

**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 СТАЛЬНОЇ ТЕРМІЧНО
ЗМІЩЕНОЇ АРМАТУРИ”**

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-63

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Тарас КІЦА
(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.
“12” вересня 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту
Кіца Тарасу Орестовичу

1. Тема роботи: **«Дослідження міцності сталюї термічно зміцненої арматури»**

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

Затверджена наказом по університету від 12.09.2024 року № 616/к-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 06.12.2024 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*: мета та завдання роботи; технічні можливості відомої установки СМЖ-129 для електротермічного зміцнення арматурних сталей; загальний вигляд модернізованої установки СМЖ-129Б для термічного зміцнення пруткової арматури електронагрівом; схема приєднування термопар до арматурного прутка для вимірювання температури після електронагрівання; графічні залежності коливання температури по довжині прутків термонапруженої арматури $\varnothing 14$ мм зі сталі 35ГС та 25Г2С за час нагріву 30с, 90с і 190с.; зміна різниці температур від номера прутка для 6-ти арматурних прутків: 30 с, 90 с, 180 с., для сталі 35ГС та 25Г2С.; результати досліджень арматурних стрижнів з електротермічним попереднім напруженням; схема випробування циліндричного зразка при утворенні в ньому кільцевої тріщини; статична тріщиностійкість k_s на різних ділянках по довжині прутка сталей 35ГС і 25Г2С після розтягу циліндричних зразків з кільцевою тріщиною; економічна ефективність запропонованого технічного рішення; висновки та пропозиції.

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			
4	Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва			

7. Дата видачі завдання: 12.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	Виконання розділу: «Огляд методик оцінки міцності»	12.09.24- 26.09.24	
2.	Виконання другого розділу: «Методики оцінки міцності та тріщиностійкості»	27.09.24- 16.10.24	
3.	Виконання розділу: «Результати експериментальних досліджень»	17.10.24- 05.11.24	
4.	Виконання розділу: «Охорона праці та захист населення»	06.11.24- 18.11.24	
5.	Виконання розділу: «Економічна ефективність результатів роботи»	19.11.24- 27.11.24	
6.	Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому	28.11.24- 06.12.24	

Студент _____ Тарас КІЦА

(підпис)

Керівник роботи _____ Руслан ГУМЕНЮК

(підпис)

УДК 629.979:664.69

Дослідження міцності сталюї термічно зміцненої арматури. Кіца Т.О. - Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування. Дубляни, Львівський національний університет природокористування, 2024.

77 с. текст. част., 33 рис., 9 табл., 23 джерел інформації.

Проведено огляд методик оцінки міцності та тріщиностійкості сталюї термічно зміцненої арматури

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.

Проведено дослідження міцності, сталюї термічно зміцненої арматури довжиною прутків 6 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	7
1 ОГЛЯД МЕТОДИК ОЦІНКИ МІЦНОСТІ ТА ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ СТАЛЬНОЇ ТЕРМІЧНО ЗМІЦНЕНОЇ АРМАТУРИ.....	9
1.1 Напружено-деформівний стан сталюї термічно зміцненої арматури та обладнання для її зміцнення.....	9
1.2 Огляд методик для визначення міцності та тріщиностійкості конструкційних сталей і термонапруженої арматури.....	14
1.2.1. Силовий підхід в механіці руйнування та методики визначення їх тріщиностійкості (K_{1C}).....	14
1.2.2. Силові критерії крихкого та квазікрихкого руйнування.....	19
1.2.3. Конструкції зразків і схеми їх навантажень для дослідження тріщиностійкості конструкційних і термонапружених сталей.....	22
1.3 Вплив попереднього навантаження на тріщиностійкість арматурних сталей.....	27
2. МЕТОДИКИ ОЦІНКИ МІЦНОСТІ ТА ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ АРМАТУРНИХ ТЕРМОНАПРУЖЕНИХ ПРУТКІВ.....	26
2.1 Коефіцієнти K_1 інтенсивності напружень для циліндричного зразка арматурної сталі з кільцевою тріщиною.....	26
2.2 Технологія виготовлення циліндричних зразків з арматурних прутків.....	31
2.3 Спосіб зародження кільцевої тріщини в металевому циліндричному зразку.....	33
3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	36
3.1 Модернізація промислової установки СМЖ-129Б для виготовлення стандартної термонапруженої арматури електронагрівом	36
3.2. Контроль температури по довжині арматурного прутка термопарами	40
3.3 Втомна міцність термонапружених прутків арматурних сталей	

35ГС і 25Г2С	49
3.4 Статична тріщиностійкість K_c термонапружених прутків арматурних сталей 35ГС і 25Г2С.....	52
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ.....	59
5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	72
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	74
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	75

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_{IC}) 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_{IC}), 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 6 метрів;
4. Розробити заходи забезпечення техніки безпеки та захисту населення;
5. Розрахувати економічну ефективність запропонованого технічного рішення.

1 ОГЛЯД МЕТОДИК ОЦІНКИ МІЦНОСТІ 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 стальної 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 ε_t – відносна температурна деформація металу, $T = t - t_o$ – величина зміни температури металу між початковим значенням і кінцевим значенням.

Якщо сталеві прутки нагріті 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 ν та коефіцієнт лінійного теплового розширення металу a_t , $1/град$. і т. д.

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

Цей приріст Δl можна визначити за такою формулою:

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

де σ – нормальна силова напруга, Па; E - модуль пружності металу прутка, Па.

Для жорсткого затискання прутка, згідно з виразом (1.1), збільшення довжини Δl 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 Δl 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 - Установа СМЖ-129Б для термічного видовження арматурних прутків методом електронагріву.

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:

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

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

де, σ_k – критична напруга, при якій тріщини починають поширюватися; γ – 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) ϑ – коефіцієнт Пуассона.

Рівняння (1.6) і (1.7) справедливі для визначення σ_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 σ_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.

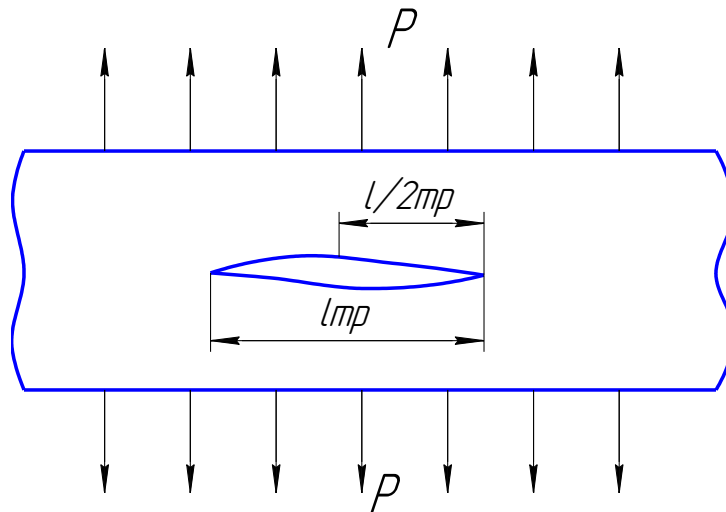


Рисунок 1.2 - Схема зконцентрованого розтягу металевої пластини з центральною тріщиною.

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.

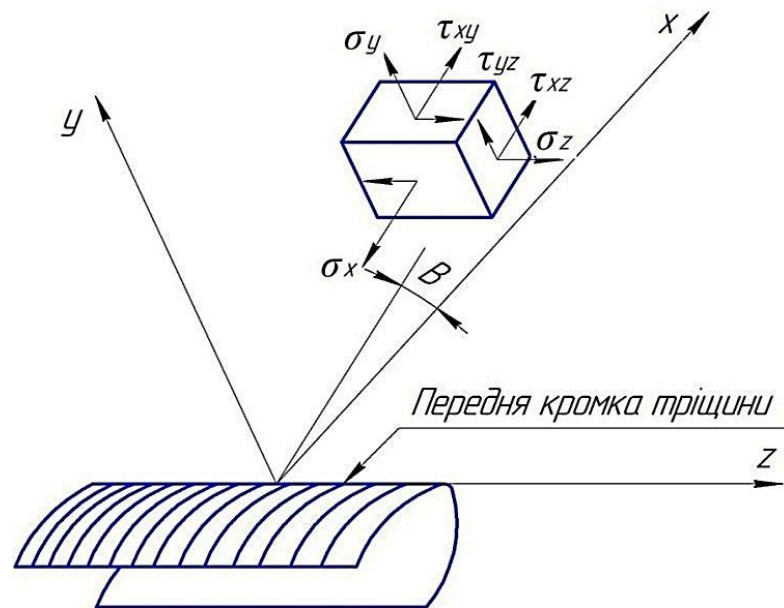


Рисунок 1.3 - Схема координат і розподіл напружень у вершині тріщини, що характеризуються рівняннями (1.3 - 1.5).

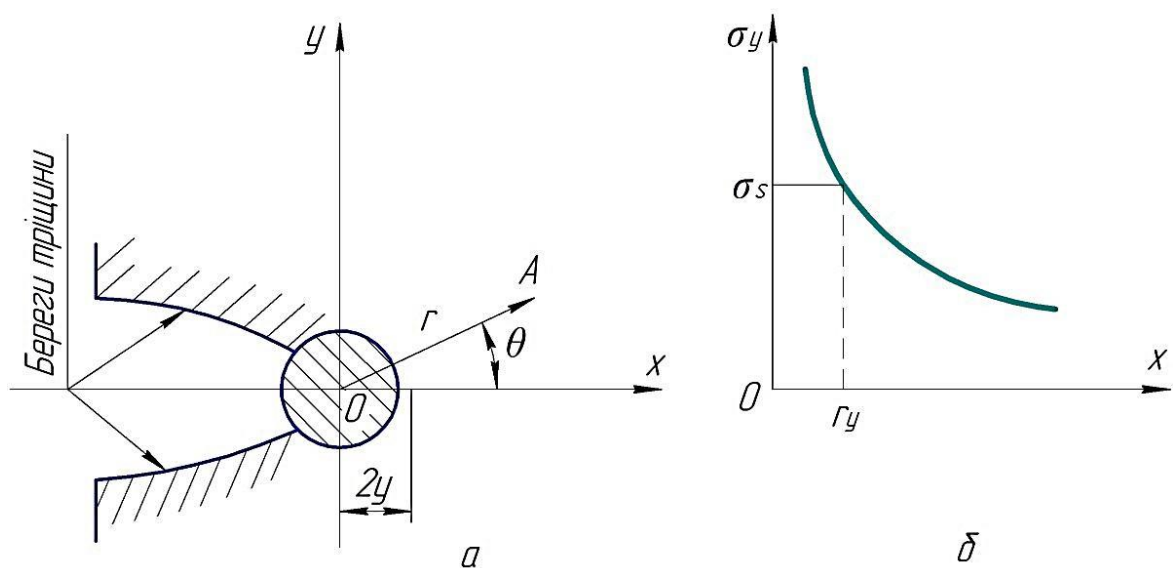


Рисунок 1.4 - Область вершини тріщини (а) та зміна напружень від вершини тріщини у плоскому зразку (б).

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 xu 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):

$$\begin{aligned}
 u_x &= \frac{K_1}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\mu + \sin \frac{\theta}{2}\right), \\
 u_y &= \frac{K_1}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\mu + \sin \frac{\theta}{2}\right), \\
 \sigma_{xx} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right), \\
 \sigma_{yy} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right), \\
 \sigma_{zz} &= \frac{2\mu K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}, \\
 \tau_{xx} &= \tau_{yz} = 0, \\
 \tau_{xy} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2};
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

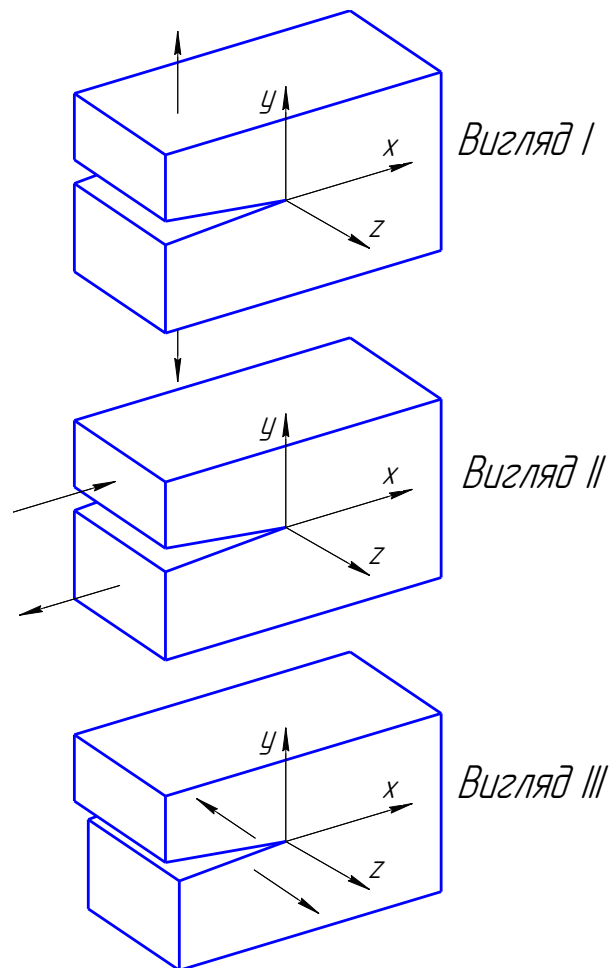


Рисунок 1.5 - Основні типи переміщень поверхонь тріщини: I – нормальний зсув; II – поперечний зсув; III – поздовжній зсув.

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

$$\begin{aligned}
 u_x &= \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 - 2\mu + \cos \frac{\theta}{2} \right), \\
 u_y &= \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(2\mu - 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right), \\
 \sigma_{xx} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right), \\
 \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}, \\
 \sigma_{zz} &= \frac{2\mu K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}, \\
 \tau_{xx} &= \tau_{yz} = 0, \\
 \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right);
 \end{aligned} \tag{1.9}$$

- 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, μ – 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 θ , 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 σ 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 σ , з достатньою точністю визначається коефіцієнтами інтенсивності напружень K_I , K_{II} , K_{III} . У

такому разі критеріальне рівняння міститиме параметри KI, KII та KIII, 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 (KI, KII, KIII), 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 σ_* - граничне значення напруги руйнування при заданій довжині тріщини l у матеріалі.

