг арматури здійснюється на спеціальних пристроях, що дозволяють повністю механізувати і

автоматизувати такі операції, як вимір, підрізка, анкерування, нагрів до необхідної температури і монтаж арматури до упорів.

Сьогодні силами конструкторського відділу проектного інституту та технічного відділу будівельного підрозділу розроблено та введено у виробництво пристрої СМЖ-128Б та СМЖ-129Б для довгомірної арматури (до 6000,0 мм), а також для Зазначених модифікацій комплектуючого задаючого пристрою для виготовлення кронштейнів шнурів живлення також виготовляються за індивідуальними вимогами замовника щодо необхідної довжини термічної арматури.

Наприклад, як показано на рис. 1.1 наведено загальний вигляд пристрою для подовження сталевих прутків СМЖ-129Б в промислових масштабах (розробка Черкаського заводу «Строймаш») [10].

Ці варіанти СМЖ128Б і СМЖ129Б виготовляються за індивідуальними замовленнями замовника (для обробки арматури необхідної довжини замовника).



Рисунок 1.1. Установка СМЖ-129Б для термічного видовження арматурних прутків методом електронагріву.

Технічні характеристики установки СМЖ-129Б представлена у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Технічні характеристики установки СМЖ-129Б

№ п/п	Назви параметрів	Одиниця вимірювання	Величина параметрів
1.	Діаметр прутків арматури	мм	12...25
2.	Довжина частини прутка арматури	мм	3000 і 5000
3.	Кількість одночасно нагріваючих прутків арматури	шт.	2
4.	Тиск повітря у пневматичній системі, не менше	МПа	0,54
5.	Встановлена потужність електро-трансформатора	кВт	40
6.	Габаритні розміри установки СМЖ-129:	мм	
	довжина		5980
	ширина		1130
	висота		1460
7.	Вага установки	кг	830

Наостанок, за даними Б.Г.Гнідця [7], робочі характеристики такого пристрою в нормальних умовах такі:

а - потужність для нагрівання одночасно двох сталевих арматурних прутків, для прикладу наприклад  $\varnothing$  14 мм, має бути не менше 50...60 кВт;

б - нагрійте пруток із вказаним діаметром до 300 °С, максимальний час нагрівання — 4 хвилини;

в – найвигідніший трансформатор для нагрівачів ТСД-100;

д - сила струму нагрівального стрижня 2200А;

г - рекомендований максимальний час нагріву 10...12 хв.;

д - для контролю температури поверхні прутка найбільш ефективні термопари зі сплаву хромель-алюмель;

Має пристрій контролю температури та високотемпературний мілівольтметр МРР-154;

Витрати електроенергії на нагрівання прутка діаметром 14 мм і довжиною 6 м до 350...400 °С становлять 20...25 кВт/год, для двох прутків однакової геометрії кількість електроенергії 20...25 кВт/год розмір - до 50 кВт/год.

З цієї сталі виготовляють стандартні залізобетонні конструкції [11].

## 1.2. Огляд методик для визначення міцності та тріщиностійкості конструкційних сталей і термонапруженої арматури

### 1.2.1. Силовий підхід в механіці руйнування та методики визначення їх тріщиностійкості ( $K_{IC}$ )

Ми всі знаємо, енергетичний критерій був першим в історії критерієм механіки руйнування, запропонований у 1921 році. А. А. Гріффітс припустив, що в будь-якому твердому тілі існують мікроскопічні тріщини, що знижує його міцність. З погляду вартості енергії, він вивів таке співвідношення щодо критичного напруження для руйнування об'єкта:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l_{тр}}}, \text{ (плоский напружений стан)} \quad (1.6)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l_{тр}(1-\nu^2)}}, \text{ (плоска деформація)} \quad (1.7)$$

де,  $\sigma_k$  – критична напруга, при якій тріщини починають поширюватися;  $\gamma$  – ефективна густина енергії; яка потрібна для подолання звязків для утворення нової поверхні  $l_{тр}$  - половина довжини тріщини (для пластини яка має центральну тріщину, якщо пластина розтягується силою  $P$ , прикладеною до її краю, як показано на рис. 1.2)  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Рівняння (1.6) і (1.7) справедливі для визначення  $\sigma_k$  для крихких матеріалів (скло, кераміка, чавун, загартована сталь) тощо.

Зважаючи на значну пластичну деформацію у вершині тріщини квазікрихких матеріалів у природі, силовий метод Дж. Р. Ірвіна став найбільш широко використовуваним методом в інженерних розрахунках. Підходяще до цього методу критичне напруження  $\sigma_k$  у вершині тріщини є жорстким тіло, пошкоджене нормальним відривом визначається коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_1$ . Надалі послідовне впровадження силових методів дало змогу багатьом дослідникам [3, 7, 10, 12, 13]. Створить достатньо повну теорію лінійної механіки руйнування, за допомогою якої крихке руйнування матеріалів та інженерних конструкцій можна з легкістю аналізувати та оцінювати.

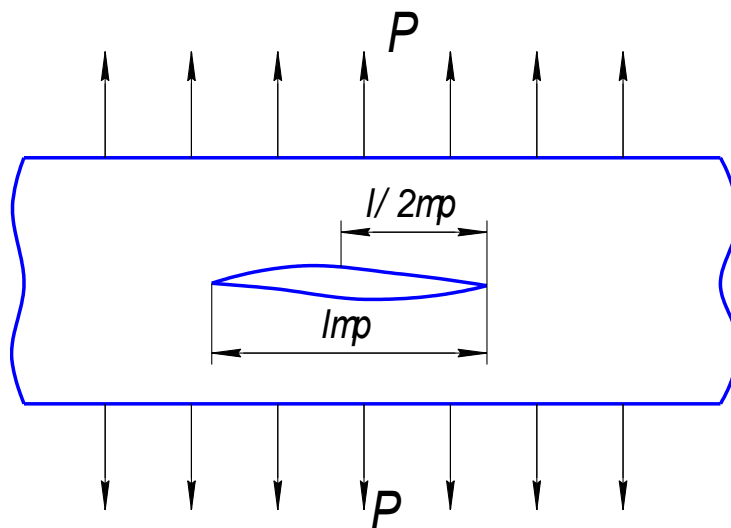


Рисунок 1.2 - Схема зконцентрованого розтягу металевої пластини з центральною тріщиною.

Зважаючи на це авторами досліджено розподіл напружень і деформацій, що виникають в елементах конструкцій під час розрахунків на міцність [1]. Матеріальний обшар на деякій віддалі від вершини тріщини представляє особливий інтерес, тому що саме там починається процес руйнування матеріалу. Для ідеального варіанту тріщина розглядається як ділянка нульової товщини без напруги на її поверхні, і розв'язок цієї умови спрощується до наступної задачі - теорія еластичності.

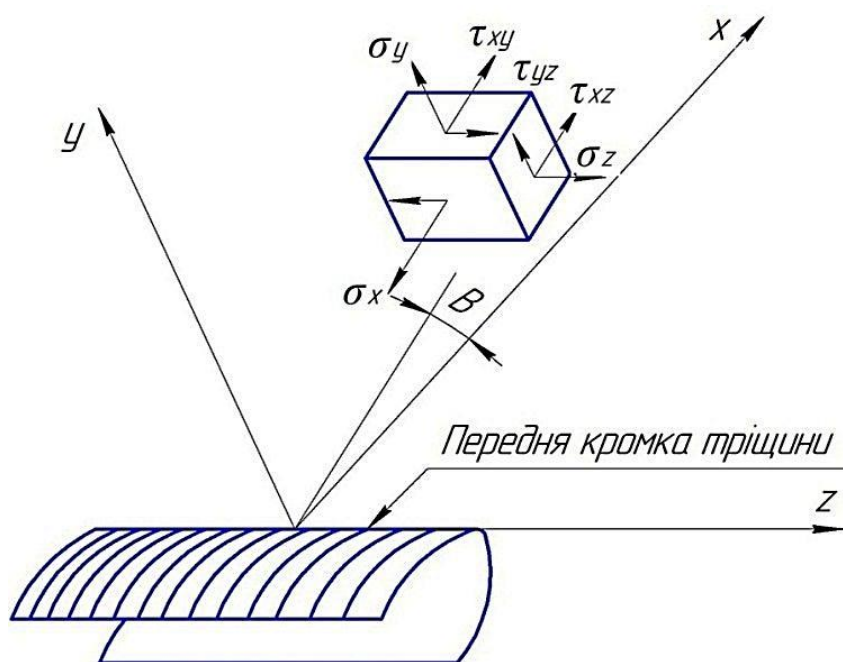


Рисунок 1.3 - Схема координат і розподіл напружень у вершині тріщини, що характеризуються рівняннями (1.3 - 1.5).

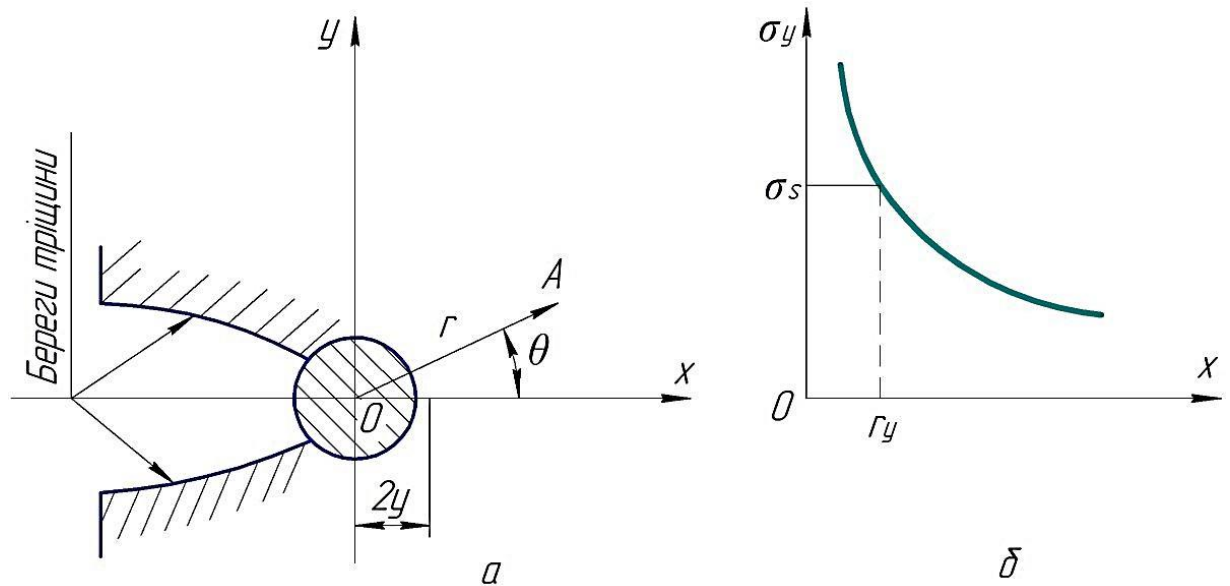


Рисунок 1.4 - Область вершини тріщини (а) та зміна напружень від вершини тріщини у плоскому зразку (б).

Загалом розподіл деформацій і напружень біля будь-якої точки  $O$  (рис. 1.4, а, б) профілю тріщини можна описати як суперпозицію трьох часткових типів деформацій (рис. 1.5), що відповідають трьом основним видам зміщення на поверхні тріщини: нормальний відрив (I), поперечні (II) і поздовжні (III) зміщення. Перший тип пов'язаний з нормальним зміщенням поверхонь тріщин у протилежних напрямках (симетричних відносно площин  $xy$  і  $xz$ ), другий – зі зміщенням поверхонь тріщин, що ковзають одна об одну в напрямку, перпендикулярному до їх передніх граней (вісь  $z$ ); три пов'язані з ковзанням однієї поверхні тріщини по іншій паралельно фронту тріщини (вісь  $z$ ).

При виконанні кожного зазначеного виду деформації на об'єкті з тріщинами по контуру розподіл переміщень і напружень записується так:

- нормальний зовнішній вигляд відриву I (рис. 1.5):

$$\begin{aligned}
 u_x &= \frac{K_1}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\mu + \sin \frac{\theta}{2}\right), \\
 u_y &= \frac{K_1}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\mu + \sin \frac{\theta}{2}\right), \\
 \sigma_{xx} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right),
 \end{aligned} \tag{1.8}$$



$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right),$$

$$\sigma_{zz} = \frac{2\mu K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2},$$

$$\tau_{xx} = \tau_{yz} = 0,$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2};$$

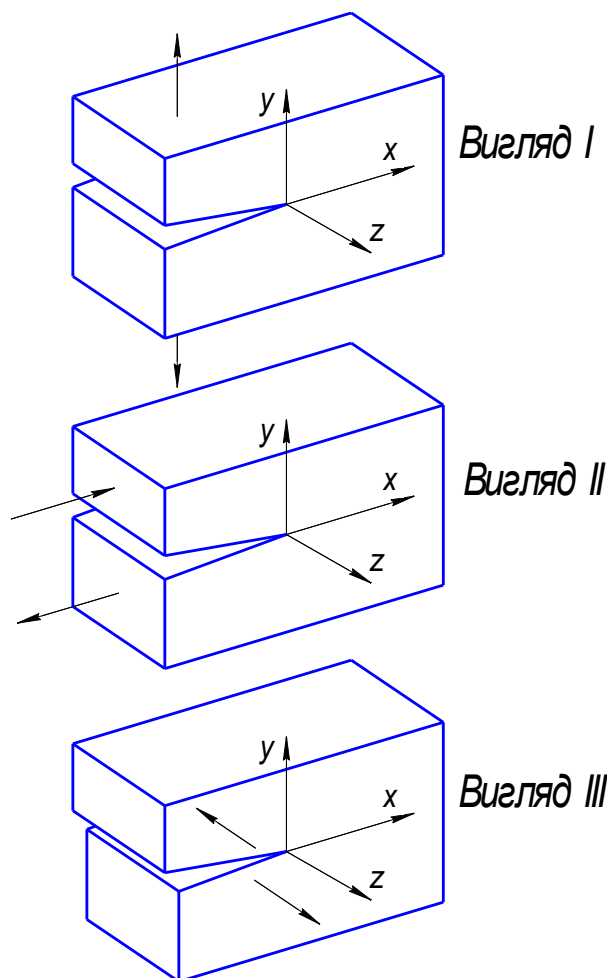


Рисунок 1.5 - Основні типи переміщень поверхонь тріщини: I – нормальний зсув; II – поперечний зсув; III – поздовжній зсув.

- Поперечний зсув має вигляд II (рис. 1.5):

$$u_x = \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 - 2\mu + \cos \frac{\theta}{2} \right),$$

$$u_y = \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 2\mu - 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right),$$

$$\sigma_{xx} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right), \quad (1.9)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2},$$

$$\begin{aligned}\sigma_{zz} &= \frac{2\mu K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}, \\ \tau_{xx} &= \tau_{yz} = 0, \\ \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right);\end{aligned}$$

- поздовжній зсув вигляд III (рис. 1.5):

$$\begin{aligned}u_x &= 0, \quad u_y = 0, \\ u_z &= \frac{K_{III}}{G} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\theta}{2}, \\ \tau_{xy} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}, \\ \tau_{yz} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}, \\ \sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0\end{aligned} \tag{1.10}$$

В рівняннях (1.8) – (1.10) використовуються такі вирази:  $G$  – модуль зсуву,  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона,  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  – коефіцієнти інтенсивності напружень нормального відриву, поперечного та поздовжнього зсуву відповідно (SIN). Коефіцієнти  $K_I$ ,  $K_{II}$  та  $K_{III}$  використовуються для вимірювання сингулярності напружень поблизу вершини тріщини (тобто зони передруйнування) і відіграють у цій зоні таку саму роль, як і коефіцієнти концентрації напружень у процесі опору макрооб'ємного матеріалу тіла. На противагу від коефіцієнта концентрації, коефіцієнт інтенсивності напружень вимірюється в  $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ . Універсальність рівнянь (1.8) – (1.10) полягає в радіальному (вздовж радіуса  $r$ , рис. 1.3) та кутовому (вздовж напрямку зміни кута  $\theta$ , рис. 1.4, а) розподілі асимптотичного рівняння напруженого стану (1.8) – (1.10) не залежно від довжини тріщини, форми тіла та схеми прикладених навантажень і тому визначається лише коефіцієнтами  $K_I$ ,  $K_{II}$  та  $K_{III}$ , якими є прикладене напруження  $\sigma$  та довжина тріщини  $l$ . Тепер можна записати, що  $K_I=K_I(\sigma, l)$ ,  $K_{II}=K_{II}(\sigma, l)$ ,  $K_{III}=K_{III}(\sigma, l)$  є основною ознакою для оцінки напружено-деформованого стану матеріалу навколо тріщини та дуже важлива в механіці руйнування, наприклад є самостійною частиною математичної теорії тріщини.

### 1.2.2. Силіві критерії крихкого та квазікрихкого руйнування.

Ідеальним варіантом напружено-деформованого стану біля фронту тріщини розміром  $l$ , спричинений зовнішнім навантаженням  $\sigma$ , з достатньою точністю визначається коефіцієнтами інтенсивності напружень  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$ . У такому разі критеріальне рівняння міститиме параметри  $K_I$ ,  $K_{II}$  та  $K_{III}$ , а втім деякі константи матеріалу  $C$ , які залежать від його властивостей (хімічний склад, реологія) тощо, і може бути записане у вигляді:

$$F(K_I, K_{II}, K_{III}, C_i)=0, (i=1, 2, 3, \dots) \quad (1.11)$$

Граничний стан описує співвідношення (1.11) даного матеріалу поверхні в координатах ( $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$ ), при досягненні якого тріщина змінюється зі стабільної на нестійку (починає розповсюджуватися). Водночас вважається, що розмір зони пластичної деформації перед тріщинами повинен бути досить малим порівняно з розміром зразка (рис. 1.3, б).

Відповідно до критерію (1.11) Дж. Р. Ірвіна [14] для руйнування квазікрихких тіл нормальними механізмами відриву тріщини почнуть розповсюджуватися, як тільки коефіцієнт інтенсивності напружень досягне критичного значення для цього матеріалу, при цьому можливі дві умови. - стан плоскої деформації та плоского розтягнення:

$$K_{I*}=K_{IC}, \quad K_{I*}=K_C, \quad (1.12)$$

Тут  $K_{I*} = K_I(\sigma_*, l)$ , де  $\sigma_*$  - граничне значення напруги руйнування при заданій довжині тріщини  $l$  у матеріалі.

Подібно до цього критерію Оуена, умови зародження тріщини для поперечного зсуву ( $K_I=K_{II}=0$ ) і поздовжнього зсуву ( $K_{II}=K_{III}=0$ ) будуть визначені за аналогією з рівнянням (1.12) відповідно.

До того ж, згідно з гіпотезою Д. С. Дагдейла, яка базується на дослідах після розтягування тонкої пластини із зовнішніми та внутрішніми вирізами, під час її продовження виникає пластична зона, яка зконцентрована у вузькій смузі, тому останню необхідно враховувати за додавання розміру  $l_0$  до довжини початкової тріщини;

$$l_{mp} = l_0 + r_y, \quad (1.13)$$

Поправку на довжину тріщини з урахуванням коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_1$  і міцності матеріалу  $\sigma_{0,2}$  можна знайти в співвідношенні:

$$r_y = 1/2\pi(K_1/\sigma_{0,2})^2 \quad (1.14)$$

Величина поправки  $r_y$  залежить від довжини тріщини та товщини пластини, внаслідок чого змінюється її напружено-деформований стан, отже пряме підсумовування за рівнянням (1.13) є некоректним.

