

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(назва факультету)

Автоматизації технологічних процесів та виробництв

(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи (проекту)

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: *Аналітичне та експериментальне оцінювання стану металевих поверхонь з втомними пошкодженнями за допомогою комп'ютеризованої дефектометрії*

Виконали: студенти

6 курсу групи КАМ-61

спеціальності

151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

_____ Рожицький Юрій Іванович,

_____ Саць Олександр Васильович

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

_____ (підпис)

проф. **Марушак П.О.**

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

_____ (підпис)

ст. викл. **Козбур І.Р.**

(прізвище та ініціали)

Рецензент

_____ (підпис)

доц. каф. КТ **Голотенко О.С.**

(прізвище та ініціали)

м. Тернопіль – 2020

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв

Освітній рівень магістр

(шифр і назва)

Спеціальність 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АВ

доц. В.Б. Савків

«_____» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Рожицькому Юрію Івановичу

(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Аналітичне та експериментальне оцінювання стану металевих поверхонь з втомними пошкодженнями за допомогою комп'ютеризованої дефектометрії

Керівник проекту (роботи) проф. Марущак Павло Орестович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від «_____» _____ 201__ року №_____

2. Термін подання студентом проекту (роботи) _____
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Фотозображення пошкоджених роликів МБЛЗ, зразки для механічних випробувань, характеристики зображень.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітична частина; 2. Технологічна частина; 3. Конструкторська частина; науково-дослідна частина; 5. Спеціальна частина; 6. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Зображення з тріщинами на поверхні ролика МБЛЗ з різною яскравістю та освітленістю;
2. Базовий алгоритм для пошуку каркасу тріщин; 3. Алгоритмічні підходи до пошуку каркасу тріщин; 4. Вдосконалення відомого алгоритму; 5. Новий алгоритм обробки зображень
6. Каркасні лінії та їх опис; 7. Графічне представлення функції; 8. Обчислювальні витрати;
9. Зменшення обчислювальних витрат; 10. Програма прогнозування довговічності ролика з дефектом; 11. Висновки

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	доц. Тотосько О.В. ст. викл. Клепчик В.М.		
Нормоконтроль	ст. викл. Козбур І.Р.		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання	При-мітка
1.	Вступ		
2.	Аналітична частина		
3.	Деградація роликів МБЛЗ: методи їх відновлення		
4.	Лабораторні методи оцінювання температурних полів та термовтомних пошкоджень		
5.	Вплив термоциклування на властивості теплостійких сталей роликів МБЛЗ		
6.	Новий алгоритм дефектометричного аналізу		
7.	Аналіз тріщин термовтоми з урахуванням стану поверхні ролика МБЛЗ		
8.	Розроблення нової методики оцінювання терміну експлуатації роликів МБЛЗ з урахуванням впливу експлуатаційних факторів		
9.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
10.	Висновки		

Студент

(підпис)

Рожицький Юрій Іванович

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

проф. Марущак П.О.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв

Освітній рівень магістр

(шифр і назва)

Спеціальність 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АВ

доц. В.Б. Савків

«_____» _____ 2020р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Сацю Олександр Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Аналітичне та експериментальне оцінювання стану металевих поверхонь з втомними пошкодженнями за допомогою комп'ютеризованої дефектометрії

Керівник проекту (роботи) проф. Марущак Павло Орестович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від «_____» _____ 2020 року №_____

2. Термін подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Фотозображення пошкоджених роликів МБЛЗ, зразки для механічних випробувань, характеристики зображень.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітична частина; 2. Технологічна частина; 3. Конструкторська частина; науково-дослідна частина; 5. Спеціальна частина; 6. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Зображення з тріщинами на поверхні ролика МБЛЗ з різною яскравістю та освітленістю;

2. Базовий алгоритм для пошуку каркасу тріщин; 3. Алгоритмічні підходи до пошуку каркасу тріщин; 4. Вдосконалення відомого алгоритму; 5. Новий алгоритм обробки зображень

6. Каркасні лінії та їх опис; 7. Графічне представлення функції; 8. Обчислювальні витрати;

9. Зменшення обчислювальних витрат; 10. Програма прогнозування довговічності ролика з дефектом; 11. Висновки

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	доц. Тотосько О.В. ст. викл. Клепчик В.М.		
Нормоконтроль	ст. викл. Козбур І.Р.		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання	При-мітка
1.	Вступ		
2.	Аналітична частина		
3.	Деградація роликів МБЛЗ: методи їх відновлення		
4.	Лабораторні методи оцінювання температурних полів та термовтомних пошкоджень		
5.	Вплив термоциклування на властивості теплостійких сталей роликів МБЛЗ		
6.	Новий алгоритм дефектометричного аналізу		
7.	Аналіз тріщин термовтоми з урахуванням стану поверхні ролика МБЛЗ		
8.	Розроблення нової методики оцінювання терміну експлуатації роликів МБЛЗ з урахуванням впливу експлуатаційних факторів		
9.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
10.	Висновки		

Студент

(підпис)

Саць Олександр Васильович

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

проф. Марущак П.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Аналітичне та експериментальне оцінювання стану металевих поверхонь з втомними пошкодженнями за допомогою комп'ютеризованої дефектометрії. - Тернопіль, ТНТУ, 2020. – 92 с.

Теоретичні дослідження проведені з використанням методів мезомеханіки, механіки деформівного твердого тіла та положень лінійної та нелінійної механіки руйнування. Експериментальна частина досліджень буде реалізована на сучасному випробувальному обладнанні керування яким здійснювалось за допомогою ПК, що дозволить отримати достатню точність і достовірність результатів експерименту. Проведено порівняльний аналіз даних тензометрії та оптико-цифрового аналізу показують взаємодоповнення цих підходів. одержані результати дозволяють оцінювати стан матеріалу з множини тріщинами за параметрами оптико-цифрового контролю. Виявлено основні закономірності параметрів мікроструктурної деградації, твердості, мікротвердості, в'язкості руйнування матеріалу роликів МБЛЗ від напрацювання. З використанням скануючої електронної мікроскопії встановлено механізми зародження тріщин та руйнування сталі роликів МБЛЗ.

Запропоновано методику імовірнісного прогнозування швидкості РВТ за регулярного навантаження. Розроблено алгоритм оптико-цифрового контролю втомних дефектів на поверхні ролика МБЛЗ, який має функції самоналаштування і дозволяє розпізнавати на зображенні витягнуті криволінійні об'єкти (наприклад, тріщини) без спеціальної адаптації до зображень певного виду. Розглянуто підхід, який дозволяє створювати проблемно-орієнтовані та спеціалізовані експертні системи, налаштовані на певну аналізовану ділянку контрольованого об'єкту. Оцінено економічну ефективність проекту та запропоновано заходи з охорони праці, безпеки життєдіяльності та охорони довкілля.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	
1.1. Деградація роликів МБЛЗ: методи їх відновлення.....	10
1.2. Лабораторні методи оцінювання температурних полів та термовтомних пошкоджень.....	25
2. ТЕХНОЛОГІЧНІ ЧАСТИНА	
2.1. Вплив термоциклування на властивості теплостійких сталей роликів МБЛЗ.....	28
3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	
3.1. Новий алгоритм дефектометричного аналізу.....	44
3.2. Аналіз тріщин термовтоми з урахуванням стану поверхні ролика МБЛЗ.....	49
4. НАУКОВА ЧАСТИНА	
4.1. Розроблення нової методики оцінювання терміну експлуатації роликів МБЛЗ з урахуванням впливу експлуатаційних факторів.....	61
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ...68	
ВИСНОВКИ.....	78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	80

ВСТУП

Машини безперервного лиття заготовок на металургійному комбінаті оснащені кількома десятками роликів. Ці ролики отримують циклічні прогини від механічного та температурного навантаження за умов контакту з розжареною заготовкою протягом тривалого періоду часу. Через багаторазове нагрівання внаслідок дотику до слябу та охолодження виникають пошкодження їх поверхні, зокрем такі як зношування, термічне розтріскування, високотемпературне окиснення, тощо.

Тому в якості протидії та запобігання пошкодженню ролика на його поверхню наносять покриття наплавленням або самофлюсуючим напиленням теплостійкого сплаву.

Традиційно, як матеріал для наплавлення використовують нержавіючу сталь, зокрема 13Cr-Ni (Ni: 1-6), 17Cr-4Ni (SUS630), сплав на основі Ni. Використовуються матеріали захищені патентами, зокрема: JP 2002-348638 A, JP 2006-263807 A, JP 2007-136509 A

В останні роки спостерігається високий попит на більш високі швидкості лиття, поліпшені виробничі показники та вихід слябу. Отже, аналітичне та експериментальне оцінювання стану металевих поверхонь з втомними пошкодженнями за допомогою комп'ютеризованої дефектометрії є підґрунтям для створення ролика МБЛЗ, який має підвищену стійкість поверхні до зношування та корозії та безумовно високу стійкості до високотемпературного розтріскування.

Тому важливо розвивати втоматизовані методи кількісного оцінювання геометріх тріщин термічної втоми на поверхні ролика, шляхом аналізу цифрових зображень.

Особливу увагу слід приділити найважливішим етапам морфологічних змін поверхні ролика: структурі втомних тріщин, їх геометричними особливостям, кількості тріщиноподібних фрагментів спричинену термічною втомою.

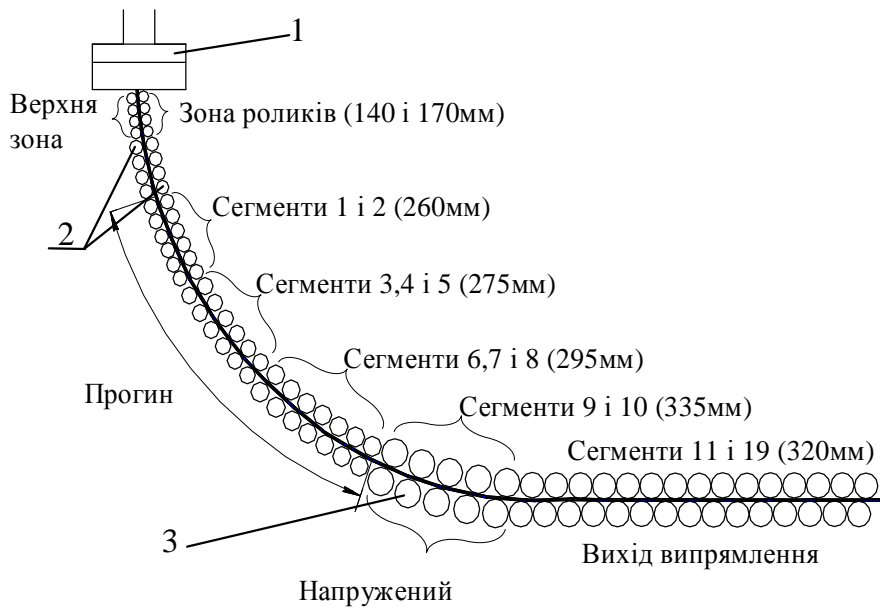
Можна припустити, що деякі дефекти будуть зливатися при активному завантаженні ролика і стрікутура дефектів повинна змінюватись під час роботи конструкції таким чином, поверхня неначе є певного роду індикатором стану ролика, якщо знати граничні умови та стадійність розвитку дефектів.

1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

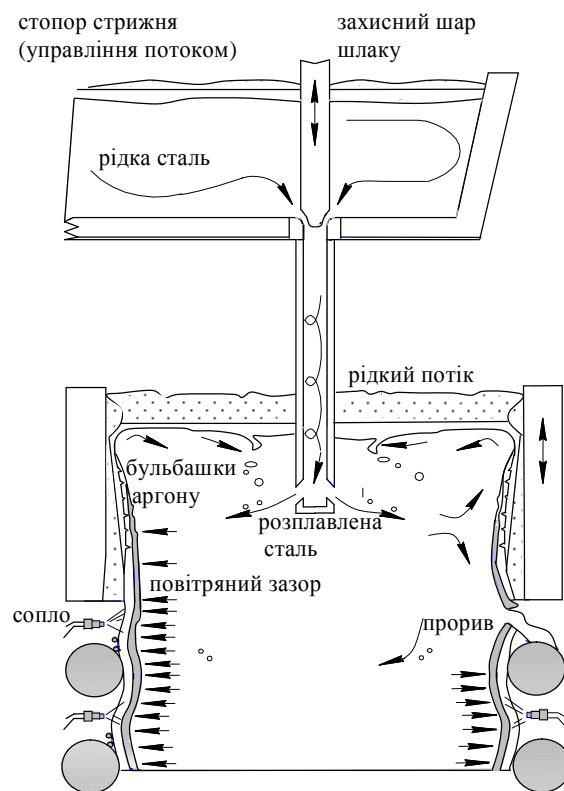
1.1. Деградація роликів МБЛЗ: методи їх відновлення

Розвиток чорної металургії зумовив збільшення номенклатури заготовок різного перерізу і, зокрема, й слябів, що виготовляються на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) [1, 2]. Це зумовлює необхідність розроблення заходів з підвищення довговічності основних тривких елементів - роликів МБЛЗ [3, 4]. На даний час для їх виготовлення використовують конструкційні леговані сталі, що містять хром, молібден, ванадій [5, 6]. Однак існує потреба в подовженні експлуатаційного періоду роликів, оскільки для більшості відомих конструкцій він не перевищує шести місяців. Основними причинами виходу роликів із ладу є: утворення сітки розпалу на бочці ролика, зношення бочки, залишковий прогин бочки і руйнування підшипників [1, 2, 7]. Підвищення стійкості роликів є важливим не лише через необхідність підвищення продуктивності МБЛЗ, але й для зменшення кількості їх непрогнозованих руйнувань та покращення якості слябових заготовок [1].

Щоб визначити шляхи вдосконалення конструктивних і технологічних параметрів роликів секцій МБЛЗ необхідно дослідити матеріали роликів у різних режимах експлуатації.



а



б

Рис. 1.1. Принципова схема розливного струмка слябової МБЛЗ [8,9]:

1 – ківш для розливання сталі; 2 – сегменти роликів; 3 – ролики

Довжина технологічної лінії сучасних слябових МБЛЗ досягає 40 м, і в двох струмках таких машин розташовано до 360 роликів діаметром 0,14 ... 0,38 м, довжиною бочки до 2 м та загальною масою 630 тон [1, 2], рис. 1.1, а.

Ролики МБЛЗ працюють у вкрай складних умовах. На виході з мідних ливарних форм частково затверділі злитки, які являють собою тонку затверділу оболонку, всередині якої міститься рідкий метал, переміщається між парами роликів уздовж МБЛЗ, поступово охолоджуючись. Відтак після вигинання під кутом 90 градусів ці злитки виводяться на горизонтальну ділянку [10, 11, 12].

В процесі вигинання сталевих злитків секції роликів піддаються впливу високих температур і значних радіальних навантажень. На горизонтальній ділянці МБЛЗ розташовані машини газового різання, які розрізають сляб на окремі заготовки. Завдяки гладкій поверхні роликів і контрольованому процесу водяного охолодження, кінцевий продукт має відмінну якість поверхні і високу ступінь внутрішньої однорідності.

Під час розрахунку геометричних параметрів деформованої заготовки визначають її поточні розміри (товщину і ширину) в площині пар роликів роликової проводки на різних ділянках МБЛЗ. Шляхом порівняння розрахункових значень із фактичною відстанню між роликами в роликових секціях було виявлено можливість збільшення відстаней між роликами, що дозволить зменшити силовий вплив заготовки на ролики, знизить коефіцієнт тертя та їх абразивне зношення.

Альтернативним варіантом є зменшення тертя в парі «ролик-сляб» за рахунок регулювання швидкості приводних роликів на різних ділянках МБЛЗ [10, 13, 14, 15].

На даний час проводяться наукові дослідження щодо раціонального вибору профілю криволінійної ділянки МБЛЗ за критерієм зниження тертя в осередках деформування заготовки. Моделюванням процесу формування заготовки у технологічному каналі МБЛЗ було [12]:

- вдосконалено методи обчислення зміни температурного поля та геометричних параметрів заготовки із урахуванням її усадки;

- розроблено метод урахування розподілу швидкостей руху заготовки із зміною кривизни криволінійної ділянки МБЛЗ.

Теоретичні результати Піксаєва Є.В. були апробовані у ВАТ “ММК” [12]. За запропонованою методикою змінювали відстань між роликками і профіль ділянки випрямлення роликкової проводки МБЛЗ №4. На рис. 1.2 відображено результати застосування методики раціонального вибору криволінійної ділянки МБЛЗ.