Подібно до цього критерію Оуена, умови зародження тріщини для поперечного зсуву ($KI=KII=0$) і поздовжнього зсуву ($KII=KIII=0$) 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_I і міцності матеріалу $\sigma_{0,2}$ можна знайти в співвідношенні:

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

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 (δ_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 σ_0 (константа матеріалу) і поширюються. Коли верхній отвір досягне критичного значення, з'являться тріщини δ_k :

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

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

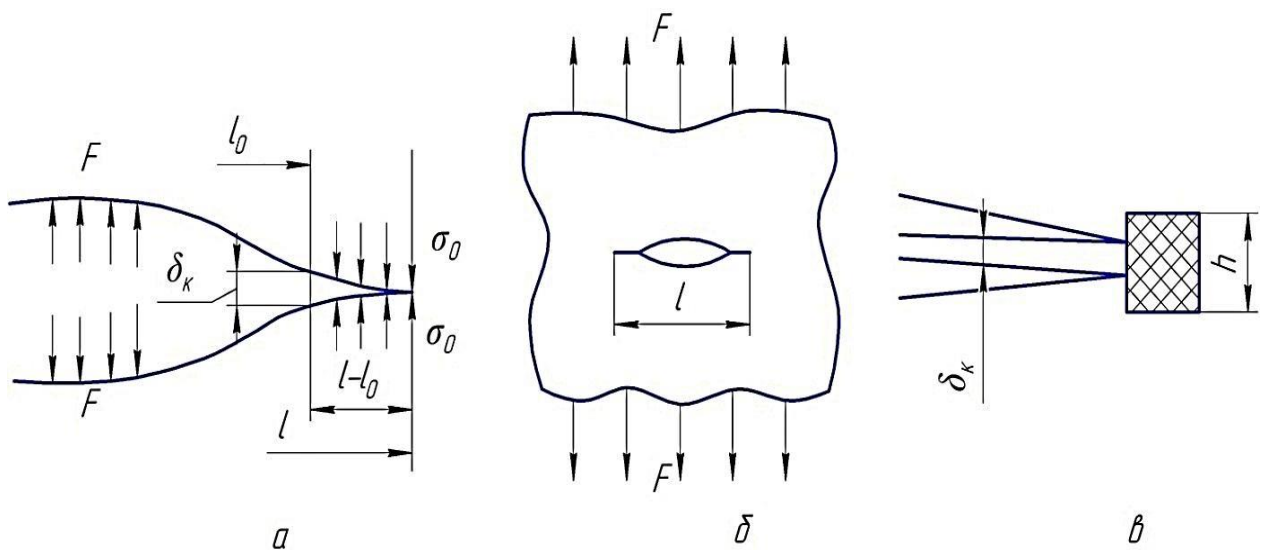


Рисунок 1.6 - Схематичне зображення δ_k моделі (а); навантаження пластини з центральною тріщиною (б); δ_k – модель локального руйнування квазікрихкого тіла з тріщиною (в).

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

одиночного об'єму, на висоті передруйнівної області (рис. 1.6, в) h досягає критичної деформації.

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

де δ – 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 підбрано 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.

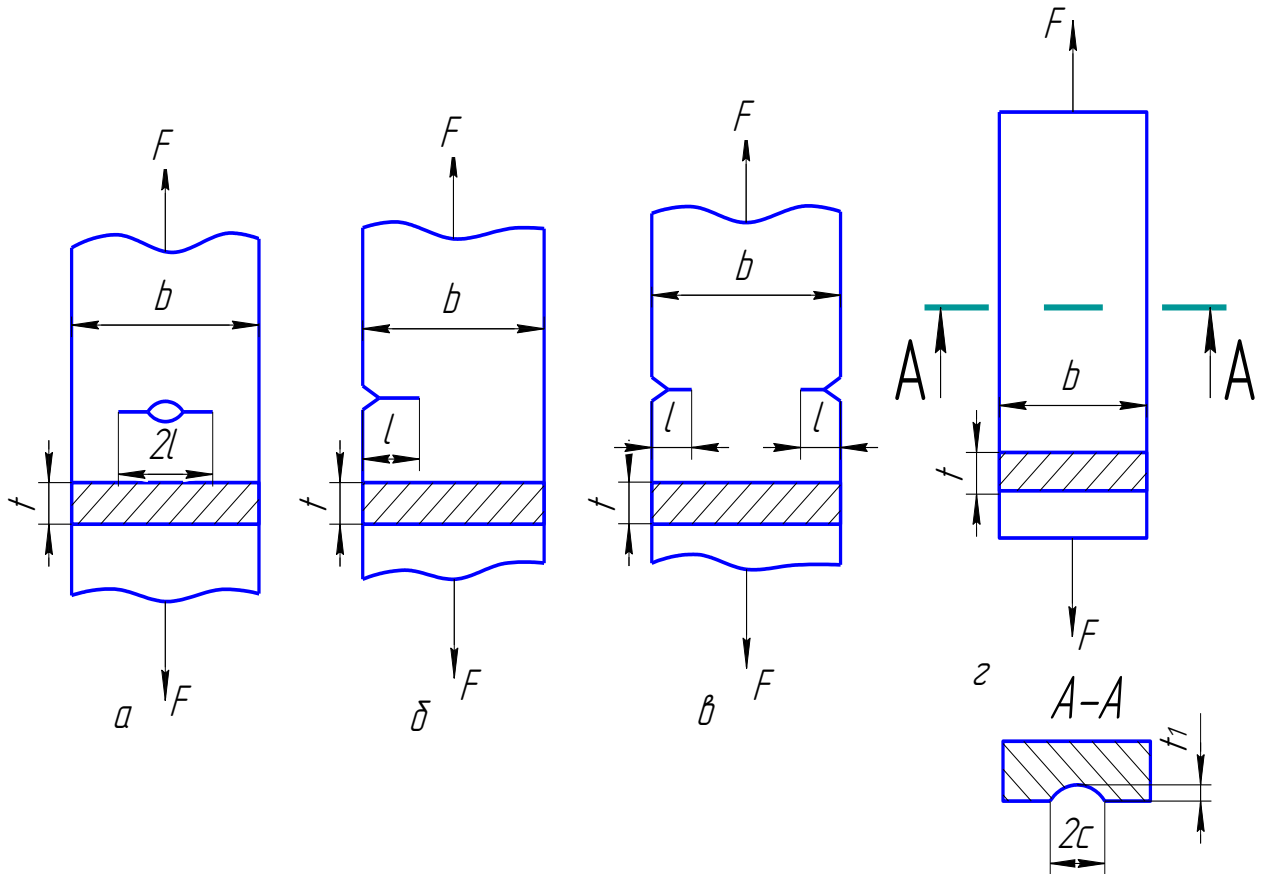


Рисунок 1.7 - Зразки пластини на розтяг: а) – з центральною тріщиною; б) – з боковою тріщиною; в) – з двома боковими; г) – з поверхневою сегментною.

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].

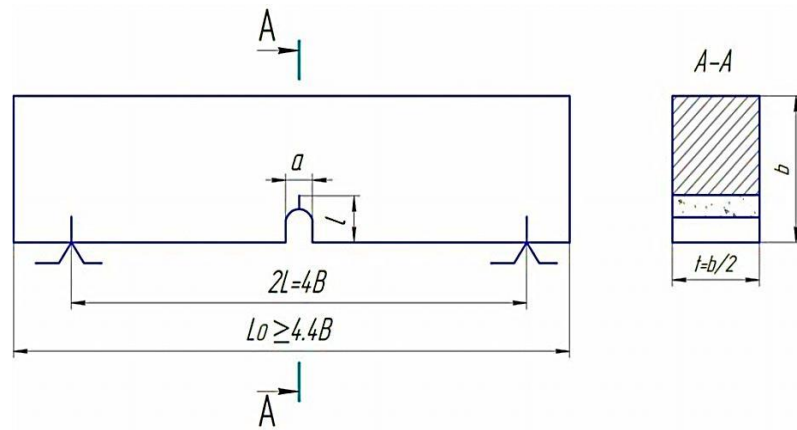


Рисунок 1.8 - Зразок-балка з боковою тріщиною на триточковий згин.

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.

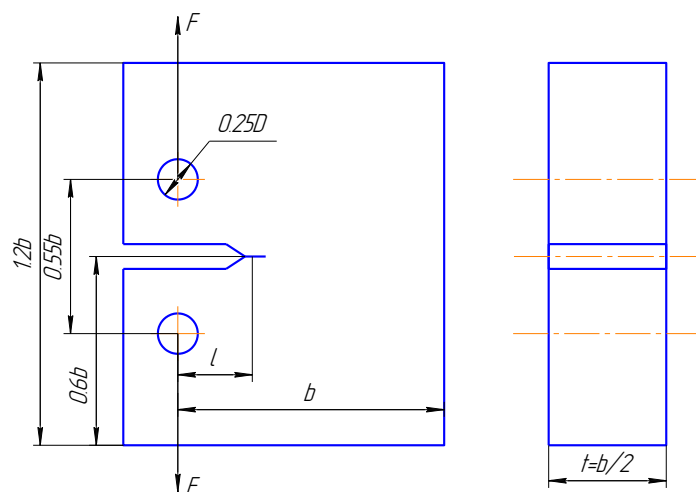


Рисунок 1.9 - Зразок-плита з боковою тріщиною на позacentровий розтяг.

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

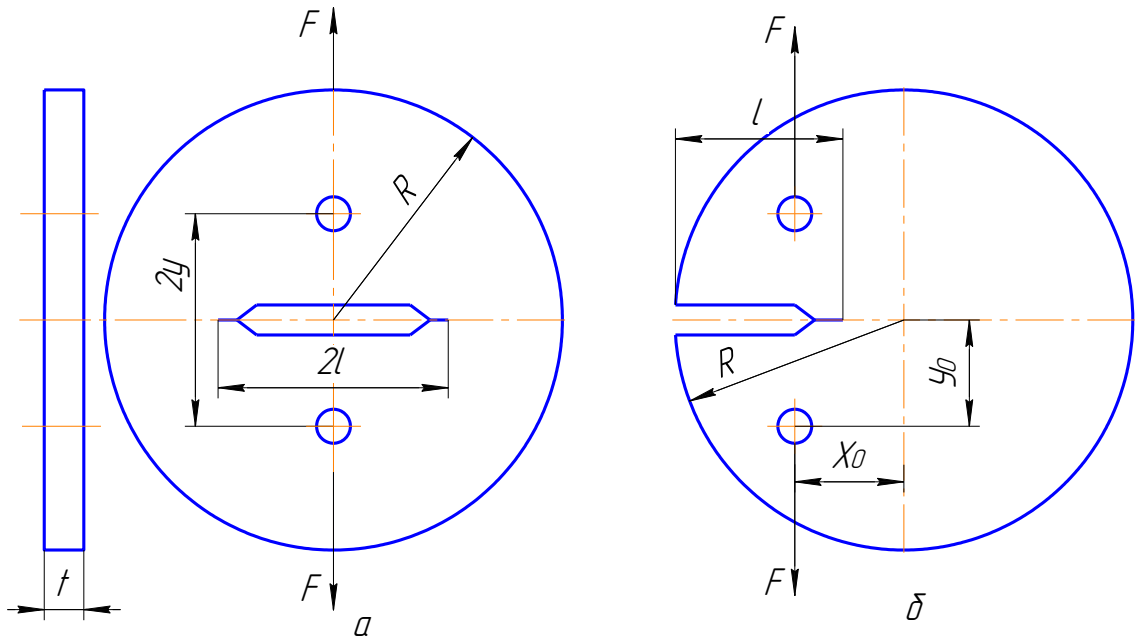


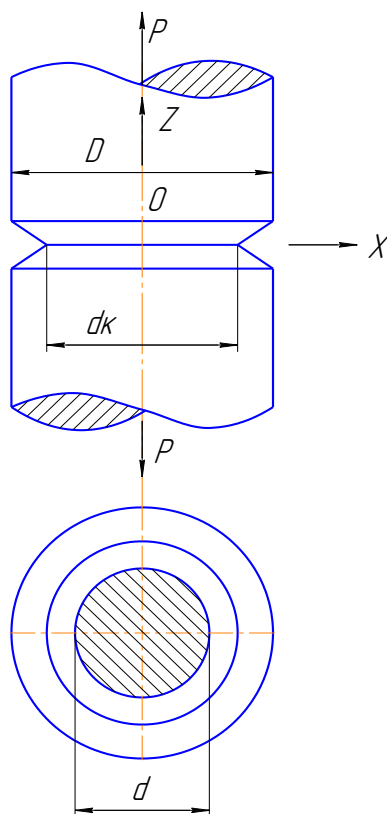
Рисунок 1.10 - Зразки-диски на розтяг: а) – центральною тріщиною; б) – боковою тріщиною.

Коли раніше класифікували різні марки матеріалів за статичною міцністю, як заводські зразки використовували циліндричні зразки з гранично малогострими кільцевими концентраторами (рис. 1.10). Головне, що заважає проводити випробування на визначення властивостей K_C або K_{IC} , 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_{IC} , тому що наявність у них кільцевих тріщин дозволяє більш ефективно реалізувати умови площинної деформації при руйнуванні за схемами осьового розтягу, триточкового згину та кручення.

2. МЕТОДИКА 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 σ_N – середнє напруження розтягу в площині тріщини циліндричного кільця; D – зовнішній діаметр металевго циліндра; $F(d/D)$ – функція безрозмірна, яка залежить від співвідношення d/D ; P – головний вектор осьової 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.