Виходячи з цього запропонований критерій Леонова-Панасюка ( $\delta_k$  модель) є більш примітивним і не зводиться до моделі Гріффітса-Ірвіна. Відповідно до цієї моделі тріщина розглядається як розріз (рис. 1.6, а, б, в), а протилежні сторони в зоні передруйнування притягуються напругою  $\sigma_0$  (константа матеріалу) і поширюються. Коли верхній отвір досягне критичного значення, з'являться тріщини  $\delta_k$ :

$$2\vartheta_n(\rho^x, \sigma_0, l_0, l_{TP}) = \delta_k, \quad (1.15)$$

де  $\vartheta_n(\rho^x, \sigma_0, l_0, l_{TP})$  – нормальна складова вектора переміщень у вершині тріщини;  $l_0$  – початковий розмір тріщини;  $l_{TP} - l_0$  – характерний лінійний розмір перехідної зони.

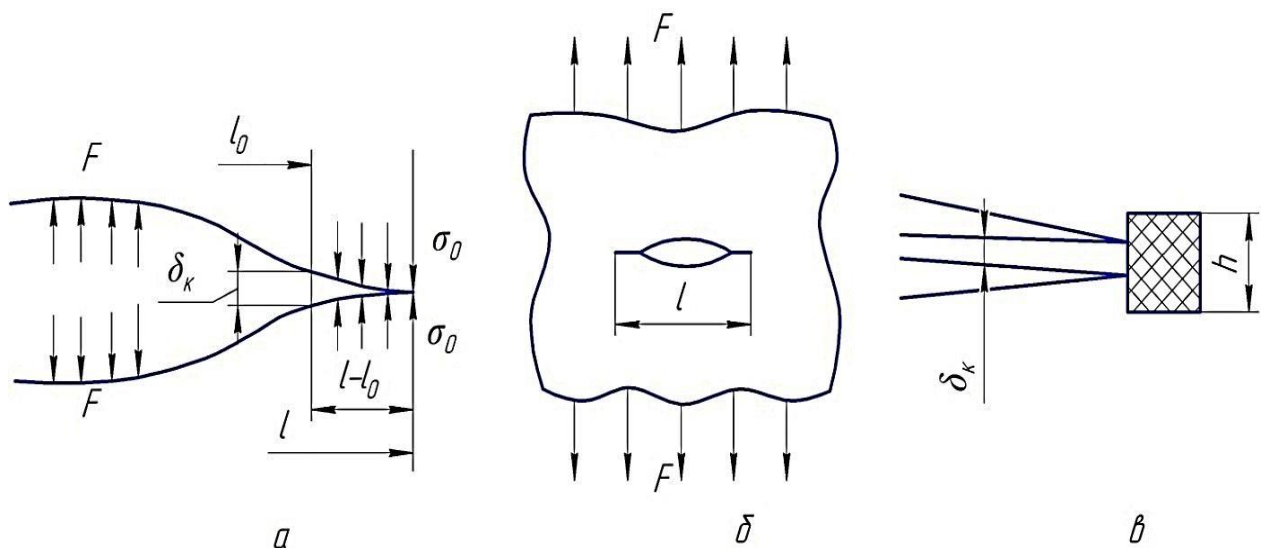


Рисунок 1.6 - Схематичне зображення  $\delta_k$  моделі (а); навантаження пластини з центральною тріщиною (б);  $\delta_k$  – модель локального руйнування квазікрихкого тіла з тріщиною (в).

Тоді  $b_k$  - модель Леонова-Панасюка в роботі О. Є. Андрейківа [1] спрощується до узагальненої моделі локального руйнування квазікрихкого тіла з тріщинами, де передбачається, що поширення тріщини почнеться при: межі одиничного об'єму, на висоті передруйнівної області (рис. 1.6, в)  $h$  досягає критичної деформації.

$$E_k = \delta/h, \quad (1.16)$$

де  $\delta$  – видовження елементарного об'єму в процесі його деформації.

Об'єм може бути пов'язаний з іншими механічними властивостями та параметрами структури матеріалу (наприклад, розміром зерна), тобто характеризує стан «самоподібності», що визначає розмір зразка та його тріщин.

Слід зауважити, що це пояснення також включає термічно напружені сталі, які ми розглянемо нижче.

Таким чином, принципова різниця між значеннями лівої та правої частин критеріального відношення (1.12) полягає в тому, що  $K_I^*$ ,  $K_{II}^*$ ,  $K_{III}^*$  відображають геометрію тіла тріщини та умови його навантаження, а  $K_{IC}$ ,  $K_{IIC}$ ,  $K_{IIIC}$  - властивості матеріалу відображають здатність матеріалу чинити опір поширенню тріщин, тобто тріщиностійкість. Для визначення тріщиностійкості конструкційних матеріалів розроблено багато методик і рекомендацій [6], які регламентують умови застосування цих стандартів.

### **1.2.3. Конструкції зразків і схеми їх навантажень для дослідження тріщиностійкості конструкційних і термонапружених сталей**

На підставі поставлених завдань та зусиллями фахівців у галузі механіки руйнування розроблено лабораторні зразки різних конструкцій та раціонально підібрано схеми навантаження для оцінки стійкості матеріалу до розповсюдження тріщин.

Оскільки геометричні розміри різних конструкцій зразків та схеми їх навантаження та формули для розрахунку  $K_{IC}$  ( $K_C$ ) детально наведені в багатьох літературних джерелах [11-15], то в такому разі обмежимося ними щодо визначення структурних і термічних напружень Тріщина, опір матеріалу  $K_{IC}$  ( $K_C$ ).

Нижче наведено найбільш характерні конструкції зразків, що використовуються на практиці лабораторних випробувань для конструкційних і термічно напружених сталей.

Зразки з внутрішніми або зовнішніми тріщинами (рис. 1.7, а, б, в) використовують для відбіркових випробувань сил статичного розтягу для класифікації якості. Для визначення тріщиностійкості  $K_{IC}$  матеріалу в умовах плоского деформування їх не використовують через малу товщину, тож визначають  $K_C$  для заданого розміру (товщини) зразка.

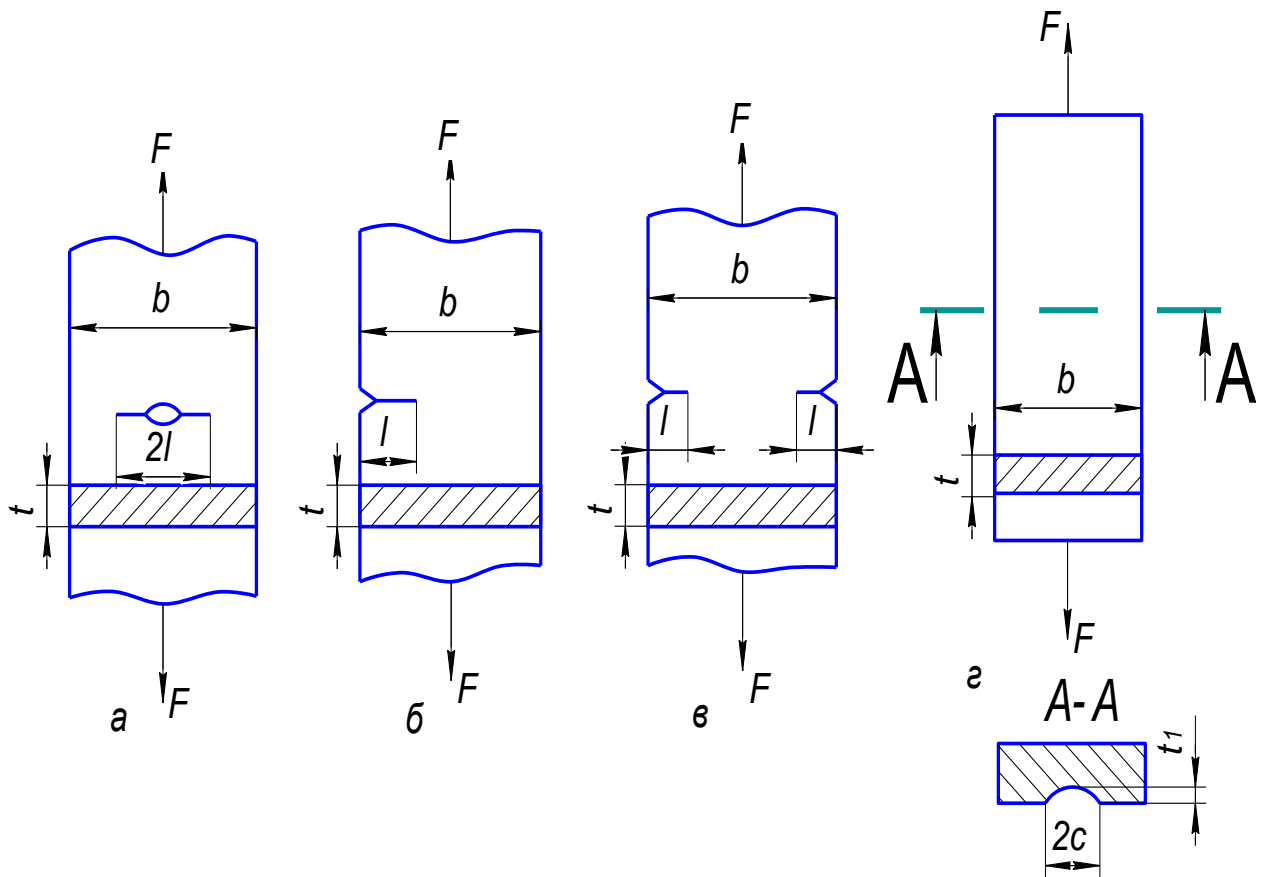


Рисунок 1.7 - Зразки пластини на розтяг: а) – з центральною тріщиною; б) – з боковою тріщиною; в) – з двома боковими; г) – з поверхневою сегментною.

Плоскі зразки з поверхневими сегментованими тріщинами (рис. 1.7, г) використовують для визначення тріщиностійкості  $K_C$  матеріалів, які використовуються для виготовлення тонкостінних посудин, що працюють під тиском (труб, резервуарів, баків). Вони пройшли випробування на статичну міцність [12].

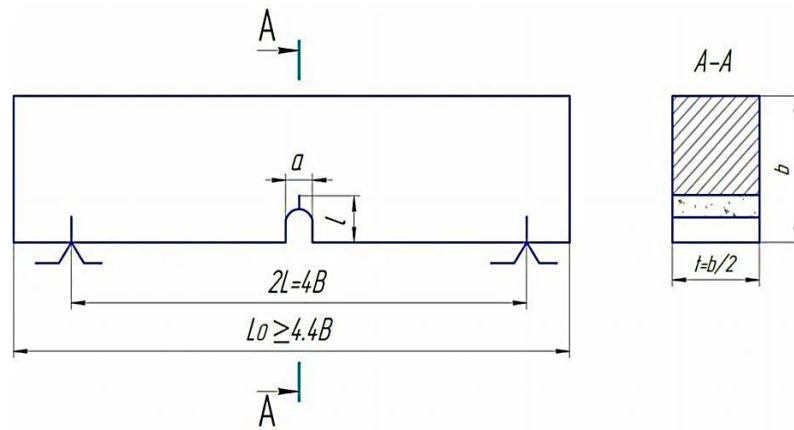


Рисунок 1.8 - Зразок-балка з боковою тріщиною на триточковий згин.

Зразки плоских балок з бічними тріщинами (рис. 1.8) широко використовують при статичних випробуваннях на триточковий згин для визначення тріщиностійкості матеріалів  $K_{IC}$  в товстостінних елементах конструкцій.

Плоский зразок з бічними тріщинами (рис. 1.9) — це так званий ДБК — зразок зарубіжних зразків, особливо англійських і американських, з різними структурними модифікаціями. Вони піддаються випробуванню на ексцентричне розтягування (розрив) для визначення матеріалів  $K_{IC}$  для великих конструкцій. На їхніх бічних поверхнях іноді використовують канавки для досягнення спрямованого росту тріщини під час втомного циклічного навантаження або статичних операцій розриву.

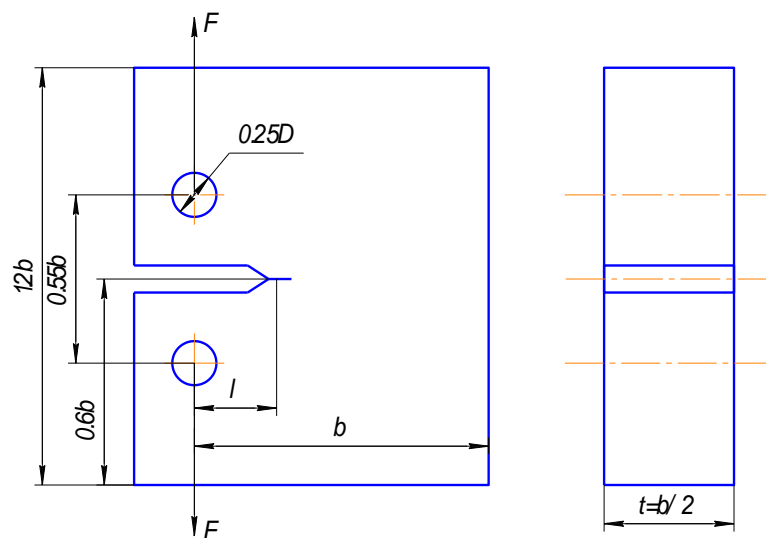


Рисунок 1.9 - Зразок-плита з боковою тріщиною на позакентровий розтяг.

При дослідженні високоміцних матеріалів стійкість до втоми або статичного розтріскування ( $K_{1C}$ ) пластин найчастіше перевіряють на зразках дисків з бічними або центральними тріщинами (рис. 1.10).

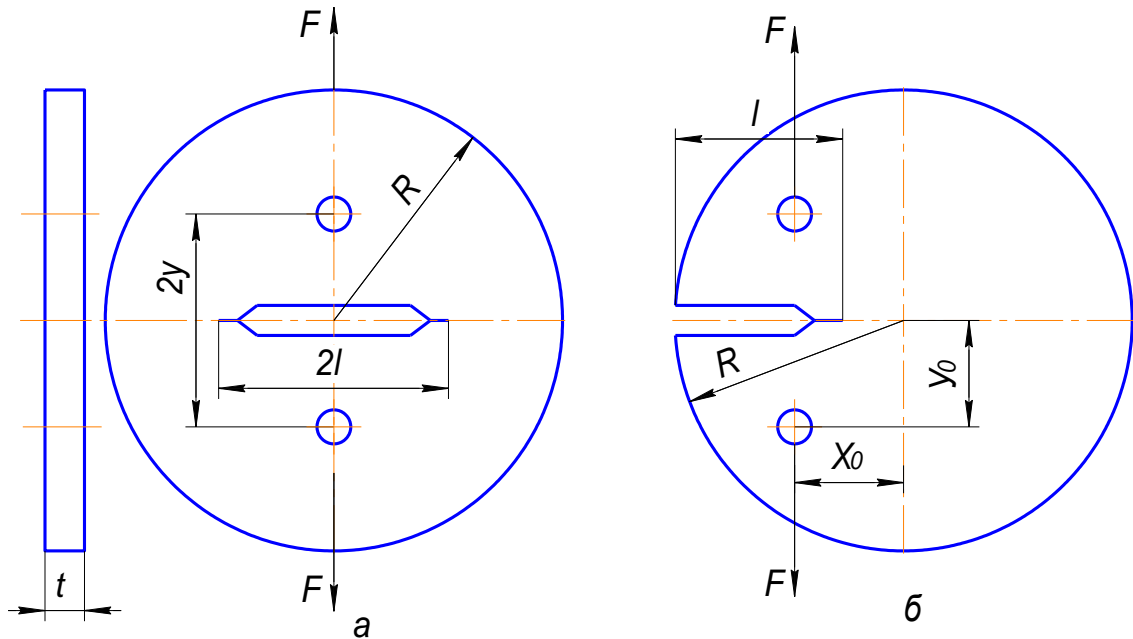


Рисунок 1.10 - Зразки-диски на розтяг: а) – центральною тріщиною; б) – боковою тріщиною.

Коли раніше класифікували різні марки матеріалів за статичною міцністю, як заводські зразки використовували циліндричні зразки з гранично малогострими кільцевими концентраторами (рис. 1.11). Головне, що заважає проводити випробування на визначення властивостей  $K_C$  або  $K_{1C}$ , це відсутність надійного методу ініціювання осесиметричних кільцевих тріщин. З початку 1980-х років вітчизняні дослідники ефективно вирішили цю проблему. Нині вони використовуються для ідентифікації матеріалів  $K_{1C}$ , тому що наявність у них кільцевих тріщин дозволяє більш ефективно реалізувати умови площинної деформації при руйнуванні за схемами осевого розтягу, триточкового згину та кручення.

Є інші типи лабораторних зразків, що можуть конструктивно вдосконалити відомі форми застосування концентраторів. Такі зразки під час випробувань проводять спеціальні дослідження, такі як втома, кручення, вигин в умовах циклічного навантаження.



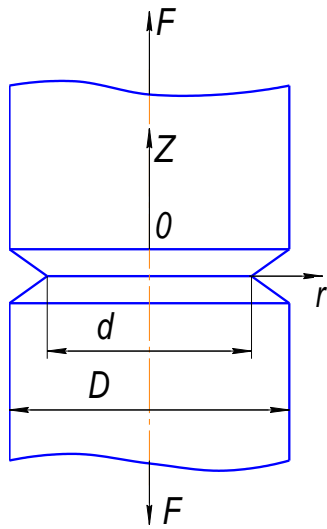


Рисунок 1.11 - Осьовий розтяг циліндричного зразка з кільцевим концентратором.

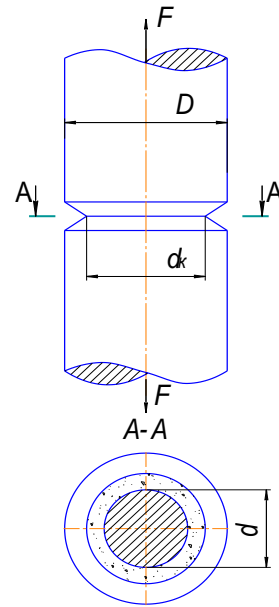


Рисунок 1.12 - Осьовий розтяг циліндричного зразка з кільцевою тріщиною.

Циліндричні зразки з кільцевими тріщинами (рис. 1.12) широко застосовують для випробувань на тріщиностійкість ( $K_{1C}$ ) прутків з циліндричними частинами.

Що стосується вибору розміру зразка та методу випробувань для  $K_{1C}(K_C)$ , то в літературі є запропоновано безліч критеріїв для визначення правильних значень цих властивостей тріщиностійкості [11]. Ми вважаємо, що детальний аналіз їх застосування дозволить вибрати найбільш ефективні.