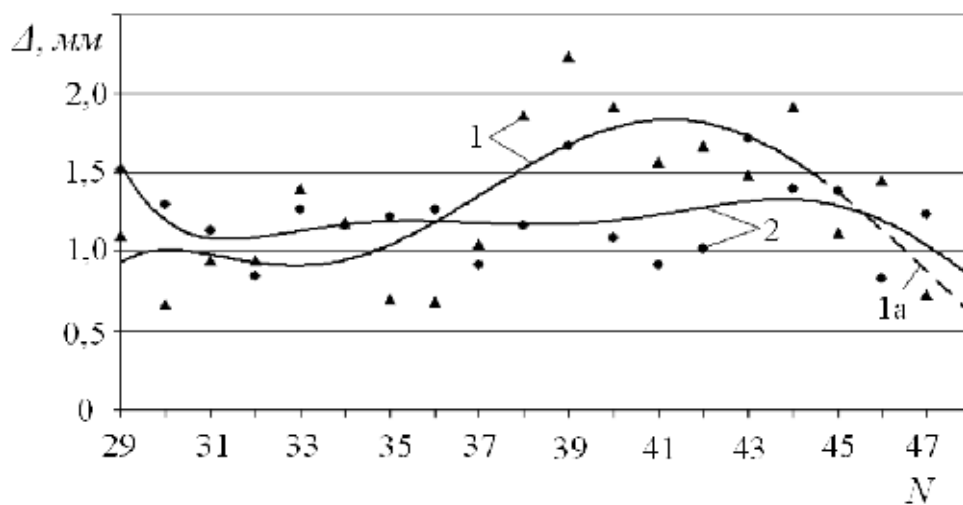


Рис.1.2. Середні значення зношення (Δ) поверхні роликів відповідно до їх номерів (N): 1 - (13-14-й струмок); 2 - (15-16-й струмок); 1а – експеримент [12]

Половину (15 і 16 струмок) роликкової проводки криволінійної ділянки тієї ж МБЛЗ було переведено на новий профіль ($m=1,087$). На машині разито 1991 плавку сталі різних марок. Встановлено [12], що за результатами реконструкції МБЛЗ, зношування роликів секцій №3-№6 зменшилось на 33,4%, навантаження на приводи роликкової проводки радіальної ділянки знизилась на 24,4%. Також знизилось зношення секцій №7, №8, що підвищило довговічність роликів на 6%. На 54% знизилась нерівномірність зношення бочок роликів, а також

досягнуто зменшення поширення перпендикулярних і гніздоподібних тріщин на 8,5 %.

Машини для безперервного лиття заготовок (СКМ) є складними технічними системами. Висота машин становить близько 20 метрів і 30 метрів у довжину. Роликова проводка складається загалом із приблизно 200 роликів (400-600 сегментів залежно від конструкції роликів - з одним або двома розрізами) з різним діаметром (140-320 мм), які охолоджуються як всередині, так і зовні.

Ролик має внутрішнє охолодження водою, щоб рідкий метал застигав безпосередньо в контакті з ним. Це охолодження називають первинним охолодженням. Поверхня слябу має температур близько 1500 °С безпосередньо під розливочним ковшем на опорних роликах і поступово знижується до 800-900 °С у горизонтальній проводки. Традиційним матеріалом для виготовлення вітчизняних роликів МБЛЗ є сталь 25Х1М1Ф (табл.1.1).

Таблиця 1.1.

Хімічний склад сталей роликів МБЛЗ [1, 2]

Сталь 25Х1М1Ф (ГОСТ 20072 – 74)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu
0.22	0.17 -	0.4	до 0.3	до	до	1.5 -	0.6 -	0.15	до
-	0.37	-		0.025	0.03	1.8	0.8	- 0.3	0.2
0.29		0.7							

У праці [5] для виготовлення роликів МБЛЗ запропоновано новий матеріал сталь 25Х2Г1АФ (табл.1.2), застосування якого дозволяє оптимізувати структуру й підвищити міцність та тріщиностійкість виробу.

Сталь 25Х2Г1АФ

C	Si	N	S	P	Cr	V
0.22 - 0.29	0.17 - 0.37	0,014- 0,018	до 0.025	до 0.03	1.6 – 2,2	0.09 - 0.15

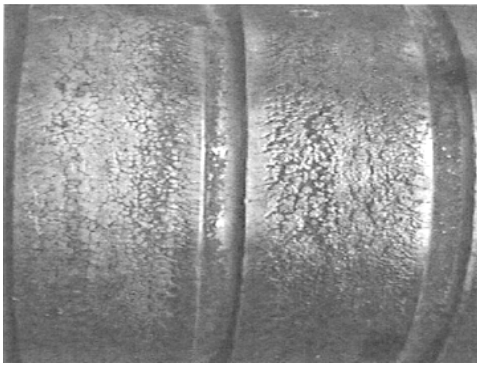
Основні види пошкоджень роликів МБЛЗ

Зношення. Причиною зношування є вплив абразивних частинок (технологічних порошків, залишків окалини та інше), що активує стирання поверхні ролика. Використання порошків на основі сполук CaO, CaF₂, SiO₂, MgO і Al₂O₃ в процесі безперервного лиття є технологічною необхідністю і дозволяє підвищити якість слябів. Як правило, застосовують ливарні порошки типу Accutherm ST-C 39, Syntherm S тощо [22, 23].

Згідно з вимогами виробництва інтенсивність зношування матеріалу робочих поверхонь роликів МБЛЗ не повинна перевищувати 0,1-0,25 мм на 1 тис. плавлень. При цьому на МБЛЗ слід виготовити не менше 1 млн т заготовок без заміни роликів [17].

Корозія є наслідком впливу охолоджувальної води на тіло ролика: через зміну хімічного складу під час взаємодії з тілом ролика рН води змінюється до 5, а інколи й до 4. Корозійні дефекти накопичуються на поверхні ролика, спричиняючи його руйнування.

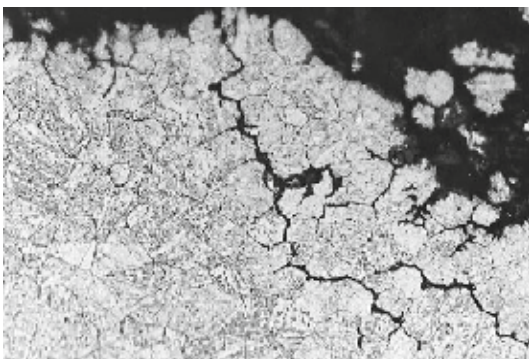
Термомеханічна втома. В матеріалі ролика виникає сітка розпалу, поширюються кільцеві тріщини; активується зношення поверхні та відбувається налипання на неї матеріалу заготовки (рис.1.3). Перелічені дефекти суттєво зменшують термін роботи роликів. Найнебезпечнішими є радіальні дефекти, що є результатом об'єднання множинних тріщин. Поширюючись на значну глибину, вони можуть спричинити непрогнозоване руйнування роликів.



а



б



в

Рис. 1.3. Типи пошкоджень поверхні роликів МБЛЗ [23-25]: а – множинне розтріскування; б – корозія; в – міжзеренне стрес-корозійне розтріскування матеріалу

Дослідження деградації роликів МБЛЗ [26, 27] вже проводились у експлуатаційних умовах металургійного виробництва, проте їх результати, як правило, потребують подальшої систематизації, статистичного аналізу та поглибленої фізико-механічної інтерпретації.

Експлуатаційне пошкодження та розтріскування поверхні ролика МБЛЗ

Температурні поля у ролику МБЛЗ, що виникають за експлуатаційних умов, досліджували аналітичними та чисельними методами у працях [28-30]. Хоча усталені режими роботи роликів МБЛЗ вже добре вивчені, важливо дослідити температурні поля у ролику МБЛЗ в момент зупинки чи сповільнення процесу лиття.

Наплавлення поверхні роликів МБЛЗ.

Підвищити термін експлуатації роликів МБЛЗ дає змогу електродугове наплавлення. Оскільки ролики експлуатуються у складних експлуатаційних умовах, до матеріалу наплавлення висувають низку вимог (табл. 1.3) [1, 31-36], а саме:

- стійкість до високотемпературного відпуску;
- висока корозостійкість;
- висока тріщиностійкість;
- висока міцність та твердість;
- стійкість до абразивного зношування.

Таблиця 1.3.

Хімічний склад матеріалів для наплавлення роликів МБЛЗ

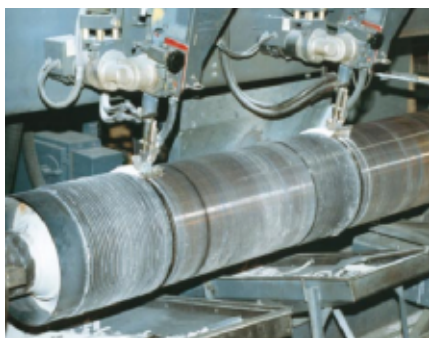
№ з/п	Марка дроту	Масова частка елементів, %					Твердість, HRC
		C	Mn	Si	Cr	Інші	
1.	СВ-20Х13	0,16-0,24	≤ 0,3	≤ 0,3	12,0 14,0	-	42-48
2.	ПП-Нп-15Х13	0,15	0,6	0,8	13,0	-	38-48
3.	ПП-Ан159	0,15	0,6	0,8	13,0	-	38-48
4.	ПП-Ан174*	0,12	0,8	0,6	13,0	1,6Ni 0,2V	38-48

*Mo = 0,8 %

Оскільки основними матеріалами для виготовлення вітчизняних роликів є сталі 24ХМ1Ф, 25Х1М1Ф, 35ХМ1, 40Х1МФА, тому для підвищення якості наплавлення покращують склад порошкових дротів та режими наплавлення [37-39], що дозволяє мінімізувати негативний

ефект від впливу перемішування шару основи та наплавлюваного матеріалу. Процес наплавлення відображено на (рис. 1.4). Для наплавлення роликів МБЛЗ застосовують порошкові дроти марок ПП-Нп12Х13, ПП-Нп20Х17, ПП-Нп30Х20НМ в поєднанні з флюсами АН-20 і АН-26, що забезпечує отримання хромовмісного шару з ферито-мартенситною структурою [1, 2].

Відомий спосіб наплавлення порошковою стрічкою ПЛ-Нп 14Х13Г5Т, хімічний склад якої захищений патентом України № 94862. Цю стрічку рекомендують наплавляти під безмарганцевим низькокремнистим флюсом (наприклад, АН-20П) на постійному струмі зворотної полярності ($I = 700 \text{ A}$, $U = 30 \text{ В}$, $V = 30 \text{ м / год}$, $L = 50 \text{ мм}$) [32].



а



б



в



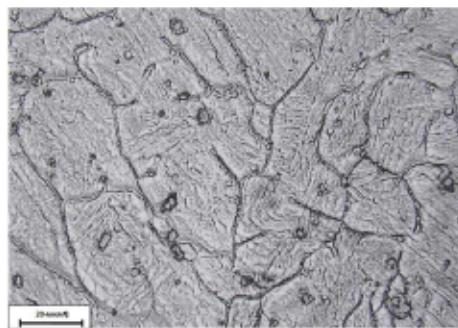
г

Рис. 1.4. Ролики МБЛЗ у процесі наплавлення [40-42]

Фірмою ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК» розроблено порошкові дроти ВЕЛТЕК-Н470, ВЕЛТЕК-Н470G, ВЕЛТЕК-Н470С для наплавлення зміцнювального шару роликів МБЛЗ. Процес відбувається під шаром флюсу або відкритою дугою в суміші газу 82% Ar+18% CO₂, стійкого до впливу високих температур, термоцикування і корозії, рис. 1.5. Для роликів горизонтальної ділянки проводки виконують тришарове наплавлення порошковим дротом ВЕЛТЕК-Н470. Наплавлений шар за хімічним складом відповідає сталі 15X14H2M1ФБ, а його твердість після термічної обробки та відпуску становить 375 ... 415 НВ.



а



б

Рис.1.5. Поверхня ролика МБЛЗ – (а) та структура металу (б), напавленого за технологією фірми ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК» [38]

Застосовано систему легування дротів [39] (Cr-Mn-Ni-Mo-N, Cr-Mn-Ni-Mo-V-Nb). Зносостійкість ролика забезпечена вмістом у матеріалі наплавлення вуглецю < 0,1 % і заміщенням частини вуглецю азотом, що понижує інтенсивність укрупнення зерен та формування на їх межах карбідів хрому. Утворені нітриди рівномірно розподілені у структурі металу, що забезпечує ефект вторинного зміцнення внаслідок від термоцикування у ході експлуатації роликів. Структура напавленого металу – низько вуглецевий дисперсний мартенсит, зміцнений дисперсними карбідами.

Ролики також наплавляють у вигляді кільцевих буртиків, рис.1.6. Оскільки зародження тріщин відбувається переважно у зонах перекриття валиків, які піддаються повторному нагріванню. Виконане у такий спосіб наплавлення запобігає виникненню втомних тріщин «розвантажуючи» прилеглі ділянки поверхні ролика МБЛЗ.



Рис. 1.6. Наплавлений ролик МБЛЗ із зазорами між наплавленими валиками [39]

При цьому ролик має менші поля залишкових напружень, а наявність «виступів» та «западин» дозволяє запобігти перегріванню його поверхні.

Хімічний склад основи роликів МБЛЗ закордонного виробництва під наплавлення подано в табл.1.4. Для наплавлення використано наплавлювальні дроти фірми COREWIRE, Ltd [42], табл.1.5.

Таблиця 1.4

Хімічний склад основи ролика МБЛЗ, закордонного виробництва, %

Сталь	C	Cr	Si	Mn	Ni	Mo
4130**	0,28- 0,33	0,80- 1,10	0,20- 0,35	0,40- 0,60	--	0,15-0,20-
8620**	0,18- 0,23	0,40- 0,60	0,20- 0,35	0,70- 0,90	0,40- 0,70	0,15-0,25

Як захисне покриття для роликів МБЛЗ застосовують сталь 420 [37]. Довговічність таких роликів є вищою за суцільноковані монометалеві, проте їх наплавлена поверхня є дуже чутливою до термовтоми.

Наступні покоління сплавів - 440 і 423 - є стійкішими до термовтоми. Через додавання як легуючого елемента азоту, підвищилася їх стійкість до виразкової корозії.

Таблиця 1.5

Хімічний склад наплавлювальних дротів
фірми COREWIRE, Ltd, %

Сплав	C	Cr	Ni	Mo	N	Стабілі- затори	HRC	Властивості
420	0,18	12,0	-	0,03	-	-	48	Зносостійкість
440	0,05	13,0	4,5	1,0	0,03	-	35	Корозійна стійкість
423	0,12	12,5	2,5	1,0	0,03	Nb, V	45	Зносостійкість / стійкість до термовтоми
414N- S	0,08	13,5	4,3	0,5	0,10	V, W	43	Зносостійкість та корозійна остійкість
423N	0,05	12,5	4,0	1,7	0,10	V, W	43	Зносостійкість та корозійна остійкість

Для наплавлення роликів також застосовують наплавлювальний матеріал Weldclad 3, що містить близько ~ 12 % Cr та 0.08-0.15 % C. Його твердість - 40-48 HRC, мікроструктура - мартенситна. Крім того, у структурі мартенситу менше 10 % дельта-фериту, що забезпечує його високі фізико-механічні властивості. Наплавлювальний дріт Corewire вимагає застосування особливої технології наплавлення для різних ділянок МБЛЗ.

Так, за умов інтенсивного корозійного впливу застосовують наплавлювальні матеріали Weldclad 800 або Weldclad 900. Такі матеріали, як Weldclad 3XCR і Weldclad 3HT модифіковані молібденом, хромом і азотом та є вдосконаленою версією Weldclad 3. Крім того, вони мають кращу корозо- та зносостійкість порівняно зі сталями 410/414.

Як відомо, приводні валки зношуються у 3 рази швидше, ніж неприводні, тому для їх захисту використовують матеріали WLDC 8 і WLDC 2000 (табл.1.6). Крім того, добре зарекомендував себе WLDC 5HT, як стійкий до абразивного зношування.

Для багат шарового наплавлення роликів МБЛЗ як підшар використовують матеріал Weldclad 19 або більш легований WLDC 3M2H/L. Це дозволяє зменшити кількість шарів наплавлення.

Для одношарового наплавлення використовують Weldclad 3S, який дозволяє досягнути 12% вмісту хрому у поверхневому шарі.

Таблиця 1.6

Хімічний склад наплавлювальних дровів, %

Дріт	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Nb	V
Застосовують для поверхневих шарів, підвищення корозостійкості, термовтоми, зношення										
WLDC 2	0.1 2	0.6	1.0	0.01	0.01	2.92	12. 0	-	-	-
WLDC 3	0.1	0.6	1.0	-	-	2.5	12. 2	0.8	0.15	-
WLDC 8	0.3		1.0	0.6	-	-	12. 2	0.7 5	-	0.15
Застосовують для утворення багат шарових наплавлених шарів										
WLDC 3XCR	0.0 6	0.6	1.0	-	-	3.1	11. 75	1.6	-	-

WLDC5 Mod	0.2 5	0.6	1.0	-	-	0.25	9.0	2.0	-	-
WLDC5H T	0.2 5	0.6	1.0	-	-	0.25	9.0	3.0	-	-
WLDC90 0	0,1	-	-	-	-	1.5	20. 0	6.0	-	-
WLDC20 00*	0.2 5	0.6	1.0	-	-	1.5	11. 75	2.0	-	0.5

*W = 0.8 %

Наплавлювальні матеріали додатково легують з метою підвищення технологічних властивостей поверхні роликів. Хром підвищує корозійну стійкість матеріалів роликів. Легування молібденом зменшує ступінь знеміцнення сталі внаслідок термовпливу та забезпечує її достатньо високу твердість у робочому діапазоні температур. Відомо, що ванадій та ніобій підвищують жаростійкість сталей наплавленого шару роликів МБЛЗ, утворюючи карбіди VC і NbC. Проте утворення цих карбідів на межах зерен дещо знижує тріщиностійкість матеріалу.