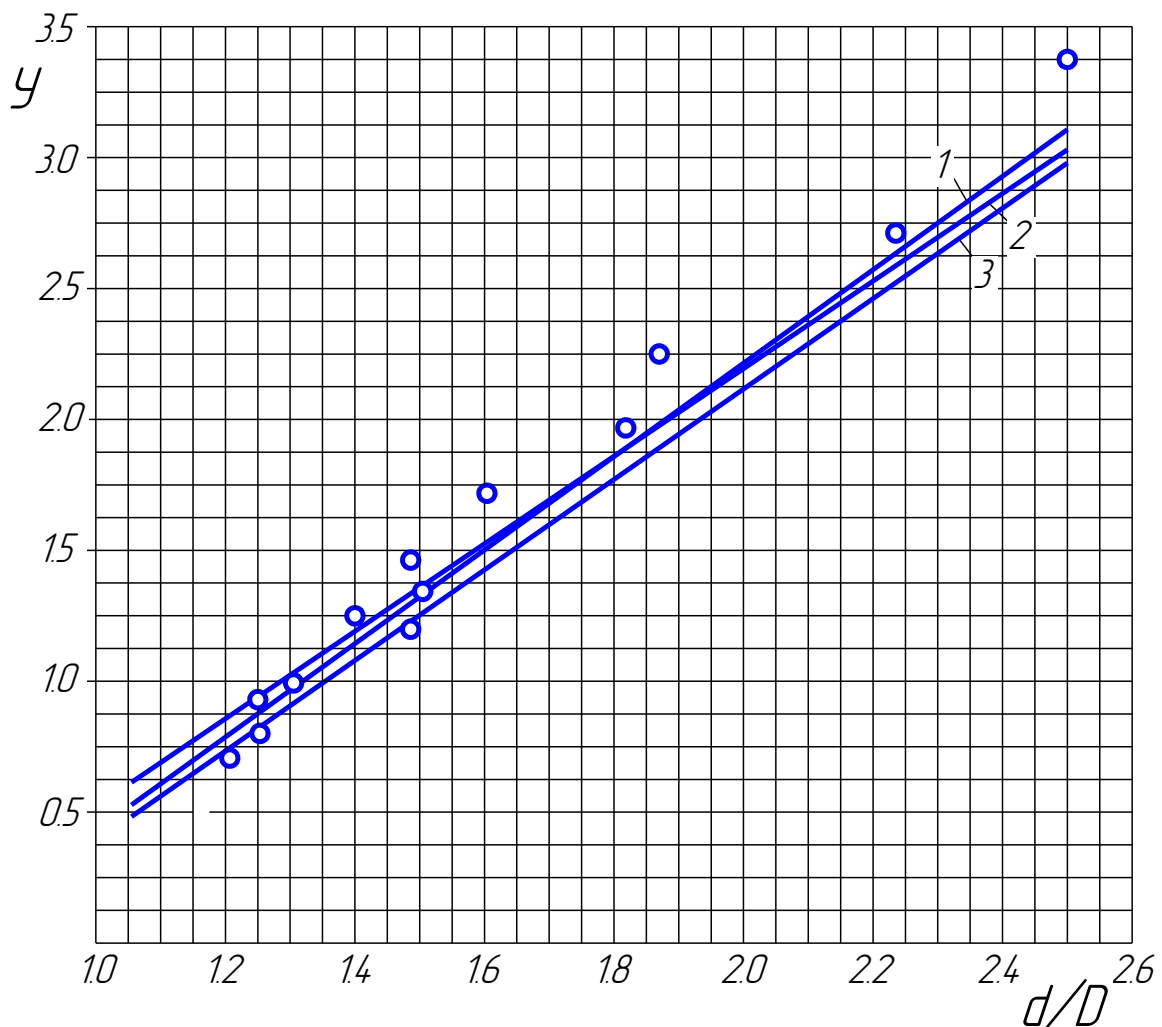


Рисунок 2.2 - Залежності зміни функції Y від співвідношення d/D для металевого циліндричного зразка з кільцевою тріщиною, визначені за формулою (2.2 і табл. 2.1); а також за формулами (2.3) і (2.4) відповідно.

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:

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

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

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 $f(d/D)$, ε :

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

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

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

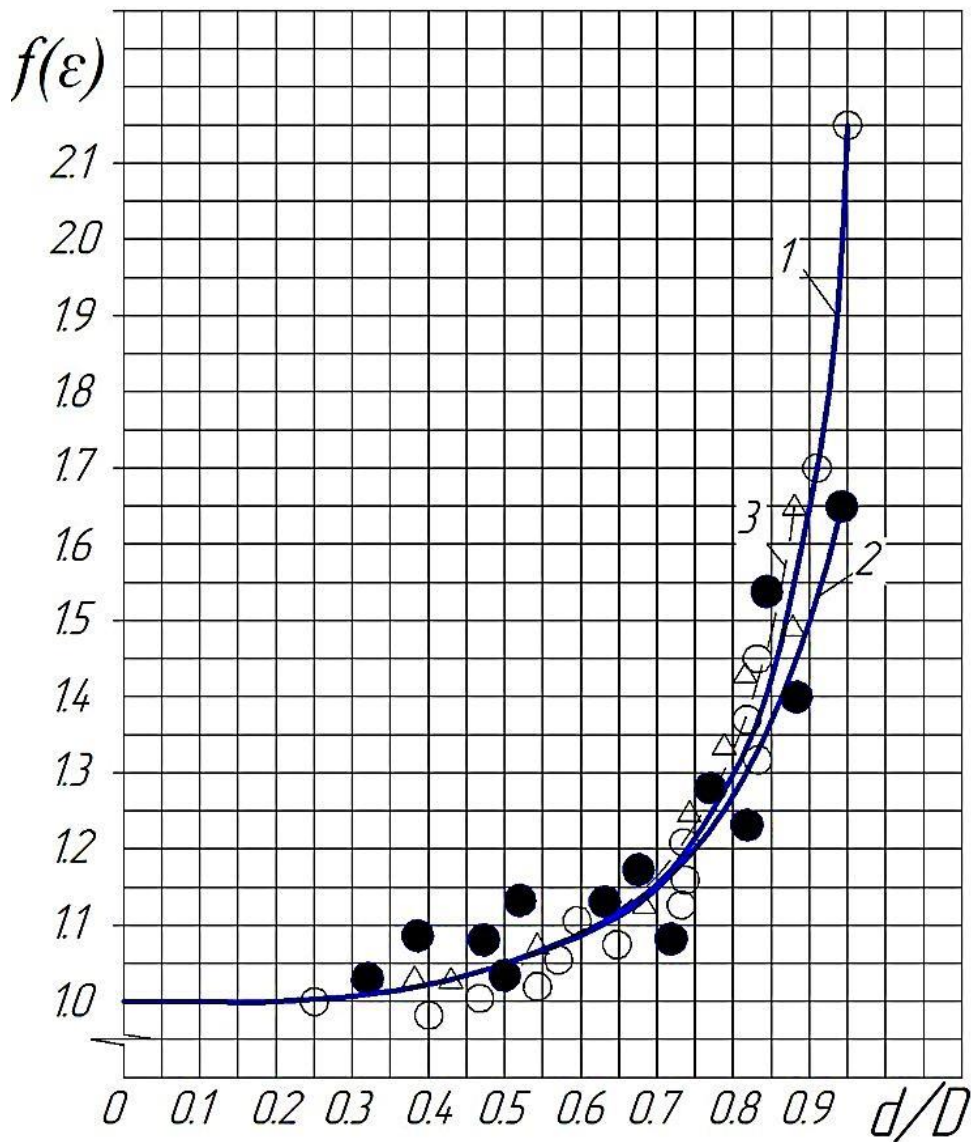


Рисунок 2.3 - Функція $f(\varepsilon)$ в залежності від співвідношення d/D для циліндричного металевго зразка з кільцевою тріщиною, побудованими за формулами (2.6; 2.7) – крива один; (3.8; 3.9) – крива два; (2.10; 2.11) – крива три відповідно.

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 справедливість 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 $D = 14$ 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 R^* , 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 P18; 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 $\varnothing 5$ h6 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 ($\varnothing 200$ мм, товщина $t=3$ 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 ($\alpha = 60^\circ$).

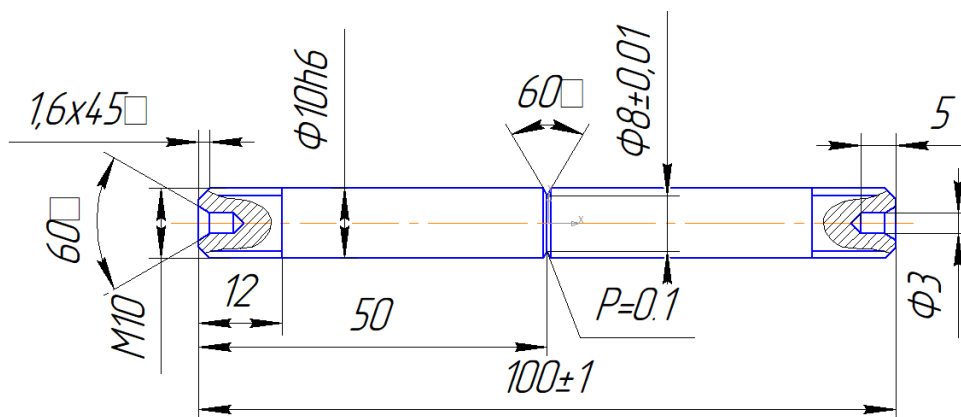


Рисунок 2.4 - Геометричні розміри зразка з арматурної сталі для випробувань на осьовий розтяг.

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.

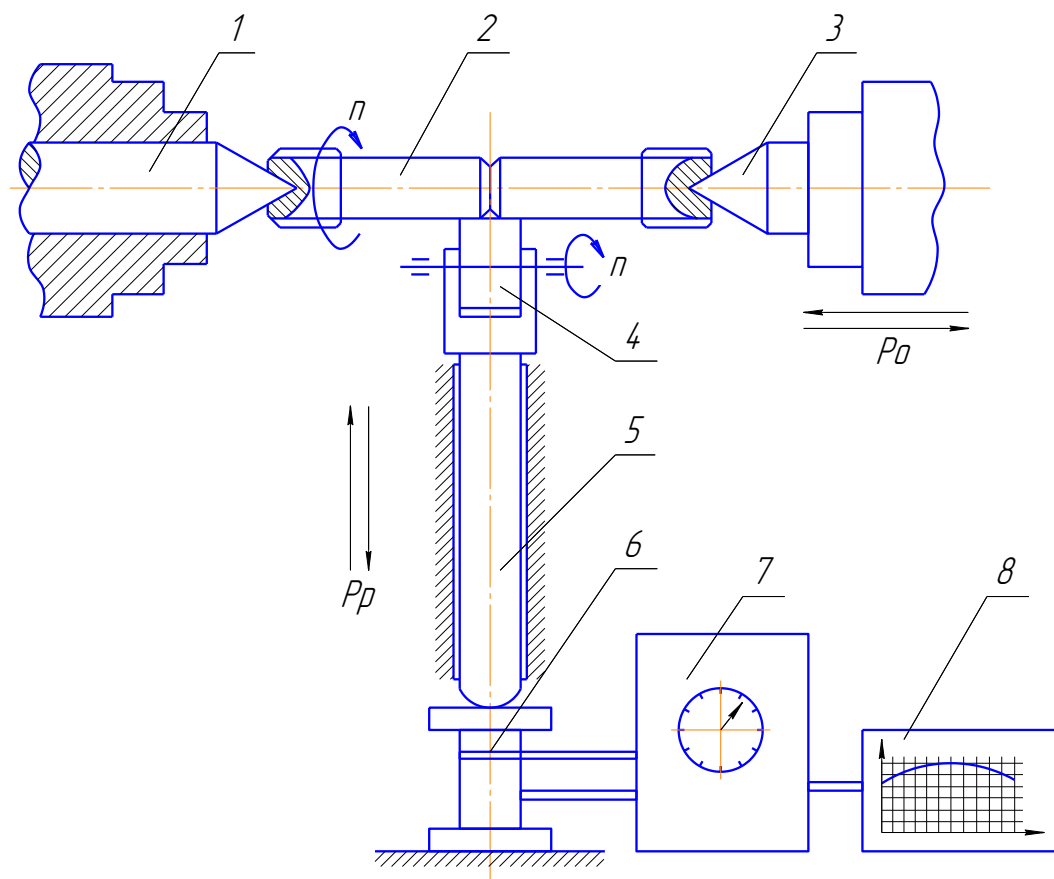


Рисунок 2.5 - Схема випробування циліндричного зразка при утворенні в ньому кільцевої тріщини: 1 - жорсткий центрувальний наконечник; 2 – випробувальний зразок; 3 - центр, який обертається; 4 - підшипник кульковий; 5 - вилка; 6 – динамометричний показчик; 7 - підсилювач; 8 - самописець вимірювальний.

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_r здійснювалося за допомогою спеціального пристрою, який закріплювався на різцетримачі токарного верстата.

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).

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 (16К20). Усі записи реєструються через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) на персональному комп'ютері як зміни падіння радіального навантаження залежно від часу циклу деформації τ 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 діаметру $\varnothing 14$ мм, з довжиною 6000 мм на заданих установках. Графічну залежність коливань температури по довжині прутка $\varnothing 14$ мм зі сталі 35ГС і 25Г2С було побудовано окремо та виміряно на різних ділянках (6 точок по довжині) за допомогою термопар, які визначалися в певному діапазоні, викликаною нерівномірністю електричного нагрівання. Система виробництва електроенергії (мережа-трансформатор).

3.1. Модернізація промислової установки СМЖ-129Б для виготовлення стандартної термонапруженої арматури електронагрівом

Проблема забезпечення надійності та довговічності елементів залізобетонних конструкцій (плит, ригелів, колон) на будівництві нерозривно пов'язана з розробкою методів досліджень і розрахунку довговічності залізобетонних конструкцій [10, 15] та технологій підвищення їх міцності з використанням пруткової арматури після попереднього електронагрівання та деформування [9, 16], яка потребує модернізації окремих операцій.

Сьогодні відомі рекомендації щодо випробувань на міцність сталеної пруткової арматури згідно з нормативними документами [11]. Деякі напрацювання з розрахунків міцності, тріщиностійкості залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування запропоновано [10]. Разом з тим

ефективного контролю температури арматурних прутків по їх довжині після попереднього електронагрівання та деформування за винятком [16], практично немає. Відсутні також методики оцінки їхньої міцності за критеріями механіки руйнування металів [8].

Основним завданням даного дослідження було модернізувати промислову установку СМЖ-129Б для подовження арматурних прутків із сталей 35ГС і 25Г2С, та контролю температури по їх довжині після попереднього електронагрівання та деформування.

Конструкція установки СМЖ-129Б експлуатується на виробництві та відповідає нормативним рекомендаціям [10]. Її використовують для зміцнення гарячекатаної арматури стандартного профілю на виробництві заздалегідь напружених залізобетонних виробів.

Конструкція та принцип роботи модернізованої промислової установки.

Установка (рис. 3.1) складається з нерухомого та рухомого контактів 1, 6 відповідно, рами 4 та електроустаткування 5. На рамі зварної конструкції з профільного прокату (швелера) встановлені всі вузли і електроустаткування установки.