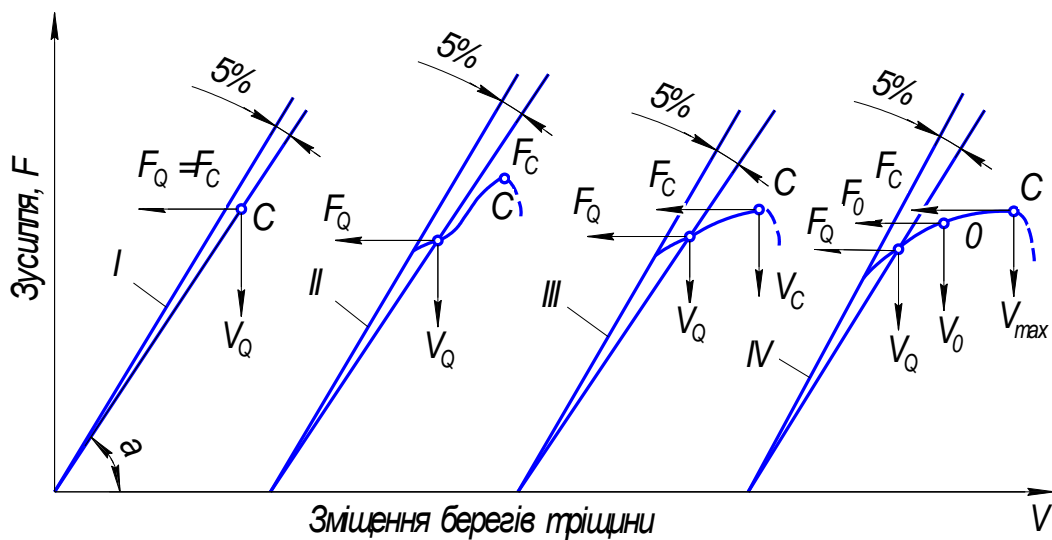


Рисунок 1.13 - Види діаграм руйнування при випробуваннях зразків арматурних сталей за умов статичного згину чи розтягу.

Діаграма типу характеристики руйнування квазікрихкого матеріалу, отриманого шляхом проведення статичного випробування на розтягання зразка з вищезазначеною структурою, показана на рис. 1.12, де в разі 5% деформації при визначенні сили  $F_S$  використано січний метод. Виходячи з цих даних, значення коефіцієнта  $K_Q$  вважається рівним  $K_{1C}$ , якщо виконується нерівність [14]:

$$F_c \leq 1,1 \cdot F_Q; \bar{D} \leq 1; \bar{d} \leq 1; \varphi_c \leq 1,5 \%, \quad (1.17)$$

$$\text{де } \bar{D} = \frac{D_p}{D}; \bar{d} = \frac{d_p}{d}; D_p = 2,3 \frac{K_Q^2}{Q_{0,2}^2}$$

Де  $D_p, d_p$  – розміри циліндричного зразка арматурного прутка в зоні руйнування;  $\varphi_c$  – відносне залишкове звуження зони руйнування зразка;  $F_Q$  – значення навантаження, яке визначене на перетині січної 5% і кривої діаграми руйнування матеріалу;  $F_c$  – навантаження максимальне, визначене у вершині діаграми руйнування. При виконанні умови (1.17) значення  $K_C$  дорівнює  $K_{1C}$ . Якщо на практиці ці нерівності не виконуються, то для отримання надійної  $K_{1C}$  необхідно буде збільшити діаметр  $D$  циліндра [14].

Найпоширенішим методом визначення  $K_{1C}$  серед зарубіжних дослідників є проведення ексцентричних випробувань на «компактні» та DCB зразки з V-подібними канавками з боків уздовж лінії різку [13], що покращує реалізацію умов плоскої деформації під час різання. процес руйнування і товщина зразка відносно годин матеріалу. При цьому інколи вдається отримати достовірні значення тріщиностійкості  $K_{1C}$  при товщинах  $B \geq 2,5 / \pi (K_{1C}/\sigma_{0,2})^2$ , яле ці зразки вимагають чіткого математичного обґрунтування корекції бічних канавок, про що автор робить висновок, з певним наближенням враховуйте їх.

Можливість визначення  $K_{1C}$  пластичних матеріалів за вирізаними зразками невеликих розмірів продемонстровано в роботі [11].

Визначення тріщиностійкості  $K_{1C}$  пластифікованих сталей середньої та низької міцності можна встановити за критичним параметром розкриття

тріщин KRT, що базується на концепції моделі  $\delta_k$  – моделі Леонова-Панасюка-Андрейківа і методі  $j$  – інтегралу і повинен використовуватися. Для руйнування сталі зі значною пластичною деформацією Процес зразка, в якому перед тріщиною з'являється значна пластична смуга.

J-інтеграл, або так звана R-крива, записана на діаграмі руйнування, по суті, є ідеєю міцності, яка використовується для оцінки тріщиностійкості матеріалів у пружно-пластичному середовищі та вивільнення енергії деформації під час поширення втомної тріщини. Концепція енергетичної контурної інтеграції була запропонована незалежно Черепановим Г. П. і Райсом Дж., але основні положення для таких випробувань були доповнені в євростандартах.

### **1.3. Вплив попереднього навантаження на тріщиностійкість арматурних сталей.**

Вплив попереднього натягу на тріщиностійкість ( $K_{IC}$ ) конструкційної сталі, особливо термічно напружених сталевих прутків, ще повністю не вивчено. Наприклад, з багатьох робіт видно, що попереднє циклічне навантаження не тільки суттєво впливає на механічні експлуатаційні характеристики та швидкість розвитку втомної тріщини матеріалу, але й суттєво впливає на опір матеріалу крихкому руйнуванню (тріщиностійкість), липкість, ударну в'язкість, крихкість. Температуру переходу визначали за результатами випробувань гладких циліндричних зразків експериментальним способом стандартного розміру (рис. 1.14, а, б) або циліндричних зразків сталі з кільцевими тріщинами (рис. 1.14, в, г), відповідно, випробуваних за схемою осьового розтягу.

Геометрія циліндричного зразка з кільцевими тріщинами для випробування на осьовий розтяг показана на рис. 1.15.

Давайте коротко опишемо діаграму повного руйнування гладкого циліндричного зразка, який підкоряється лінійному закону Гука для крихких матеріалів, як показано на рис. 1.16 (див. заштрихований розділ I), для

квазікригких матеріалів він має характеристичну криву (F-ε) з чіткою межею текучості, коли на поверхні циліндра утворюється шийка: вона піднімається або опускається, як показано на рис. 1.14.

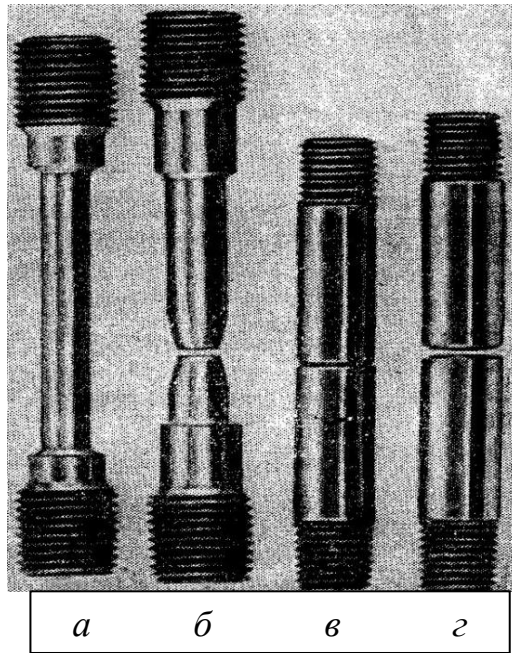


Рисунок 1.14 - Циліндричних зразки випробувальних сталей: а, б – до і після випробувань гладкий; в, г – з кільцевою тріщиною до випробування і після випробування.

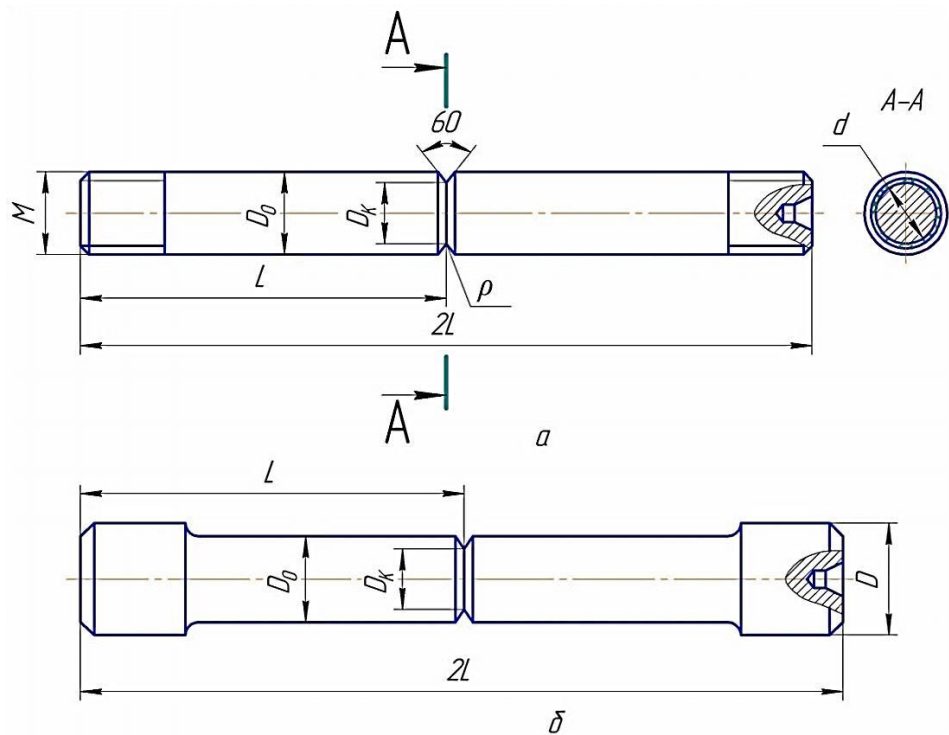


Рисунок 1.15 - Види циліндричних зразків сталей для визначення тріщиностійкості ( $K_{1C}$ ): а - осьовим розтягом за нарізь; б - захоплювач за галтелі по кінцях зразка.

Найвища точка на рисунку відповідає кінцевому руйнуванню гладкого циліндричного зразка, а напруга, що відповідає цій точці, називається максимальним напруженням міцності  $\sigma_v$  (рис. 1.14). При дослідженні матеріалів із підвищеною пластичністю після формування шийки в циліндричних зразках повна картина руйнування закінчується руйнуванням шийки та падінням напруги, як показано на рисунку 1.16.

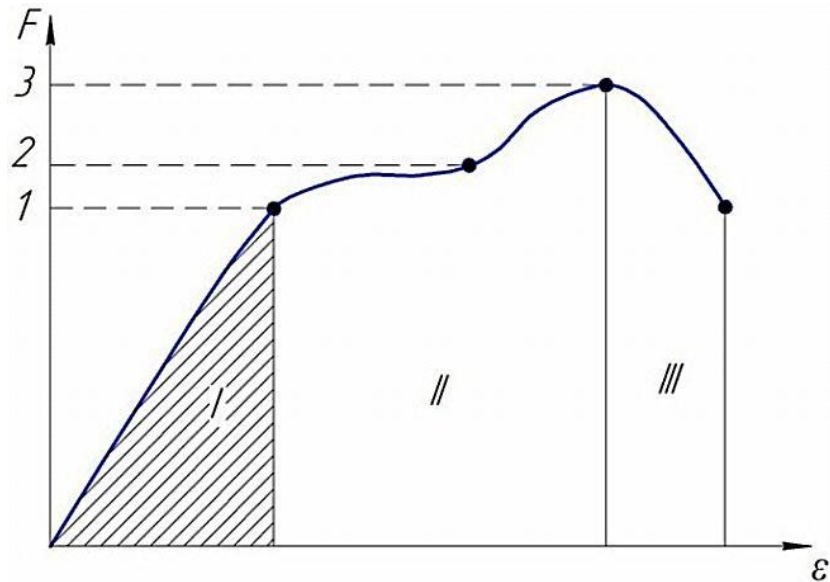


Рисунок 1.16 - Діаграма руйнування гладкого циліндричного металевого зразка: I - ділянка крихкого руйнування; II - ділянка квазікрихкого руйнування; III – ділянка в'язкого руйнування.

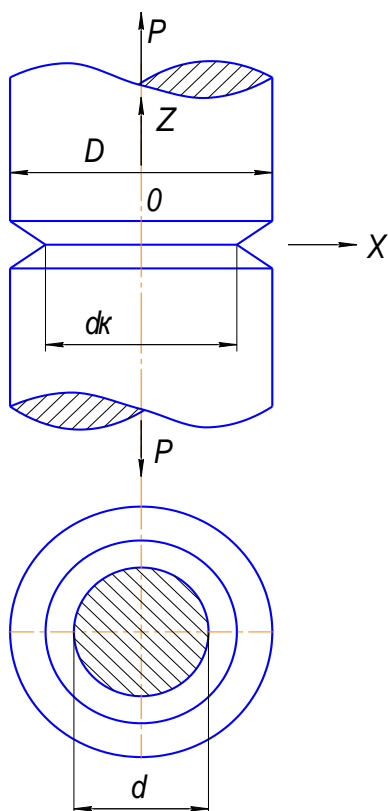
Зауважимо, що процеси, які відбуваються на повній діаграмі руйнування металевого гладкого циліндричного зразка, можуть трансформуватися та впливати на інші види деформації, змінюючи тим самим довговічність, міцність і тріщиностійкість матеріалу.

Наприклад, у роботі також виявлено, що під впливом циклічного навантаження на випробувальний зразок зародження тріщини в зразку зменшується, а робота розповсюдження тріщини зростає. Автори [10] продемонстрували, що циклічне навантаження попереднє нижче межі довговічності не призводить до окрихчення сталі. Досліджено вплив термічної обробки на опір сталі зародженню та поширенню втомної тріщини [5,18].

## 2. МЕТОДИКИ ОЦІНКИ МІЦНОСТІ ТА ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ АРМАТУРНИХ ТЕРМОНАПРУЖЕНИХ ПРУТКІВ

В цьому розділі представлено методику оцінки тріщиностійкості та міцності термонапружених сталевих арматурних прутків зі сталей 35ГС та 25Г2С за схемою кругового згину випробувального зразка з кільцевим концентратором, деформованого на токарному верстаті з фіксованим прогином до початку деформації. Графічна залежність росту втомної тріщини з плином часу циклічного деформування циліндричних металевих зразків, розрізаних на шість ділянок по довжині термічно напружених стержнів, та результати тріщиностійкості статичної після розтягування циліндричних зразків арматурних сталей з кільцевими тріщинами по довжині термічно напружених прутків, напружену арматуру будують за наведеною схемою.

### 2.1. Коефіцієнти $K_I$ інтенсивності напружень для циліндричного зразка арматурної сталі з кільцевою тріщиною.



У цьому дослідженні виконується К-калібрування та аналізується адекватність остаточної формули кожного автора для розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  в умовах статичного розтягу осьового для циліндра з кільцевою тріщиною (рис. 2.1).

Рисунок 2.1 - Схема осьового навантаження циліндричного зразка сталі з кільцевою тріщиною.

На думку Паріса П. і Сі Дж., коефіцієнт інтенсивності тиску становить:

$$K_I = \sigma_N \sqrt{\pi \cdot D} \cdot F(d/D); \sigma_N = \frac{4P}{\pi D^2}, \quad (2.1)$$

У формулі  $\sigma_N$  – середнє напруження розтягу в площині тріщини циліндричного кільця;  $D$  – зовнішній діаметр металевого циліндра;  $F(d/D)$  – функція безрозмірна, яка залежить від співвідношення  $d/D$ ;  $P$  – головний вектор осової сили розтягування циліндра.

Коли сила розтягу досягає граничного значення  $P=P^*$  і напруження  $\sigma_N=\sigma^*$ , тріщина розширюється і циліндр руйнується. Граничному значенню відповідає коефіцієнт  $K_I$ , розрахований за формулою (2.1.), тобто  $K_I = K_{IC}$ . Значення безрозмірної функції  $F(d/D)$  найбільш точно розраховано Г. Ф. Бюкнером в діапазоні  $0,5 \leq d/D \leq 0,9$ . У таблиці наведено функцію  $F(d/D)$  як функцію відносної величини відношення  $d/D$ .

Тоді відповідно до Х. Ф. Бюкнера  $K$  - може призвести до зміни певної функції  $U$  відповідно до значення  $d/D$ , яке можна записати наступною формулою:

$$K_I = \frac{P}{D^{3/2}} \cdot Y = \frac{P}{D^{3/2}} \cdot \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{D}{d}\right)^{3/2} \cdot F(d/D), \quad (2.2)$$

де значення  $F(d/D)$  представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Значення  $F(d/D)$  від відносного розміру тріщини  $d/D$ .

1 - $d/D = 0,50$ – функція $F(d/D) = 0,2400$ ;
2 - $d/D = 0,70$ – функція $F(d/D) = 0,2590$ ;
3 - $d/D = 0,80$ – функція $F(d/D) = 0,2510$ ;
4 - $d/D = 0,60$ – функція $F(d/D) = 0,2550$ ;
5 - $d/D = 0,90$ – функція $F(d/D) = 0,2100$ .

А. Є. Андрейків [1] також розв'язав задачу граничної рівноваги циліндра з кільцевими тріщинами, де коефіцієнт інтенсивності напружень визначається за:

$$K_I = \frac{P}{D^{3/2}} \cdot Y = \frac{P}{D^{3/2}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{D}{d}\right)^{3/2} \cdot \frac{1}{1+0,339\varepsilon^3+0,136\varepsilon^5}, \quad (2.3)$$

де  $\varepsilon=d/D$  –розмір кільцевої тріщини відносний.

С. Я. Ярема методом інтерполяції граничних умов розв’язав задачу граничної рівноваги циліндра з кільцевими тріщинами, наближена формула якої виражається у вигляді:

$$K_I = \frac{P}{D^{3/2}} \cdot Y = \frac{P}{D^{3/2}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{D}{d}\right)^{3/2} \cdot \sqrt{1 - \frac{0.199\varepsilon}{1-0.8012\varepsilon}}, \quad (2.4)$$

Залежність маси тари  $K_I = D^{3/2}/P$  при  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , будується за формулами (2.2), (2.3), (2.4), як показано на рисунку 2.2. Задовільно узгоджуються один з одним.