Електроіскрове зміцнення

Розглянемо даний спосіб зміцнення поверхні на прикладі ролика із наплавленим на поверхні зміцнюючим покриттям у вигляді кільцевих буртів [43], (рис.1.7). Поверхню обробляють способами, поданими у табл. 1.7. При цьому залежно від вихідних властивостей поверхні підбирають відповідний легуючий матеріал-електрод. Під час оброблення матеріал переноситься на оброблювану поверхню, утворюючи високоміцний легований шар. За недостатньої суцільності покриття операцію повторюють. Як електроди використовували тугоплавкі тверді сплави BK15, T15K6, BK6M та сормайт.

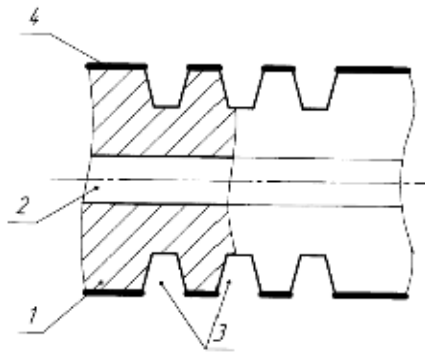


Рис. 1.7. Схема ролика із гвинтовими канавками та нанесеним електроіскровим покриттям

Таблиця 1.7

Параметри електроіскрового легування поверхні ролика МБЛЗ

- сила технологічного струму, А	100
- напруга холостого ходу, В	110
- ємність конденсаторів, мкФ	1500
- середовище охолодження дискового електрода	стиснене повітря
- швидкість оброблення, мм/хв.	до 100
- суцільність покриття за один прохід, %	до 95
- твердість матеріалу ролика, HRC	59
- твердість 1-го шару покриття, HRC	70
- твердість 2-го шару покриття, HRC	82
- товщина нижнього шару покриття, мм	0,05
- товщина верхнього шару покриття, мм	0,07
- шорсткість поверхні покриття, Ra мкм	10,0
- частота імпульсів, Гц	100

Таблиця 1.8

Марка сталі ролика МБЛЗ	Зміцнюючий матеріал	Коефіцієнт підвищення зносостійкості
25Х1М1Ф	ВК15	1,90
	КВ6М	1,78
	Т15К6	2,66

Таблиця 1.9

Марка сталі ролика МБЛЗ	контрольний зразок	1,0
25ХМ1Ф	ВК15	1,82
	КВ6М	1,74
	Т15К6	1.95
	контрольний зразок	1.0

Таблиця 1.10

Спосіб зміцнення	Матеріал легування	Тривалість роботи роликів – кількість розлитого металу, т.
одношарове легування	ВК15	23700
	Т15К6	25500
	КВ6М	22900
двошарове легування	КВ6М	
	Т15К6	26500
	-	ВК15

	T15K6	25900
	сормайт, T15K6	28300
контрольний зразок без зміцнення	-	15500
зміцнення ролика-прототипу	-	16800

Згідно з поданими у таблицях 1.8 і 1.9 даними, найкращих показників досягнуто на роликах, зміцнених двошаровим покриттям: їх коефіцієнт зносостійкості збільшився в 1,7-2,6 разів порівняно з необробленими роликами.

Дослідження режимів електроерозійного легування роликів МБЛЗ із використанням тугоплавких електродів як зміцнюючого елемента довели, що найефективнішим є нанесення двошарового покриття, причому нижній шар покриття слід виконувати електродом сплаву сормайт, а верхній шар - електродом T15K6. Експлуатаційні випробування зміцнених роликів свідчать, що їх зносостійкість зростає в 1,8-2,5 рази.

Перевагою даного способу зміцнення є:

- висока адгезія нанесеного матеріалу електрода до інструментальної основи внаслідок взаємної дифузії;
- можливість локального нанесення покриття;
- відсутність змін фізико-механічних властивостей матеріалів.

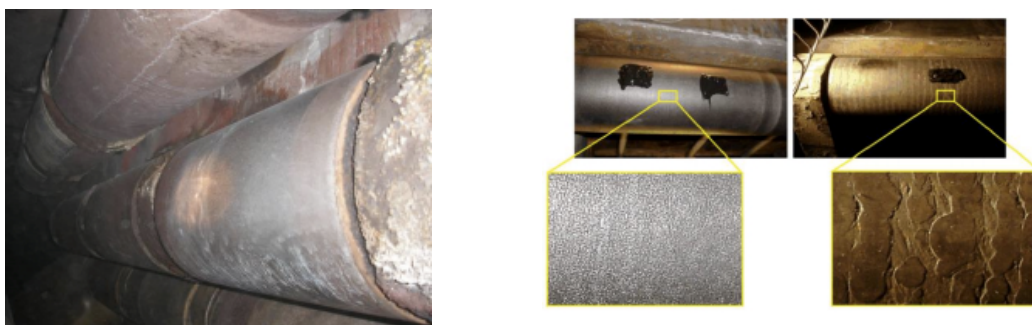
Лазерне наплавлення поверхні роликів. Даний метод є ефективнішим від традиційного наплавлення поверхні під шаром флюсу сталями серії 400 [44]. Метод застосовують для відновлення експлуатованих роликів і виконують після наплавлення та механічної обробки. Вздовж осі променя в потоці інертного газу у зону плавлення подають порошок, наплавлення здійснюється лазерним променем, рис.1.8. Результатом наплавлення є структурно однорідна поверхня із

високими механічними властивостями [45] і корозійною та механічною стійкістю [46].



Рис. 1.8. Наплавлення лазером

Довговічність роликів з лазерним наплавленням у 5 разів вища за довговічність роликів із напавленою поверхнею, оскільки у цьому випадку відсутні зони неоднорідності між валиками напавленого металу які, як правило, є місцями корозійного та втомного пошкодження напавлених роликів. На рис. 1.9 проведене якісне порівняння стану поверхні експлуатованих роликів, яке підтверджує переваги методу лазерного напавлення.



а

б

Рис. 1.9. Поверхня експлуатованих роликів МБЛЗ після розливання 118 кт сталі – а та 63 кт відповідно; А – ролики напавлені лазером; Б – напавлені під шаром флюсу

Отже, лазерне наплавлення є економічно ефективним способом нанесення тонкого шару металу із підвищеними технологічними властивостями. Мінімальна зона термічного впливу усуває проблеми неоднорідності зварного шва [47], що й сприяє підвищенню довговічності роликів МБЛЗ.

1.2. Лабораторні методи оцінювання температурних полів та термовтомних пошкоджень

На даний час перспективним є моделювання термомеханічних напружень у тілі ролика методом скінченних елементів [7, 48]. Але для адекватної оцінки напружено-деформованого стану роликів необхідно мати достовірну інформацію про розподіл температурних полів у тілі ролика, та з'ясувати можливість багаторазового відтворення температурних умов роботи конструкції в лабораторних умовах [49, 50].

Існуючі методи теплового розрахунку роликів МБЛЗ, як правило, засновані на розв'язанні двовимірного рівняння теплопровідності. Водночас, температурне поле роликів завжди тривимірне і нестационарне. Неповне урахування теплового стану роликів під час проектування роликів систем ускладнює вибір матеріалу для їх виготовлення, конструктивних форм і способів охолодження, що призводить в процесі експлуатації до недостатньої їх стійкості і, як наслідок, до частих зупинок металургійних машин.

Французькими вченими було спроектовано установку, що моделює роботу роликів МБЛЗ у експлуатаційних умовах [51]. Циліндр (модельний ролик МБЛЗ) нагрівали високочастотним індуктором, охолоджували двома потоками стисненого повітря, а також водою, вздовж осьового каналу, який співпадає із повздовжньою віссю

циліндра. Стенд був обладнаний чотирма термопарами, встановленими на різних глибинах від поверхні, рис. 1.10.

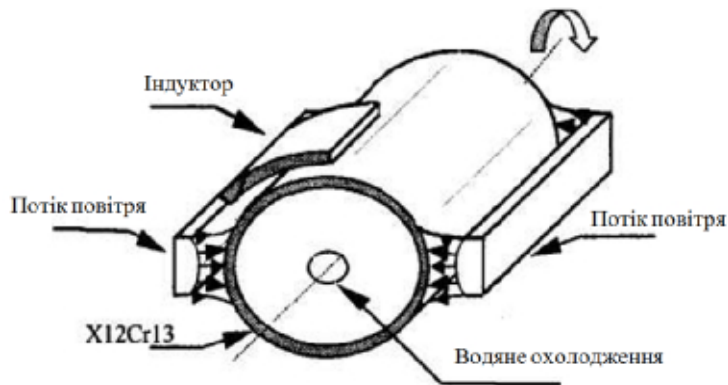


Рис. 1.10. Схема експериментальної установки для випробувань на термічну втому [51]

Температурний розподіл на поверхні контролювали двома інфрачервоними пірометрами. Записували параметри температурного циклу, швидкість обертання, інтенсивність теплового випромінювання, швидкість потоку охолоджувального повітря та води.

Угорські вчені розробили експериментальний стенд для випробувань на циклічну термовтому. Протягом експерименту ролик, подібний до тих, що використовуються в ливарному виробництві, обертася навколо осі і піддавався почерговому високотемпературному нагріванню та охолодженню. Схематичне зображення устаткування зображене на рис. 1.11.

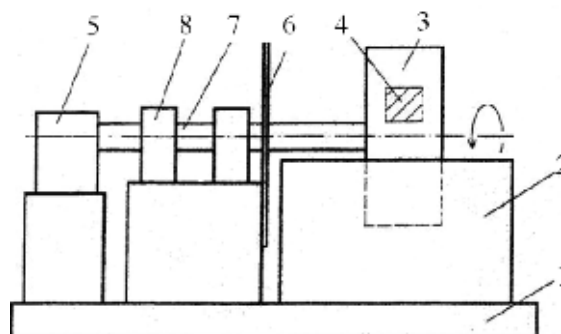


Рис. 1.11. Схема експериментального випробування на термічну втому [52]: 1 – основа; 2 – ємкість з водою; 3 – ролик; 4 – нагріта поверхня; 5 – привід; 6 – відхиляючий пристрій; 7 – вісь; 8 – консоль

Верхню частину ролика, закріпленого на осі асинхронного двигуна, нагрівали у термокамері. Після цього нагріту поверхню занурювали у холодну воду. Протягом циклу обертання поверхня ролика циклічно нагрівалась та охолоджувалась [52].

Експеримент проводили за такою методикою:

- ролик почергово нагрівали до 700°C , що є нижчим температури поліморфного перетворення та охолоджували у воді з температурою 20°C ;

- експеримент здійснювали до появи на поверхні ролика перших тріщин;

- випробування тривали 1000 ... 2000 термоциклів

- швидкість обертання становила 6 і 8 об/хв.

Недоліки лабораторного дослідження:

1. Через наявність повітряного зазору нагрівання індуктором потребує значних витрат енергії, при цьому ролик прогрівається не в усьому об'ємі, а лише його поверхневий шар.

2. Регулювання зазору між індуктором та пластиною потребує додаткових операцій з налагодження, що уможлиблює реалізацію лише усталеного режиму роботи ролика МБЛЗ.

3. При випробуванні на термовтому у водяній ванні автори знехтували реальними режимами обертання ролика, що спричинить неточності при перенесенні результатів з моделі на реальний об'єкт.

Щоб усунути вказані недоліки, для моделювання експлуатаційного термоциклування поверхневих шарів ролика МБЛЗ у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя було сконструйовано лабораторний стенд (рис. 1.12), у якому модель ролика

виконано у вигляді порожнистого товстостінного циліндра зі сталі 25Х1М1Ф довжиною 200 мм та діаметром 60 мм. Охолоджувальний отвір діаметром 12 мм виконано вздовж осі ролика.

Модельний ролик з повздовжнім отвором встановлювали в опорах ковзання, після чого прокачували проточну воду. Низькошвидкісне обертання ролика від синхронного двигуна з редуктором типу ЦД-54 здійснювали через понижуючу клинопасову передачу. Частота обертання ролика становила 0,01 Гц, що наближено відповідає експлуатаційним умовам [1, 2].

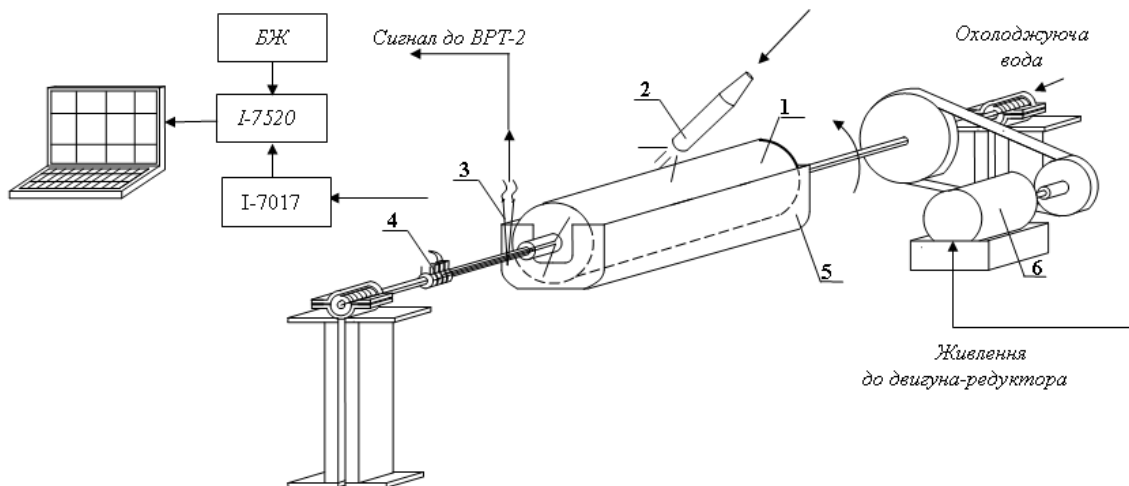


Рис. 1.12. Схема установки для випробувань моделей роликів у нестационарному температурному полі: 1 - ролик; 2 - газовий пальник; 3 – хромель-алюмелеві термопари; 4 - порожнистий вал, 5 - охолоджуюча ємність; 6 - двигун-редуктор [52]

Система нагрівання і охолодження ролика. Робочу температуру поверхні ролика реалізовували шляхом нагрівання газовим пальником. Температуру нагрівання контролювали, за показниками цифрового

вольтметра. Охолодження ролика здійснювалося зануренням нижньої частини ролика в ємність з проточною холодною водою, рис. 1.13, а.

Система запису даних. Термопари для вимірювання температурних полів закріплювали в тілі ролика на відстані ($h = 0; 5,0, 15,0$ мм) від поверхні ролика. Сигнал з термопар через модулі І-7016 передавався на модуль І-7017F, який є 8-ми канальним модулем АЦП (до 10 вим./сек). Інтерфейсний модуль І-7520 з'єднував систему запису даних з ПК. Окремий блок забезпечував живлення модулів системи ($U = 24$ В, $I = 1,5$ А).

Випробування ролика і деякі результати. Оскільки довжина моделі ролика в 3,3 рази більша за його діаметр, вимірювання температурних полів проводили в його центральній частині. При цьому не враховували зміну температури вздовж осі ролика, розглядаючи плоску задачу в окремо взятому поперечному перерізі.

Моделювали зупинку процесу розливання за 1,0 хвилину, рис. 1.13, б. Виявлено, що після запуску розігрітого до квазістаціонарного стану ролика відбувається незначне зниження температури циклу з її подальшою стабілізацією, протягом 4-5 обертів. Загалом, дані експерименту ($t_{\max} = 600^{\circ}\text{C}$, $t_{\min} = 90^{\circ}\text{C}$) близькі до експлуатаційних ($t_{\max} = 580^{\circ}\text{C}$, $t_{\min} = 130^{\circ}\text{C}$). Графіки залежності осесиметричної складової температурного поля ролика від часу обертання зображено на рис. 1.14.

Найбільше значення температури ($t_{\max} = 600^{\circ}\text{C}$) на зовнішній поверхні ролика досягається в максимальній точці циклу, у місці контактування з джерелом нагрівання, мінімальне – при охолодженні в ємності ($t_{\min} = 90^{\circ}\text{C}$). Внаслідок інтенсивного тепловідведення з внутрішніх шарів, температура в нижній точці циклу залишається стабільною протягом 35 сек. Аналіз результатів досліджень (рис. 1.13 а, б) показує, що зі збільшенням кута контактування ролика з джерелом нагрівання, час переходу ролика на сталий режим зменшується. Це пов'язано з більш рівномірним і швидким його прогріванням. Слід

зазначити, що зупинка ролика спричиняє підвищення температури у приповерхневих шарах, при цьому розмах термоциклу наближається до значень, одержаних на поверхні, рис. 1.13, б.