До передніх поздовжніх балок рами 4 кріплять п'ять зварних кронштейнів 3, які утворюють стелаж для арматурних прутків. У верхній частині рами між контактами в кронштейнах встановлені три підтримуючих склізів 2. В кінці рами на чотирьох роликах закріплено рухомий контакт 6 зварної конструкції, що несе контактну губку, пневмоциліндр затиску і важіль з притиском. Для переміщення рухомого контакту служить пневмоциліндр підтяжки 7. Нерухомий контакт 1 за конструкцією аналогічний рухомому контакту і технологічно встановлений на протилежному кінці рами. На рамі з боку рухомого контакту встановлені кінцевий вимикач 8 і кнопка управління 9 роботою установки.

Установка працює наступним чином. Стиснуте повітря подають від цехової магістралі через пневморозподільник в пневмоциліндри затиску та підтяжки, в результаті цього затискні важелі займають крайнє верхнє

положення, а рухомий контакт – початкове положення для підтяжки. У контактні губки укладають два арматурні прутки, що підлягають подовженню. До прутків підводять рухомий та нерухомий контакти.

За рахунок переміщення рухомого контакту від дії стиснутого повітря проходить затиск прутків з подальшою їх підтяжкою.

Після відповідної витримки, яку задає реле часу, електричний струм подається до кінцевих частин прутків. Підведення живлення від електромережі до рухомого контакту здійснюють набором гнучких мідних шин. Нагріваючись від проходження електричного струму прутки подовжуються, в результаті чого переміщується рухомий контакт, що знаходиться під дією розтягуючої сили, яку задає циліндр підтяжки. Наявність підтяжки забезпечує точну фіксацію в початкове положення рухомого контакту і запобігає викривленню арматури на ділянці між контактами, що дозволяє стабілізувати розрахункову величину подовження арматурних прутків по їх довжині (див. рис. 2.1). При цьому величину необхідного подовження прутків регулюють затискними гвинтами. Після досягнення необхідної величини подовження прутків гвинти натискають своєю торцевою поверхнею на штифти мікроперемикача, чим і призупиняють подальший нагрів прутків.

Нагріті прутки знімають вручну за кінці і укладають впритул один до одного в піддон. У випадку, якщо нагріті прутки своєчасно не знято, температура в них підтримується автоматично.

В табл. 3.1 подано технічну характеристику модернізованої промислової установки описаної конструкції.

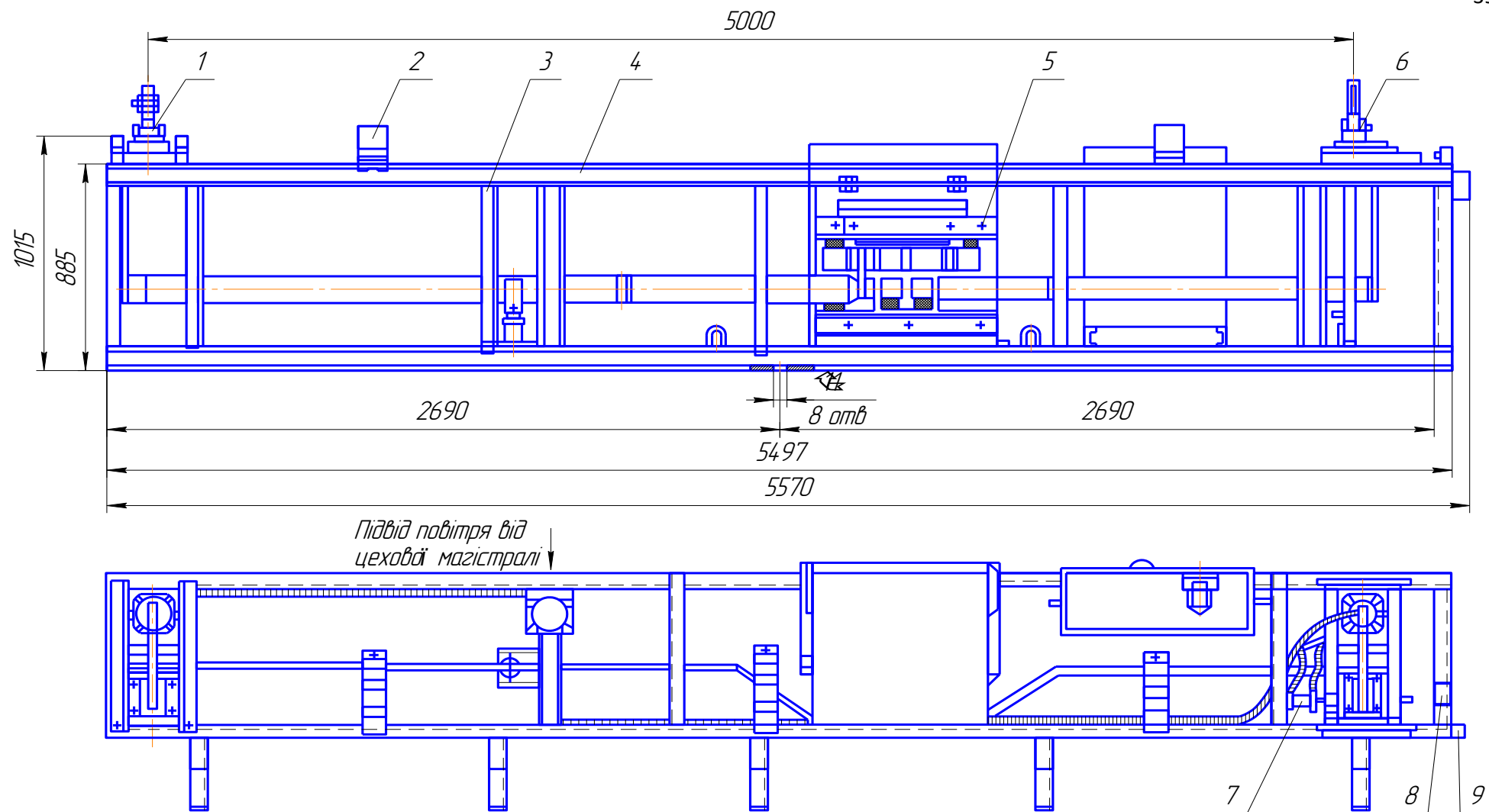


Рисунок 3.1 - Загальний вигляд модернізованої установки СМЖ-129Б для термічного зміцнення пруткової арматури електронагрівом

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики модернізованої установки СМЖ-129Б

№ п/п	Конструктивні та технологічні параметри установки для електронагрівання	Значення параметрів установки
1	Діаметр прутків, що нагрівають, мм	10...25
2	Довжина електронагрівальної частини прутка, мм	3000... 6600
3	Число прутків, що одночасно нагрівають, шт.	2
4	Встановлена потужність трансформатора, кВт	40
5	Тиск повітря в системі (не менше), МПа	0,49
6	Зусилля затиску прутка, Н	4900
7	Зусилля підтяжки прутка, Н	2000+300
8	Витрати повітря, м ³ /год.	1,5
9	Швидкість нагріву, °С/хв.	100
10	Температура нагріву, °С	300...450
11	Габаритні розміри (довжина, ширина, висота), мм:	5570x1100x1350
12	Маса установки, кг	820

3.2. Контроль температури по довжині арматурного прутка термодарами

Нагрів арматурних прутків із сталі 35ГС діаметром $D = 14$ мм (будівельна марка А-III) та сталі 25Г2С діаметром $D = 14$ мм (будівельна марка Ат-5) проводили на описаній вище модернізованій установці з загальною довжиною між кріпильними контактами 6000 мм. Режим нагрівання укладених в ложементи установки прутків наступні: сила струму 700 А, напруга 380 В. Нагрівання кожного прутка здійснювали автоматично після досягнення його видовження до 290 мм. Для фіксованих точок по довжині, у висвердлених отворах $\varnothing 6$ мм на глибину $h = 8$ мм вставляли шість термодар типу ХА (хромель-алюмель) на відстані $l = 1000$ мм одна від одної (див. схему на рис. 3.2).

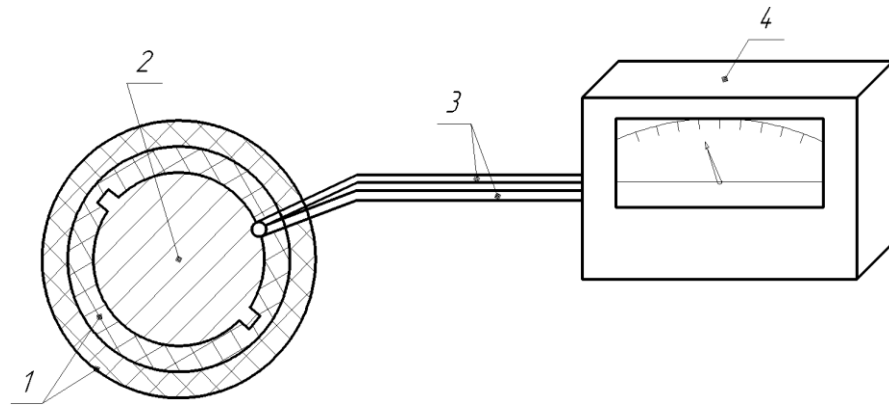


Рисунок 3.2 - Схема приєднування термопар до арматурного прутка для вимірювання температури після електронагрівання: 1 – шари азбестової термоізоляції; 2 – перетин арматурного прутка; 3 – хромель-алюмелієва термопара; 4 – потенціометр типу КСП-2.

Місця кріплення термопар до арматурних прутків захищали ізоляцією, а затиск термопар проводили самозатискачами. Матеріал термопар – сплав хромель – алюмель. Матеріал термоізоляції – азбестовий лист товщиною 6 мм. Його обмотували по периметру прутка у два шари і в’язали спеціальним шнуром. З метою зниження теплових втрат від нагрівання проводили також теплоізоляцію проміжних опор нагрівального апарату установки.

Контроль температури виконували після під’єднання кінців термопар до багатоканального приладу типу КСП-2. Запис результатів вимірювання здійснювали на стрічці цього приладу після повного циклу нагрівання прутка. Запис значень температури від часу нагрівання по довжині кожного прутка для шести фіксованих точок здійснювали почергово, зокрема часу витримки 30 с, 90 с, та 180 с. відповідно.

Результати вимірювань таким чином, значень температур, для шести прутків із сталі 35ГС і шести прутків із сталі 25Г2С зведено у табл. 3.2 і табл. 3.3 відповідно.

На підставі даних цих таблиць побудовані графічні залежності коливань температури по довжині шести арматурних прутків від часу нагріву (рис. 3.3 - 3.6) для сталі 35ГС і 25Г2С відповідно.

Таблиця 3.2 - Коливання температури по довжині прутків №№ 1; 2; 3; 4; 5; 6 термонапруженої арматури А-Шв Ø 14 мм для сталі 35ГС

№ точок на прутку	Довжина прутка у вимірюваній точці, мм	Значення температур для шести номерів прутків <i>T</i> , °С					
		№1	№2	№3	№4	№5	№6
3	500	298	262	396	385	247	376
4	1500	316	318	385	337	258	323
5	2500	296	308	325	287	269	348
2	3500	295	296	348	306	322	337
6	4500	324	333	306	324	308	356
1	5500	331	315	285	396	286	366
Зміни різниці . температури за час нагріву 30 с		40	71	111	109	75	53
3	500	257	227	304	328	221	334
4	1500	258	273	318	307	253	286
5	2500	249	267	279	263	238	325
2	3500	245	258	296	267	266	309
6	4500	247	276	265	295	255	306
1	5500	278	277	255	327	228	328
Зміни різниці температури за час нагріву 90 с		33	50	63	65	45	48
3	500	198	190	257	319	198	297
4	1500	208	231	271	267	209	257
5	2500	205	227	247	285	208	268
2	3500	199	219	254	282	234	277
6	4500	209	228	237	296	218	275
1	5500	233	233	227	284	208	283
Зміни різниці температури за час нагріву 180 с		35	43	44	52	36	40

Примітка: зміни різниці температур підраховані між найбільшою і найменшою температурами, встановленими по довжині прутка для шести реперних точок на підставі даних по вертикалі. Такі підрахунки проведено для інших сталей і діаметрів прутків, що зведено у наступних таблицях.

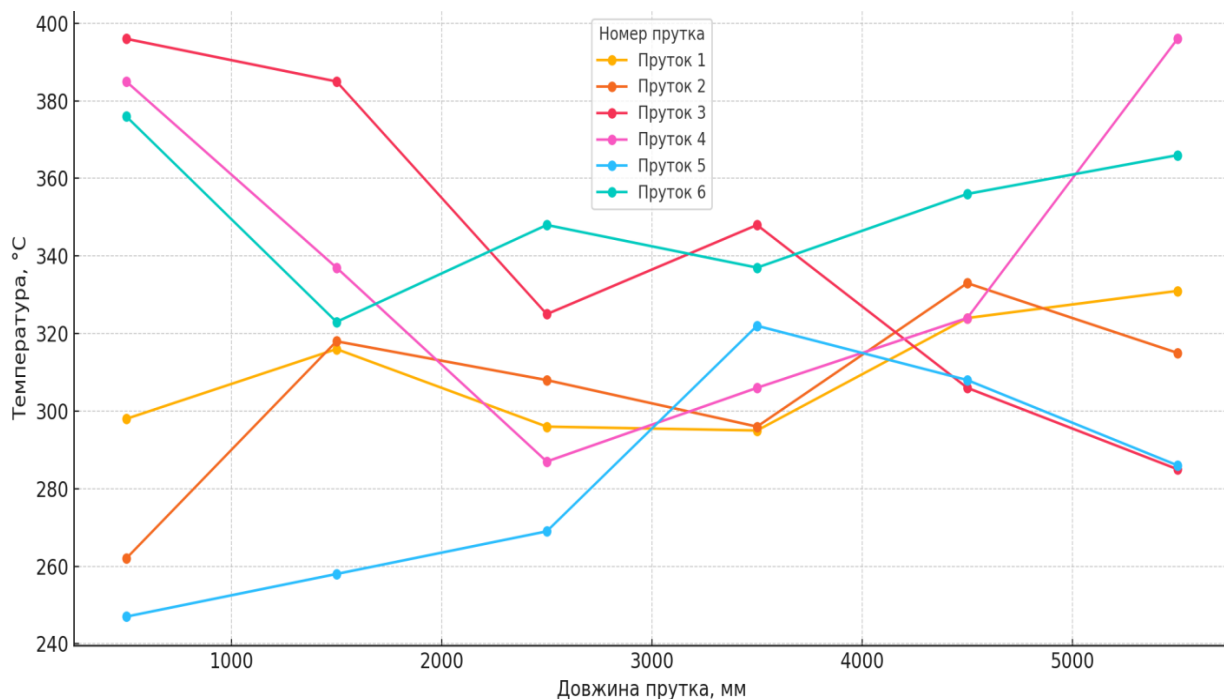


Рисунок 3.3 - Коливання температури по довжині прутків термонапруженої арматури Ø 14 мм зі сталі 35ГС за час нагріву 30с.