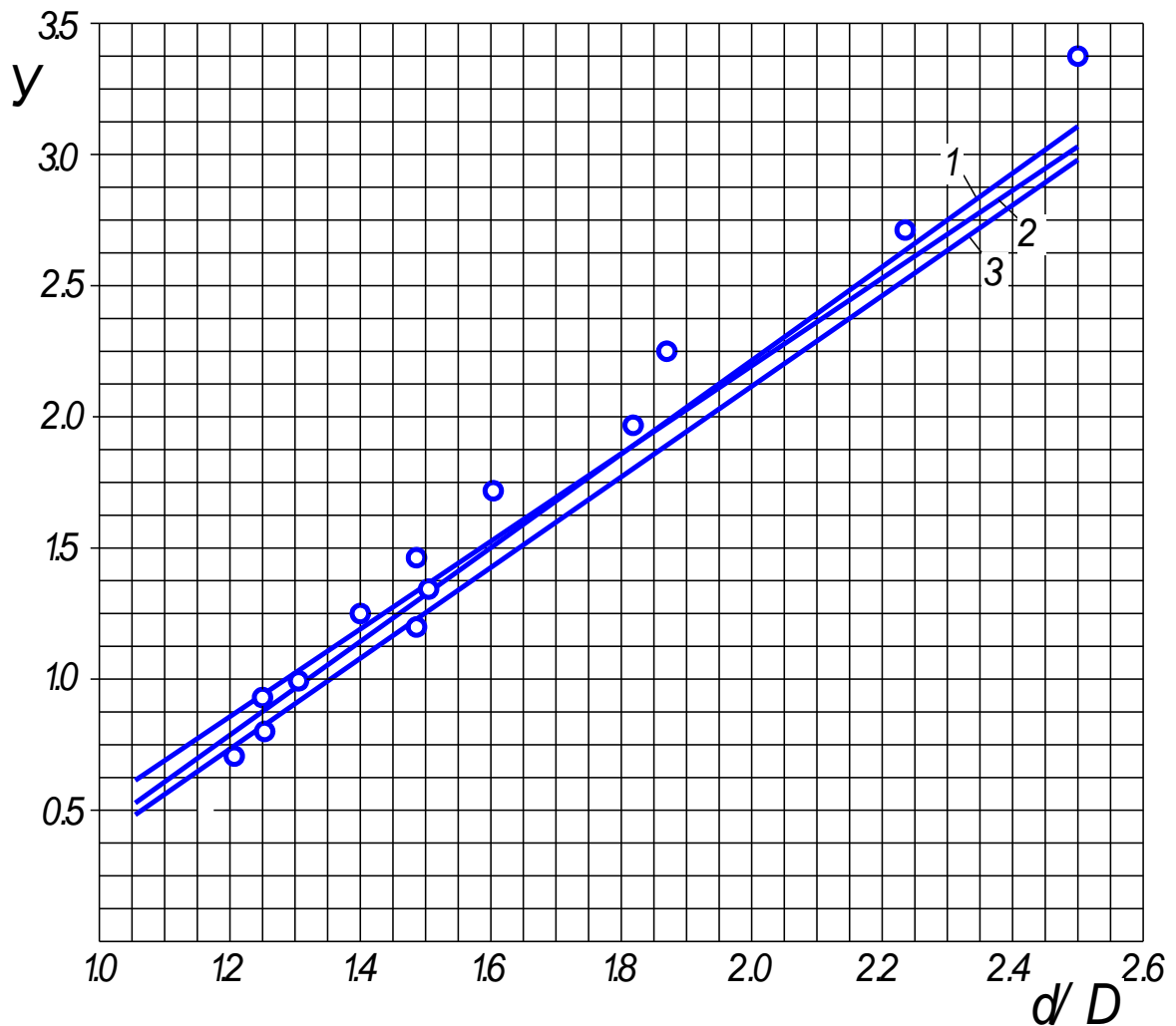


Рисунок 2.2 - Залежності зміни функції  $y$  від співвідношення  $d/D$  для металевого циліндричного зразка з кільцевою тріщиною, визначені за формулою (2.2 і табл. 2.1); а також за формулами (2.3) і (2.4) відповідно.



Залежність маси тари  $K_1 = D(3/2)/P$  при  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  будується за формулами (2.2), (2.3), (2.4), як показано на рисунку 2.2. Задовільно узгоджуються один з одним:

$$\frac{P_*\sqrt{1-\varepsilon}}{d\sqrt{d} \cdot K_1} = 1 - 0.5\varepsilon - 0.125\varepsilon^2 + 0.2757\varepsilon^3 - 0.2082\varepsilon^4 + 0.0663\varepsilon^5 + 0.0048\varepsilon^6 - 0.0135\varepsilon^7 - 0.011\varepsilon^8 + 0.027\varepsilon^9 \quad (2.5)$$

У нашому дослідженні для спрощення розрахунку величини  $K_1$  права частина формул (2.3) і (2.5) які стосуються зміни функції  $f(\varepsilon)$  від відносного розміру кільцевої тріщини  $d/D$  представлено кривими 1; 2; 3 на рисунку 2.3.

Нарешті, з рівняння (2.5)  $K_1$  коефіцієнт, який визначає тріщиностійкість будь-якого матеріалу, можна записати як:

$$K_I = K_{IC} = \frac{P^*}{d\sqrt{d} \cdot f(\varepsilon)}, \quad (2.6)$$

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon}} \left( 1 - (0.5100\varepsilon - 0.1260\varepsilon^2 + 0.2758\varepsilon^3 - 0.2083\varepsilon^4 + 0.0664\varepsilon^5 + 0.0049\varepsilon^6 - 0.0131\varepsilon^7 - 0.0161\varepsilon^8 + 0.0261\varepsilon^9) \right) \quad (2.7)$$

Для формули (2.4) кінцевий варіант, виражений через  $f(d/D)$ , буде представлений так:

$$K_I = K_{IC} = \frac{P^*}{D \cdot \sqrt{D}} \cdot f(d/D), \quad (2.8)$$

$$f(d/D) = \frac{0,7976 \cdot \sqrt{1-\varepsilon}}{\varepsilon \sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{1-0,8012\varepsilon}}, \quad (2.9)$$

Для рівняння (2.2) кінцева форма, виражена через  $f(d/D)$ , є:

$$K_I = K_{IC} = \sigma^* \sqrt{D} \cdot f(\varepsilon), \quad (2.10)$$

$$f(\varepsilon) = \frac{0,470 \cdot \sqrt{1-\varepsilon}}{\varepsilon \sqrt{1-0,8012\varepsilon}}, \quad (2.11)$$

Для будь-якого варіанту авторської формули відносна довжина тріщини  $\varepsilon=d/D$  змінюється в межах  $0,40 < \varepsilon < 0,90$ .

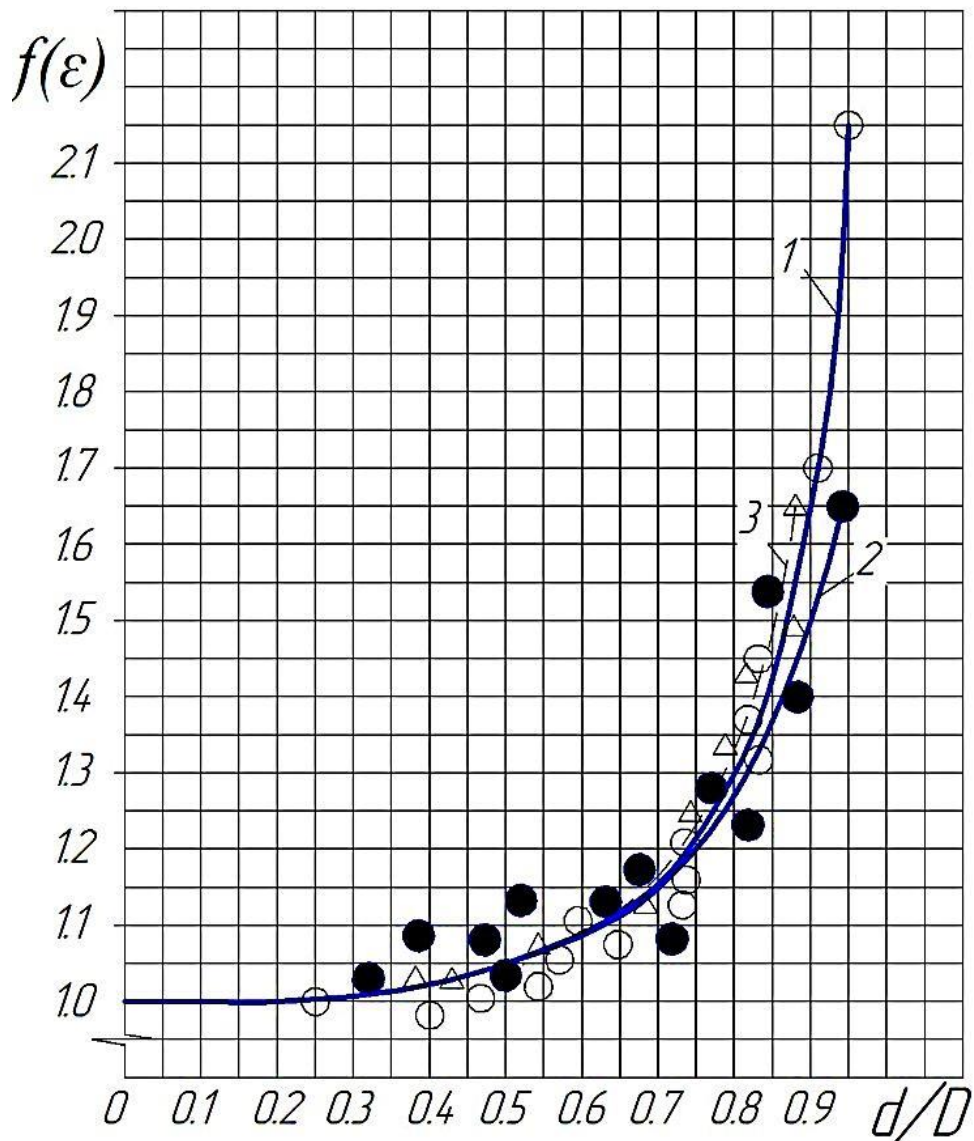


Рисунок 2.3 - Функція  $f(\varepsilon)$  в залежності від співвідношення  $d/D$  для циліндричного металевих зразка з кільцевою тріщиною, побудованими за формулами (2.6; 2.7) – крива один; (3.8; 3.9) – крива два; (2.10; 2.11) – крива три відповідно.

Як показано на рис 2.3 чорні світлі кола та трикутні точки – це результати експериментальної перевірки правильності кривої після розтягування циліндричних металевих зразків з кільцевими тріщинами з різними співвідношеннями  $d/D$  та значеннями  $P=P^*$ , що доводить справедливості використання цих формул для знаходження критичного коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{1C}$  для будь-якого матеріалу підтверджено.

Світлі кружечки та трикутні точки – дані розтягування для циліндричних зразків  $D = 16$  мм,  $0,5 < \varepsilon < 0,9$  ( $\varepsilon=d/D$ ) – для сталі 25Г2С та чорні кружечки – дані розтягування для того самого зразка з аналогічними співвідношеннями ( $\varepsilon= d /D$ ) - відповідно для сталі 35ГС і добре корелює з розрахунковими даними кривої 1 формули (2.6-2.7) на рисунку 2.2.

Отже, виходячи з експериментально встановленого значення  $P^*$ , в кожному конкретному випадку за формулою (2.6-2.11);  $f(\varepsilon)$  можна знайти опір матеріалу крихкому руйнуванню  $K_1 = K_C = K_{1C}$ . У формулі  $K_C$  – значення коефіцієнта інтенсивності напружень при плоскому напруженні (сила розтягу малого циліндричного зразка з кільцевими тріщинами),  $K_{1C}$  – значення коефіцієнта інтенсивності напруження плоскої деформації (сила розтягу великого циліндричного зразка з кільцевими тріщинами). Порівняно з попереднім деформаційним станом, перед передньою кільцевою тріщиною не утворилася пластична деформація, відповідно відбулося нормальне від'єднання.

## **2.2. Технологія виготовлення циліндричних зразків з арматурних прутків**

Заготовкою для виготовлення циліндричних зразків (рис. 2.4) є термічно напружені сталеві стержні стандартного розміру за діаметром і довжиною, то технологічний процес для сталі 25Г2С і 35ГС  $\varnothing 14$  мм буде включати наступні операції:

005. Операції роздільні.

1. Виріжте стержень  $\varnothing 8$  мм, витримуючи розміри стержня по довжині  $l = 100 \pm 0,5$  мм. Пристосування для закріплення металевого прутка - лещата; вибраний інструмент - дискова фреза (діаметр 500 мм, товщина  $t = 5$  мм), виготовлена зі швидкорізальної сталі Р18; верстат - Хеллера.

010. Операція центрування.

1. Відцентруйте отвори  $\varnothing 3$  мм з обох боків прутків, витримуючи глибину  $l = 5$  мм відповідно. Пристосування для фіксації штанги –

трикулачковий патрон; Інструмент – центральне свердло  $\varnothing 3$  мм із швидкорізальної сталі P18, закріплене в патроні; Верстат – токарний 16K20.

015 Токарна робота.

1. Загострити пруток від  $\varnothing 8$  мм до  $\varnothing 7$  мм по довжині  $l = 100 \pm 0,5$  мм.  
2. Загострити пруток від  $\varnothing 7$  мм до  $\varnothing 6$  мм, дотримуючись кінцевого розміру  $l=12$  мм.

3. Зніміть фаски з обох сторін діаметром 6 мм, зберігаючи розмір і кут  $2 \times 45^\circ$ . Пристосування для кріплення заготовки - конічна канавка жорстка і обертовий центр; інструмент - наскрізна фреза з твердосплавної пластини T15K6, кут в площині  $\varphi=45^\circ$ ; верстат - токарний 16K20.

020 Операції окремі.

1. Нарізати нарізь M6-6h у двох місцях  $\varnothing 6$  мм на кінці штока, дотримуючись довжини  $l = 12$  мм. Пристосування для кріплення штока - патрон трикулачковий; прес-форма M6-6h, закріплена на рукоятці; Верстат токарний 16K20

025 Інші операції.

1. Розрізати кільцевий концентратор від  $\varnothing 6 \times 6$  мм до  $\varnothing 5,0$  мм по середині стрижня довжиною  $l = 50$  мм, дотримуючись верхнього кута  $\alpha = 60^\circ$  і нижнього радіуса закруглення  $\rho \leq 0,2$  мм. Пристрій кріпильний стрижень - жорсткий центр з конічним пазом і центр обертання; інструмент - різьбонарізна фреза з твердосплавної пластини T15K6, кут вершини  $\alpha=60^\circ$ ; токарний верстат 16K20.

030 Шліфувальні операції.

1. Відполіруйте пруток по довжині від  $\varnothing 5,5$  мм до  $\varnothing 5 \text{ h}6$  мм  $l=75 \pm 0,5$  мм. Пристосування для кріплення прутка - конічна канавка з жорстким центром і центром обертання; Інструмент - шліфувальний круг ( $\varnothing 400$  мм, товщина  $t = 40$  мм) зелений карбід кремнію; Верстат - циліндричний шліфувальний верстат ZM151.

035 Шліфувальні операції.

1. Відшліфувати кільцевий конденсатор від  $\varnothing 5,0$  мм до  $\varnothing 4,5 \pm 0,01$  мм по середині стрижня довжиною  $l = 50$  мм. Пристосування для нерухомого

прутка, кінчна канавка жорстка і обертовий центр, інструмент шліфувальний відрізний алмазний шліфувальний круг ( $\varnothing 200\text{мм}$ , товщина  $t=3\text{мм}$ ) штучний алмазний наповнювач, верстат круглошліфувальний верстат ZM151.

#### 040 Контрольні операції

1. Розмір заготовки показано на рис 2.4 Перевірка: довжина - штангенциркулем з точністю до 0,1 мм; зовнішній діаметр - мікрометр; різьба - з різьбовим калібром - кільце М 6 - 6h; радіус заокруглення в нижній частині кільцевого конденсора - за допомогою мікроскопа МІМ - 7, кільцевий конденсор Кути контуру судини - використовувати шаблон трикутника ( $\alpha = 60^\circ$ ).

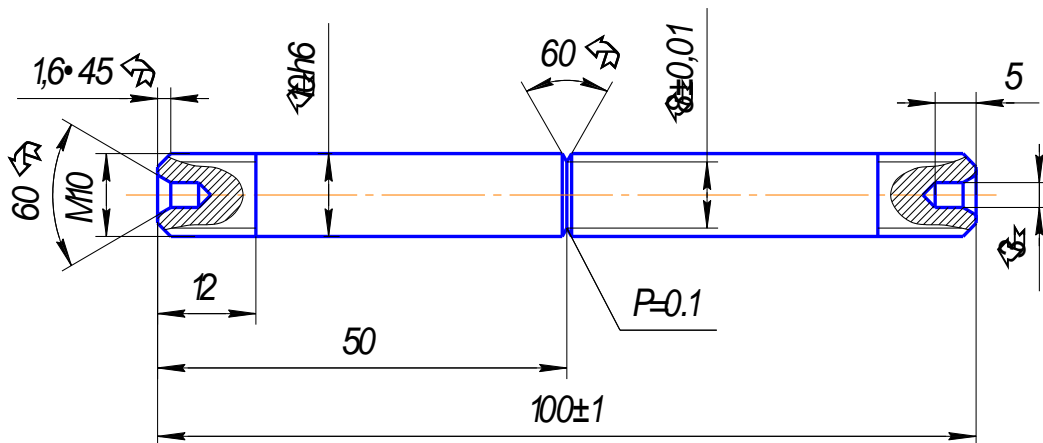


Рисунок 2.4 - Геометричні розміри зразка з арматурної сталі для випробувань на осьовий розтяг.

### 2.3. Спосіб зародження кільцевої тріщини в металевому циліндричному зразку.

Нижче використовується ефективний метод ініціювання суворо концентричних круглих поверхневих осесиметричних тріщин у циліндричних зразках, який дозволяє отримати початкові тріщини з мінімальними витратами часу та використанням простого лабораторного обладнання. Це дозволяє контролювати глибину кільцевих тріщин, які проникають у матеріал в умовах циклічного втомного деформування, що

виникає при жорстко закріпленому круговому згині циліндричного зразка за допомогою кільцевого концентратора.

Відповідно до запропонованого способу, циліндричний зразок з ініційованим кільцевим концентратором, радіус нижньої галтелі може дорівнювати 0,1...0,2 мм, піддається круговому згину з жорстко закріпленою стрілою прогину  $f$  і пружністю досліджуваного матеріалу. Радіальне навантаження.  $P_p$  в межах деформації. Схема навантаження для зародження кільцевої тріщини таких зразків наведена на рис. 2.5.

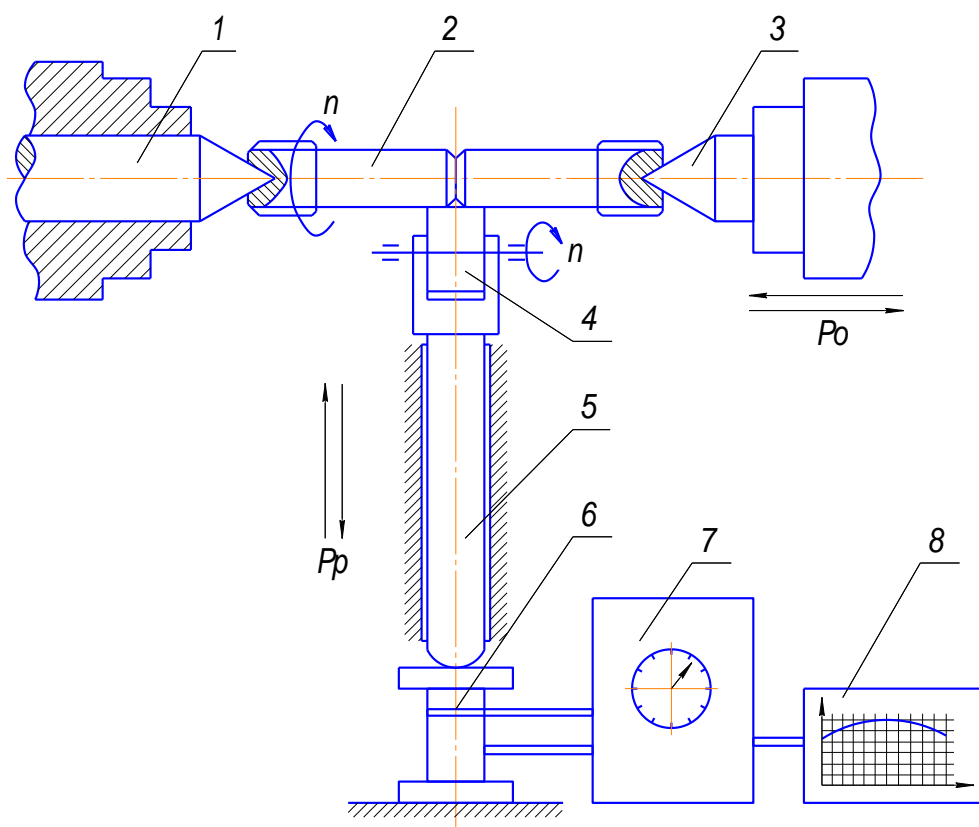


Рисунок 2.5 - Схема випробування циліндричного зразка при утворенні в ньому кільцевої тріщини: 1 - жорсткий центрувальний наконечник; 2 - випробувальний зразок; 3 - центр, який обертається; 4 - підшипник кульковий; 5 - вилка; 6 - динамометричний показчик; 7 - підсилювач; 8 - самописець вимірювальний.