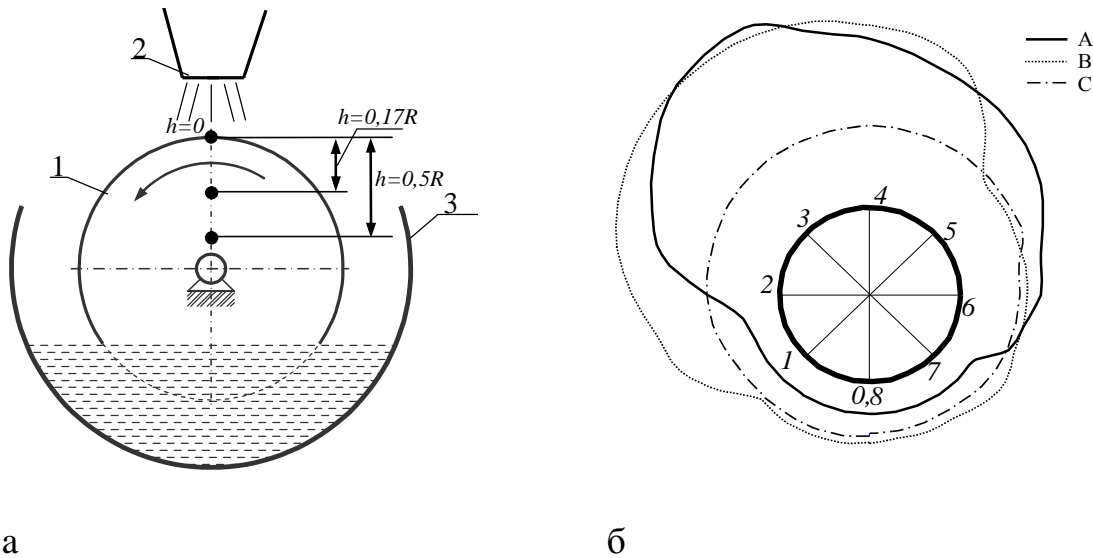


Рис. 1.13. Схема термоцикування (а): ролик - 1, газовий пальник - 2, охолоджувальна ємність – 3 та температурні поля в бочці ролика (б): на відстанях $h = 0; 5,0; 15,0$ мм (А, В,С) відповідно, від робочої поверхні, після зупинки протягом 5,0 хвилин

Під час обертання ролика виникають періодична та неперіодична складові температурного поля, рис. 1.13, б. Неперіодична складова поля температур виникає лише за перехідних режимів. Періодична складова притаманна технологічному процесу і локалізується у поверхневому шарі. За дослідженого квазістаціонарного режиму існує активна зона з періодичною зміною температури та осесиметричне ядро, з температурою, практично незмінною протягом оберту [49, 52].

Таблиця 1.11

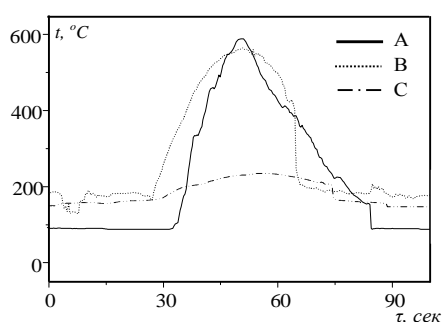
Параметри температурного поля у модельному ролику МБЛЗ

Точка вимірювання	Розподіл температур (t) вздовж радіуса (R) ролика, °C
-------------------	---

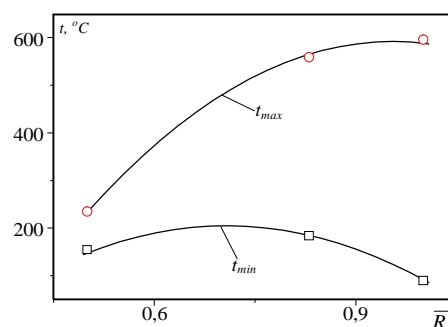
	R	0,17R	0,5R
0	92	174	156
1	92	176	164
2	198	407	200
3	538	547	224
4	485	523	234
5	357	200	219
6	221	186	163
7	94	190	151

Як бачимо на рис. 1.14, а, для поверхні характерний «гострий» термоцикл трикутної форми. З віддаленням від поверхні він набуває «згладженої» форми. Максимальний розмах термоциклу спостерігали на поверхні моделі. Із зменшенням значення R розмах термоциклу зменшується, (рис. 1.14, б), зменшення розмаху термоциклу у внутрішніх шарах ролика МБЛЗ спричинене зниженням інтенсивності тепловідводу та переходом до квазістаціонарного температурного поля.

Одержані результати задовільно узгоджуються з експлуатаційними даними, одержаними на промислових слябових МБЛЗ [1, 2].



а



б

Рис. 1.14. Термоцикли у бочці модельного ролика на різних відстанях від поверхні (а) та максимальні і мінімальні температури

термоциклу (б), (позн. див. на рис.1.13)

Знаючи коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 13,82$ сталі 25X1M1Ф, можна визначити розмах деформації ($\Delta\varepsilon$) у точках нагрівання:

$$\Delta\varepsilon = \alpha\Delta T,$$

Одержимо $\Delta\varepsilon = 0,51\%$ та $\Delta\varepsilon = 0,70\%$ відповідно.

Кубічна сплайн-інтерполяція температурного поля. Для побудови функції розподілу температури у ролику $F(x,y)$ застосовано інтерполяцію кубічними сплайнами. Область визначення $[a,b]$ розбивали на невеликі відрізки довжиною h , на кожному з яких функцію задавали поліномом третього порядку. Коефіцієнти полінома підбирали таким чином, щоб виконувались певні умови: неперервності самої функції, її першої та другої похідних і проходження через задані точки (вузли інтерполяції).

Використовуючи цей принцип, побудовано вісім функцій $f_i(\rho)$, $i = \overline{0,7}$, які визначають температуру вздовж променя із сталим кутом відносно осі OX . Положення точки вимірювання б (рис.1.14, б) відповідає куту $\phi = 0$, 5 – $\phi = \frac{\pi}{4}$, 4 – $\phi = \frac{\pi}{2}$, 3 – $\phi = \frac{3\pi}{4}$, 2 – $\phi = \pi$, 1 – $\phi = \frac{5\pi}{4}$, 0 – $\phi = \frac{3\pi}{2}$, 7 – $\phi = \frac{7\pi}{4}$. У якості вузлів використано дані таблиці 1.11.

Оскільки значення похідних на межі області визначення невідомі, задавали так звані природні граничні умови $f''(a) = 0$, $f''(b) = 0$, тобто побудовано природний сплайн. Похибка інтерполяції в такому випадку становить $O(h^2)$. Максимум похибки спостерігали в околах граничних вузлів, у внутрішніх вузлах точність інтерполяції значно вища.

Функції $f_i(\rho)$, $i=\overline{0,7}$ дозволили збільшити кількість вузлів до 81. Застосувавши двовимірну сплайн-інтерполяцію, отримано функцію $F(\phi, \rho)$, що описує розподіл температури у ролику в циліндричних координатах (рис. 1.15, а). Використавши зв'язок між полярними та прямокутними декартовими координатами, остаточно отримано функцію розподілу температури у ролику $F(x, y)$, карту ліній рівня якої подано на рис. 1.15, б.

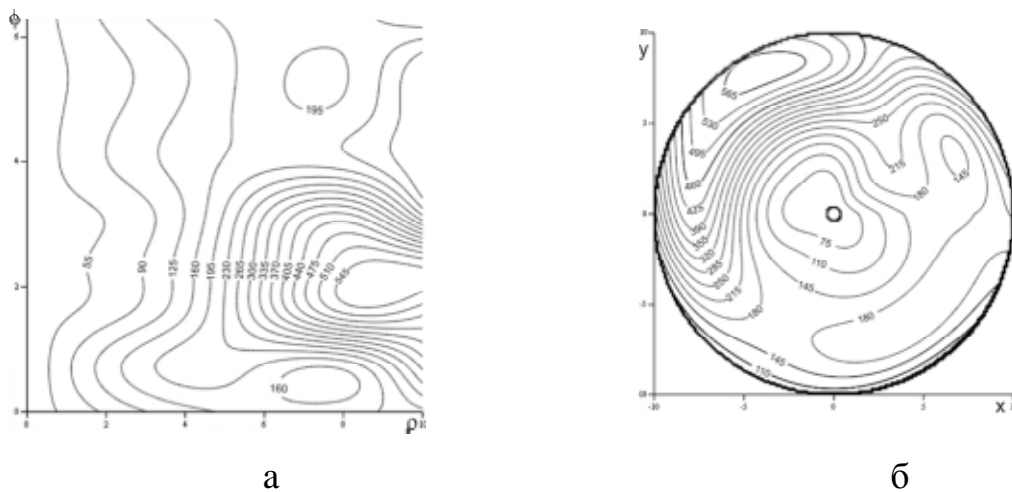


Рис. 1.15. Функція розподілу температури у ролику в циліндричній (а) та прямокутній декартовій системі координат (б) [53]

Подібні методи є одним з способів вибору матеріалів роликів МБЛЗ із оптимальними технологічними властивостями. Відомі праці [29, 51], у яких запропоновано алгоритм та програму для теплового розрахунку роликів МБЛЗ (рис. 1.16), що дозволяє визначати температурний стан роликів на основі попередньо заданих геометричних та теплофізичних параметрів.

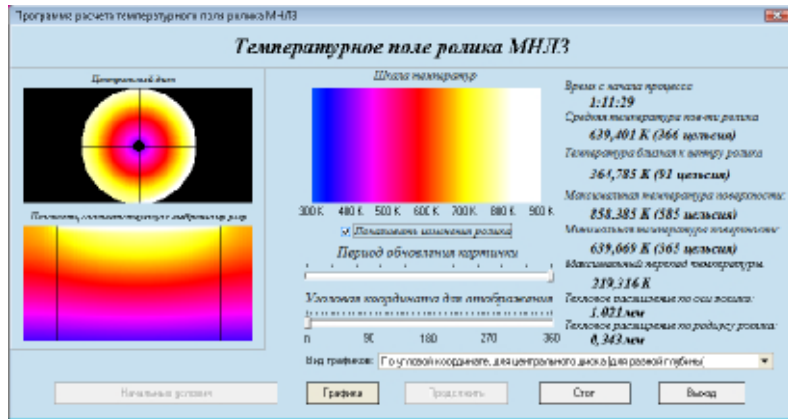
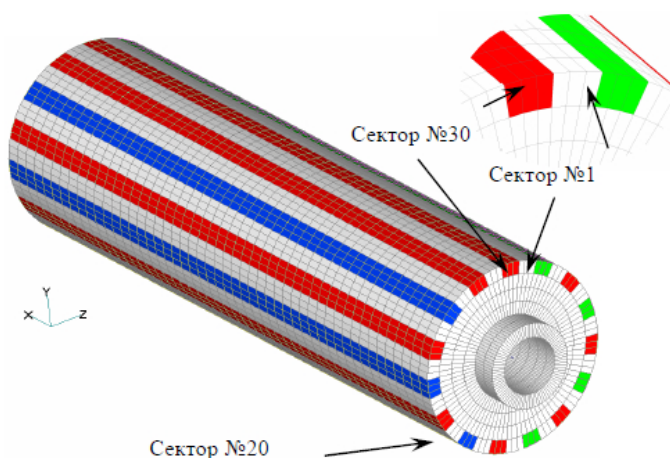


Рис. 1.16. Приклад розрахунку температурного поля для ролика МБЛЗ з внутрішнім каналом [51]

Для визначених моментів часу можна визначити: середню, максимальну та мінімальну температуру поверхні, теплове розширення ролика тощо. Для розрахунків НДС ролика використовували скінченно елементний комплекс MSC VisualNastran for Windows 2003, рис. 1.17. Результатом розрахунку були температурні поля та НДС ролика залежно від зміни температури і швидкості обертання в інтервалі часу від 0-ї до 999-тої секунди. Такий часовий діапазон вибирали з міркувань отримання повної картини кінетики розподілу температури для кількох обертів ролика після запуску МБЛЗ (за цей час ролик зробить майже чотири оберти при швидкості розливання сталі 0,2 м/хв, а при швидкості розливання сталі 1,0 м/хв – майже двадцять).



а

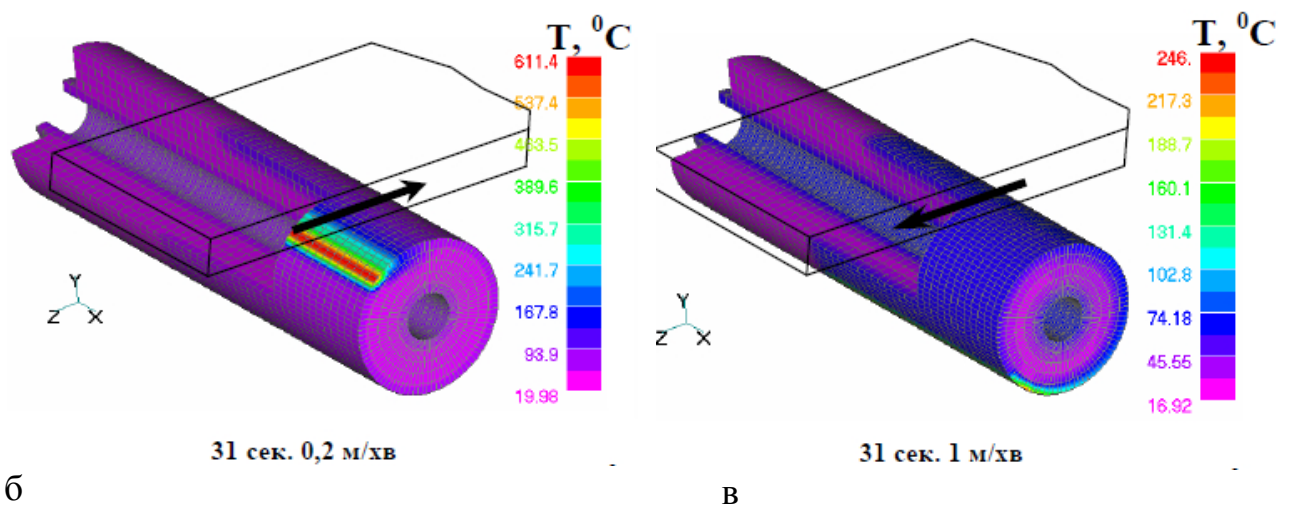


Рис. 1.17. Визначення температури та розподіл температурного поля у ролику під час обертання за 31 сек [7]

Від початкового моменту часу, а на рис. 1.17 – графік температури для трьох довільно (№27118, 19726, 14182) вибраних вузлів на його поверхні.

Встановлено, що розрахункові значення теплового стану роликів і одержаних з натурального експерименту добре узгоджуються, а їх похибка не перевищувала 5 %. За вказаним методом одержано монограми для максимальної температури поверхні ролика, а також розглянуто перепад температур у коловому напрямку, що дозволяє вибрати найраціональніші режими їх експлуатації.

Проведені у працях [52, 53] теплофізичні розрахунки дозволили запропонувати нову конструкцію бандажованого ролика МБЛЗ. Як вісь обертання використано експлуатований ролик, на який при посадці з натягом встановлено три секції бандажу. На поверхню осі попередньо було нанесено алюмінієве покриття. Такі ролики пройшли успішні промислові випробування на МБЛЗ-4 ОАО «ММК».

Крім того, було розроблено конструкцію бандажованого ролика, у якій бандажі монтуються з зазором, що значно спрощує їх виготовлення. Експериментально встановлено, що у разі

наплавлення робочої поверхні бандажів відбувається їх усадження, зменшення внутрішнього діаметру. Це зумовлює появу натягу між віссю та бандажем. Він є достатнім для передачі крутного моменту та забезпечення теплопровідності. Додаткове кріплення бандажів штифтами та зварюванням підвищує міцність конструкції. Крім того, отримані ролики мають ефективнішу за традиційну систему охолодження, яка дозволяє додатково охолоджувати внутрішню поверхню бандажів, рис.1.18.

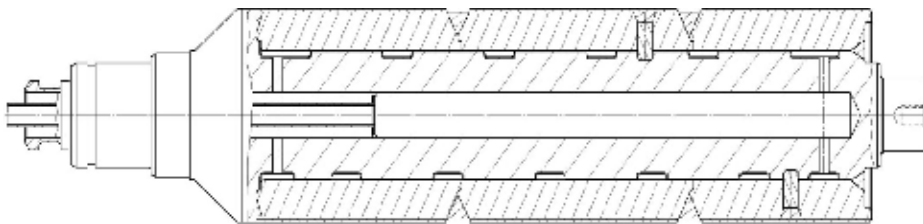


Рис. 1.18. Ролик секції МБЛЗ [52, 55]

Ремонт роликів з бандажами. Перевагою пропонованих ремонтних заходів [54] є повне використання всього активного шару бандажа та зниження імовірності його проковзування вздовж осі. В експлуатованому ролику механічно видаляли дефекти та підігрівали до 350°C , наплавляли поверхні бандажів матеріалом мартенситного класу з еквівалентним вмістом вуглецю 0,4-2,0, при відношенні еквівалентного вмісту до товщини наплавленого шару 0,08-2,2. Після цього виконували термічне оброблення - відпуск при температурі 450°C протягом 3 год., а після повного остигання – механічне оброблення наплавленого бандажу, рис.1.19. Кілька варіантів технології ремонту роликів подано у таблиці 1.12.