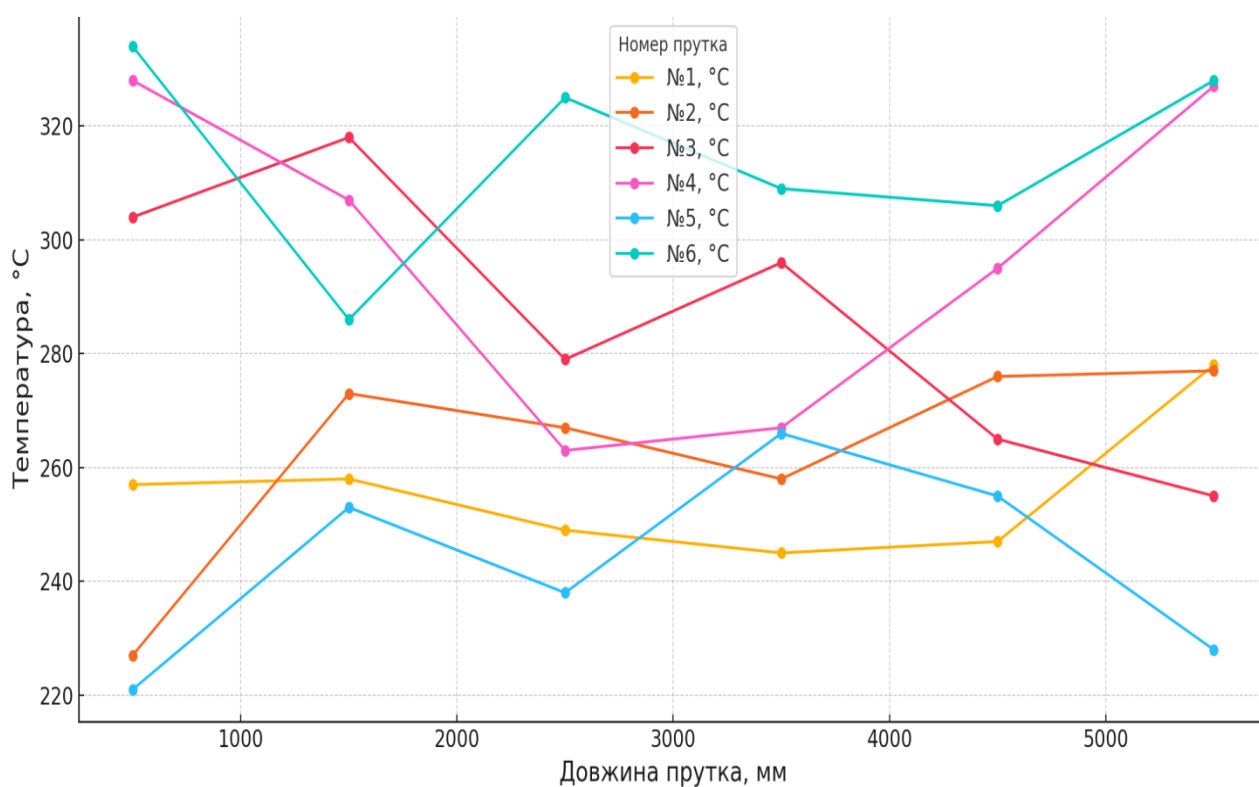


Рисунок 3.4 - Коливання температури по довжині прутків термонапруженої арматури Ø 14 мм зі сталі 35ГС за час нагріву 90с.

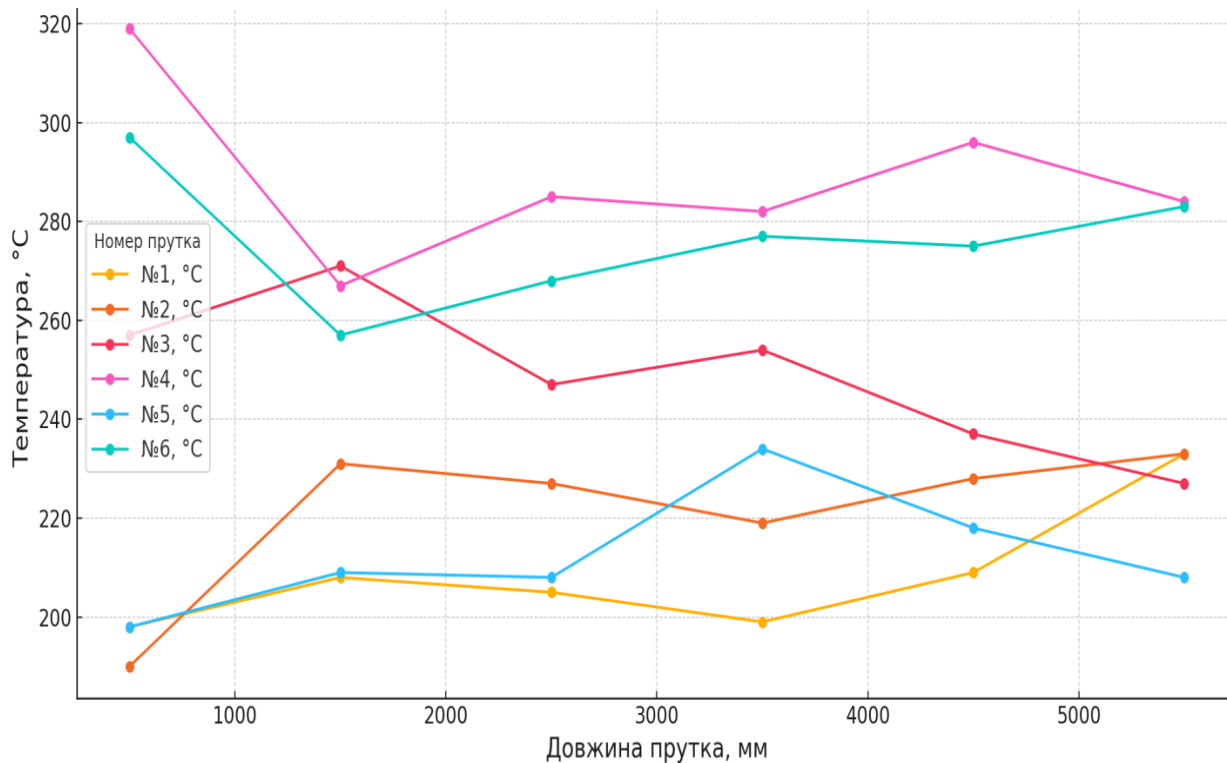


Рисунок 3.5 - Коливання температури по довжині прутків термонапруженої арматури $\varnothing 14$ мм зі сталі 35ГС за час нагріву 180с.

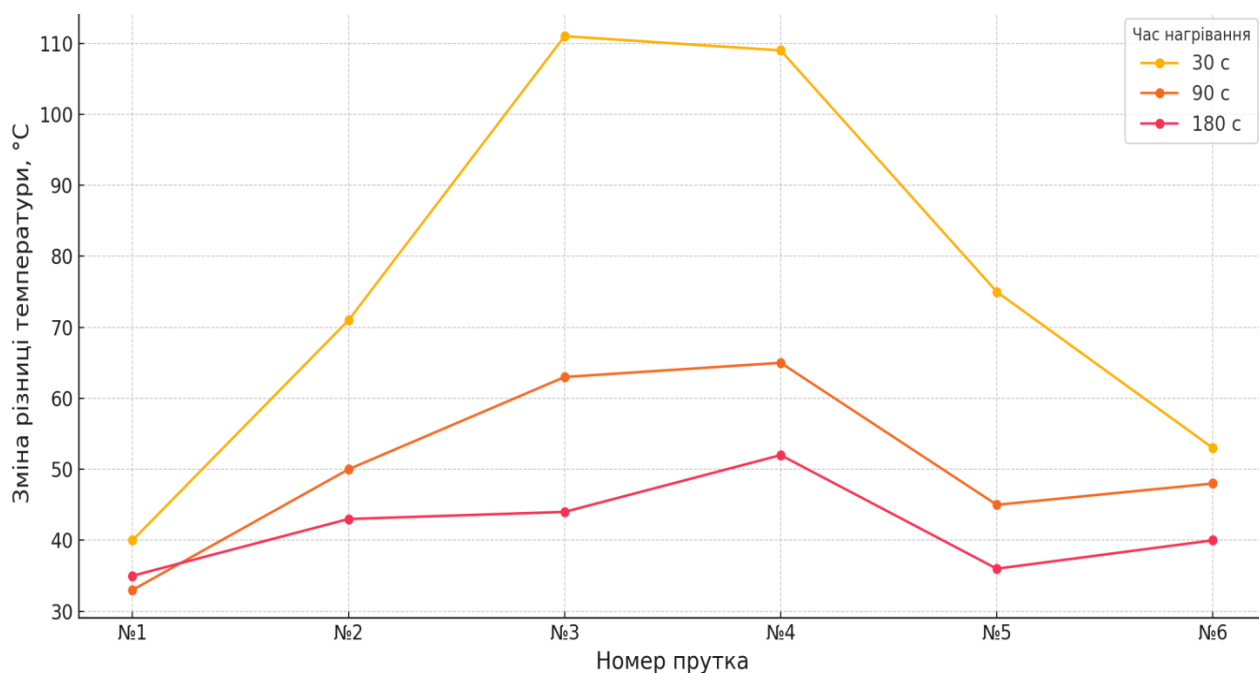


Рисунок 3.6 - Зміна різниці температур від номера прутка для 6-ти арматурних прутків: 30 с. – крива 1; 90 с. – крива 2; 180 с. – крива 3, для сталі 35ГС.

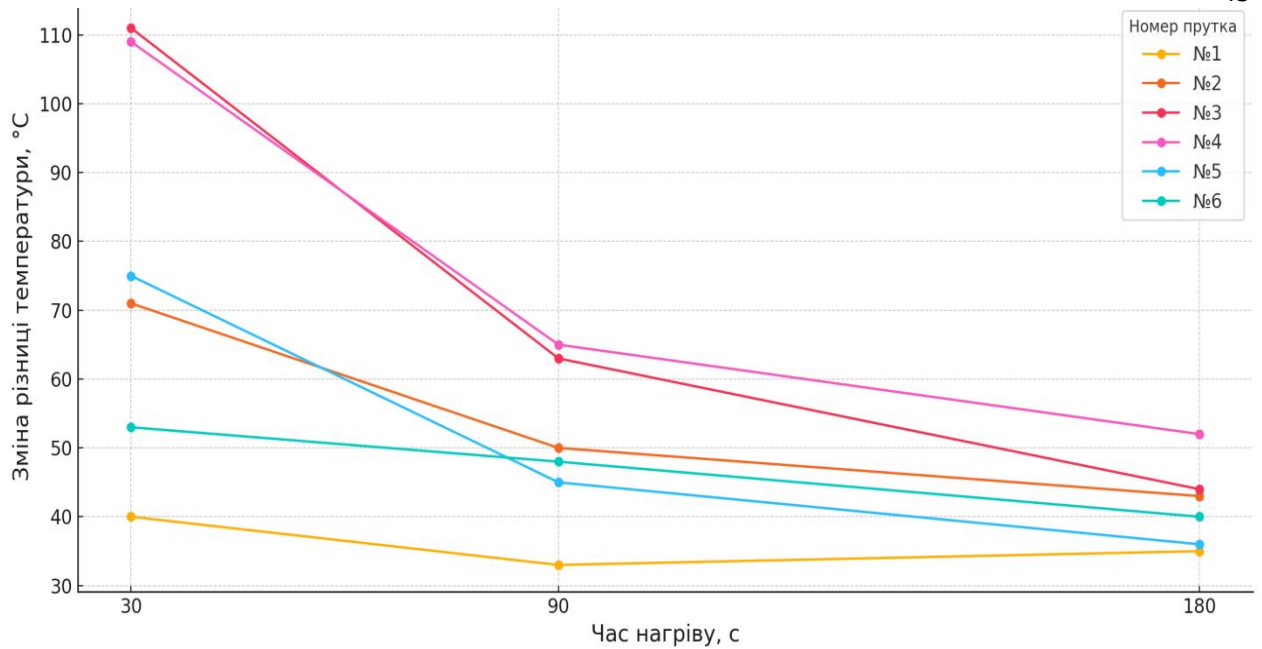


Рисунок 3.7. - Зміна різниці температур від часу нагріву по довжині шести арматурних прутків №№: 1; 2; 3; 4; 5; 6 для сталі 35ГС.

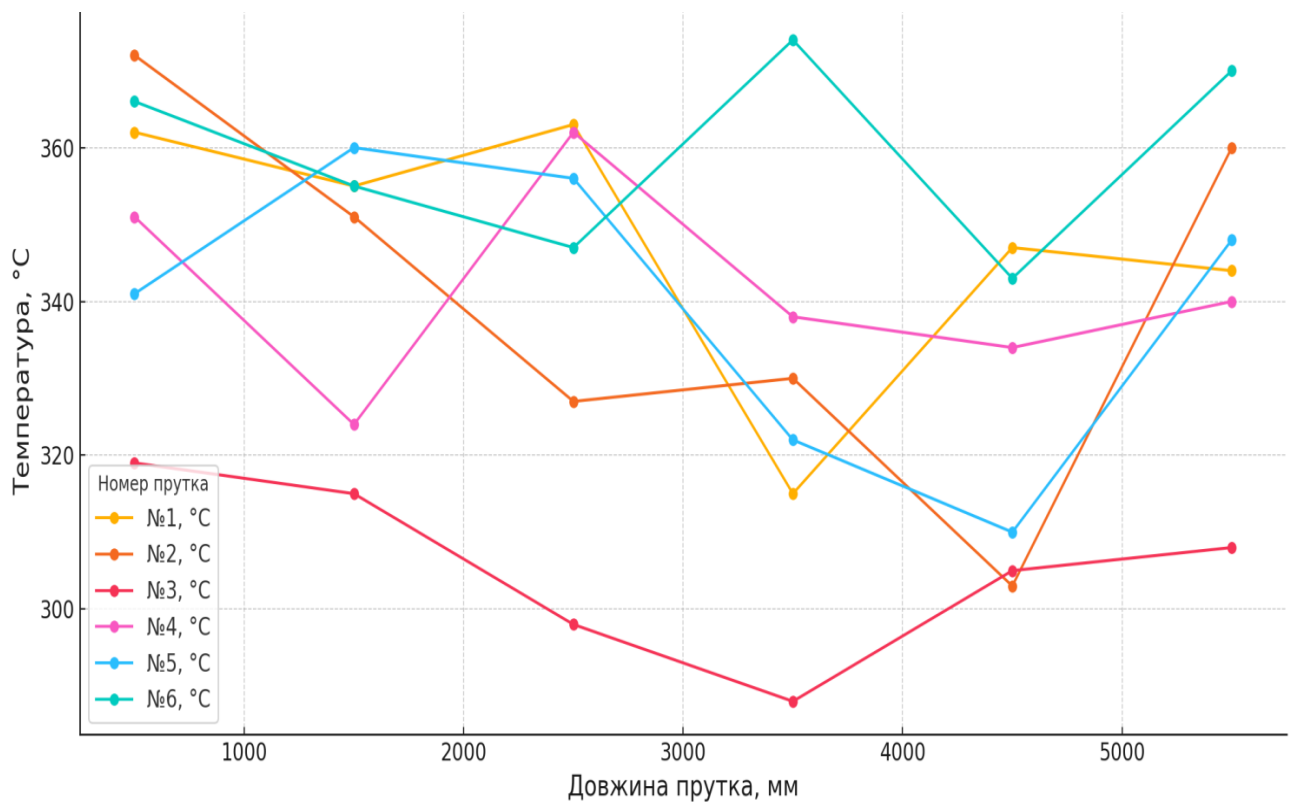


Рисунок 3.8 - Коливання температури по довжині прутків термонапруженої арматури Ø 14 мм зі сталі 25Г2С за час нагріву 30с.