Центрований з обох боків зразок 2 (див. рисунок 2.5) встановлений на жорсткому центрі 1, закріпленому в трикулачковому патроні, а інший кінець притиснутий обертовим центром 3 із заданою постійною силою стиснення від задньої бабки машини. Бічне навантаження зразків  $P_p$  здійснювалося за

допомогою спеціального пристрою (рис. 2.7), який закріплювався на різцетримачі токарного верстата моделі 16К20 (рис. 2.6).

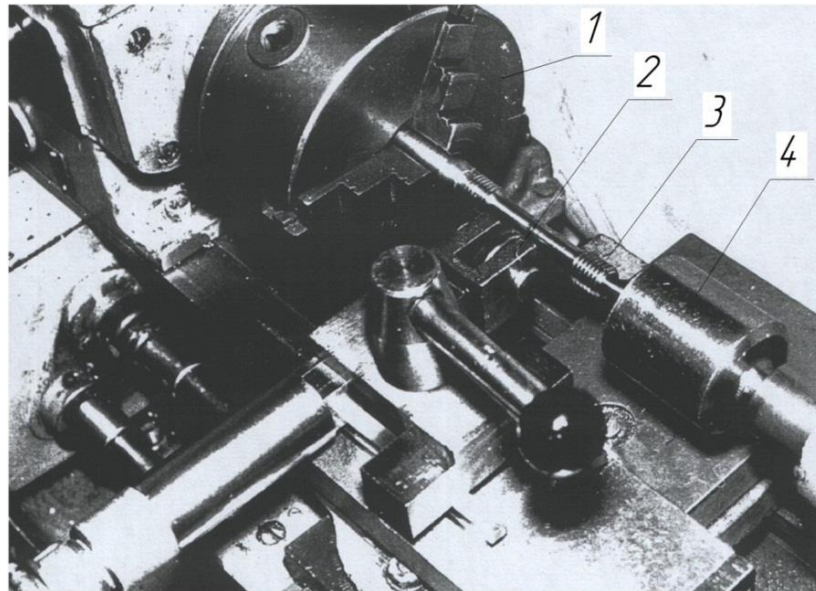


Рисунок 2.6 - Загальний закріплення циліндричного металевго зразка на токарному верстаті 16К20 для операції ініціювання кільцевої тріщини: 1 - верстат токарний; 2 – прилад для поперечного згину металевго зразка; 3 – циліндричний металевий зразок; 4 – центр обертовий.

Прикладене навантаження до кулькової опори 4 (див. схему на рис. 2.5), через вилку перемикання 5 передається на динамометр 6, на якому за мостовою схемою закріплені дротяні тензодатчики, сигнал динамометра 6 проходить через тензо-вимірювальний підсилювач 7 живить тензодатчик 6 . Вимірювальний прилад - самописець з чорнильною голкою 8. Циліндричний зразок, навантажений таким чином, починає обертальний рух, де час фіксується або розраховується як кількість обертів шпинделя верстата, до моменту початкового виникнення та поширення тріщини. Утворення і зростання тріщин контролюють записом графіків (л-ж) на самописці 8. Характерно, що з моменту виникнення кільцевої тріщини спостерігається зменшення цих показань за рахунок зміни жорсткості обертового зразка. Самописець 8 фіксує подальше зменшення навантаження (до певної точки) при нахилі та обертанні зразка, що вказує на виникнення та поширення початкової тріщини.

Описана методика дозволяє широко варіювати контрольоване навантаження (від нуля до повного руйнування циліндричного зразка, тобто зародження кільцевої тріщини заданої глибини, а також виявлення моменту зародження та спостереження за динамікою тріщини).

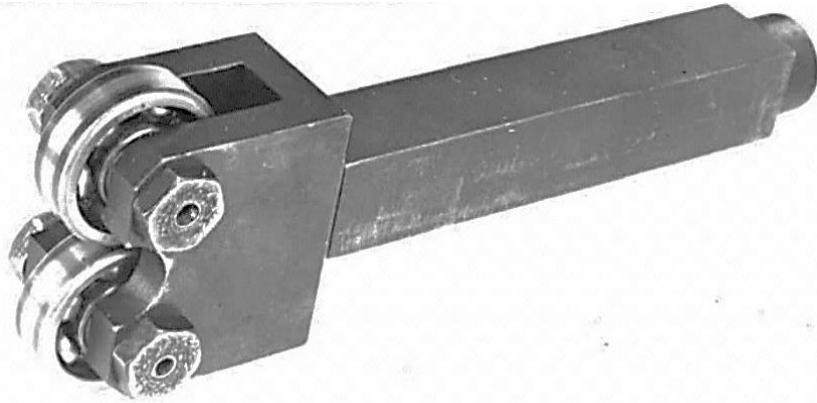


Рисунок 2.7 - Пристрій для навантаження циліндричного металевго зразка з кільцевим концентратором, працюючого за схемою триточкового кругового згину.

Основна відмінність цього методу від відомих методів полягає в тому, що динаміка зародження та поширення кільцевих тріщин реєструється за допомогою високочутливих контрольовано-вимірювальних приладів, яка також фіксує задану стискаючу силу в осьовому напрямку. Оскільки поперечне навантаження  $P$  знаходиться на кільцевому концентраторі циліндричного зразка (рис. 2.4), то воно встановлюється на постійний заданий прогин спеціальним пристроєм, встановленим на різцетримачі супорта верстата токарного (16K20). Усі записи реєструються через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) на персональному комп'ютері як зміни падіння радіального навантаження залежно від часу циклу деформації  $\tau$  або кількості втомних деформацій  $N_{\text{циклів}}$ .

Тому запропонований метод буде використано для подальших досліджень кільцевих тріщин, спричинених електротермічним попереднім напруженням, у циліндричних зразках зі сталевих прутків 25Г2С та 35ГС, про що йтиметься нижче.



### **3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.**

У цьому розділі описано обладнання, прилади та контрольні-вимірні засоби, що використовуються для виготовлення попередньо напружених сталевих прутків, які широко застосовуються при виготовленні залізобетонних елементів конструкцій (плит, колон, прогонів) тощо.

Важливою особливістю програми є розробка та виготовлення невеликих лабораторних пристроїв для термічного зміцнення сталевих прутків шляхом фіксованого затискання та охолодження. Запропоновано спосіб контролю температури по довжині термонапружених прутків різного діаметру ( $\varnothing$  8...30 мм), з укороченою (1500 мм) довжиною на заданих установках. Графічну залежність коливань температури по довжині прутка  $\varnothing$  8 мм зі сталі 35ГС і 25Г2С було побудовано окремо та виміряно на різних ділянках (3 точки по довжині) за допомогою термопар, які визначалися в певному діапазоні, викликаною нерівномірністю електричного нагрівання. Система виробництва електроенергії (мережа-трансформатор).

#### **3.1. Лабораторна установка для термічного зміцнення малодіаметральної арматури електронагрівом.**

Для забезпечення надійності та довговічності невеликих елементів залізобетонних конструкцій (балок, віконних перемичок) у будівельній індустрії необхідно розробити технології підвищення їх міцності за рахунок попереднього електричного нагрівання та використання термонапружених сталевих прутків після деформації, і необхідно проектувати та виготовляти невеликі агрегати.

Метою даного дослідження є розробка проекту невеликого лабораторного пристрою для подовження сталевих прутків малого діаметра та малої довжини і контролю температури по їх довжині після попереднього електричного нагрівання та деформування.

*Будова та принцип роботи малої лабораторної установки.*

Структурна схема такого пристрою (рис. 3.1) містить: трансформаторний підсилувач струму 1, контактні мідні виводи 2 (затискаються на кінцях сталевих прутків), раму пристрою з привареними конструктивними швеллерами 3, кріплення 4 для сталевих прутків, в кінці встановлюється шафа 5 з електрообладнанням для пуску і зупинки установки, терморезисторами 6 для зняття температури нагрівального прутка по його довжині і контрольно-вимірювальними приладами КСП - 2 види вимірювання температури.

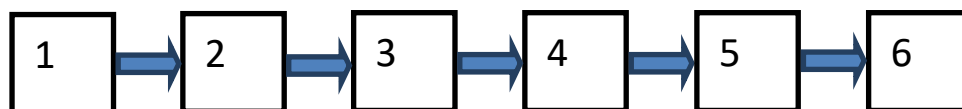


Рисунок 3.1 - Блок-схема складових елементів лабораторної установки: 1 - трансформатор електричного струму; 2 - мідні клеми; 3 - корпус лабораторної установки; 4 - кріпильні елементи; 5 - бокс з електроапаратурою для пуску-зупинки установки; 6 - контрольно-вимірювальні прилади для зчитування та запису температури типу КСП.

Загальна схема розробки лабораторного маленького пристрою показана на рис. 3.2.

Конструкція пристрою (рис. 3.2) складається з рами зварної конструкції 1 з привареним до верхньої частини швелером 7. Чотири ізоляційні керамічні втулки 6 запресовані в чотири отвори, просвердлені на певних відстанях в каналі. Чотири контактні мідні клеми 2 попередньо встановлені на двох сталевих стрижнях 3, які просуваються в крайнє ліве та праве положення по своїй довжині. Після цього просунути дві тяги в отвори чотирьох керамічних втулок і закріпити їх на полиці швелера за допомогою кріплень - шайб 4 і гайок 5, завдяки нарізям на кінцях прутків.

Принцип роботи установки полягає в наступному. Після підключення мідної контактної клеми 2 до електромережі натиснути кнопку «Пуск» шафи апаратури 5, на панелі почне блимати сигнальна лампочка.

За рахунок тепла, що виділяється струмом, що проходить через трансформатор-підсилувач 1, сталеві прутки подовжуються. Їх подовження

регулюється часом очікування до вимкнення реле відключення напруги і сигнальної лампочки, після чого в цьому положенні штанги міцно фіксуються на стійці швелера елементами кріплення 4, динамометричним ключем 7.

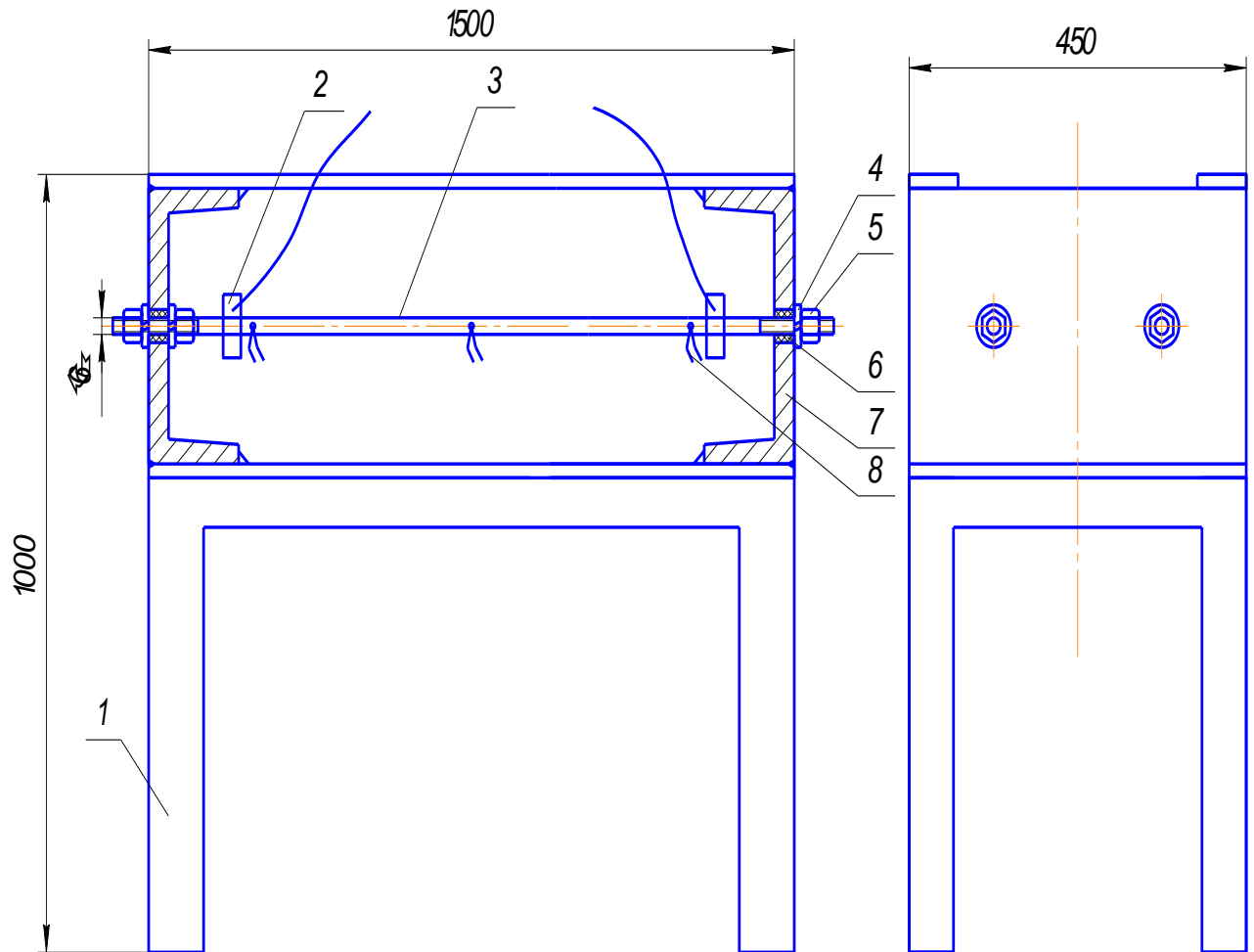


Рисунок 3.2 - Схема лабораторної установки для термічного зміцнення пруткової арматури: 1 - корпус лабораторної установки зварної конструкції; 2 - мідні клєми контактні; 3 - арматурний пруток  $\varnothing 8$  мм; 4 - шайба; 5 – гайка М6; 6 - керамічні термостійкі втулки; 7 – швелер; 8 - термопари (хромель-алюмель).

Одночасно з процесом нагрівання ця величина реєструється за допомогою 3 термопар 8, розташованих на відстані  $l = 500$  мм одна від одної по довжині прутка, з'єднаних з контрольно-вимірювальним приладом нагріву типу КСП-2 по його довжині.

Після відключення струму холодні прутки із залишковою електротермічною напругою стиску звільняються від кріпильних елементів,

виймаються з пристрою і укладаються в піддон. Після цього цикл лабораторної установки закінчується і повторюється новий цикл у аналогічній послідовності. У майбутньому термічно напружені сталеві прутки будуть піддаватися механічним випробуванням на міцність або стійкість до тріщин.

У таблиці 3.1 наведені технічні характеристики проектного малого лабораторного приладу.

Таблиця 3.1 -Технічні характеристики лабораторної установки

№ п/п	Параметр	Значення
1	Діаметр металевих прутків, що нагрівають, мм	3...8
2	Довжина нагріваючої частини арматурного прутка, мм	1500
3	Потужність електротрансформатора, кВт	15
4	Число прутків, що одночасно нагріваються, шт.	2
5	Зусилля підтяжки металевого прутка, Н	1000±200
6	Зусилля затиску металевого прутка, Н	2500
7	Температура нагріву металевого прутка, °С	300... 450
8	Маса установки, кг	65
9	Швидкість нагріву металевого прутка, °С/хв.	100
10	Габаритні розміри (довжина, ширина, висота) , мм:	1500x450x1000

### 3.2. Визначення температури по довжині арматурного прутка

На вищевказаному сучасному обладнанні здійснюється нагрівання сталевих прутків зі сталі 35ГС діаметром  $D = 8$  мм (клас конструкції А-III) і сталі 25Г2С діаметром  $D = 8$  мм (клас конструкції Ат-5). Загальна довжина між контактами кріплення при встановленні становить 1500 мм. Характер нагріву штока в підшипнику приладу наступний: сила струму 700А, напруга 380В. Кожен пруток автоматично нагрівається після того, як він розтягується

на 5 мм. Для фіксованих точок по довжині термопар типу ХА розташовуються на відстані  $l = 500$  мм одна від одної (рис. 3.4).

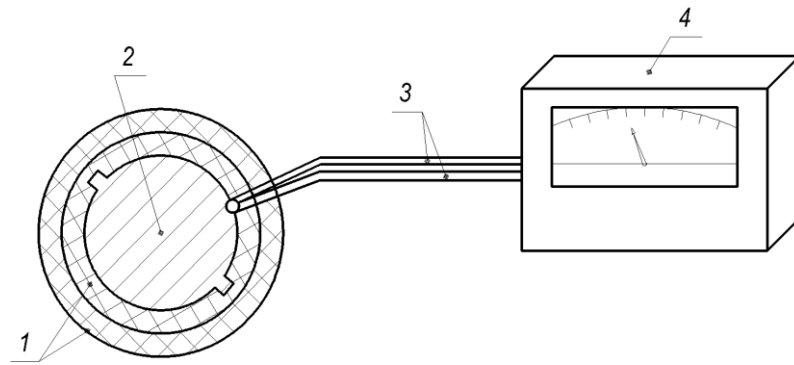


Рисунок 3.4 - Приєднування термопар до арматурного прутка для визначення температури після нагрівання: 1 –азбестова термоізоляція; 2 – арматурний пруток; 3 – термопара хромель-алюмелієва; 4 – потенціометр типу КСП-2.

Місце з'єднання термопар зі сталеву планкою захищають ізоляційним матеріалом, а термопару затискають самозжимом. Матеріалом термопар є хромалюмінієвий сплав. Ізоляційний матеріал – азбестова плита товщиною 6 мм. Його двічі обмотують навколо прутка і прив'язують спеціальною проволкою. Для зменшення втрат тепла на нагрівання також утеплено середній кронштейн опалювального обладнання агрегату.