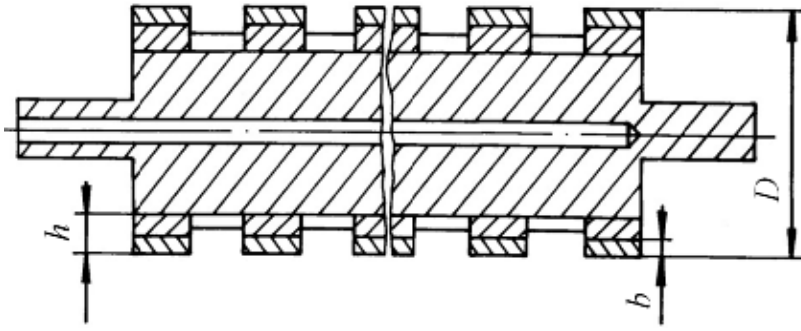


Рис. 1.19. Схема ролика із відновленими наплавленням бандажами: b - товщина бандажа, h - товщина наплавленого шару, D - діаметр ролика [54]

Таблиця 1.12

Технологічний опис режимів відновлення роликів МБЛЗ

№ з/п	Матеріал наплавлення	Еквівалентний вміст вуглецю, C_E , %	Товщина наплавленого шару, мм	Співвідношення, C_E / b	Стійкість, (кількість плавлень), шт.	Причина виходу з ладу
1.	СВ-08ГСМТ	0,27	4,5	0,06	820	П
2.	СВ-08ХГС	0,40	4,5	0,09	1300	З
3.	СВ-10ХІІНВМФ	1,53	4,5	0,34	1520	З
4.	СВ-18Х17Т	2,0	4,5	0,44	1480	З
5.	СВ-18Х25Т	2,9	4,5	0,64	930	З
6.	СВ-18ХХГС	0,40	6,0	0,067	760	П
7.	СВ-18ХХГС	0,40	5,0	0,08	1380	З
8.	СВ-10ХІІНВМФ	1,53	1,5	1,02	1520	З
6.	СВ-10Х17Т	2,0	0,9	2,2	1480	З
10.	СВ-10Х17Т	2,0	0,7	2,9	830	З

П – проковзування бандажа; З – зношення бандажа; Р – руйнування бандажа.

Помітно, що вміст вуглецю 0,4-2,0% в наплавленому шарі (див. варіанти 2-4) є оптимальним. Найкращим співвідношенням між еквівалентом вуглецю в наплавленому шарі і його товщиною вважається 0,08-2,2 (див. варіанти 7-9).

Одержано результат, який дозволяє прогнозувати граничний стан ролика за аналізом його пошкодженої поверхні оптико-цифровими методами. Використання тривимірної реконструкції тріщини, у свою чергу, дозволяє

інженерам не тільки краще розуміти стан ролика, але й зменшити інвазивність та ризик його непрогнозованого руйнування.

Пропонований підхід відрізняється від інших застосувань тим, що поверхні ролика є як об'єктом техніко-діагностичного дослідження так і певною мірою сенсором стану самої конструкції. Тому пропонований підхід є достатньо точним і дозволяє використовувати різні показники, зокрема поєднання оптико-цифрових та діагностичних методів. Разом з тим оцінювання контуру тріщини ґрунтується на припущенні, що вона є напівеліптичною, що свідчить про подальшу необхідність розроблення інструментів для надійного вимірювання контурів кривих фронту тріщини і внесення поправок у пропонований алгоритм.

Табл. 1.11. Методи дефектоскопії та можливість їх використання під час роботи та при зупинці МБЛЗ

Назва методу	Можливість використання без зупинки вир-ва	Можливість ідентифікації множинних дефектів
Оптичний (у т.ч. оптико-цифровий)	+	+
Капілярний	-	-
Акустичний	-	+
Магнітний	-	-
Струмовихровий (Електротехнічний)	-	-
Радіохвильовий (у т.ч. тепловий, та радіаційний)	-	Інтегральне оцінювання

Найбільш перспективним з них є метод оптико-цифрового контролю, який дозволяє ідентифікувати дефекти безконтактно та з великою точністю.

Відомі праці Марущака П.О., Коноваленка І.В. у яких досліджували сітку тріщин, яка утворилася впродовж експлуатації у поверхневому шарі

суцільнокованого ролика зі сталі 25X1M1Ф, виготовленого на ВАТ "ММК ім. Ілліча".

Формалізація завдань автоматизованої класифікації. Одним із завдань, що виникають під час топологічного обстеження поверхні пошкодженого ролика, є узагальнення, класифікація та накопичення інформації про поверхню.

Вихідною інформацією є багатовимірні дані, які описують складний об'єкт, що знаходиться в атрибутивному багатовимірному просторі ознак. Таким чином, однією з найважливіших задач є автоматизована класифікація багатомірних топологічних даних з точки зору їх подальшого статистичного опрацювання.

Розташування тріщин моделювали з допомогою орієнтаційних діаграм. Оригінальна прикладна програма дозволяє оцінити інтегральну направленість масиву поверхневих тріщин та відобразити їх розподіл на задалегідь сформовані групи із дискретністю 10° . Направленість тріщин аналізується в діапазоні від 0 до 180° . З метою отримання якісного зображення, уникнення появи відблисків і тіней, виконували фотографування поверхні при паралельному освітленні.

У більшості випадків тріщини відрізняються за кольором та інтенсивністю відбитого світла від основної непошкодженої поверхні (вони є темнішими).

Головні кроки алгоритму визначення положення тріщин на зображенні показано на блок-схемі (рис. 1.20). Отримані під час аналізу поверхні дані використовували для кількісного описування пошкоджуваності поверхні. Пошкодженість поверхні визначали за густиною тріщин d_c (мм^{-2}) згідно з формулою

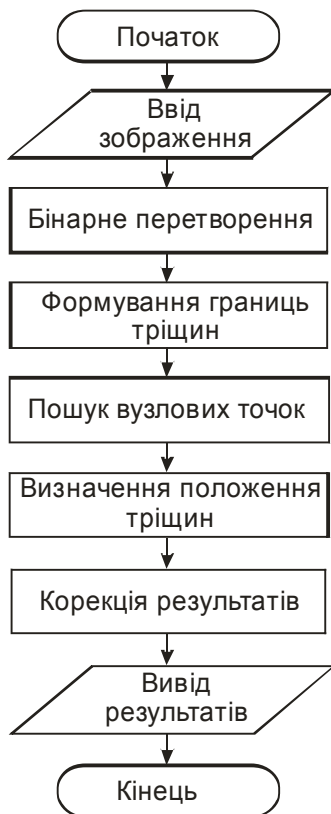
$$d_c = \frac{N_{surf}}{S_{surf}},$$

де S_{surf} – аналізована площа поверхні, мм^2 ; N_{surf} – кількість поверхневих тріщин на визначеній ділянці.

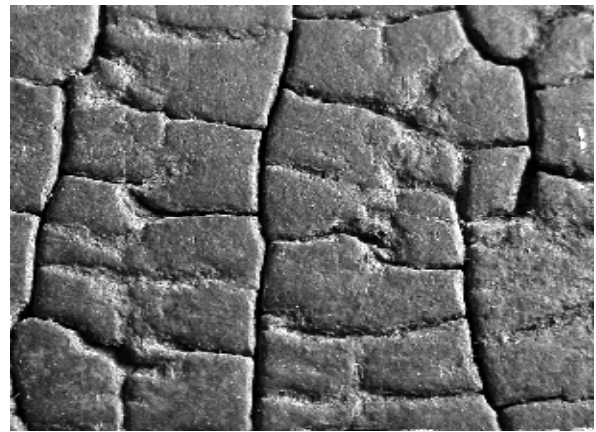
Визначали відносну частку розтріскування як відношення суми площ тріщин до площі дослідженої ділянки:

$$v = \frac{\sum_{i=0}^n f_i}{S_{surf}},$$

де $\sum_{i=0}^n f_i$ - сума площ тріщин термовтоми, ідентифікованих на аналізованому зображенні, мм^2 .

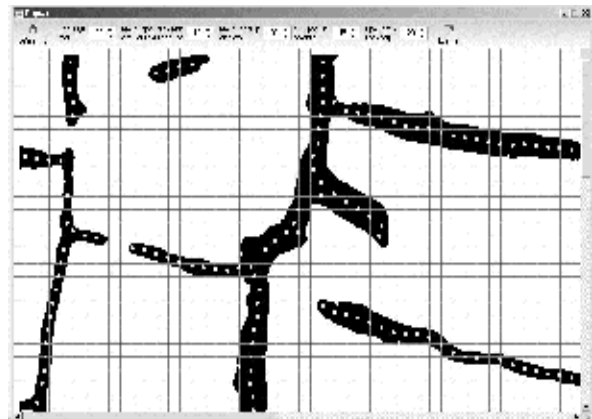


а



б

б



в

Рис. 1.20. Основні принципи автоматизованого аналізу розтріскування поверхні ролика МБЛЗ: а – алгоритм опрацювання графічних даних; б – фрагмент аналізованого зображення сітки тріщин; в – фрагмент накладання каркасної сітки із визначенням вузлових точок

2. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1. Вплив термоциклування на властивості теплостійких сталей роликів МБЛЗ

Досліджено вплив попереднього термоциклічного напрацювання та пластичного деформування розтягом на зміну параметрів мікроструктури сталей 15X13МФ і 25X1М1Ф, а також зв'язок між твердістю, мікротвердістю та густиною дислокацій і величиною пластичної деформації матеріалу. Для тривкого шару ролика використано сталь 25X1М1Ф, захисного шару – 15X13МФ.

Ролики машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) експлуатуються за циклічної зміни температури поверхневих шарів, внаслідок періодичного контакту зі слябом та примусового повітряно-водяного охолодження [12, 13].

Проте, кінетика термоциклічної пошкоджуваності є досить складною, на сьогодні відсутні дані пошкоджуваності та деградації властивостей матеріалів роликів МБЛЗ з урахуванням циклічного напрацювання матеріалу. Крім того, важливо дослідити закономірності деформування та руйнування матеріалів після термоциклічного напрацювання, на мезо- і макромасштабному рівнях при формуванні шийки за умов статичного розтягування.

Важливим аспектом є оцінка деградації властивостей матеріалу теплостійкої сталі 25X1М1Ф після термоциклічного напрацювання.

Роль поверхні протягом циклічного термоциклування визначається тим, що вона знаходиться в особливих енергетичних умовах, що викликає незворотні зміни властивостей і структури. Внаслідок відмінностей

теплофізичних властивостей складових мікроструктури (фериту, перліту, включень і т.д.) циклічна зміна температури створює напруження в субструктурі матеріалу, спричиняє вичерпування пластичності та формування розпорошених пошкоджень у вигляді зміцнених мікроділянок матеріалу. Інтенсивність накопичення пошкоджень визначається тривалістю напрацювання структурних перетворень в металі і режимом навантаження. Помітно, що величина мікротвердості поверхні термоцикльованого зразка монотонно зростає (рис. 2.1 б), що очевидно буде мати місце до ділянки “насичення”.

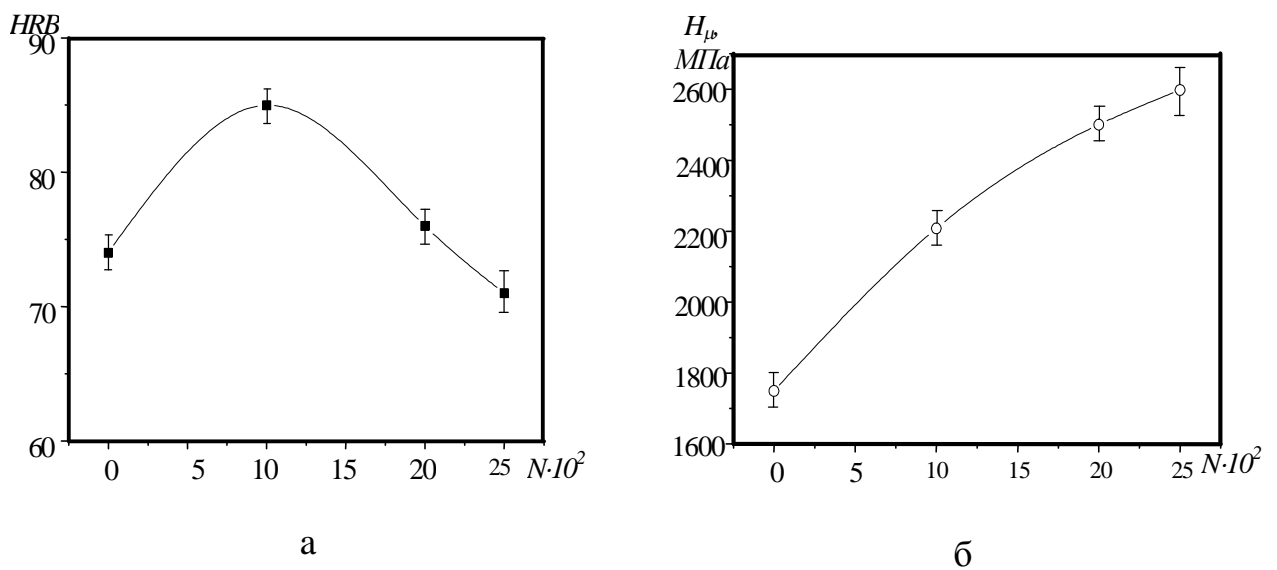


Рис. 2.1. Залежність твердості (а) та мікротвердості (б) сталі 25X1M1Ф від термоциклічного напрацювання

Водночас для твердості спостерігалися дещо інші закономірності: твердість за 10^3 циклів напрацювання зростає, після чого знижується, а за напрацювання $2,5 \cdot 10^3$ є дещо меншою за твердість вихідного матеріалу (рис. 2.1 а). Тобто в макрооб’ємах матеріалу відбувається знеміцнення матеріалу внаслідок впливу термонапружень, процесів термічного повороту та самовідпуску. Отже, процес пластичного деформування в умовах термоциклічного навантажування можна розглядати як багаторівневу систему, в якій пластичний плин розвивається самоузгоджено на мікро-, мезо- і макромасштабних рівнях. При цьому поверхневий шар полікристала

розглядається як автономний мезоскопічний структурний рівень деформації, в якому мезоскопічні механізми пластичної течії розвиваються значно легше, ніж в об'ємі матеріалу. Як видно з рис. 2.1 мікротвердість на поверхні зразків більша, ніж всередині незалежно від кількості циклів термоциклічного навантажування.

Механічні властивості поверхневих шарів значно відрізняються від властивостей в глибині матеріалу рис. 2.2. Основними причинами відмінності властивостей поверхневих шарів є відсутність зв'язку атомів на поверхні (поверхнева енергія), а також відсутність стисненості (обмеження) деформації при пластичному плинні незручно розташованих до навантаження мікроб'ємів матеріалу [14].

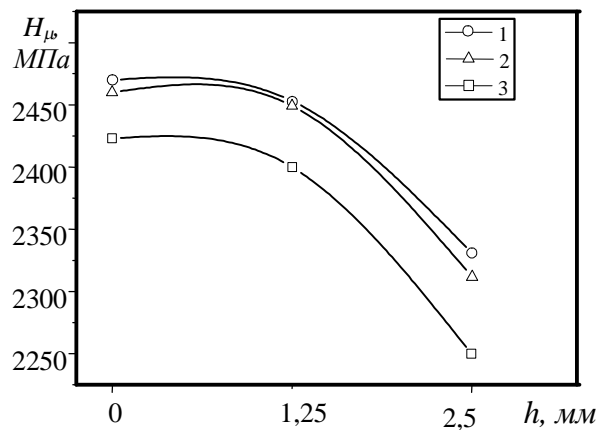


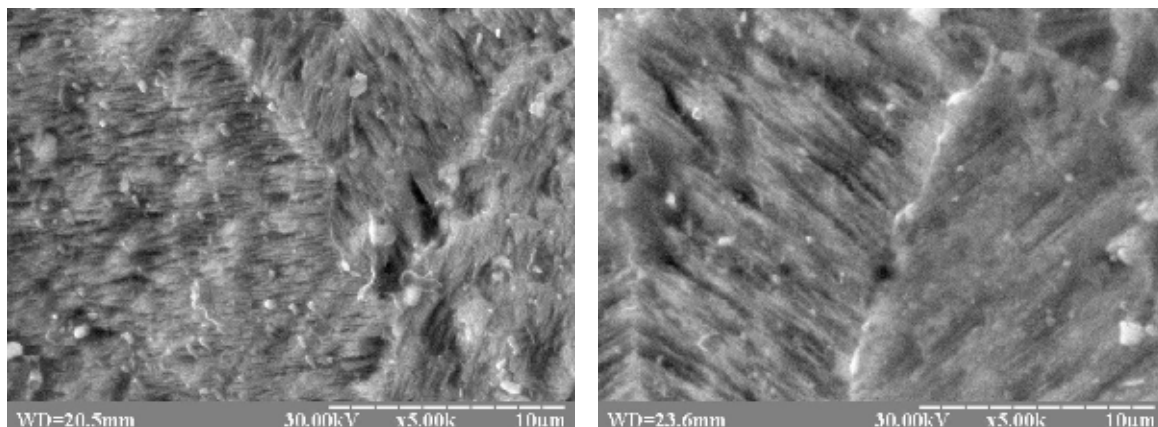
Рис. 2.2. Зміна мікротвердості сталі 25X1M1Ф по глибині зразка після термоциклічного напруження

Під час термоциклічного навантажування тіло зерна та границі зерен деформуються з різною інтенсивністю, процеси міжзеренної пластичності суттєво впливають на кінетику їх наклепу та розвиток мікротріщин. Розвиток мезоскопічних механізмів деформування проявляється в поверхневих шарах полікристалів в умовах циклічного навантажування нижче макromeжі плинності. Особливості поверхневого шару обумовлюють розвиток в ньому пластичного плинну, за напружень нижчих межі плинності.

Пружно-деформований підшар «навантажує» пластично деформований поверхневий шар за схемою циклічного стиснення-розтягання. На поверхні зразків після 10^3 термічних циклів виявлено прямолінійні розорієнтовані смуги ковзання рис. 2.3 а. Із зростанням кількості циклів напрацювання виникає система слідів ковзання, що перетинає утворену раніше, це свідчить про пластичне деформування послідовно або одночасно за кількома кристалографічними площинами.