Таблиця 3.3 - Коливання температури по довжині прутків: №№: 1; 2; 3; 4; 5; 6 термонапруженої арматури Ат-5 Ø 14 мм для сталі 25Г2С.

№№ точок на прутку	Довжина прутка у вимірюваній точці, мм	Значення температур для шести номерів прутків <i>T</i> , °С					
		№1	№2	№3	№4	№5	№6
3	500	362	372	319	351	341	366
4	1500	355	351	315	324	360	355
5	2500	363	327	298	362	356	347
2	3500	315	330	288	338	322	374
6	4500	347	303	305	334	310	343
1	5500	344	360	308	340	348	370
Зміни різниці температури за час нагріву 30 с		48	69	31	36	50	31
3	500	286	341	275	297	291	287
4	1500	298	302	258	281	313	278
5	2500	309	298	233	304	306	271
2	3500	277	289	271	282	288	284
6	4500	313	274	286	280	267	263
1	5500	315	310	252	301	290	268
Зміни різниці температури за час нагріву 90 с		38	67	53	24	46	24
3	500	251	286	234	265	246	291
4	1500	256	255	228	246	275	279
5	2500	266	253	239	268	266	271
2	3500	241	244	227	261	248	288
6	4500	276	246	244	256	233	264
1	5500	268	262	225	271	243	273
Зміни різниці температури за час нагріву 180 с		35	42	35	25	42	27



Рисунок 3.9 - Коливання температури по довжині прутків термонапруженої арматури Ø 14 мм зі сталі 25Г2С за час нагріву 90с.

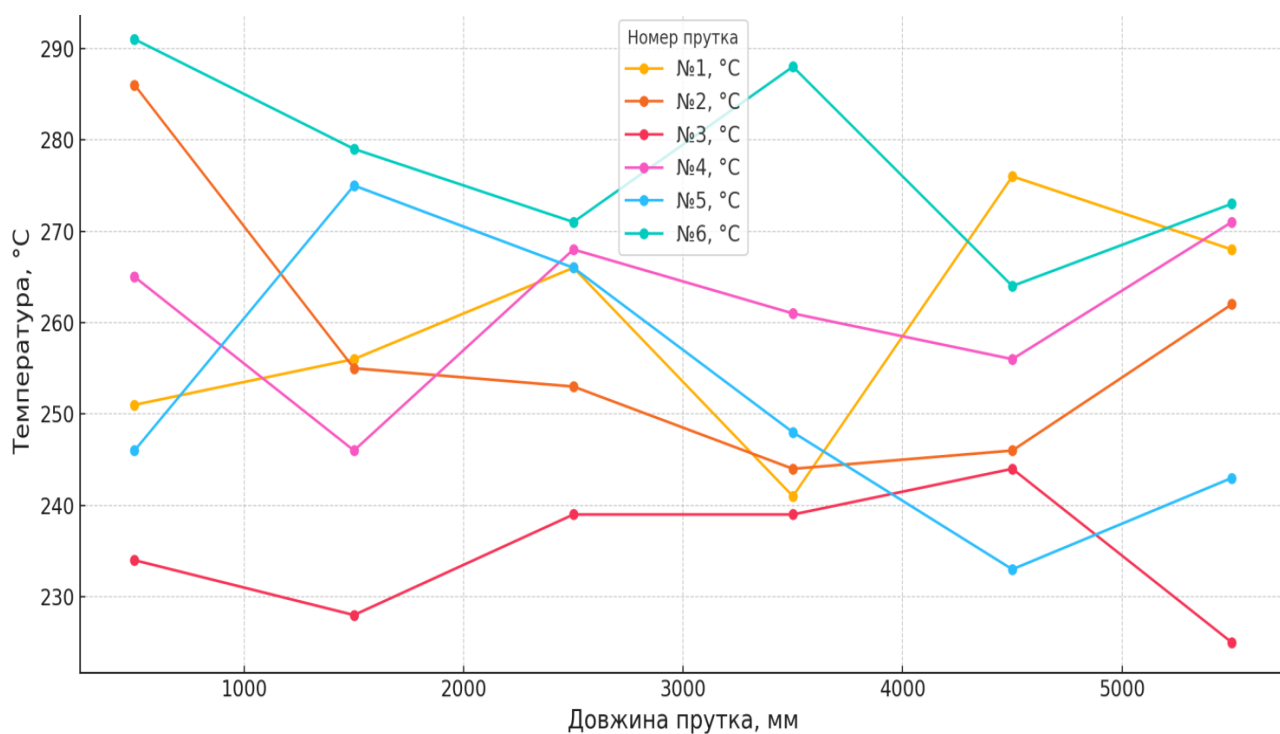


Рисунок 3.10 - Коливання температури по довжині прутків термонапруженої арматури Ø 14 мм зі сталі 25Г2С за час нагріву 180с.

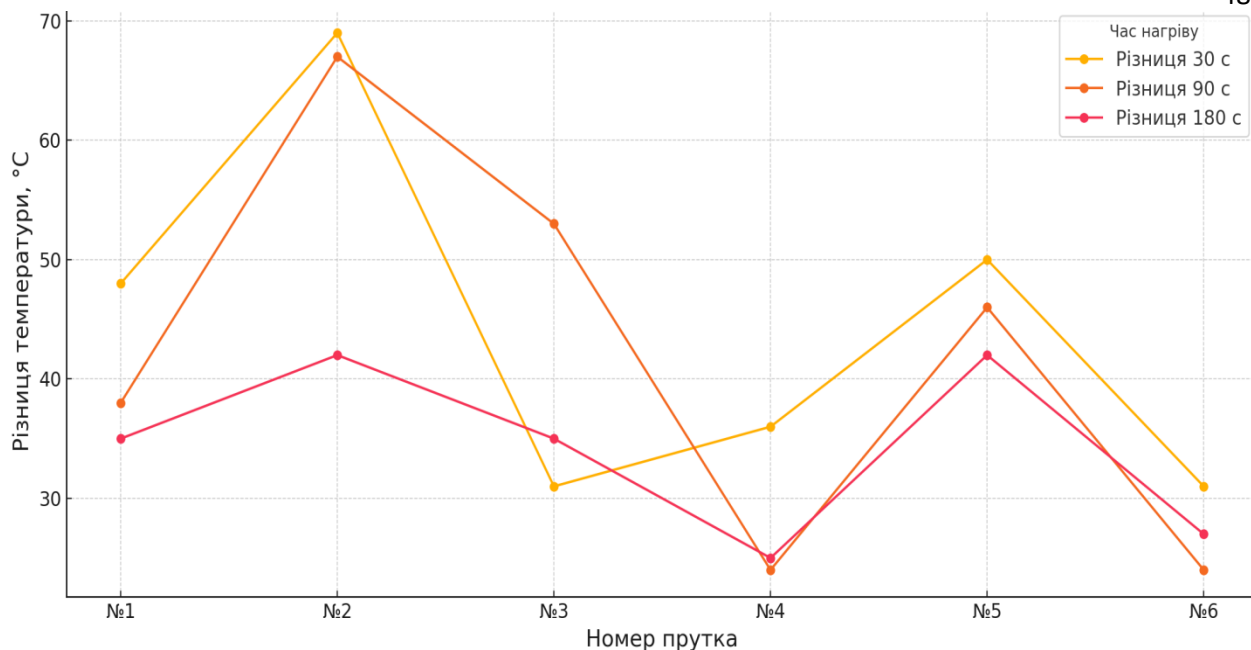


Рисунок 3.11 - Зміна різниці температур від номера прутка для 6-ти арматурних прутків : 30 с. – крива 1; 90 с. – крива 2; 180 с. – крива 3 для сталі 25Г2С.

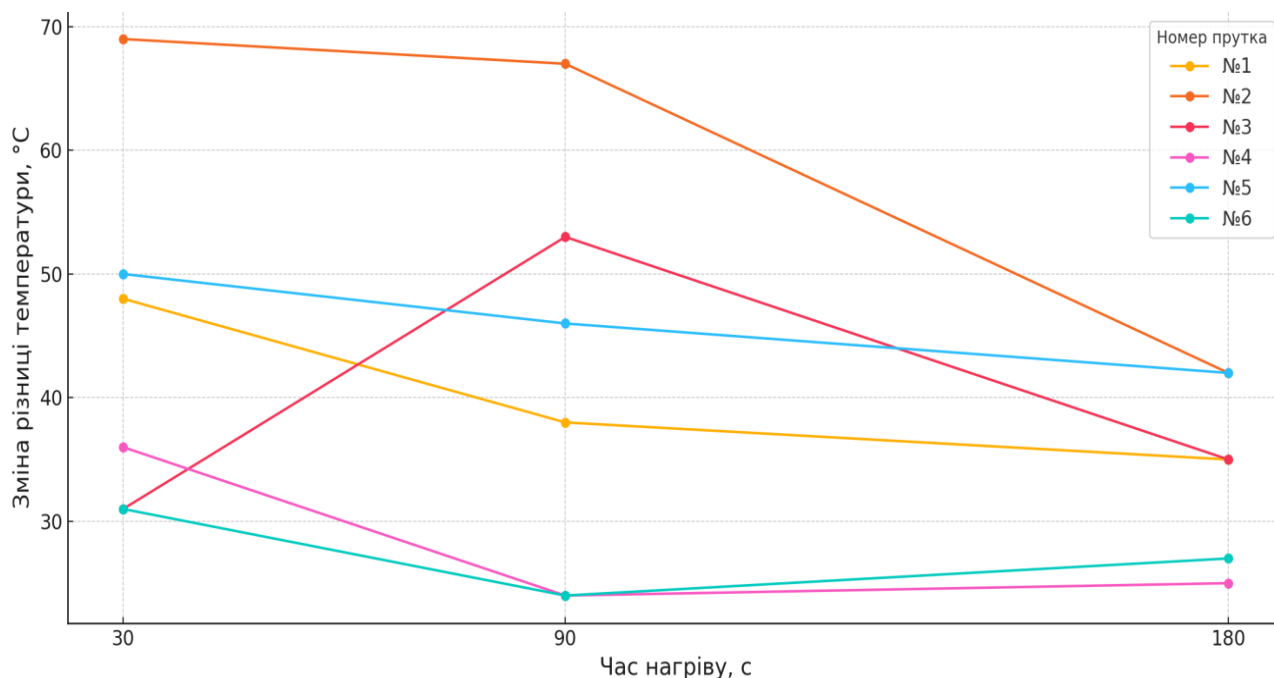


Рисунок 3.12 - Зміна різниці температур від часу нагріву по довжині 6-ти арматурних прутків №№: 1; 2; 3; 4; 5; 6 для сталі 25Г2С.

Як впливає із наведених графіків більші зміни різниці температур по довжині шести арматурних прутків від часу нагріву (30 с, 90 с і 180 с)

спостерігаються для сталі 35ГС порівняно зі сталлю 25Г2С (див. рис. 3.3 - 3.12) відповідно. Необхідно також відзначити, що ці зміни не мають чіткої закономірності, але можна констатувати, що збільшення часу нагріву прутків до 180 с зменшує коливання (розсіювання) температур по довжині прутків незалежно від марки сталі, хоча перевагу щодо зменшення цих коливань можна надати сталі 25Г2С порівняно зі сталлю 35ГС.

Як будуть змінюватися коливання температур для малогабаритних по діаметру та довжині арматурних прутків після нагріву (електронатягом) стало предметом розроблення малогабаритної установки, будова та принцип нагріву якої буде описано далі.

3.3 Втомна міцність термонапружених прутків арматурних сталей 35ГС і 25Г2С

Методика експерименту та обговорення результатів. У дослідженнях використано дві марки арматурних сталей і 35ГС і 25ГС, діаметр прутка яких складав 14 мм.. Хімічний склад цих сталей показано в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Хімічний склад досліджуваних арматурних сталей

Марка сталі	Масова частка елементів, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
35ГС	0,30-0,37	0,8-1,2	0,5-0,8	0,25	0,25	-	0,02	0,03
25Г2С	0,20-0,29	1,2-1,6	0,6-0,9	0,30	0,30	0,30	0,01	0,02

Загальна довжина випробувальних арматурних прутків для обох марок сталей складала по $L = 6000$ мм. Кожен пруток нагрівали на промисловій установці (рис. 3.1) прямим пропусканням електричного струму ($I = 700$ А; $U = 36$ В) протягом 180 с, що забезпечувало видовження на величину $\Delta l = 30$ мм. Потім в нагрітому положенні прутки защемлювали в опалубці для формування плити за допомогою спеціальних затискачів (цанг) і охолоджували до кімнатної температури після автоматичного відключення

електронагріву. Розподіл температури вздовж нагрітих прутків контролювали шістьма термопарами типу ХА (хромель-алюмель), які вставляли у висвердлені отвори $\varnothing 8$ мм на глибину $h = 5$ мм за допомогою приладу типу КСП-2. Нумерація розташування термопар у шести точках по довжині прутків показано на рис. 3.13, а значення температур, виміряних для них і механічні властивості сталей 35ГС і 25Г2С зведено в табл. 3.5.