Контроль температури здійснюється підключенням кінця термопар до багатоканального приладу КСП-2. Після повного циклу роботи нагрівального прутка вимірювання записуються на стрічку приладу. Значення температури для часу нагріву по черзі реєстрували в трьох фіксованих точках по довжині кожного прутка, а саме час витримки становив 30 с, 90 с і 180 с. відповідно.

У таблиці зведені результати вимірювань цим методом значень температури для 6 прутків зі сталі 35ГС і 6 прутків зі сталі 25Г2С табл. 3.2 і 3.3 відповідно.

На основі даних у цих таблицях для сталі 35ГС і 25Г2С були побудовані графіки коливань температури вздовж шести прутків залежно від часу нагрівання (рис. 3.5 - 3.8).

Таблиця 3.2 – Значення коливання температури по довжині арматурних прутків № 1; 2; 3; 4 термічно зміцненої арматури Ø 8 мм для сталі 35ГС

№ точок на прутку	Вимірювальна точка по довжині прутка	Значення температури для чотирьох прутків, °С			
		№1	№2	№3	№4
1	250	383	359	371	389
2	750	378	376	388	399
3	1250	360	391	396	382
Різниця зміни температури за час нагріву 30 с		23	32	25	17
1	250	391	366	382	394
2	750	373	375	391	384
3	1250	389	393	404	391
Різниця зміни температури за час нагріву 90 с		18	27	22	10
1	250	395	383	395	402
2	750	401	399	389	396
3	1250	391	392	383	395
Різниця зміни температури за час нагріву 180 с		10	16	12	7

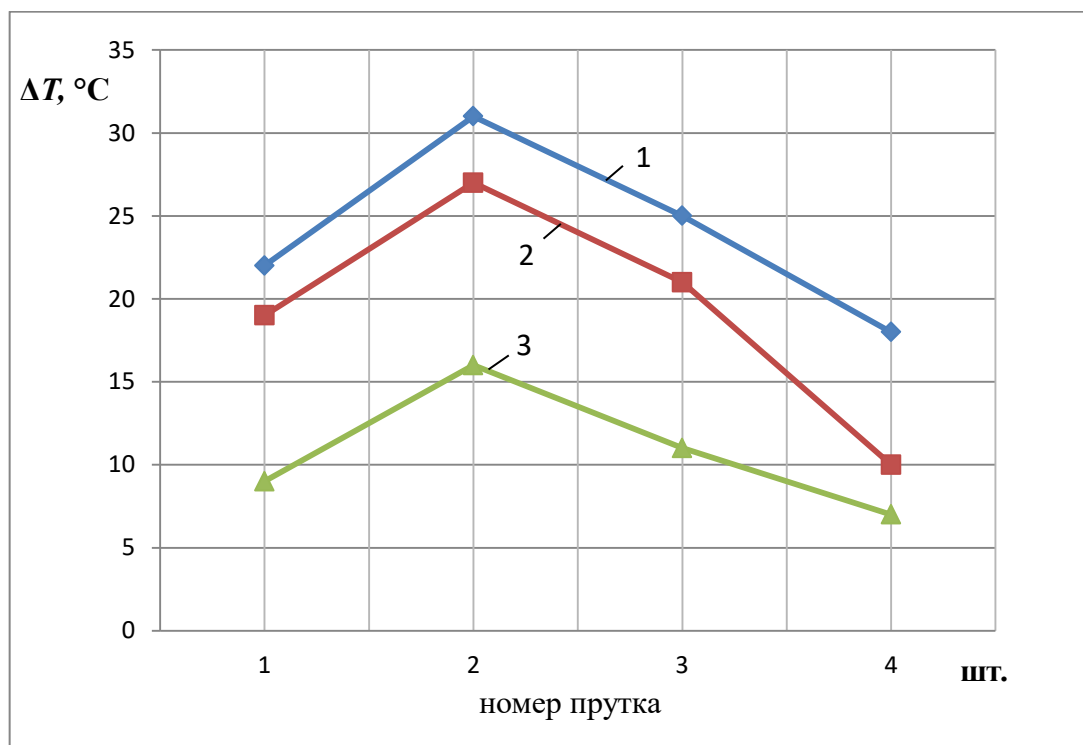


Рисунок 3.5 - Різниця температур від часу нагріву прутків: 30 с – крива 1; 90 с – крива 2; 180 с – крива 3 для сталі 35ГС.

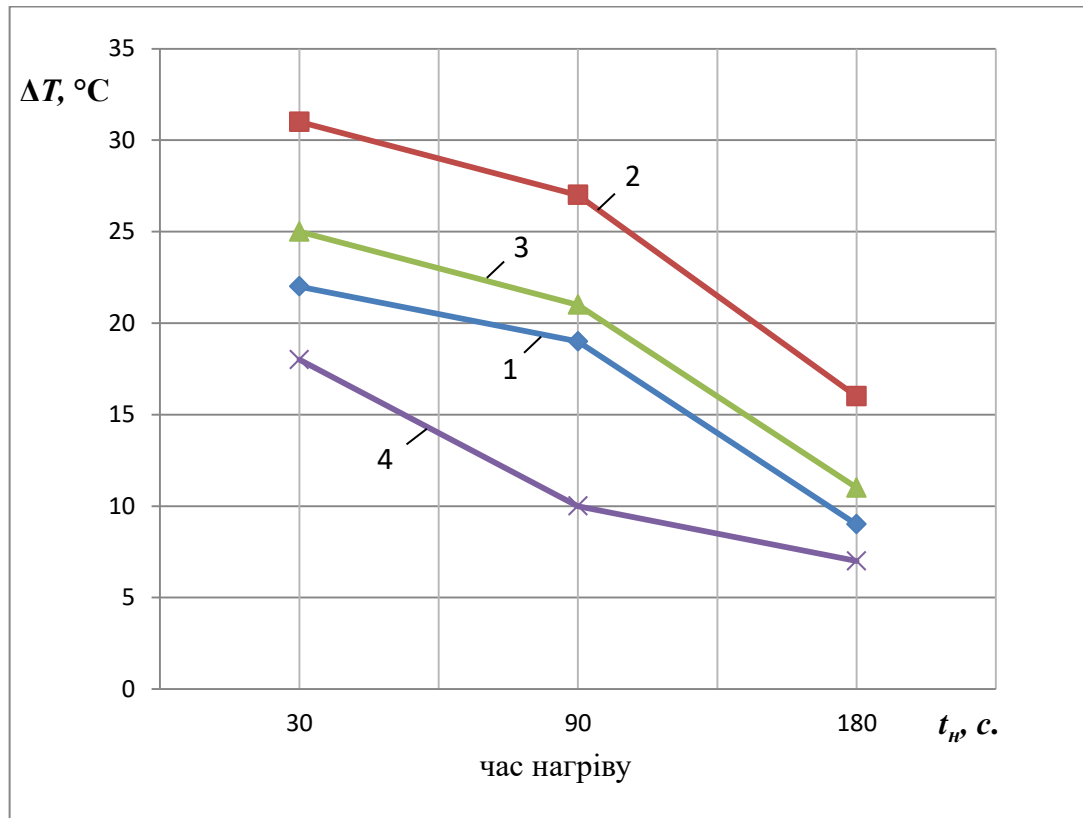


Рисунок 3.6 - Різниця температур від часу нагріву по довжині арматурних прутків: №№ 1; 2; 3; 4 для сталі 35ГС.

Таблиця 3.3 – Значення коливання температури по довжині арматурних прутків № 1; 2; 3; 4 термічно зміцненої арматури  $\varnothing$  8 мм для сталі 25Г2С

№ точок на прутку	Вимірювальна точка по довжині прутка	Значення температури для чотирьох прутків, °C			
		№1	№2	№3	№4
1	250	391	400	398	399
2	750	402	415	415	409
3	1250	400	409	407	403
Різниця зміни температури за час нагріву 30 с		12	16	18	10
1	250	400	404	402	409
2	750	396	413	404	415
3	1250	404	400	412	406
Різниця зміни температури за час нагріву 90 с		8	13	10	9
1	250	407	412	401	413
2	750	403	408	406	410
3	1250	401	405	408	415
Різниця зміни температури за час нагріву 180 с		6	7	7	5

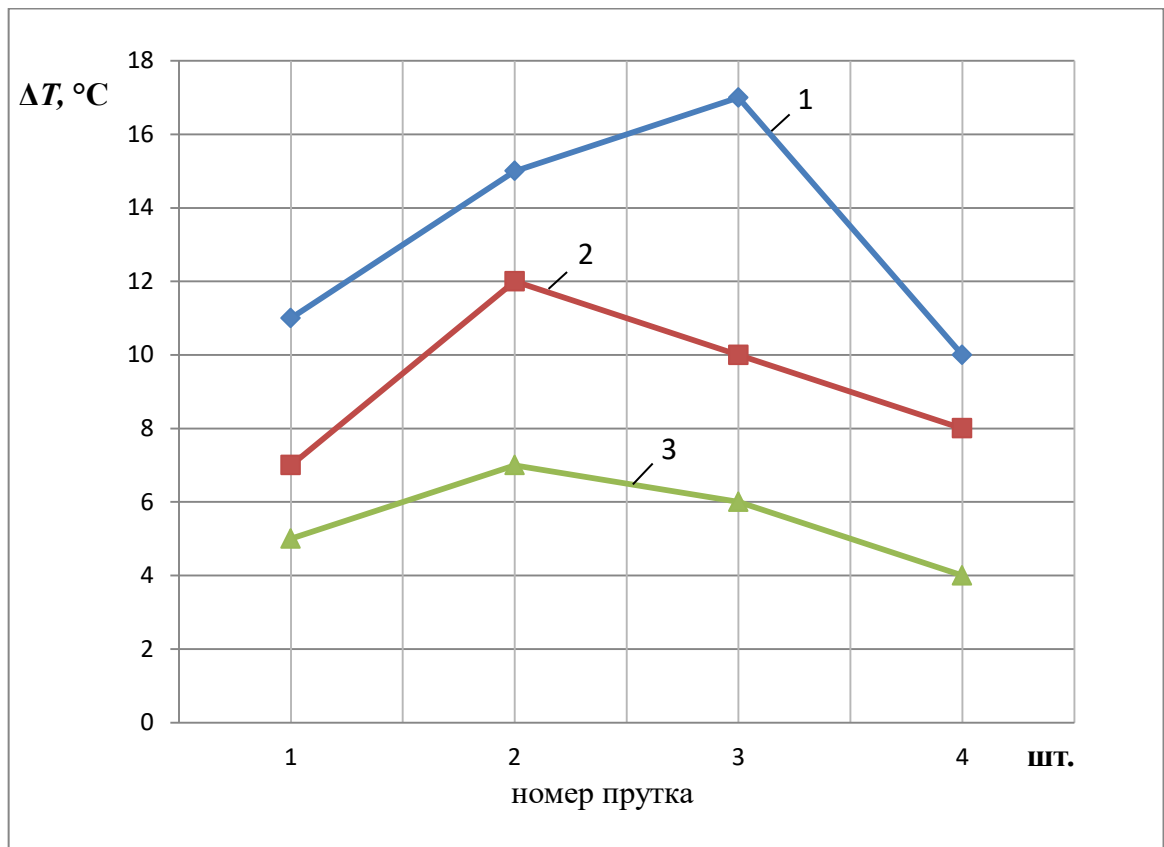


Рисунок 3.7 - Різниця температур від часу нагріву прутків: 30 с – крива 1; 90 с – крива 2; 180 с – крива 3 для сталі 25Г2С.

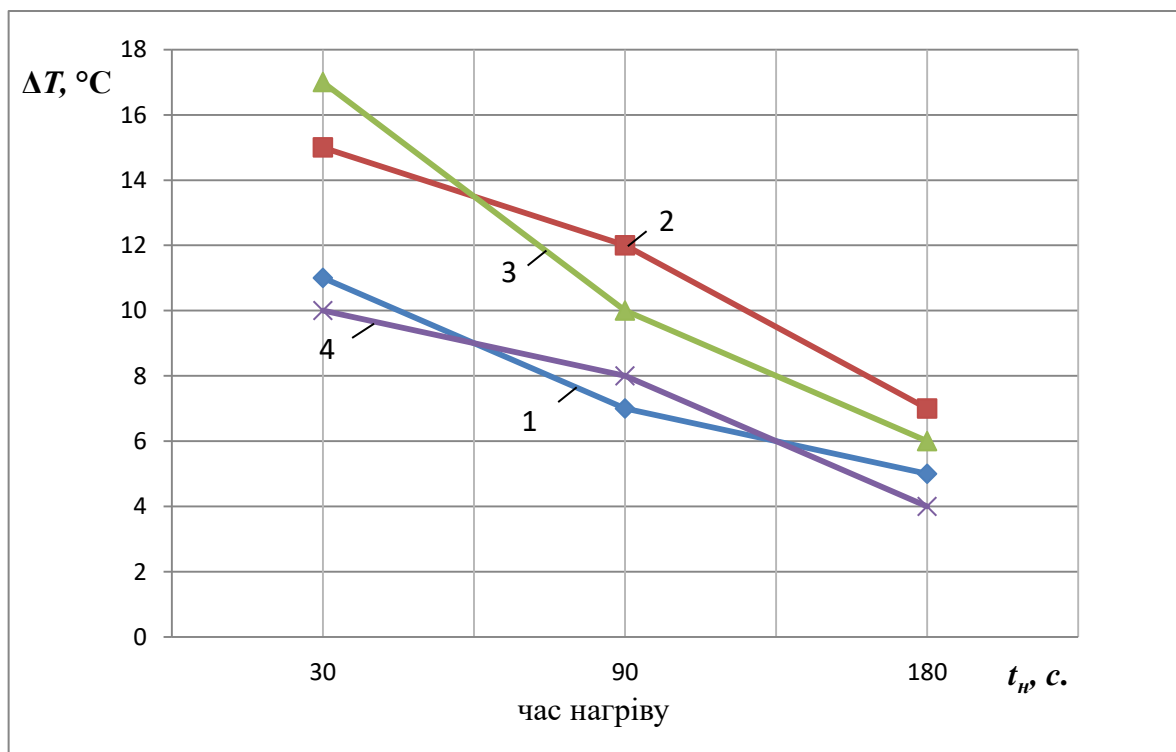


Рисунок 3.8 - Різниця температур від часу нагріву по довжині арматурних прутків: №№ 1; 2; 3; 4 для сталі 25Г2С.



Згідно з рис 3.5 – 3.8 можна побачити, що час нагрівання термічно напруженої арматури малого діаметра буде впливати на коливання температури в напрямку її довжини. Для сталі 35ГС і сталі 25Г2С збільшений час нагрівання практично усуває температурні коливання завдяки зменшеній довжині прутка.

### 3.3. Визначення втомної міцності термонапружених прутків арматурних сталей 35ГС і 25Г2С.

Обговорення експериментальних методів і результатів. У цьому дослідженні використовувалися дві марки сталевих прутків, 35ГС і 25Г2С, з діаметрами 8 мм відповідно до хімічного складу цих сталей наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Хімічний склад вибраних арматурних сталей

Марка	Масова частка хімічних елементів, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
35ГС	0,30-0,37	0,80-1,2	0,50-0,8	0,24	0,24	-	0,020	0,030
25Г2С	0,20-0,29	1,20-1,6	0,60-0,9	0,31	0,31	0,31	0,010	0,020

Загальна довжина випробувальних прутків для обох типів сталі  $L = 1500$  мм. Кожен пруток нагрівали протягом 180 с (рис. 3.3) пропусканням постійного струму ( $I = 700$  А;  $U = 36$  В) в лабораторній установці, забезпечуючи подовження  $\Delta l = 5$  мм. Потім в позиції нагріву пруток затискається спеціальним затискачем (патроном) і охолоджується до кімнатної температури після відключення електронагріву автоматичного. Розподіл температури вздовж нагрівального прутка контролюється трьома термопарами типу ХА (Cr-Ni) за допомогою блоку типу КСП-2. Номери позицій термопари в трьох точках уздовж прутка показані на рис. 3.9.

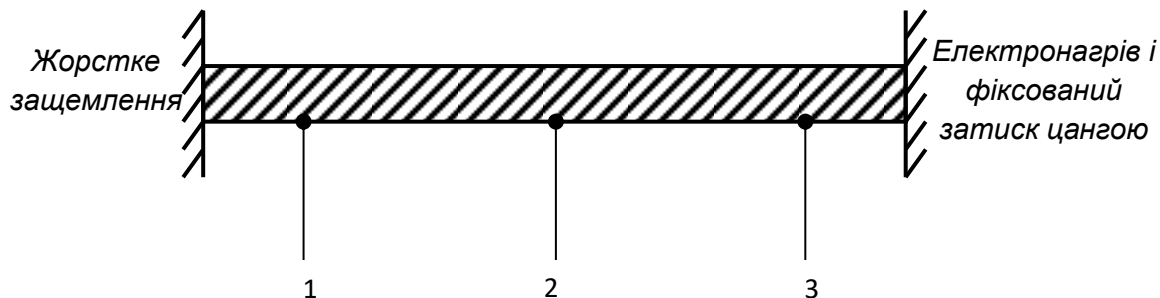


Рисунок 3.9 - Розташування термопар у реперних точках по довжині арматурного прутка: для сталей 35ГС і 25Г2С – визначені значення температур представлено у стовпчику 4, табл. 3.5.

Механічні властивості  $\sigma_b$  і  $\sigma_T$  були отримані після нарізання трьох ділянок по довжині заготовки, з яких були виготовлені випробувальні гладкі циліндричні зразки з розмірами: діаметр  $\varnothing$  6 мм, робоча довжина  $l = 60$  мм, загальна довжина  $L = 80$  мм, на обох кінцях є нарізи М6-7h, які використовуються для досягнення осьового натягу.

Оскільки різні перерізи електротермічно зміцнених сталевих стрижнів по довжині мають різні показники міцності (табл. 3.5), а також залишкові напруги, представляє інтерес подальше вивчення здатності матеріалу чинити опір розвитку втомної тріщини в певних умовах втомної деформації. Для цього з трьох характерних частин термічного стрижня вирізали заготовки для виготовлення циліндричних зразків з кільцевими концентраторами. Відповідно до описаного вище методу, для 12 партій циліндричних зразків кільцеві тріщини глибиною  $(1,5 \pm 0,15)$  мм на діаметр циліндра були викликані круговим згином (700 об/хв) з фіксованим постійним прогином  $f = 1,2$  мм.

Слід зазначити, що для сталей 35ГС і 25Г2С немає послідовної закономірності зміни втомної міцності (час виникнення та поширення тріщини) уздовж довжини термічно напруженого прутка, починаючи з положення різання циліндричного зразка. Водночас зразки зі сталі 25Г2С мали вищу втомну міцність порівняно зі сталлю 35ГС незалежно від положення різання по довжині прутків досліджуваних циліндричних зразків.

Для цих 12 партій предметом дослідження стає те, як буде змінюватися статична тріщиностійкість досліджуваної сталі ( $K_{IC}$ ), починаючи з положення, де циліндричний зразок розрізано по довжині термічно напруженого сталевго прутка в осьових умовах з кільцевими тріщини.