Із зростанням кількості циклів термоциклічного напрацювання спостерігали поворот окремих зерен, що помітно за певним викривленням смуг ковзання рис. 2.3 б.

На границях зерен смуги ковзання гальмуються при переході в суміжне зерно (за значної розорієнтації ґратки) або викривляються та продовжуються в сусідньому зерні (за наявності малокутових границь). Локальна неоднорідність пластичного деформування окремих ділянок закріплюється в них під час термоциклічного навантажування, а джерела підвищеної та пониженої локальної деформації не перерозподіляються [14].



а

б

Рис. 2.3. Мікроструктура сталі 25X1M1Ф після термоциклічного напрацювання: а – 1000 теплозмін; б – 2500 теплозмін.

Зміна густини пошкоджень в металі, супроводжується зміною їх геометрії, розмірів та просторової орієнтації, що обумовлює зміну

мікротвердості поверхневих шарів. Статичну тріщиностійкість сталі 25Х1М1Ф визначали за методом Лебедева- Чаусова (методом повних діаграм деформування), рис. 2.4.

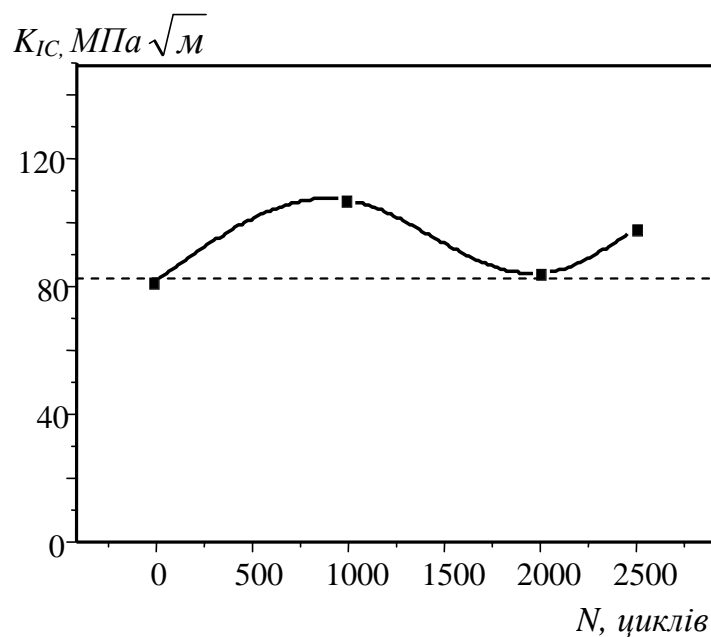


Рис. 2.4. Вплив ТЦН на характеристики тріщиностійкості K_{Ic} сталі 25Х1М1Ф

Термоциклування викликає незначне зростання статичної тріщиностійкості сталі 25Х1М1Ф, визначеної за методом повних діаграм [16], та змінює кінетику зародження та коалесценції пор.

3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Новий алгоритм дефектометричного аналізу тріщин термовтоми з урахуванням стану поверхні ролика МБЛЗ

Тріщини є важливим фактором, який віддзеркалює стан матеріалу. Аналіз поверхні на предмет тріщин дозволяє оцінити не тільки можливість подальшого використання досліджуваного об'єкта, але й може бути вагомим показником безпеки системи. Часто для контролю стану поверхні використовують людський зір, що вносить у дослідження суб'єктивний фактор та не дає кількісної оцінки отриманого результату [1].

Для виявлення тріщин на поверхні матеріалу розроблено ряд методик, оснований на аналізі зображення поверхні [1-7 та інші]. При цьому використовують поєднання різних відомих алгоритмів для аналізу зображення (зокрема, аналіз гістограми зображення, граничне перетворення (thresholding), фільтрування, вейвлети, аналіз текстур). Більшість з цих методик направлена на локалізацію зон із тріщинами, але часто важливим є не просто виявити наявність тріщин, але й кількісно оцінити їх геометричні параметри: довжину, нахил тощо. Для цього на зображенні з тріщинами виділяють каркас тріщин у виді ланцюжка пов'язаних пікселів, після чого обчислюють геометричні параметри тріщин [2, 7, 8].

Практичне використання описаного підходу для розпізнавання тріщин на реальних зображеннях вимагає попереднього налаштування алгоритму та окремого підбору його параметрів для різних видів зображень. Зокрема, зміна освітленості поверхні, її яскравості чи кольору вимагатиме підбору інших значень параметрів алгоритму. Такий підхід робить алгоритм жорстко орієнтованим на зображення з певними характеристиками. При переході до аналізу зображень іншого виду такий алгоритм вимагає переналаштування. Метою роботи є розробка адаптивного алгоритму, який менш залежний від особливостей зображення.

Базовий алгоритм

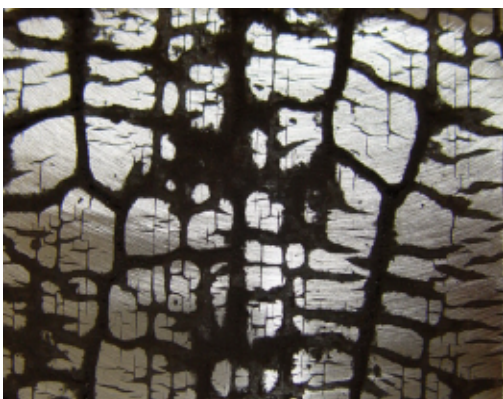
На рис. 3.1 приведено зображення тріщин, які утворилися на поверхні ролика машини безперебійного лиття заготовок. Зображення мають різні середні значення яскравості фону та характеризуються нерівномірною освітленістю різних зон поверхні. Алгоритм з жорстко заданими параметрами при аналізі такої множини зображень вимагатиме попереднього підбору параметрів для різних зображень. Крім цього, при зміні параметрів алгоритму навіть для одного і того ж зображення отримуватиметься дещо різний результат.



а



б



в



г

Рис. 3.1. Зображення з тріщинами на поверхні ролика машини безперебійного лиття заготовок з різною яскравістю та освітленістю

У попередніх роботах [7, 8, 9] нами розроблено алгоритм для ідентифікації на зображенні тріщин та обчислення їх геометричних характеристик. Алгоритм складається зі стадії виявлення тріщин та обчислювальної стадії. Вхідним для алгоритму є кольорове або сіре (grayscale) зображення поверхні з тріщинами. Перша стадія призначена для обробки зображення. Її кінцева мета – отримати каркас тріщини, який представляє собою сукупність ліній з одиничною товщиною, що проходять вздовж тріщини від її початку до кінця. Під час другої (обчислювальної) стадії на основі отриманого каркасу тріщин розраховуються їх кількісні параметри: довжина, нахил, кількість.

Для отримання протягом першої стадії алгоритму каркасу, який коректно відображує наявні на поверхні тріщини, важливо правильно підібрати ряд параметрів, що використовуються для обробки початкового зображення та локалізації пошкоджених зон.

Перша стадія алгоритму містить операції фільтрування, граничного перетворення та скелетизації. Фільтрування за допомогою Гаусівського фільтру дозволяє згладити переходи між різними ділянками зображення і зменшити фрагментованість розпізнаних об'єктів – тріщин. Під час фільтрування важливим параметром є розмір ядра фільтра, оскільки він впливає на процеси "відсіювання" фонових пікселів та об'єднання відокремлених фрагментів об'єкта розпізнавання. Тому зміна розміру ядра фільтра помітно впливає на кінцевий результат розпізнавання.

Після фільтрування проводили сегментацію, виділяючи на зображенні пікселі, які відповідають пошкодженим зонам. Для сегментації використали адаптивне граничне перетворення Бредлі на основі інтегрального зображення (Bradley adaptive thresholding using the integral image) [10]. Кожен піксель вважається приналежним об'єкту, якщо його яскравість на заданий відсоток менша за середню яскравість оточуючих пікселів у вікні заданого розміру. Вибір параметру розподілу пікселів на фоні та належні об'єкту суттєво впливає на результат розпізнавання. Неправильний підбір

приведе до того, що частина об'єктів розпізнавання буде прийнята за фон, або будуть "розпізнані" об'єкти, які насправді є фоном. Зокрема, зміна границі фону граничного перетворення спричиняє зміщення краю знайдених на зображенні об'єктів. Внаслідок цього можуть змінюватися геометричні характеристики тріщин, які обчислені в результаті роботи алгоритму.

Отримане в результаті вказаних перетворень зображення з двома сегментами (об'єкти та фон) містить інформацію про форму та площу тріщин, проте не може безпосередньо використовуватись для визначення таких кількісних параметрів, як кількість тріщин, їх довжина, нахил тощо.

Для виділення сукупності точок, якими можна описувати структуру сітки пошкоджень, проводиться скелетизація [8]. Ця операція дає змогу виділити каркасні лінії тріщин шляхом виявлення на зображенні серединних ліній товщиною один піксель. Каркасні лінії є кінцевим результатом першої стадії алгоритму. Саме вони використовуються для подальшого розрахунку геометричних характеристик тріщини.

На отриманих каркасних лініях виділяють сукупність опорних точок, які є вхідним набором даних для подальших розрахунків. Використовуючи сукупність опорних точок, обчислюють довжину дефектів поверхні, їх нахил відносно координатних осей зображення, розраховують положення та кількість квазілінійних фрагментів. Ці дані використовують для аналізу стану поверхні та дослідження закономірностей її руйнування [7,9].

В межах цієї роботи називатимемо описаний алгоритм пошуку на зображенні каркасних ліній сітки тріщин базовим алгоритмом. На координати точок каркасної лінії впливають різні параметри базового алгоритму. Встановлено, що найбільший вплив здійснює зміна розміру ядра (kernel size) фільтра та границі фону (pixel brightness limit) під час сегментації [8]. Підбір цих параметрів має суттєвий вплив на результат розпізнавання каркасу тріщин.

Зазвичай при використанні подібних алгоритмів проводять попередній підбір їх параметрів, проводячи обробку зображень певного виду та визначаючи оптимальне значення параметрів. В подальшому для аналізу інших зображень цього виду використовують знайдені параметри.

У даній роботі запропоновано вдосконалений алгоритм пошуку на зображенні криволінійних витягнутих об'єктів (наприклад, тріщин), який:

- не потребує попереднього підбору параметрів для аналізу самого зображення;
- дозволяє виявити найвірогідніші для вибраного способу обробки зображень зони зображення з лінійними витягнутими об'єктами;
- дозволяє отримати інформацію про можливі відхилення отриманих результатів.

Алгоритм передбачає розпізнавання зображення при достатньо великій підмножині наборів значень параметрів базового алгоритму. Результат такого множинного розпізнавання розглядається як нечітка множина з функцією приналежності кожного її елемента (пікселя), яка дорівнює кількості наборів параметрів, що привели до розпізнавання цього елемента приналежним каркасній лінії тріщини.

Опис вдосконаленого алгоритму пошуку тріщин

Нехай I – це множина точок зображення, яка є підмножиною двовимірного простору \mathbb{N}^2 ; а $i(x, y)$ – яскравість пікселя з координатами (x, y) . Таким чином, $I = \{ i(x, y) \mid x = \overline{1, Iw}, y = \overline{1, Ih} \}$, де Iw, Ih – відповідно ширина та висота зображення I . Для 8-бітного зображення у градаціях сірого кольору $i(x, y) \in [0...255]$.

Означимо множину змінних параметрів алгоритму, які суттєво впливають на його роботу, як $P_A = \{ P_1, P_2 \dots P_\eta \}$, де η – кількість параметрів. Наприклад, P_1 може відповідати параметру "розмір ядра фільтру", P_2 – параметру "межа граничного перетворення" і т. д. Значення

кожного з параметрів π_i може змінюватися у діапазоні $[\pi_{i_{min}}, \pi_{i_{max}}]$ з кроком $\delta\pi_i$. Тоді $P = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ – конкретний набір значень параметрів, при яких отримана каркасна лінія.

Означимо також множину всіх точок зображення, які належать каркасним лініям при даному наборі значень параметрів алгоритму [11]:

$$F(P) = \{(x, y) \mid \chi_F(x, y, P) = 1\},$$

$$\chi_F(x, y, P) = \begin{cases} 1, & \forall i(x, y) \in F(P) \\ 0, & \forall i(x, y) \notin F(P) \end{cases}, \quad (3.1)$$

де χ_F – характеристична функція, яка дорівнює 1, якщо піксель (x, y) належить каркасній лінії, і дорівнює 0 в протилежному випадку.

Кожному набору значень параметрів алгоритму $P_k, k = \overline{1, K}$ (де K – кількість наборів значень) відповідає своя множина точок $F(P_k)$. Тоді функція, яка підраховуватиме кількість попадань точки (x, y) у каркасну лінію для всіх досліджених K наборів значень, дорівнюватиме:

$$S(x, y) = \sum_{k=1}^K \chi_F(x, y, P_k). \quad (3.2)$$

Узагальнена блок-схема розрахунку акумуляторної функції $S(x, y)$ приведена на рис. 3.2. Накопичення значень функції $S(x, y)$ відбувається, доки не буде перебрано значення кожного зі змінних параметрів π_i (у нашому випадку це розмір ядра гаусівського фільтра та межа граничного перетворення) в діапазоні $[\pi_{i_{min}}, \pi_{i_{max}}]$ з кроком $\delta\pi_i$. На практиці перебирання можливих наборів значень параметрів виконували за допомогою вкладених циклів, коли цикл для перебирання значень певного

параметра знаходиться в межах циклу перебирання значень іншого параметра.

Розрахункова частина останнього вкладеного циклу містить звертання до базового алгоритму для обчислення положення каркасних ліній сітки тріщин та поновлення значень акумуляторної функції $S(x, y)$. Зауважимо, що для розпізнавання каркасу сітки тріщин в ролі базового алгоритму може бути використано не тільки раніше описаний алгоритм [7, 8, 9], але й будь-який інший, результатом якого є набір точок, що описують каркас.

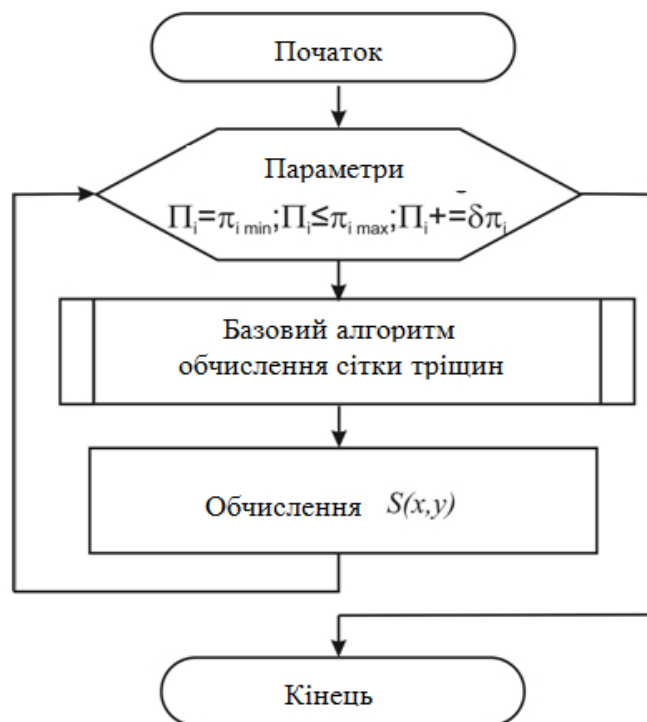


Рис. 3.2. Блок-схема аналізу зображення для різних наборів значень параметрів

Функцію $S(x, y)$ можна подати як зображення у градаціях сірого кольору (інтенсивність пікселя представлятиме значення функції у відповідній точці). Тоді світлі ділянки будуть відповідати частинам зображення, на яких каркасна лінія тріщин розпізнавалась при більшій

кількості різних наборів значень параметрів $P = \{\pi_1, \pi_2 \dots \pi_n\}$ (рис. 3).
 Ширина полос на зображенні функції $S(x, y)$ характеризує розкид обчислених значень каркасної лінії в цій зоні зображення.