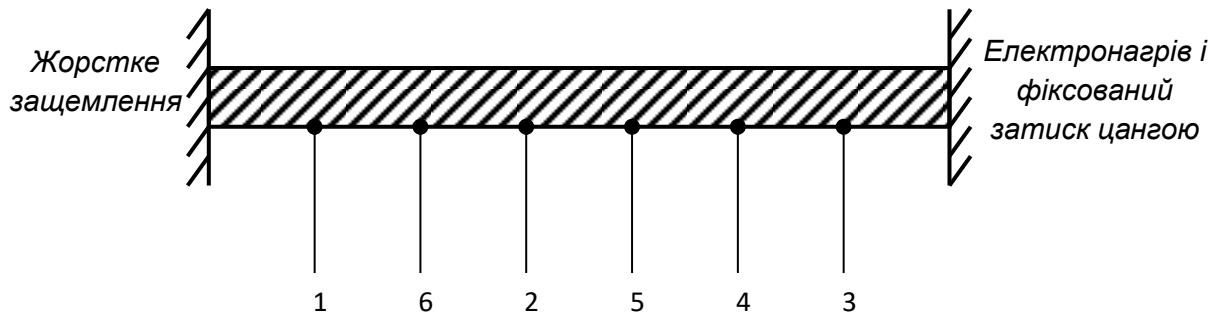


Рисунок 3.13 - Нумерація розташування термопар у реперних точках по довжині прутка з різними температурами нагрівання: для сталей 35ГС і 25Г2С – значення температур показано у стовпчику 4, табл. 3.3.

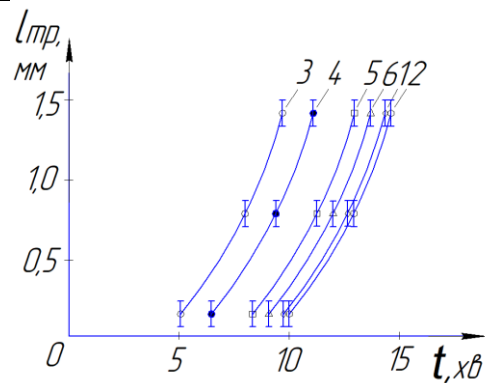
Механічні характеристики σ_B і σ_T одержали після вирізки із шести ділянок по довжині прутків заготовок для виготовлення випробуваних гладких циліндричних зразків (див. рис. 2,4).

Оскільки електротермічно зміцнені арматурні прутки на різних ділянках по довжині мали різні значення міцності (табл. 3.5), а заодно і залишкові напруження, то вони представляли інтерес щодо подальшого вивчення опору матеріалу поширенню втомних тріщин за умов втомного деформування. Для цього з шести характерних ділянок термонапружених прутків вирізали заготовки для виготовлення циліндричних зразків з кільцевим концентратором (рис. 2.4) За описаною вище методикою згідно зі схемою рис. 2.5 шляхом кругового згину (700 об/хв.) за фіксованого сталого прогину $f = 1,2$ мм для дванадцяти партій циліндричних зразків ініціювали кільцеві тріщини глибиною $(1,5 \pm 0,15)$ мм на діаметр циліндра.

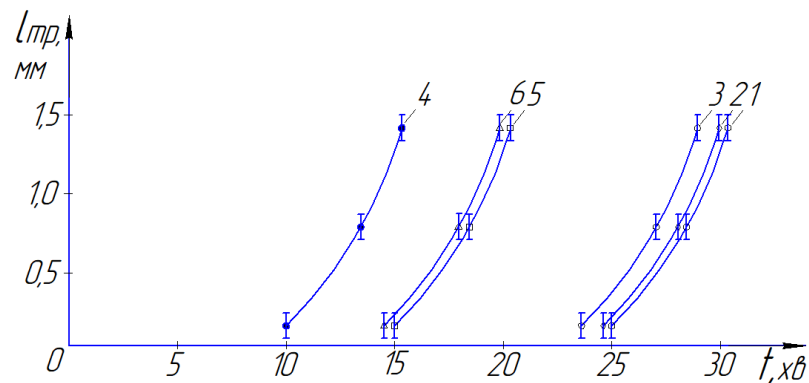
Результати цих експериментів на підготовчій операції зародження та росту тріщин в глибину матеріалу циліндричного зразка від часу втомного деформування показано на рис. 3.14.

Таблиця 3.5 - Результати досліджень арматурних стрижнів з електротермічним попереднім напруженням

№ точки	Маркування сталей	Віддалі прутка у реперних точках вимірювання температури, мм	Температура T , °C	Механічні характеристики арматурних сталей для фіксованих точок	
				σ_B , МПа	σ_T , МПа
1	Сталь	500	297	1050	970
2	35ГС	1500	291	1140	1010
3	пруток	2500	310	1070	930
4	Ø 14 мм	3500	322	1080	960
5	A400C	4500	296	1130	1008
6	(A-IIIø)	5500	312	1145	1015
1	Сталь	500	310	1330	1020
2	25Г2С,	1500	247	1410	1100
3	пруток	2500	261	1320	1050
4	Ø 14 мм	3500	302	1335	1030
5	A800C	4500	292	1350	1050
6	(АТ-5)	5500	281	1340	1040



а)



б)

Рисунок 3.14 - Залежності довжини тріщини $l_{тр}$ від часу t втомного деформування циліндричних зразків з кільцевим концентратором, вирізаних

із шести ділянок по довжині прутка термонапруженої арматури: а) сталь 35ГС; б) сталь 25Г2С; криві - 1 – 500мм; 2 – 1500мм; 3 – 2500мм; 4 – 3500мм; 5 – 4500мм; 6 – 5500мм відповідно.

Необхідно відзначити, що сталої закономірності зміни втомної міцності (часу зародження та поширення тріщини) від місця вирізки циліндричних зразків по довжині термонапружених прутків для сталей 35ГС і 25Г2С немає. Разом з тим більшу втомну міцність мають зразки із сталі 25Г2С у порівнянні із сталлю 35ГС незалежно від місця вирізки по довжині арматурних прутків досліджуваних циліндричних зразків.

Як буде змінюватися статична тріщиностійкість (K_{IC}) досліджуваних сталей від місця вирізки циліндричних зразків по довжині термонапружених прутків для цих сталей, для цих дванадцяти партій, стало предметом досліджень за умови осьового розтягу циліндричних зразків з кільцевою тріщиною.

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

Такі дослідження виконано на розривній машині РМ□10 (фірми Instron) осьовим розтягом циліндричного зразка зі швидкістю переміщення рухомого захоплювача $V = 1,0$ мм/хв., (рис. 3.15), де записували діаграму руйнування в координатах сила-деформація ($P \square \square$). Маючи руйнівне зусилля $P = P^*$ для кожного конкретного варіанта зруйнованого циліндричного зразка з заданою кільцевою тріщиною і користуючись формулами (2.6-2.7) або формулами (2.8-2.9), а також формулами (2.10-2.11) та графічними залежностями (рис. 3.3- 3.11), підраховували значення тріщиностійкості K_c для сталей 35ГС і 25Г2С, які зведено в табл. 3.6.

Як впливає із даних табл. 3.6. одержані значення K_c , визначені за трьома підходами різних авторів є близькі між собою. Сам факт коливання температур по довжині термонапруженої арматури призвів до появи

залишкових напружень на різних ділянках довжини прутків, а заодно до різних значень як часу руйнування (τ) за умов втомного деформування циліндричних зразків з кільцевим концентратором, так і різних значень тріщиностійкості (K_C) за умов статичного розтягу циліндричних зразків з кільцевою тріщиною (див. табл. 3.6) відповідно.

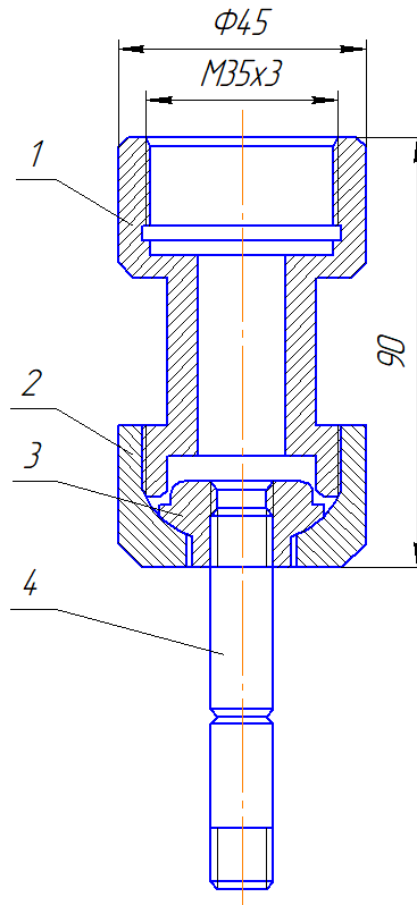


Рисунок 3.15 - Загальний вигляд захоплювача (розміри в мм) для закріплення циліндричного зразка з кільцевою тріщиною за умов статичного розтягу для розривної машини: 1 – корпус; 2 – гайка сферична; 3 – сухар сферичний; 4 – циліндричний зразок.

Таблиця 3.6 - Статична тріщиностійкість K_C на різних ділянках по довжині прутка сталей 35 ГС і 25 Г2С після розтягу циліндричних зразків з кільцевою тріщиною, підрахована за формулами (3.6 – 3.11) відповідно

№ № Репе рних то- чок	Маркування сталей і діаметр прутка	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Віддалі прутка в реперних точках вимірювання температури, мм	Розміри циліндричного зразка з кільцевою тріщиною, мм					Руйнівне зусилля для зразка з тріщиною $P^*, \text{кН}$	Середні значення тріщиностійкості $K_C, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$		
				D	d_K	d_{TP}	$\varepsilon = \frac{d}{D}$	l_{TP}		за ф-лами (3.6-3.7)	за ф-лами (3.8-3.9)	за ф-лами (3.10- 3.11)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Сталь 35ГС пруток Ø14мм (А400С)	298	500	10	8,0	6,90	0,690	1,1	51,0	60,96	58,08	58,98
2		292	1500	10	8,0	7,00	0,70	1,0	52,5	60,95	58,08	58,97
3		311	2500	10	8,0	7,60	0,760	0,4	53,5	52,34	49,52	50,66
4		323	3500	10	8,0	7,70	0,770	0,3	52,0	48,57	47,32	49,52
5		297	4500	10	8,0	7,30	0,730	0,7	53,5	56,83	55,28	57,11
6		312	5500	10	8,0	6,80	0,680	1,2	47,5	58,04	56,55	58,32
1	Сталь 25Г2С пруток Ø14мм (А800С)	311	500	10	8,0	7,31	0,732	0,7	90,5	96,85	93,97	95,22
2		248	1500	10	8,0	7,60	0,760	0,4	97,0	94,09	91,27	91,68
3		262	2500	10	8,0	7,90	0,790	0,1	96,5	82,62	81,27	83,81
4		303	3500	10	8,0	7,81	0,781	0,2	99,5	89,51	86,93	87,83
5		293	4500	10	8,0	7,90	0,790	0,1	99,0	84,79	82,41	83,21
6		282	5500	10	8,0	7,79	0,779	0,1	96,5	84,39	82,05	83,88

Такі зміни підтверджують також візуальні спостереження зламів поверхонь циліндричних зразків із сталей 35ГС і 25Г2С відповідно, де злами темносірого кольору характерні для сталі 25Г2С з підвищеними значеннями тріщиностійкості K_C мають квазікрихке руйнування, а злами сірого кольору для сталі 35ГС з меншими значеннями K_C практично мають крихке руйнування. Переваги за тріщиностійкістю сталі 25Г2С порівняно зі сталлю 35ГС можна пояснити підвищеними міцнісними характеристиками σ_B і σ_T (див. дані табл. 3.5)

Для наочності на рис. 3.16. показано вид зламу циліндричного зразка з кільцевою тріщиною після осьового розтягу з найменшим одержаним значенням K_C пруткової арматури (див. табл. 3.6) для сталі 35ГС.

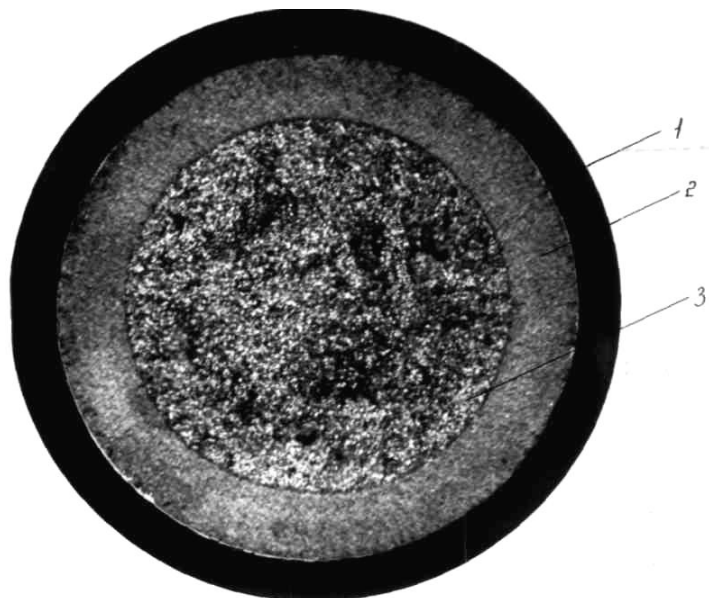


Рисунок 3.16 - Вид зламу циліндричного зразка (сталь 35ГС) з кільцевою тріщиною після осьового розтягу за умов $+20^{\circ}\text{C}$: 1 – концентратор; 2 – вихідна тріщина; 3 – долом.

Обробка результатів щодо визначення тріщиностійкості K_C .

Зміну значень різниці тріщиностійкості ΔK_C підраховують за формулою:

$$\Delta K_C = K_{C_{\text{max}}} - K_{C_{\text{min}}} \quad (3.1)$$

де $K_{C_{\text{max}}}$, $K_{C_{\text{min}}}$ – максимальне та мінімальне значення тріщиностійкості встановлені по довжині прутка.