Таблиця 3.5 - Результати досліджень арматурних прутків з електротермічним попереднім напруженням

№ точок	Марка	Відстані прутка у реперних точках, мм	Температура $T$ , °C	Механічні характеристики арматурних сталей для фіксованих точок	
				$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа
1	Сталь	250	298	351	324
2	35ГС	750	292	381	337
3	Ø 8 мм	1250	311	357	311
1	Сталь	250	311	443	341
2	25Г2С,	750	248	412	367
3	Ø 8 мм	1250	262	441	351

### 3.4 Статична тріщиностійкість $K_c$ термонапружених прутків арматурних сталей 35ГС і 25Г2С.

Такі дослідження проводили на розтягувальній машині РМ-10 (Instron) шляхом осьового розтягування циліндричних зразків рухомим затискачем зі швидкістю переміщення  $V = 1,0$  мм/хв., де реєстрували картину руйнування в силово-деформаційних координатах ( $P$ ). Для кожного конкретного варіанту зруйнованого циліндричного зразка із заданою кільцевою тріщиною за формулою (2.6-2.7) або формулою (2.8-2.9) разом з формулою (2.10-2.11) і графічною залежністю отримують силу руйнування  $P = P^*$  (Рисунок 2.2 та рисунок 2.3) розраховано та зведено в таблицю 3.6 значення  $K_c$  тріщиностійкості сталі 35ГС та 25Г2С.

Це видно з даних таблиці 3.6 Значення  $K_c$ , визначені трьома методиками різних авторів, близькі між собою. Коливання температури по довжині термічно напружених прутків призводять до залишкових напружень

на різних ділянках прутка, що призводить до різних значень часу руйнування ( $\tau$ )

Втомна деформація циліндричних зразків відповідно з кільцевими концентраторами та кільцевими тріщинами має різні значення для циліндричних зразків в умовах статичного розтягу (див. табл. 3.4).

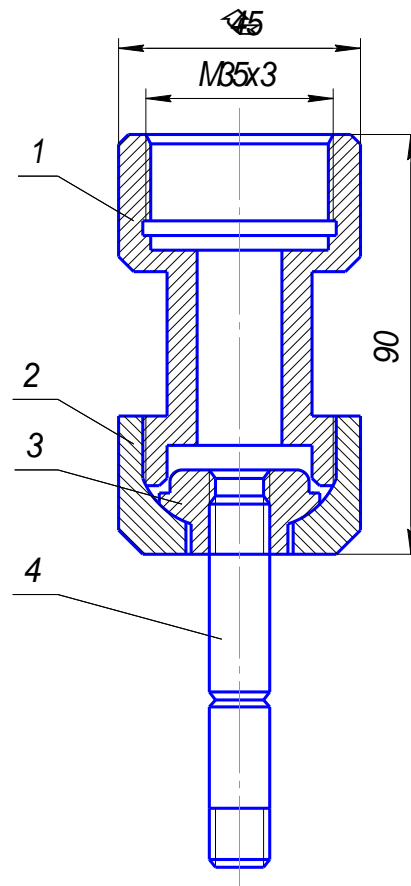


Рисунок 3.10 - Захоплювач для закріплення металевого циліндричного зразка з кільцевою тріщиною: 1 – корпус захоплювача; 2 – гайка сферична; 3 – сухарик сферичний; 4 – циліндричний випробувальний зразок.

Таблиця 3.6 - Статична тріщиностійкість  $K_C$  в різних частинах по довжині металевого прутка сталей 35 ГС і 25 Г2С з кільцевою тріщиною, визначена за формулами (2.6 –.11) відповідно

№ № Реперних точок	Марка	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Відстані прутка в реперних точках вимірювання температури, мм	Розміри металевого циліндричного зразка з кільцевою тріщиною, мм					Руйнівне зусилля для зразка з тріщиною  $P^*$ , кН	Середні значення $K_C, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$		
				$D$	$d_K$	$d_{TP}$	$\varepsilon = \frac{d}{D}$	$l_{TP}$		за ф-лами (2.6-2.7)	за ф-лами (2.8-2.9)	за ф-лами (2.10- 2.11)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Сталь 35ГС пруток Ø8мм	298	250	7	5	3,91	0,68	1,10	25,50	30,96	29,08	58,95
2		292	750	7	5	4,01	0,71	1,01	26,51	30,96	29,08	58,95
3		311	1250	7	5	3,81	0,67	1,20	24,51	29,04	28,55	58,32
1	Сталь 25Г2С пруток Ø8мм	311	250	7	5	3,32	0,732	0,70	45,50	48,85	47,95	47,24
2		248	750	7	5	3,61	0,761	0,41	47,51	47,07	46,25	43,66
3		262	1250	7	5	3,80	0,778	0,10	48,51	45,37	41,05	41,88

#### 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ

Лабораторна установка повинна обслуговуватись одним оператором, який пройшов спеціальний інструктаж з техніки безпеки і ознайомлений з інструкцією її експлуатації

1. Повинен бути забезпечений вільний доступ до всіх механізмів лабораторної установки, захарашення проходів не допустимо.

2. Всі зовнішні рухомі та нагрівальні елементи лабораторної установки повинні бути закриті захисними кожухами.

3. Лабораторна установка повинна бути заземлена відповідно до існуючих вимог.

4. Включати лабораторну установку можна тільки в тому разі, коли переконались, що заземлення не має механічних пошкоджень, а облицювальні кришки закриті.

5. Під час роботи лабораторної установки заборонено відкривати електрошафу і пульт, виконувати будь-які роботи в зоні нагрівання коли вони підключені до живлення.

6. Обслуговування, ремонт і наладку механічної частини повинні проводити тільки ті особи, які пройшли спеціальну підготовку і мають відповідне кваліфікаційне посвідчення.

7. Роботи з ремонту електрообладнання повинні проводитись тільки при відключеній напрузі. В місці відключення напруги повинна бути вивішена табличка "НЕ ВМИКАТИ! РЕМОНТНІ РОБОТИ".

8. На лабораторній установці повинні бути встановлені блокувальні пристрої.

9. Оператор не має права залишати без нагляду включену установку.

10. Категорично заборонено проводити санітарну обробку при наявності напруги на лабораторній установці.

Вимоги безпеки. ГОСТ12.2.003 “Виробниче обладнання. Загальні вимоги безпеки” встановлює вимоги безпеки до виробничого обладнання в частині конструкцій, органів його управління, засобів захисту, які входять в конструкцію, а також вимог безпеки, які визначаються особливостями монтажних і ремонтних робіт, транспортуванням і зберіганням виробничого обладнання.

Обладнання повинне бути безпечним при монтажі, експлуатації, ремонті, транспортуванні і зберіганні, не повинно забруднювати викидами, шкідливих речовин навколишнє середовище (повітря, ґрунт, водойми) вище встановлених норм. Безпечність обладнання забезпечується вибором принципу дії, конструктивних схем, безпечних елементів конструкції і т. п., застосуванням засобів механізації, автоматизації, дистанційного управління і захисту; виконанням ергономічних вимог; включенням вимог безпечності в технічну документацію по монтажу, експлуатації, ремонту, транспортуванню і зберіганню [6].

Обладнання повинно бути пожежно - і вибухобезпечним, стійким до підвищення вологості, коливання тиску і температури, дії агресивних речовин, обледеніння, вітрових навантажень.

Крім загальних вимог безпеки до виробничого обладнання необхідно враховувати також специфічні вимоги до обладнання м'ясної промисловості, передбачені стандартом ОСТ 27-00-216 “Виробничі машини і обладнання. Загальні вимоги безпеки”.

Робочі місця обслуговуючого персоналу повинні знаходитися поза зоною переміщення механізмів.

Конструкція обладнання повинна передбачати заходи (теплоізоляція) з обмеження виділення конвекційного променевого тепла. В машинах з місцевим охолодженням повинен бути пристрій, який блокує запуск машин при відсутності холодоагенту.

Обладнання, яке виділяє вологу, газу, порох і сторонні запахи, повинне бути максимально герметизоване. При недостатній герметизації необхідно використати місцеве відсмоктування повітря.

Зовнішні виступаючі частини обладнання повинні бути заокруглені по радіусі не менше 5 мм і не мати зазубрень, напливів металу після зварки.

Кнопки включення виробничого обладнання повинні бути заглиблені на 3-5 мм в корпусі пускової коробки.

Органи управління (кнопки, ричаги, маховички і т. д.) в постійного робочого місця повинні розміщатися в робочій зоні, обмеженої в межах: по довжині не більше 0,7 м, по глибині не більше 0,4 і по висоті не більше 0,6 м; вказані органи управління повинні бути над рівнем підлоги (площадки) на висоті в межах від 0,9 до 1,5 м при обслуговуванні стоячи і на висоті 0,6-1,2 м при обслуговуванні сидячи. Всі кнопки, ричаги, маховички і інші органи управління повинні мати позначення і надписи, які пояснюють їх функціональне призначення, а також пофарбовані у відповідні кольори:

- червоний колір – зупинка;
- ахроматичний колір (чорний, білий чи сірий), допускається зелений - пуск;
- ахроматичний колір – поперемінні зупинка чи пуск;
- жовтий колір – аварійне включення;
- ахроматичний або синій колір – спеціальне включення.

Площадки обслуговування машин і обладнання, розміщені на висоті, повинні мати огорожі і сходи з поруччям, а площадки крім цього, - повинні мати вільний прохід шириною не менше 0,7 м. Покрив площадок повинен виключати слизькість і мати по краях суцільну обшивку на висоті 0,15 м. Висота огорожі і перил повинна бути не менше 1 м, а на висоті 0,5-0,6 м від покриття площадки (сходів) необхідно розмішувати додаткові повздовжні огорожі і вертикальні стійки з кроком не більше 1,2 м. Сходи на висоті 3-5 м повинні мати перехідні площадки; ширина сходів не менше 0,6 м, проміжок між сходами – 0,2, ширина сходини – не менше 0,12 м. Сходи висотою



більше 1,5 м повинні мати нахил не більше 45°, меншої висоти не більше 60 до горизонту.

Зусилля на важелі, постійного використання при ручному управлінні не повинно перевищувати 40 Н, а при ручному регулюванні і накладанні – 100 Н.

Пускові педалі ніжного управління обладнанням повинні мати огороження або попереджувальні пристрої, які виключають випадкове включення обладнання (падіння предмету, випадкове натиснення). Огороження педалі повинні бути міцним, не мати гострих країв і не обмежувати рухів ноги. Площадка пускової педалі повинна бути прямою з рифленою поверхнею (неслизькою) і мати заокруглені з початку і упору для ноги в кінці. Ширина педалі повинна бути не меншою 80 мм, а довжина до упору 110-130 мм. Підвищення педалі над рівнем підлоги площадки (перед її включенням) не повинно перевищувати 120 мм, а прогин її (після включення) – 60 мм; посилення при натисканні на педаль в положенні сидяче – 24,5 Н, в положенні стоячи – 34,5 Н.

Засуви, гвинти і крани, розміщені вище 2 м від рівня підлоги (робочої площадки або заглиблені, повинні мати пристрої (ричагові, штангові і ін.) які б дозволили відкривати і закривати їх з робочого місця.

Стаціонарна контрольно-вимірна апаратура повинна бути встановлена на робочих місцях не вище 2 м від рівня підлоги (робочої площадки).

Струмopровідні частини обладнання повинні бути надійно електроізолювані, огорожені або знаходитися в недоступних до людей місцях.

Температура нагрітих поверхонь обладнання, огороження і трубопроводів на робочих місцях не повинна перевищувати 45°C.

Конструкція обладнання, працюючого під тиском, повинна відповідати правилам його проектування, виготовлення і експлуатації.

Економічно доцільно застосовувати універсальне (за призначенням) і багатоопераційне обладнання. Воно повинно бути дешевим, надійним і

довговічним. Таке обладнання можна створювати за принципом агрегування, застосовуючи загальний привід і змінні органи для виконання різних операцій. Деталі і вузли повинні уніфіковані і мати мінімальні розміри.

Для роботи обладнання на підприємствах, як правило, не потрібне використання пари (особливо високого тиску), стиснутого повітря і газу.

Для експлуатації обладнання на підприємствах необхідні спеціально підготовлені технології, механіки, лаборанти і робочі.

Найбільш ефективною робота обладнання всього малого виробництва в цілому буде при використанні місцевих природних джерел тепло-, водо- і холодопостачання. При проектуванні виробництва необхідно враховувати можливість використання натурального холоду для зберігання сировини і продукції.

Охорона навколишнього природного середовища – це система заходів направлених на забезпечення гармонійної взаємодії суспільства і природи , на основі збереження, виробництва і раціонального використання природних ресурсів.

Відходи виробництва пов'язані з викидами в атмосферу шкідливої пилуки і газів викидами у водойми стічних вод, які їх забруднюють і стравлюють, погіршують стан ґрунту, який знаходиться біля підприємства.

Моделювання процесів формування та виникнення травмонебезпечних і аварійних ситуацій на виробництві

У зображеннях процесів формування, виникнення аварій та виробничих травм усі випадкові події (явища), що утворюють конкретну аварійну або травмонебезпечну ситуацію, пов'язані між собою причинно-наслідковими зв'язками. В них є початкові, проміжні та кінцеві події.

Початкові події (небезпечні умови, небезпечні дії) виявляють у процесі обстеження об'єктів виробництва, а проміжні та кінцеві входять до схеми на основі логічного аналізу можливих варіантів перебігу подій.

Слід зауважити, що поняття «початкові події» введено умовно, бо насправді цим подіям можуть передувати інші. Але вони першими помічаються при обстеженні робочих місць та інших об'єктів виробництва.

Якщо на схемах, що зображують процеси протікання (перебігу) випадкових подій, починаючи з початкових і закінчуючи кінцевими, показати причинно-наслідкові зв'язки, то ми одержимо логічні моделі процесів, що вивчаються.

Кожна логічна модель процесу формування та виникнення небезпечної або аварійної ситуації складається з певної кількості випадкових подій, які між собою можуть бути статистично залежними або незалежними. Статистичне залежні події — це такі, коли поява наступної події неможлива без виникнення попередньої. Якщо кожна з двох подій, що входять до однієї моделі, можуть з'являтися незалежно одна від одної, то такі події є статистичне незалежними. Як правило, у таких моделях незалежні випадкові події одна відносно одної розміщуються паралельно, а залежні — послідовно. Причинно-наслідкові зв'язки зображені стрілками, які, крім того, ще показують напрямок протікання (перебігу) подій.

Шляхом дослідження небезпечних ситуацій, які можуть виникати при експлуатації виробничого обладнання, описані і побудовані логічні моделі різні за формою і характером подій. Це дало можливість перейти до побудови більш складних моделей аварій, травм і катастроф, які потрібні для встановлення причин виникнення потенційних небезпек, без чого неможливо вжити обґрунтованих профілактичних заходів.

Метод логічного моделювання потенційних аварій, травм і катастроф відкриває можливість розробити досконалу систему управління безпекою життєдіяльності виробництва, яка базується на оперативному пошуку виробничих небезпек, їх глибокому логічному (при необхідності і математичному) аналізі й терміновому прийнятті заходів для усунення потенційних небезпек ще до виникнення травмонебезпечних та катастрофічних ситуацій.

Процес пошуку потенційних небезпек на виробництві ґрунтується на більш точному і ефективному проведенні існуючого оперативного контролю, який також повинен бути відповідно удосконалений.

Аналізуючи кожен з побудованих логічних моделей процесів формування та можливого виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій, завжди можна знайти подію, з якої починається небезпечний процес і до виникнення небезпечних наслідків.

Якщо дослідження логічних зв'язків провести у зворотному напрямку, то обов'язково можна знайти ту подію (явище), що є причиною (однією з причин) формування досліджуваного процесу.

Метод логічного моделювання травмонебезпечних, аварійних та інших ситуацій значно полегшує пошук причин аварій, виробничих травм і дорожньо-транспортних пригод при їх розслідуванні.

Вивчені, побудовані і систематизовані логічні моделі для окремих виробничих процесів, обладнання та інших об'єктів можна програмувати, а складений з них банк даних, може бути використаний для прогнозування виникнення аварій, травм, катастроф та інших небажаних явищ за допомогою ЕОМ.

Логічні моделі можна застосовувати при прийнятті рішень про відповідальність осіб, винних у виникненні таких пригод, а також ступінь вини самого потерпілого.

Методикою оцінки рівня безпеки робочих місць, машин, виробничих процесів та окремих виробництв передбачено пошук об'єктивного критерію (показника) рівня безпеки для конкретного об'єкта. Таким показником вибрана ймовірність виникнення аварії, травми або катастрофи залежно від досліджуваного явища.

Для того щоб оцінку рівня безпеки певного об'єкта чи явища запровадити на виробництві, необхідний простий і доступний метод обчислення значень ймовірності будь-якого випадкового явища. Основні

принципи цього методу полягають у тому, що на основі обстеження робочого місця чи окремої машини (об'єкта) виявляють виробничі небезпеки, можливі аварійні або травмонебезпечні ситуації. При оцінці ситуацій визначають події, які можуть стати головною подією при побудові логіко-імітаційної моделі аварії або травми (чи катастрофи). Після цього будують модель («дерево відказів і помилок оператора»). При цьому важливе значення має правильний вибір головної випадкової події.

Головну випадкову подію (конкретна аварія, травма або катастрофа), модель якої нам необхідно побудувати, вибирають виходячи з оцінки відповідного об'єкта, виробництва чи окремої одиниці обладнання і змісту його найбільш небезпечного явища, яке за певних умов виробництва може виникнути.

Залежно від об'єкта головними подіями можуть бути:

- для технологічного обладнання: «захват одягу», «захват рук, ніг та інших елементів тіла людини», «удар», «падіння людини», «електричний удар», «опіки тіла», «опромінення» тощо;

- для підприємства в цілому: «вихід з ладу обладнання», «пошкодження електричного обладнання», «пошкодження будівель», «пожежа» тощо.

Після вибору головного випадкового явища (події) розпочинають побудову моделі («дерева»). Використовуючи оператори «І» та «АБО», виконують набір ситуацій (відомих до цього), які можуть призвести до тієї події, яка вибрана як головна.

У деяких випадках головна подія може мати; і більше однакових небезпечних ситуацій за змістом, але різних за природою і причинами виникнення [6].

В кожному конкретному випадку виробництва необхідно ретельно вести пошук і дослідження небезпечних ситуацій. Після визначення відповідних аварійних, травмонебезпечних або катастрофічних ситуацій та їх кількості, визначають інші події, що входять до кожної такої ситуації, логічним аналізом із застосуванням операторів «І», «АБО» та інших. Процес

побудови моделі триває поки не будуть знайдені усі базові події, що визначають межу моделі.

Слід мати на увазі, що кожна випадкова подія, до якої входять базові події, може формуватися й виникати при входженні у неї двох, трьох і більше базових подій за допомогою відповідних операторів.

Повністю побудована і перевірена модель підлягає математичній обробці для визначення ймовірності кожної випадкової події, що увійшла до моделі, починаючи з базових і закінчуючи головною.

Ймовірності базових подій визначають за даними виробництва. Наприклад, базова подія «стан контролю з охорони праці». Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об'єкті. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 50 або 30 %, то ймовірність відповідно дорівнює 0,5 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність «не здійснення контролю» становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0. Після обчислення ймовірності всіх подій, розміщених у ромбах, і базових подій, починаючи з лівої нижньої гілки «дерева», позначають номерами всі випадкові події, що увійшли до моделі.

На цьому можна вважати, що певна модель підготовлена до математичної обробки. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують формули.