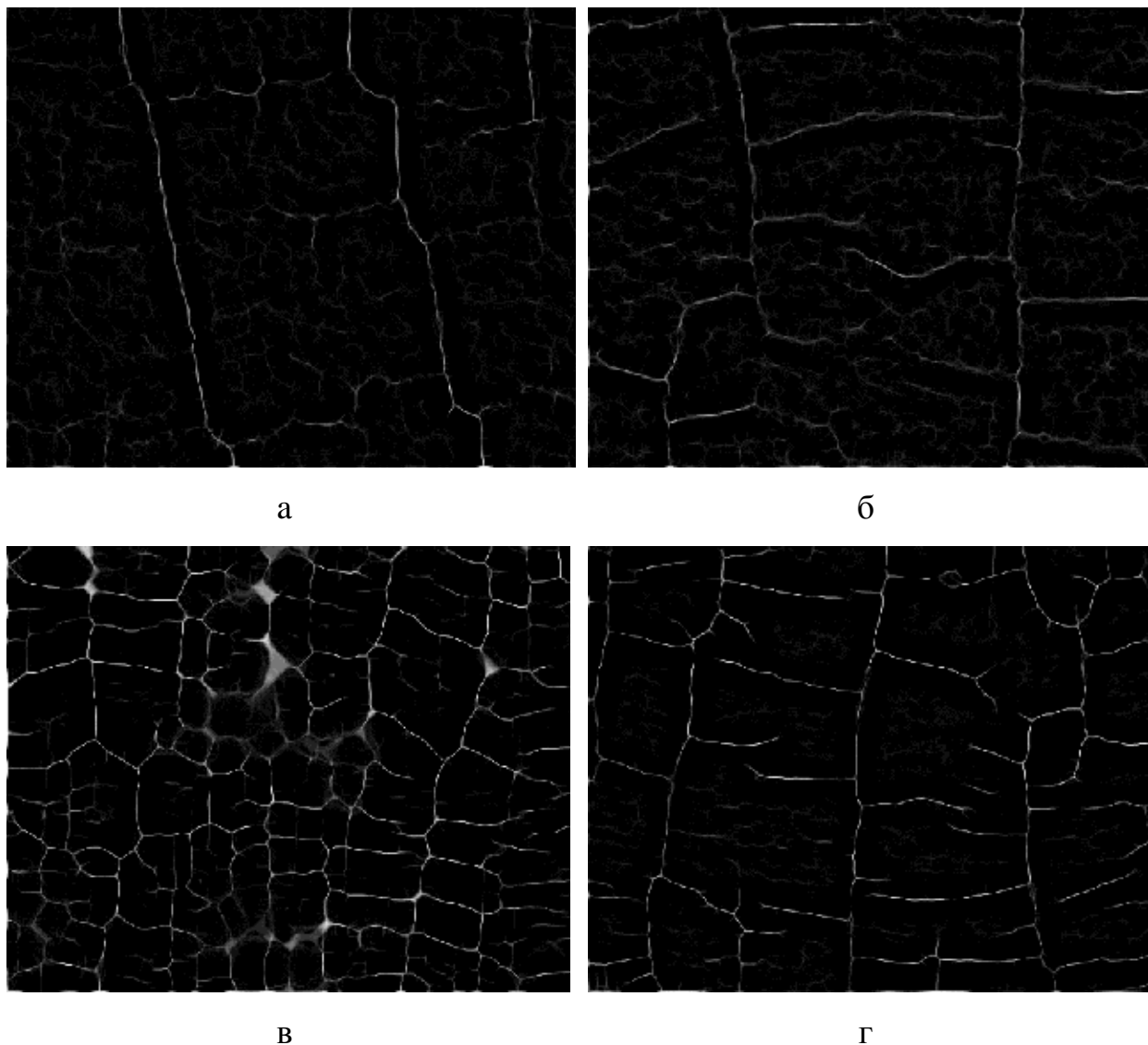


Рис. 3.3. Графічне подання функції $S(x, y)$ для зображень на рис. 3.1

Якщо значення функції $S(x, y)$ нормалізувати, отримаємо нечітку множину (fuzzy set) $\tilde{C} = \{(x, y) \mid \mu_{\tilde{C}}(x, y)\}$ з функцією приналежності (membership function) $\mu_{\tilde{C}}(x, y)$:

$$\mu_{\tilde{C}}(x, y) = \frac{S(x, y)}{\sup(S)}. \quad (3.3)$$

Функція приналежності $\mu_{\tilde{C}}(x, y)$ визначає імовірність попадання точки (x, y) в каркасну лінію для дослідженої сукупності значень параметрів алгоритму. Тоді точки, які належать каркасним лініям з певною імовірністю α , містить α -зріз множини \tilde{C} :

$$\tilde{C}(\alpha) = \{(x, y) \mid \mu_{\tilde{C}}(x, y) \geq \alpha\}, \quad \alpha \in [0, 1]. \quad (3.4)$$

Нечітка множина \tilde{C} містить деталізовану інформацію про ступінь приналежності її точок каркасним лініям, які розраховані при всіх можливих наборах значень параметрів алгоритму $\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$, і представляє "нечітку каркасну лінію" пошкоджень.

Результати, подані на рис. 3.3, отримані при послідовному переборі параметрів "розмір ядра фільтру" та "межа граничного перетворення". При цьому значення параметрів далеко виходили за оптимальний діапазон, так що алгоритмом "розглядались" як випадки, при яких на зображенні взагалі нічого не було розпізнано, так і випадки, при яких більшість площі зображення хибно розпізнавалась як пошкодження.

Дослідження поведінки запропонованого алгоритму на множині зображень показали, що хибно розпізнані зони зображення (при неоптимальному наборі значень параметрів) мають "блукаючий" характер і не спричиняють пікових значень функції $S(x, y)$. Їх наявність приводить до появи розмитих зон з відносно низьким значенням. У той же час зони з тріщинами стійко розпізнаються при різних значеннях змінних параметрів і формують пікові значення функції $S(x, y)$. Саме це створює передумови для

можливості "автофокусування" алгоритму на тріщинах без його попереднього налаштування.

Таким чином, запропонований алгоритм дозволяє не тільки розпізнати зони пошкоджень на зображеннях різного виду без попереднього підбору параметрів базового алгоритму, але й показати ймовірність приналежності пікселя каркасу тріщини для вибраного базового алгоритму.

Обговорення запропонованого підходу

Запропонований алгоритм потребує значно більше обчислювальних потужностей, ніж використаний базовий алгоритм. Порівняємо обчислювальні витрати (computational cost) базового та пропонованого алгоритму. Для цього за одиницю обчислень прийmemo A_{B0} – обчислення базового алгоритму, які припадають на один піксель зображення. Тоді обчислювальні витрати базового алгоритму дорівнюють:

$$A_B = A_{B0} I_w I_h. \quad (3.5)$$

Обчислювальні витрати пропонованого алгоритму такі:

$$A = A_B \prod_{i=1}^{\eta} N_{\Pi_i}, \quad (3.6)$$

де N_{Π_i} – кількість значень параметра Π_i , які перебирає алгоритм,

$$N_{\Pi_i} = \frac{\pi_{imax} - \pi_{imin}}{\delta\pi_i} + 1.$$

На рис. 3.4 показано залежність обчислювальних витрат від кількості значень, на які розбивається діапазон кожного параметра, при двох змінних параметрах алгоритму ($\eta = 2$).

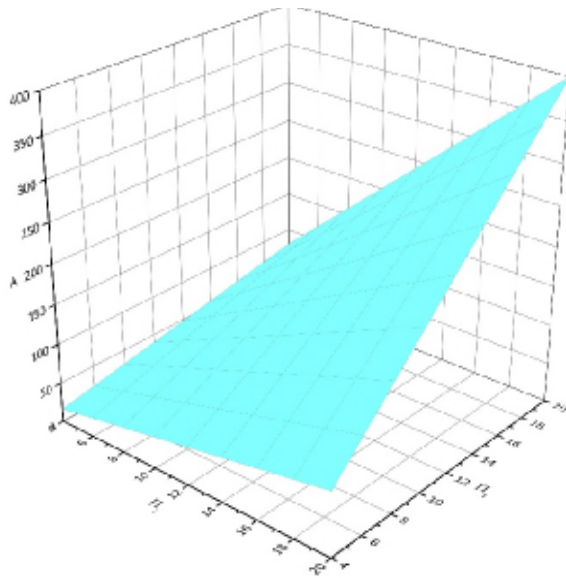


Рис. 3.4. Залежність обчислювальних витрат від кількості наборів значень параметрів для $\eta = 2$

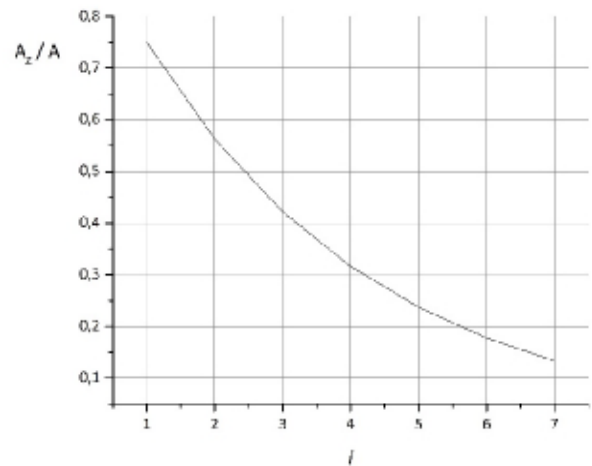


Рис. 3.5. Ступінь зменшення обчислювальних витрат для піраміди зображень, коли лінійний розмір кожного наступного зображення становить 75% від попереднього

Щоб зменшити обчислювальні витрати на застосування множинного розпізнавання, використовували зменшення початкового зображення. Для зображення, лінійні розміри якого отримуються домножуванням на масштабуючий коефіцієнт $K_m \in (0, 1)$, обчислювальні витрати становитимуть

$$A_z = K_m^2 A = K_m^2 A_B \prod_{i=1}^{\eta} N_{\Pi i}, \quad (3.7)$$

Якщо зображення зменшити, то можна досягнути суттєвого зменшення обчислювальних витрат. Після обробки такого зображення та розрахунку нечіткої множини \tilde{C} отриманий результат слід масштабувати до початкових розмірів. При збільшенні використовували бікубічну інтерполяцію (bicubic interpolation).

Для оцінювання переваг, які дасть зменшення зображення, формували піраміду зображень так, що лінійний розмір кожного наступного зображення становить 75% від попереднього. На рис. 3.5 приведено графік, який демонструє ступінь зменшення обчислювальних витрат для кожного наступного рівня піраміди i порівняно з початковими витратами алгоритму (3.6). Ступінь зменшення початкового зображення має бути таким, щоб не втратити інформацію про можливі об'єкти тріщин. Тому допустима величина масштабування залежить від розмірів об'єкта, який очікують знайти на зображенні.

В загальному випадку лінійний розмір об'єкта зображення на n -ному рівні піраміди зображень буде

$$L_k = L_0 K_p^n, \quad (3.8)$$

де L_0 – лінійний розмір на початковому зображенні; K_p – коефіцієнт масштабування кожного наступного рівня піраміди, приймали $K_p = 0.75$. Таким чином за відомим розміром очікуваних об'єктів розпізнавання можна оцінити рівень піраміди зображень, який придатний для їх розпізнавання.

Об'єкти тріщин на зображеннях з рис. 3.1 мають розмір, порівнянний з розмірами самого зображення. При їх обробці з початкового зображення розміром 1967×1562 пікселів формували зменшене зображення 6 рівня піраміди розміром 350×278 пікселів. Таке зменшення забезпечувало хорошу швидкодію і дозволяло розпізнати всі головні об'єкти тріщин.

4. НАУКОВА ЧАСТИНА

4.1. Розроблення нової методики оцінювання терміну експлуатації роликів МБЛЗ з урахуванням впливу експлуатаційних факторів

Під час експлуатації ролики машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) і обладнання для гарячого вальцювання зазнають дії циклічного термомеханічного навантаження. Це приводить до появи і росту множинних поверхневих тріщин [11, 12, 19]. Це вимагає урахування пошкоджуваності матеріалу в околі вістря тріщини в умовах сумісної дії тиску пари, температури і корозійно-агресивних та наводнювальних середовищ.

Довговічність ролика загалом визначається ростом поверхневих тріщин за термовтоми до критичного розміру. Тому його живучість залежить від властивостей матеріалу ролика, циклічного механічного навантаження і температурних змін, швидкості прокатки та низки інших факторів. Вплив температури, частоти і форми циклу навантаження на швидкість росту втомних тріщин (РВТ) матеріалу ролика МБЛЗ досліджено у праці [18].

Швидкість РВТ у сталі 15Х13М майже не залежить від температури (20 °С і 600 °С), проте при 600 °С ефект частоти навантаження (0,01 Гц і 0,1 Гц) істотно залежить від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK . Підвищення частоти навантаження від 0,01 до 0,1 Гц збільшує швидкість РВТ при $\Delta K < 24 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ і зменшує більш ніж у 2 рази при $\Delta K > 28 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Довговічність елементів конструкцій із поверхневими дефектами значною мірою залежить від форми початкового дефекту [4, 9, 10, 20].

Зміну форми фронту поверхневих втомних тріщин у циліндричних зразках із сталі 30NiCrMoV12 осей колісних пар досліджено за обертового згину у праці [5]. Виявлено, що при зміні відносної глибини поверхневої тріщини на порядок (від 0,025 до 0,25) відношення півосей еліпса (глибини

тріщини до її довжини на поверхні) зменшується від 0,9 до 0,6. Поверхневі тріщини в осях колісних пар є переважно півеліптичними [4, 9, 20].

У праці [10] показано, що незалежно від схеми навантаження (реверсний чи обертовий згин) і початкового виду дефекту (півеліптичний чи півкруглий) за відносної глибини тріщини більше 0,16 форма фронту тріщини описується єдиною залежністю від відносної глибини.

Досліджено топологію поверхневих тріщин у суцільнокованому ролику МБЛЗ із сталі 25Х1М1Ф, знятому із експлуатації після 4500 плавок [1]. Тріщини у площині, перпендикулярній до осі ролика, у 1,5...1,8 рази глибші за осьові та мають коефіцієнт форми (співвідношення між глибиною та довжиною) $\frac{a_p}{2C_p} \approx 2,5$ для тріщин глибиною до 6 мм і $\frac{a_p}{2C_p} \approx 4$ для тріщин глибиною більше 6 мм.

Розтріскування вальцювальних роликів та інших елементів вальцювальних конструкцій за термовтоми змодельовано, наприклад, у [13, 15]. Однак, детерміністичні підходи не враховують розкид механічних властивостей, тому, використовуючи їх, не можливо оцінити ймовірність досягнення критичного розміру тріщини як функції навантаження і отримати функції розподілу залишкової довговічності елемента конструкції. На противагу їм, статистичні та ймовірнісні методи механіки руйнування дозволяють отримати функції розподілу залишкової довговічності або критичного розміру тріщини [6, 7]. Такі підходи до моделювання РВТ в елементах конструкцій побудовані на аналізі напружено-деформованого стану і враховують розкид характеристик циклічної тріщиностійкості для певних умов експлуатації [3, 14], який описується відомими законами розподілу. Для опису параметрів рівняння Періса переважно застосовують нормальний та логарифмічно-нормальний розподіли [8].

У статті розвинуто методологію та оцінено залишкову довговічність ролика МБЛЗ залежно від форми початкового дефекту з урахуванням статистичного розкиду характеристик циклічної тріщиностійкості.

Моделювання росту поверхневої втомної тріщини і оцінка залишкової довговічності. Моделювали ріст поверхневої втомної тріщини у ролик МБЛЗ, виготовленому із сталі 25Х1М1Ф [17].

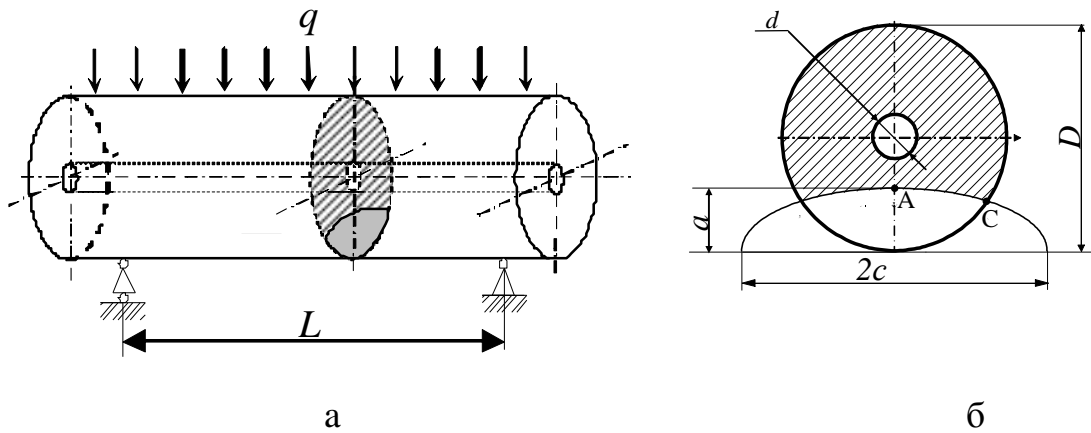


Рис. 4.1. Ролик МБЛЗ: а) схема навантажування, б) геометричні параметри перерізу із півеліптичною тріщиною [17]

Ролик є порожнинним товстостінним циліндром із зовнішнім діаметром $D = 320$ мм і охолоджувальним отвором діаметром $d = 80$ мм (рис. 4.1). Відстань між опорами $L = 2000$ мм. Розглядали півеліптичну втомну тріщину у центральному перерізі ролика, перпендикулярну до його осі (рис. 4.1 б). Залишкову довговічність ролика МБЛЗ оцінено за наступних припущень: початкова глибина тріщини $a_0 = 15$ мм; коефіцієнт форми початкової тріщини $a_0 / c_0 = 1/16; 1/8; 1/4; 1/2$. Для спрощення моделі прийняли, що температурні коливання впродовж одного оберту ролику є незначними. Температура у серединному перерізі ролика рівна 375 °С, на поверхні ролика – 600 °С [17].

Напруження у ролику спричинене тиском рідкого металу і вагою сляба. Ріст півеліптичної втомної тріщини моделювали за асиметрії циклу навантаження $R = K_{\min} / K_{\max} = 0$, де K_{\min} , K_{\max} – мінімальний та максимальний КІН, відповідно. Розмах напружень $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 257$ МПа, де σ_{\min} та σ_{\max} – мінімальне та максимальне напруження циклу навантаження.