За результатами проведених досліджень, для арматурних сталей 35ГС і 25Г2С можна виділити наступні складові щодо зміни різниці тріщиностійкості ΔK_C від таких основних перемінних перемінних:

а) різниця тріщиностійкості ΔK_C від часу нагріву t_H прутків:

$$\Delta K_C = \Delta K_{C1} \text{ для } t_H = 30 \text{ с} - \Delta K_{C2} \text{ для } t_H = 90 \text{ с} - \Delta K_{C3} \text{ для } t_H = 180 \text{ с};$$

б) різниця тріщиностійкості ΔK_C від довжини нагрітого прутка $L_{\text{заг}}$

$$\Delta K_C = \Delta K_{C1} \text{ для } L_{\text{заг}} = 6000 \text{ мм} - \Delta K_{C2};$$

в) різниця тріщиностійкості ΔK_C від діаметра нагрітих прутків D .

$$\Delta K_C = \Delta K_1 \text{ для } D = 8 \text{ мм} - \Delta K_2 \text{ для } D = 14 \text{ мм}.$$

г) різниця тріщиностійкості ΔK_C від марки сталі $M_{\text{ст}}$: $\Delta K_C = M_{1\text{ст}} - M_{2\text{ст}}$

Отже розсіювання значень різниці тріщиностійкості ΔK_C від електро-термічного нагріву арматурних прутків по довжині аналогічно формулі (3.2), можна описати теоретичною чотирипараметричною функцією:

$$\Delta K_C = \Phi(t_H; D; L_{\text{заг}}; M_{\text{ст}}), \quad (3.2)$$

де, t_H – час нагріву, с; D – діаметр прутка, мм; $L_{\text{заг}}$ – загальна довжина прутка, мм; $M_{\text{ст}}$ – марка досліджуваної сталі відповідно.

На основі вищенаведених даних нами побудовано зведені графічні залежності зміни значень різниці тріщиностійкості ΔK_C по довжині випробувальних прутків від перемінних формули (3.2), які представлено на рис. 3.17, а, б, в, для сталей 35ГС і 25Г2С відповідно.

Із наведених даних для сталі 35ГС (рис. 3.17, а) маємо зменшення розсіювання значень різниці тріщиностійкості ΔK_C від збільшення часу нагріву прутків t_H , натомість зростання розсіювання ΔK_C від збільшення діаметра прутків D і майже рівномірне розсіювання ΔK_C по кінцях прутків і різке зростання розсіювання тріщиностійкості ΔK_C по середніх ділянках довжини прутків L відповідно.

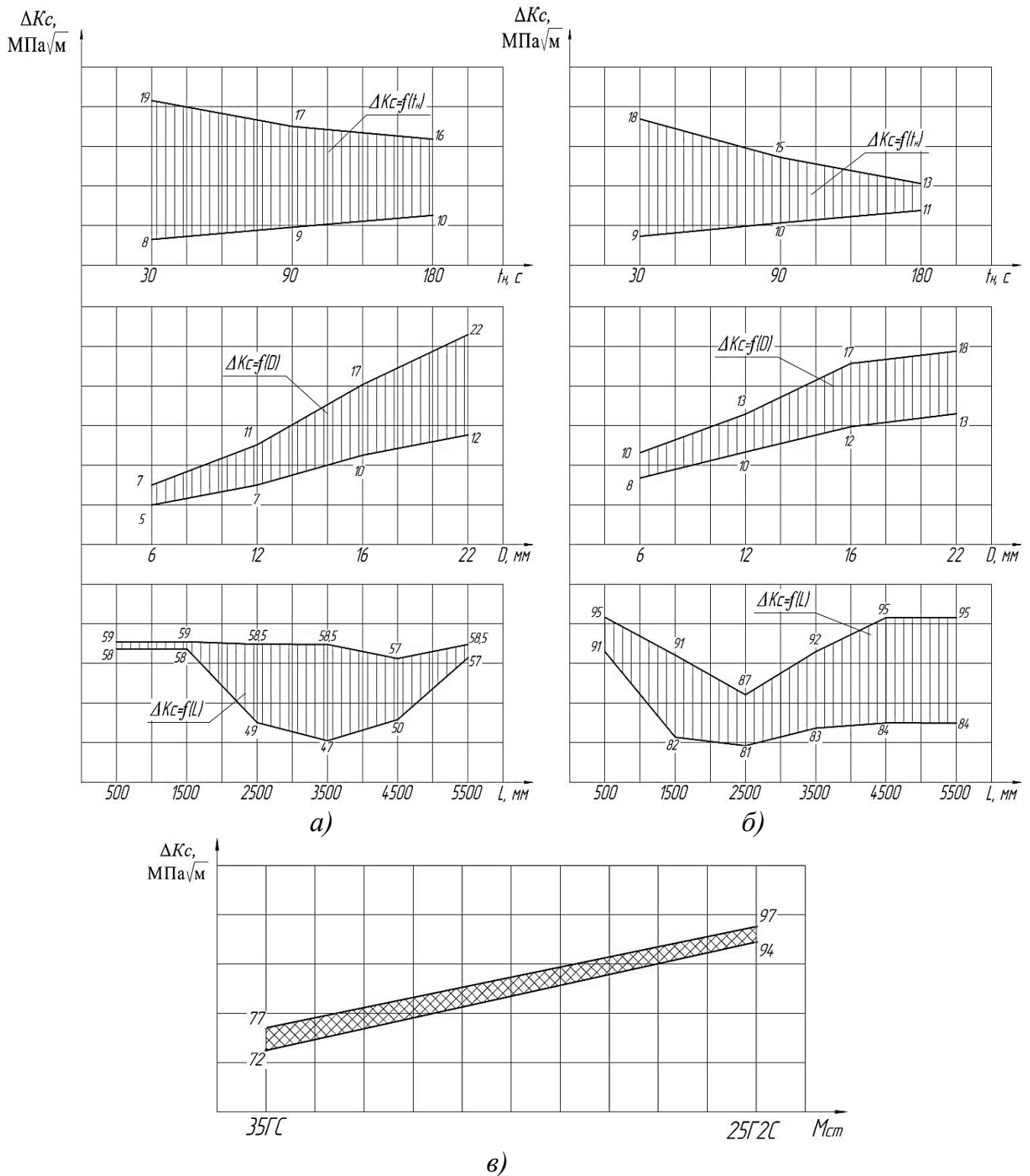


Рисунок 3.17 - Залежності зміни розсіювання значень різниці тріщиностійкості ΔK_c від перемінних t_n ; D ; L ; $M_{ст}$, для сталі 35ГС (а) та для сталі 25Г2С (б) а також від перемінної $M_{ст}$ (в): t_n - час нагріву, с; D - діаметр прутка, мм; L - довжина прутка, мм; $M_{ст}$ - марка сталі.

Для сталі 25Г2С (рис. 3.17, б) одержано майже аналогічні закономірності розсіювання тріщиностійкості ΔK_C від перемінних: $\Delta K_C = \Phi(t_H; D; L_{\text{заг}})$ відповідно.

Стосовно зміни значень різниці тріщиностійкості ΔK_C від марки сталі $M_{\text{ст}}$, то маємо зменшення розсіювання цього параметра на користь сталі 25Г2С порівняно із сталлю 35ГС (рис. 3.17, в).

Разом з тим встановлено, що меншим розсіюванням значень різниці тріщиностійкості ΔK_C по довжині прутка характерна вища тріщиностійкість K_C для сталей 25Г2С і 35ГС відповідно.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ

Установка СМЖ-129Б 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, захарщення проходів не допустимо.

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

3. 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 електрошкафу 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, гази порох і сторонні запахи, повинне бути максимально герметизоване. При недостатній герметизації необхідно використати місцеві 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 розміщувати 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 повинно 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).

Струмопровідні 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 45с.

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 пилюки 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 жодна 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 травмонезбезпечних 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 кожну з побудованих логічних моделей процесів формування та можливого виникнення травмонезбезпечних 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 безпеки, 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.

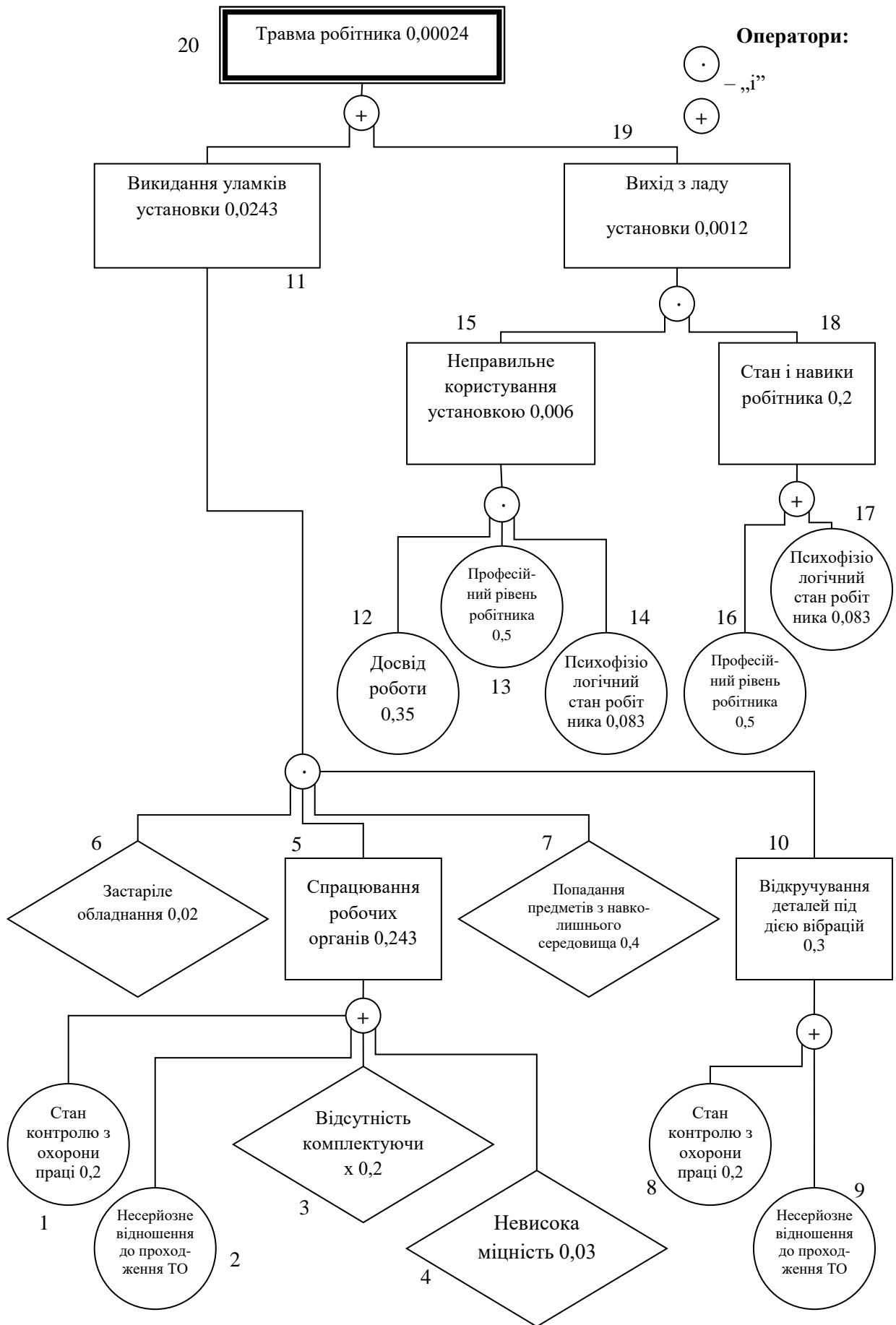


Рисунок 4.1 - Логіко-імітаційна модель процесу формування та виникнення аварії та травми під час роботи установки.

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 безпеки 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_ϕ 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:

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

де B_σ – балансова вартість, грн., яка визначається як:

$$B_\sigma = C_m + B_{mm} + B_m + B_M + B_{npr} + B_{co} + B_{mz}, \quad (5.6)$$

де C_m – ціна машини, грн.;

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

B_m – ціна транспортування, грн.;

$B_{\mathcal{M}}$ – 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, $C_{ee} = 7,5$ 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	СМЖ-129Б	СМЖ-129
Ефективність процесу	E_{ϕ}	кг/(кВт·год.)	220	198,3
Енергосмність процесу	E	(кВт·год.)/кг	0,004	0,005
Металоємність процесу	M	кг/(кг/год.)	0,970	0,974
Трудомісткість процесу термічного зміцнення	T_p	люд.·год./ (кг/год.)	0,0020	0,0022
Питома вартість обладнання	B_n	грн./ (кг/год.)	6,350	6,545
Річні затрати електроенергії (1 зміна)	Z_{ee1}	кВт	154562	158951
Річні затрати електроенергії (2 зміни)	Z_{ee2}	кВт	309124	317902
Річна вартість електроенергії (1 зміна)	B_{ee1}	грн.	1159215	1192132,5
Річна вартість електроенергії (2 зміни)	B_{ee2}	грн.	2318430	2384265
Затрати праці	Z_n	люд.·год.	3,07	3,11
Балансова вартість установки	B_{ϕ}	грн.	378221	380908

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-виміральної апаратури, що дає можливість контролювати зміни температури в технічному циклі.

Досліджено термічно напружені сталеві прутки довжиною 6 метрів зі сталі 35ГС Ø 14 мм і 25Г2С Ø 14 мм у шести точках вимірювання, розташованих на відстані 500 мм одна від одної по її довжині, а мінімальні значення – різниця температур ΔT , викликана притяганням електронів і залишковою напругою охолодження. Вздовж прутка встановлюється більший ΔT 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 ΔT .

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 умовах контролю 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. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Гнідець Б. Г. Залізобетонні конструкції з електротермічним попереднім напруженням / Б. Г. Гнідець, П. П. Завадяк, М. Р. Щеглюк. – К. : Техніка, 1996. – 240 с.
6. Залога В.О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні: навчальний посібник / В.О. Залога, О.О. Залога, В.Д. Гончаров; за загальн. ред. В.О. Залоги. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 371 с.
7. 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.

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. Методика зміцнення і контролю сталюї термонапруженої арматури та оцінки її тріщиностійкості. Вісник Львівського національного аграрного університету : Агроінженерні дослідження. – 2010. – № 14. – С. 276 – 282.

10. 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.

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

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

15. Лучко Й. Й. Методи оцінки несучої здатності і підвищення тріщиностійкості залізобетонних елементів конструкцій / Й. Й. Лучко. – Львів : Слово і комерція, 1997. – 453 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., Малафеев 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 alluminium 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/>