1. Нехай дві базові події з ймовірностями  $P_1$  і  $P_2$  за допомогою оператора «I» входять у наступну третю подію. Тоді ймовірність виникнення цієї події  $P_3$  можна визначити так:

$$P_3 = P_1 P_2$$

2. За допомогою оператора «I» три події з ймовірностями  $P_1$ ,  $P_2$  і  $P_3$  формують четверту випадкову подію. Тоді ймовірність цієї події  $P_4$  обчислюють так:

$$P_4 = P_1 P_2 P_3$$

3. Оператор «І» об'єднує  $n$  подій з ймовірностями  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ . Тоді ймовірність вихідної події  $P$  буде

$$P = P_1 P_2 P_3 \dots P_n$$

4. Дві базові події з ймовірностями  $P_1$  і  $P_2$  за допомогою оператора «АБО» входять до третьої події. Тоді її ймовірність  $P_3$  буде:

$$P_3 = P_1 + P_2 - P_1 P_2$$

5. Оператор «АБО» об'єднує три базові події з ймовірностями  $P_1, P_2, P_3$  які за допомогою цього оператора входять у наступну подію з ймовірністю  $P_4$ . Тоді ймовірність цієї події можна визначити за формулою

$$P_4 = P_1 + P_2 + P_3 - P_1 P_2 - P_1 P_3 - P_2 P_3 + P_1 P_2 P_3.$$

6. Якщо в оператор «АБО» входять чотири і більше випадкових базових подій з відомими значеннями ймовірностей, то для спрощення обчислень їх згруповують по дві або по три події і застосовують наведені формули. Після визначення ймовірностей вихідних подій кожної з таких груп, їх знову необхідно згрупувати і провести аналогічні обчислення, аж поки не залишаться дві або три події, над якими необхідно провести ті ж операції.

Так, поступово обчислюючи ймовірність вихідних подій кожного окремого розгалуження, наближаємось до головної події і обчислюємо ймовірність її виникнення.

Значення ймовірності головних подій, що досліджуються, на жаль, не можна порівняти з нормативними значеннями певного ступеня ризику для певної людино-машинної системи, бо таких даних просто не існує. Але значення ймовірності тієї чи іншої події, обчислені при дослідженні конкретної моделі, дає уяву про високу, середню і незначну (малоймовірну) небезпеку.

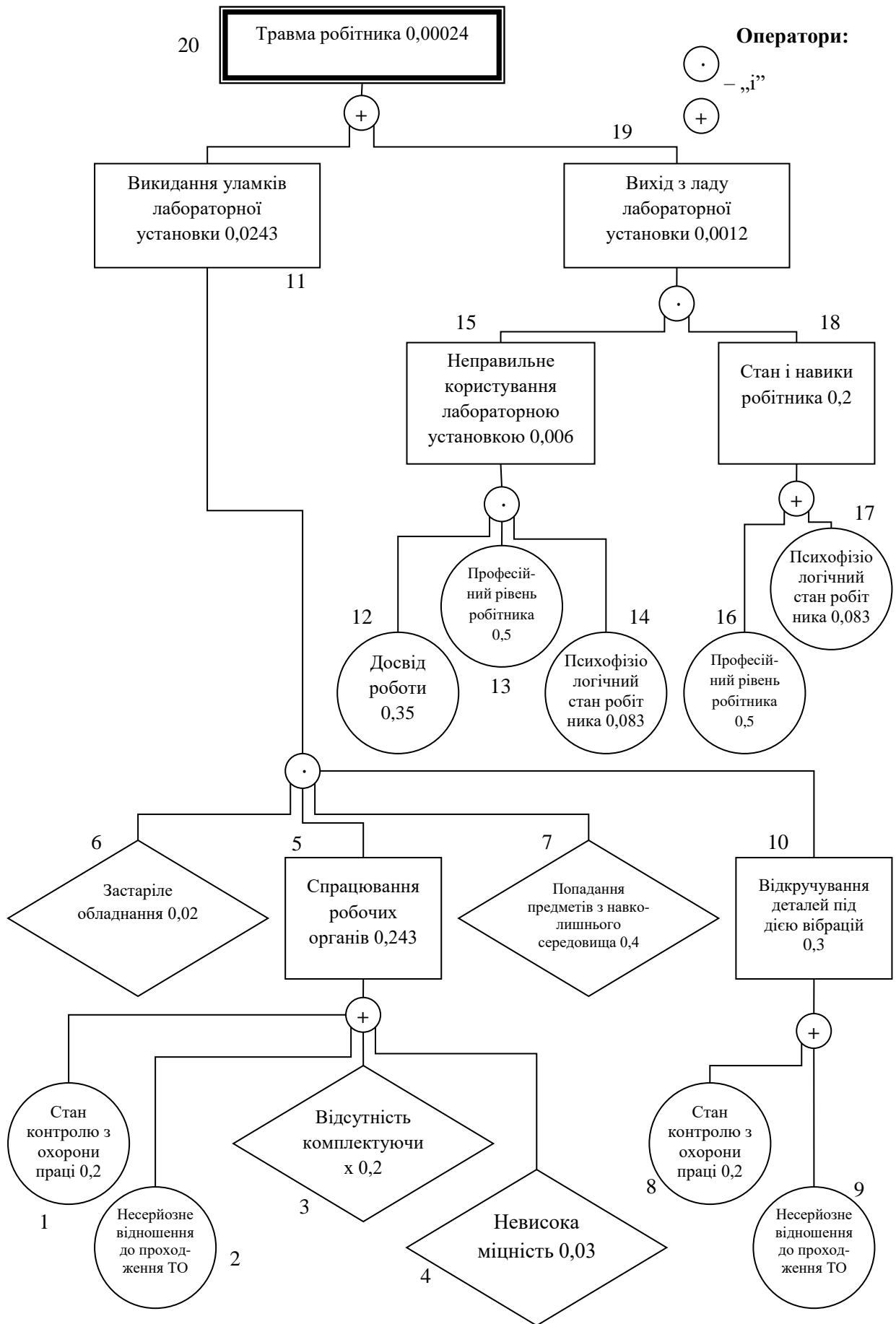


Рисунок 4.1 - Логіко-імітаційна модель процесу формування та виникнення аварії та травми під час роботи установки.



Єдиний документ, який можна взяти для орієнтуру, це ГОСТ 12.1.010-76, в якому зазначено, що виробничі процеси повинні розроблятися так, щоб ймовірність виникнення вибуху на будь-якій вибухонебезпечній ділянці протягом року не перевищувала  $10^{-6}$  ( $P=0,000001$ ).

Для проведення обчислень ймовірності травми використаємо логіко-імітаційну модель процесу її формування.

Оскільки значення ймовірності виникнення аварії або травми (аварійної чи травмонебезпечної ситуації) найбільш точно і об'єктивно характеризує рівень небезпеки на конкретному об'єкті, то цим створені умови для удосконалення системи управління безпекою праці в окремих підрозділах або господарствах. При цьому значення ймовірності можуть бути використані при розробці заходів впливу на працюючих, що часто допускають небезпечні дії, і заохочуючих (стимулюючих) заходів до тих працюючих, на робочих місцях яких існує дуже низька ймовірність виникнення травми або аварії.

Наведемо приклад визначення ймовірності аварії за допомогою логіко-імітаційної моделі (рис. 4.1).

Позначимо події моделі відповідними номерами від 1 до 13. Подія 9 характеризує саме аварію. Ймовірності базових подій покажемо умовно, але значення їх будуть близькими до реальних умов виробництва.

$$P_1=0,05; P_2=0,2; P_3=0,3; P_5=0,1; P_7=0,5; P_8=0,5.$$

Використовуючи указану модель, визначимо послідовно ймовірність події 3:

$$P_4=P_1+P_2+P_3-P_1P_2-P_1P_3-P_2P_3+P_1P_2P_3=0,243;$$

$$P_6=P_4P_5=0,0243;$$

$$P_9=P_6P_7P_8=0,006.$$

Одержане значення ймовірності виникнення аварії (викришення зубів)  $P_9=0,006$ , характеризує те, що при наявності таких подій, які відображені у моделі, на кожну 1000 одиниць аналогічного обладнання можна очікувати 6 аварій.

Якщо продовжити розрахунки далі, то можна розрахувати ймовірність травми:

$$P_{10}=0,2; P_{12}=0,2;$$

$$P_{11}=P_9 P_{10}=0,0012;$$

$$P_{13}=P_{11} P_{12}=0,00024.$$

Логіко-імітаційні моделі аварій і травм допомагають зменшити ймовірність виникнення аварійних та травмонебезпечних ситуацій.

## 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Ефективність лабораторного обладнання найкраще відображає його енергоємність і є найважливішим показником сучасного виробництва. Крім того, необхідно оцінити такі показники, як металоємність, трудомісткість, собівартість, рівень технології процесу, термін окупності інвестицій..

Ефективність процесу  $E_{\phi}$  відображається як:

$$E_{\phi} = \frac{Q}{N_m}, \quad (5.1)$$

де  $Q$  – продуктивність машини, кг/год;

$N_m$  – потужність машини, кВт.

Енергоємність процесу оцінюється співвідношенням:

$$E = \frac{N_m}{Q}, \quad (5.2)$$

де  $E$  – енергоємність процесу, (кВт·год)/кг;

$N_m$  – потужність машини, кВт.

Металоємність процесу на машинах різного типу оцінюється наступним виразом:

$$M = \frac{m_m}{Q}, \quad (5.3)$$

де  $m_m$  – маса машини, кг.

Трудомісткість процесу:

$$T_p = \frac{z_n}{Q}, \quad (5.4)$$

де  $z_n$  - затрати праці на виконання технологічної операції, люд·год.

Питома вартість технічного засобу:

$$B_n = \frac{B_{\phi}}{Q}, \quad (5.5)$$

де  $B_{\phi}$  – балансова вартість, грн., яка визначається як:

$$B_{\phi} = C_m + B_{\text{нп}} + B_m + B_M + B_{\text{нр}} + B_{\text{со}} + B_{\text{тз}}, \quad (5.6)$$

де  $C_m$  – ціна машини, грн.;

$B_{mn}$  – ціна передпродажної підготовки машини, грн.;

$B_t$  – ціна транспортування, грн.;

$B_m$  – вартість монтажу машини, грн.;

$B_{nnp}$  – ціна пусконаладжувальних робіт, грн.;

$B_{co}$  – ціна сервісного обслуговування, грн.;

$B_{mz}$  – ціна тимчасового зберігання обладнання, грн.

Річні витрати енергії на експлуатацію обладнання визначаються як:

$$Z_{ee} = E \cdot Q \cdot T_p, \quad (5.7)$$

де  $T_p$  – річний бюджет часу роботи обладнання, год.

Річна вартість енергії, що витрачена на виконання технологічної операції протягом виробничого періоду визначається як:

$$B_{ee} = Z_{ee} \cdot C_{ee} \cdot B_{ndv}. \quad (5.8)$$

де  $C_{ee}$  – ціна 1 кВт·год. електроенергії,  $C_{ee} = 6$  грн./кВт·год;

$B_{ndv}$  – податок на додану вартість,  $B_{ndv} = 1,2$ .

Проведені розрахунки за формулами (5.1) (5.8) приведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Зведені результати розрахунку енергетичних і техніко-економічних показників роботи установки

Параметр	Позначення	Одиниці виміру	Лабораторна установка	СМЖ-129Б
Ефективність процесу	$E_f$	кг/(кВт·год.)	250	210,3
Енергоємність процесу	$E$	(кВт·год.)/кг	0,004	0,005
Металоємність процесу	$M$	кг/(кг/год.)	0,9700	0,9740
Трудомісткість процесу термічного зміцнення	$T_p$	люд.·год./ (кг/год.)	0,0015	0,0028
Питома вартість обладнання	$B_n$	грн./((кг/год.)	4,350	4,545
Річні затрати електроенергії (1 зміна)	$Z_{ee1}$	кВт	12480	24400
Річні затрати електроенергії (2 зміни)	$Z_{ee2}$	кВт	24960	48800
Річна вартість електроенергії (1 зміна)	$B_{ee1}$	грн.	60464	114120
Річна вартість електроенергії (2 зміни)	$B_{ee2}$	грн.	120928	228240
Затрати праці	$Z_n$	люд.·год.	0,69	3,11
Балансова вартість установки	$B_b$	грн.	69751	180908

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Запропоновано методики зміцнення термонапружених сталевих прутків на невеликих лабораторних установках з урахуванням контролю температури вздовж стрижнів за допомогою термопар і чутливої контрольно-вимірювальної апаратури, що дає можливість контролювати зміни температури в технічному циклі.

Досліджено термічно напружені сталеві прутки довжиною 1,5 метра зі сталі 35ГС  $\varnothing$  8 мм і 25Г2С  $\varnothing$  8 мм у трьох точках вимірювання, розташованих на відстані 500 мм одна від одної по її довжині, а мінімальні значення – різниця температур  $\Delta T$ , викликана притяганням електронів і залишковою напругою охолодження. Вздовж прутка встановлюється більший  $\Delta T$  і мінімальний час нагріву  $t_n$  – 30 с, що для 35ГС більш важливо, ніж для 25Г2С, при цьому ці зміни не мають явної закономірності. Збільшення часу нагрівання до 180 секунд зменшує (врівноважує) такі коливання  $\Delta T$ .

Визначені переваги термічної напруги сталі 25Г2С порівняно з 35ГС пояснюються вищим вмістом в ній вуглецю, фосфору, сірки та оксидів, що призводить до окрихчення останньої. З іншого боку, руйнування сталі 25Г2С більш енергоємне через підвищений вміст марганцю в сталі, що призводить до зменшення неметалічних включень.

Використовуючи запропонований метод, а саме: виготовлення термічно напружених сталевих прутків в лабораторних умовах, контроль температурних коливань по їх довжині, визначення міцності та тріщиностійкості основного металу, можна буде вирішувати наукові задачі та вдосконалення практичних питань якості цього металопрокату для будівельної галузі.

Проведено заходи забезпечення техніки безпеки та охорони довкілля, розроблено логіко-імітаційну модель процесу формування та виникнення аварії та травми під час виробництва. Розраховано економічну ефективність запропонованого технічного рішення.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бліхарський З. Я. Вплив одночасної дії агресивного середовища і навантаження на міцність залізобетонних балок з корозійними пошкодженнями по довжині / З. Я. Бліхарський, Р. Є. Хміль, Р. В. Вашкевич // Зб. наук. пр. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів. – 2005. – Вип. 5. – С. 13 – 21.
2. Божидарнік В. В. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів : монографія : у 2-х т. / Т. 1. Основи механіки руйнування неперервно армованих композитів. – Луцьк : Надстир'я, 2007. - 400с.
3. Гнідець Б. Г. Залізобетонні конструкції з електротермічним попереднім напруженням / Б. Г. Гнідець, П. П. Завадяк, М. Р. Щеглюк. – К. : Техніка, 1996. – 240 с.
4. Гуменюк Р. В., Когут М.С. Вплив діаметра та довжини на коливання температури для термонапруженої арматури із сталей 35ГС і 25Г2С. Матеріали всеукраїнської наук.-практ. конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Підвищення надійності та міцності деталей при ремонті з використанням перспективних методів зміцнення" : МНАУ. 25 – 26 вересня 2013. – С. 87 – 90.
5. Гуменюк Р. В., Когут М.С. Лабораторна установка для зміцнення і контролю сталюї термонапруженої арматури. Зб. наук. пр. Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : НАНУ Фіз. мех. інст. ім. Г.В. Карпенка. – Львів : Каменяр, 2012. – № 9. – С. 233 – 237.
6. Залога В.О. Пуховський Є.С., Малафєєв Ю.М. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування. Навчальний посібник для студентів ВНЗ машинобудівних спеціальностей / Частина I / Під ред. Коренькова В.М. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 286 с.
7. Залога В.О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні: навчальний посібник / В.О. Залога, О.О. Залога, В.Д.

Гончаров; за загальн. ред. В.О. Залого. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 371 с.

8. Здросис К.П. Керування спеціальними режимами електромеханічних систем механізмів підйому з асинхронним електроприводом: автореф. дис. на здоб. ступ. канд. техн. наук: спец. 05.09.03 „Електротехнічні комплекси та системи” / К.П. Здросис. – О., 2001. – 17 с.

9. Когут М. С., Гуменюк Р.В. Визначення тріщиностійкості ( $K_{IC}$ ) металу шва сталюї термонапруженої арматури на циліндричному зразку з кільцевою тріщиною. MOTROL. Commission of Motorization and energetics in agriculture. – 2012. – Vol. 14, № 4. – S. 28 – 31.

10. Когут М. С., Гуменюк Р.В. Методика зміцнення і контролю сталюї термонапруженої арматури та оцінки її тріщиностійкості. Вісник Львівського національного аграрного університету : Агроінженерні дослідження. – 2010. – № 14. – С. 276 – 282.

11. Когут М. С., Гуменюк Р.В. Тріщиностійкість прутків арматурних сталей з електротермічним попереднім напруженням. Наукові нотатки міжвузівського збірника (за напрямом „Інженерна механіка”) ЛНТУ. – 2009. – № 25, ч. 1. – С. 176 – 182.

12. Когут М. С., Гуменюк Р.В. Тріщиностійкість термонапруженої арматури і вплив на неї коливань температури. Проблеми міцності. – 2011. – № 5. – С. 82 – 89.

13. Лучко Й. Й. Методи дослідження та випробування будівельних матеріалів і конструкцій / Й. Й. Лучко, П. М. Коваль, М. Л. Дем’ян. – Львів : Каменяр, 2001. – 431 с.

14. Лучко Й. Й. Методи оцінки несучої здатності і підвищення тріщиностійкості залізобетонних елементів конструкцій / Й. Й. Лучко. – Львів : Слово і комерція, 1997. – 453 с.

15. Лучко Й. Й. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування / Й. Й. Лучко. – Львів : Каменяр, 1999. – 346 с.

16. Пахолюк А.П., Пахолюк О.А. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали. Посібник для студентів інженерних спеціальностей ВНЗ. - Львів.: Світ. 2005. 220с.
17. Пуховський Є.С., Малафєєв Ю.М. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування. Навчальний посібник для студентів ВНЗ машинобудівних спеціальностей / Частина I / Під ред. Коренькова В.М. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 286 с.
18. Серіков Я. О. Безпека життєдіяльності – секюритологія. Проблеми. Завдання. Шляхи вирішення : монографія : в 2-х ч. / Я. О. Серіков, Л. Ф. Коженєвські. – Харків : ХНАМГ ; Краків : ЕАС, 2012. – Ч. 1. – 168с. Ч. 2. – 337 с.
19. Термічна обробка металів: [навч. посіб.] / А.В. Мохорт, М.Г. Чумак - К.: Либідь, 2002. - 512 с. - ISBN 966-06-0212-X
20. Ясній П. В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщиноотривкість / П. В. Ясній. – Львів : Світ, 1998. – 292 с.
21. Yang C. Design and analysis of composite pipe joints under tensile loading / C. Yang // J of Composite Materials. – 2000. – 34, № 4. – P. 332 – 349.
22. Yokobori T. The effect of frequency on fatigue crack propagation spacing in A12024-T3 aluminium alloy and SM-50 steel / T. Yokobori, K. Sato // Eng. Fract. Mech. – 1996. – № 63. – P. 81 – 88.
23. <http://www.gebp.lviv.ua/index.php/ua/>