КІН у найглибшій точці А (рис. 4.1 б) і у точці с на поверхні півеліптичної тріщини у порожнинному циліндрі обчислено за даними Carpinteri [5]. Розмах КІН у точках А та с розраховували за формулою

$$\Delta K_{A(c)} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} Y_{A(c)},$$

де $Y_{A(c)}$ – поправкова функція відносної глибини тріщини $\zeta = a / D$ і форми фронту $\lambda = a / c$.

Швидкість РВТ da / dN у сталі 25Х1М1Ф визначали за одновісного розтягу компактних зразків товщиною 5 мм [17]. Механічні властивості сталі за температури 375 °С наступні [17]: межа текучості $\sigma_{0,2} = 670$ МПа і межа міцності $\sigma_B = 690$ МПа. Експериментальні залежності швидкості РВТ у сталі 25Х1М1Ф [17] апроксимовано рівнянням Періса:

$$da / dN = C (\Delta K)^m.$$

За температури 600 °С при $R = 0$ і частоті навантаження $f = 1$ Гц $C = 6,6 \cdot 10^{-9}$ мм/цикл/(МПа $\sqrt{м}$) m , $m = 3,26$ [17].

Параметр C для сталі 25Х1М1Ф розглядали як нормально розподілену випадкову змінну із параметрами розподілу: середнє $\mu = 7,45 \cdot 10^{-9}$ та середньоквадратичне відхилення $s = 6,09 \cdot 10^{-10}$ [17] згідно підходу, запропонованого у праці [16]. Припущення щодо невідомого середнього та стандартного відхилення було перевірено та підтверджено за критерієм Андерсона-Дарлінга [2]. Змодельовано ріст втомних тріщин у ролику МБЛЗ із півеліптичною тріщиною при температурі 600 °С. Визначали медіанну довговічність N_f досягнення тріщини глибини $a_f = 45, 60, 70$ мм.

На рис. 4.2 зображено залежність медіанної довговічності N_f від форми початкового дефекту для різних значень a_f . Виявлено, що із зростанням

коефіцієнта форми a_0 / c_0 початкової півеліптичної втомної тріщини глибиною $a_0 = 15$ мм медіанна втомна довговічність ролика МБЛЗ зростає. Приміром, із зростанням коефіцієнта форми a_0 / c_0 від 0,0625 до 0,5 довговічність збільшується приблизно у 2 рази.

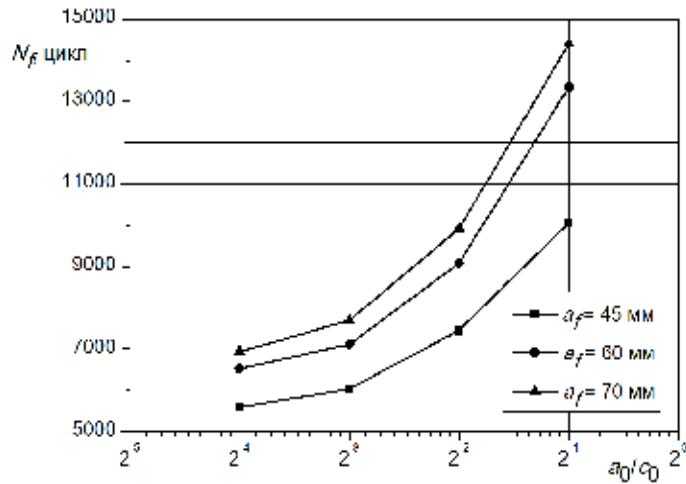
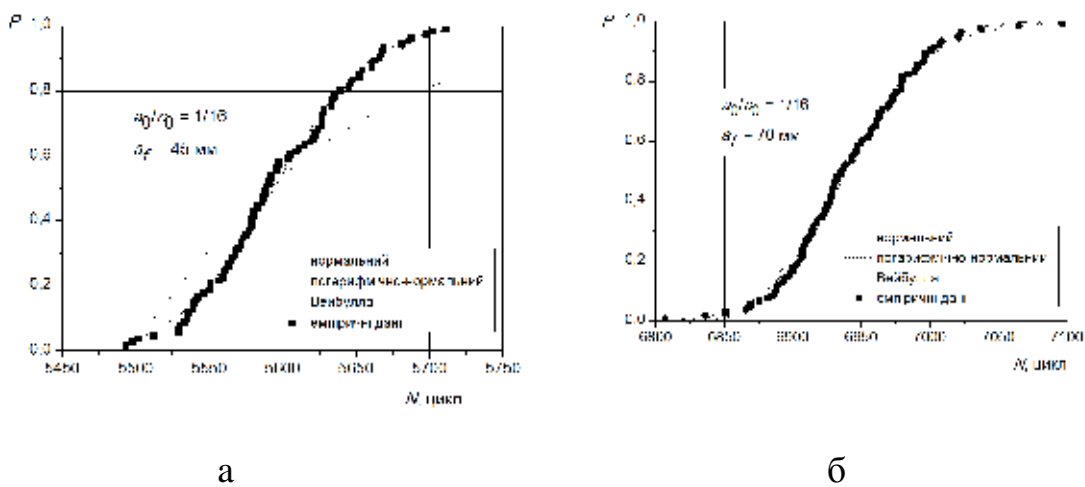


Рис. 4.2. Залежність медіанної довговічності N_f при температурі 600 °С залежно від форми початкового дефекту

На рису. 4.3 зображено результати ймовірнісного моделювання росту втомної тріщини – розподіли втомної довговічності (кількості циклів навантаження) досягнення тріщиною глибини $a_f = 45$ мм та 70 мм при початковій формі дефекту $a_0 / c_0 = 1/16; 1/2$.



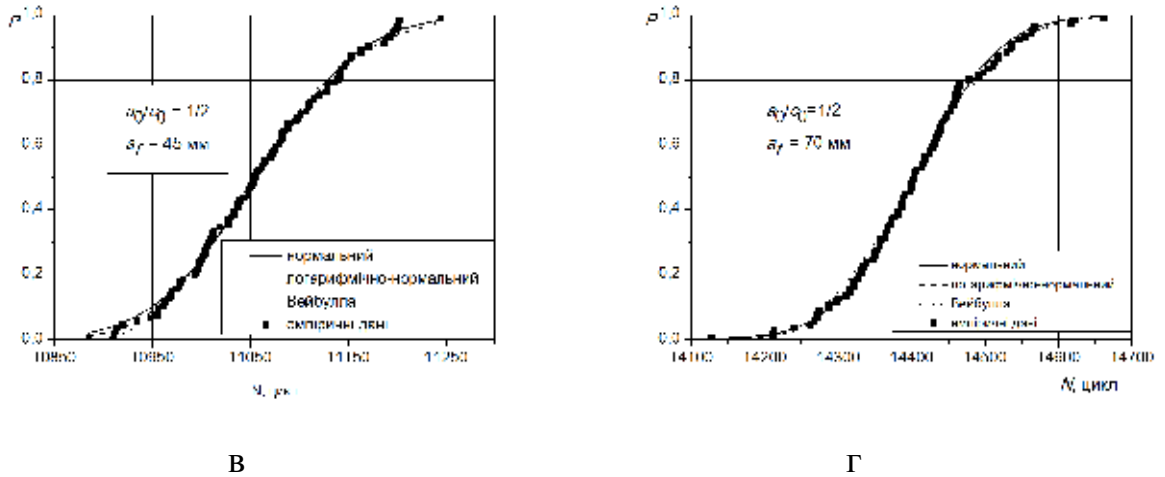


Рис. 4.3. Розподіли втомної довговічності N для різної початкової форми тріщини

У всіх змодельованих випадках розподіли кінцевої довговічності узгоджуються із критерієм Андерсона-Дарлінга для нормального та логарифмічно-нормального розподілів, тоді як розподіл Вейбулла не завжди підходить для опису даних втомної довговічності. На рисунку 4.4 зображено фронти поверхневих тріщин під час їх поширення. Ліва тріщина мала початковий коефіцієнт форми $a_0 / c_0 = 1 / 2$, а права – $1 / 16$.

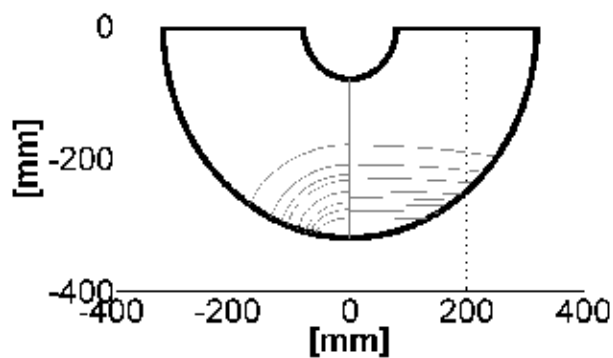


Рис. 4.6. Геометрія фронту тріщини із збільшенням її глибини. $a_0 = 15$ мм. Зліва – $a_0 / c_0 = 1 / 2$, справа – $a_0 / c_0 = 1 / 16$

На рис. 4.5 зображено залежність коефіцієнта форми півеліптичної втомної тріщини a/c від відношення a/t , де $t = (D - d) / 2$ – товщина стінки ролика. Розрахунок здійснено для $a_0 / c_0 = 1 / 16; 1 / 2$.

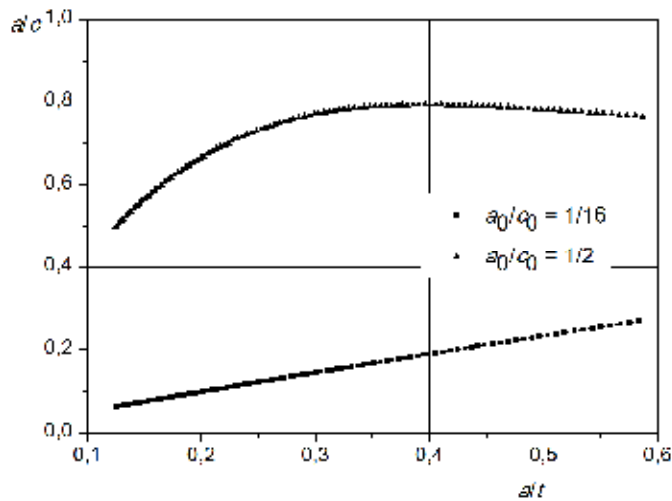


Рис. 4.5. Залежність коефіцієнта форми півеліптичної втомної тріщини a/c від відношення a/t для $a_0/c_0 = 1/16; 1/2$.

У досліджених межах моделювання поширення тріщини у ролик МБЛЗ ($a/t = 0,125 \dots 0,58$), поверхневі тріщини з істотно різними початковими коефіцієнтами форми зберігають цю відмінність із збільшенням глибини тріщини.

На основі моделі зв'язності розроблено і реалізовано алгоритми виділення елементів сітки тріщин на аналізованому зображенні поверхні ролика МБЛЗ та використання її параметрів для прогнозування залишкової довговічності конструкції. Алгоритм є універсальним та дозволяє аналізувати ділянки із сітками тріщин термовтоми різної довжини.

Встановлено кількісні характеристики дисипативних структур (сітки тріщин) на поверхні ролика із гранично допустимими експлуатаційними пошкодженнями.

Закони розподілу довжин тріщин одержані в даній роботі, повинні в подальшому перевірятись, а дані гістограм розподілу доповнюватись. Оскільки зміни умов експлуатації можуть змінювати закони розподілу або їх параметри.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Основні причини електротравматизму

Електротравматизм у порівнянні з іншими видами травматизму складає до 1%, але по числу випадків з тяжкими наслідками займає одне з перших місць.

Всі електроустановки прийнято розділяти за напругою на дві групи: $U < 1000 \text{ В}$ і $U > 1000 \text{ В}$. Слід зазначити, що найбільше число травм сяється на електроустановках $U < 1000 \text{ В}$. Це пояснюється тим, що ці електроустановки застосовуються всюди, їх багато, і вони часто обслуговуються персоналом неелектричної спеціальності.

Основними причинами електротравматизму є:

- поява напруги там, де її в нормальних умовах не повинно бути (металоконструкції, корпуси електро- і промислового устаткування, будівельні елементи споруд). Причина - пошкодження ізоляції кабелів, дротів або обмоток електричних машин і апаратів;
- можливе доторкання до неізольованих струмопровідних частин. Всі клеми, шини повинні розташовуватися на висоті або під обгороджуванням;
- утворення електричної дуги між струмопровідною частиною і людиною (при $U > 1000 \text{ В}$). Нормами встановлені наступні найменші допустимі відстані: у електроустановках $U = 6-35 \text{ кВ}$ - 0,6 м; 60 – 110 кВ - 1 м; до 150 кВ - 1,5 м; до 220 кВ - 2 м; 500 кВ - 3,5 м;
- інші причини - неузгоджені і помилкові дії персоналу; залишення електроустановки під напругою без нагляду; виникнення крокової напруги на поверхні землі; допуск до робіт на відімкнення струмопровідних частин без перевірки відсутності напруги і наявності заземлення.

5.2. Дія електричного струму на організм людини

Дія електричного струму на живу тканину носить своєрідний різносторонній характер. Проходячи через організм, електричний струм проводить термічну, електролітичну і біологічну дію. Термічна дія виявляється в нагріванні тканин аж до опіків окремих ділянок тіла, перегріву кровоносних судин і крові, що викликає в них функціональні розлади. Електролітична дія викликає розкладання крові і плазми - порушення їх фізико-хімічних складів.

Біологічна дія виявляється в подразненні і збудженні живих тканин організму, що може супроводжуватися мимовільним судорожним скороченням м'язів. При цьому можуть виникати різноманітні порушення в організмі - повне припинення діяльності серця і легенів, а також механічних пошкоджень тканин. Чинники, що визначають небезпечне ураження електричним струмом, поділяються на три групи:

- чинники електричного характеру - сила струму, напруга, рід і частота струму, опір тіла людини електричному струму;
- чинники не електричного характеру - індивідуальні особливості людини, чинник уваги, час дії, шлях струму;
- чинники довкілля - температура, вологість, запиленість, атмосферний тиск, електричне і магнітне поле.

Розглянемо ці чинники детальніше: Величина струму є основним чинником, від якого залежить ушкодження: чим більший струм, тим небезпечніша його дія.

0,6-1,5 мА - пороговий відчутний струм;

10-15 мА - пороговий невідпускаючий струм;

25-50 мА - діє на м'язи грудної клітини, утрудняє і навіть припиняє дихання;

100 мА - викликає зупинку серця або його фібриляцію. Найбільш небезпечна частота 20-200 Гц змінного струму.

до 450 В найбільш небезпечний змінний струм;

>500 В - постійний струм;

450-500 В - небезпека однакова;

Електричне поле - за наявності електричного поля небезпека менша. Магнітне поле - не викликає патології, але зміна чисельного значення напруженості поля призводить до виникнення струмів в організмі людини і електричній травмі. Шлях руху струму: найбільш вразливими місцями є: тильна частина кисті; рука вища кисті; шия, скроня, спина; нижня частина ноги; плече.

5.3. Класифікація приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом

Приміщення підрозділяються:

- приміщення з підвищеною небезпекою – вологість $\phi > 75 \%$; струмопровідний пил, підлоги, температура $t > 35 \text{ }^\circ\text{C}$;
- приміщення особливо небезпечні характеризуються наявністю однієї з наступних трьох умов, що створюють небезпеку:
 - а) з хімічно активним середовищем, що руйнує ізоляцію;
 - б) наявність 2-х і більше чинників, властивих приміщенням з підвищеною небезпекою;
 - в) з особливою вогкістю, ϕ до 100 %;
- приміщення без підвищеної небезпеки - нормальні умови і неструмопровідні підлоги.

5.4. Аналіз небезпеки ураження електричним струмом у різних електричних мережах

Основні випадки ураження електричним струмом стаються при доторканні людиною не менше ніж до двох точок мережі, що мають різні потенціали. Небезпека такого доторкання залежить від умов ввімкнення людини в мережу, схеми мережі, режиму її нейтралі, величини напруги, стан ізоляції струмопровідних частин від землі. Ввімкнення людини в електричну

мережу може бути однофазним, і двофазним. Електричні мережі поділяються на однофазні і трифазні. Трифазні мережі змінного струму бувають з ізолюваною від землі нейтраллю і глухо заземлені.

Розглянемо однополюсне доторкання до однофазної мережі змінного струму (рис. 6.1.).

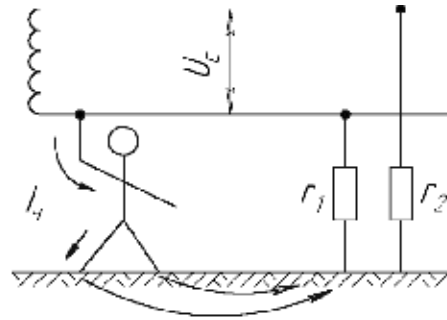


Рис. 6.1. Однополюсне доторкання до однофазної мережі змінного струму

Всі струмопровідні частини будь-якої мережі, що знаходяться під напругою, нормально мають бути ізолювані від землі. Опір дроту по відношенню до землі, називається опором ізоляції або опором витоку, що складаються з опору ізоляції самого дроту і послідовно ввімкнення ділянок шляху на землю (будівельні конструкції, підлога, ґрунт). По цьому ланцюжку опору під дією різниці потенціалів між дротом і землею протікає невеликий струм, який називається струмом витоку (r_1 і r_2 - опір ізоляції чи опір витоку).

В разі доторкання людини до фази мережі його опір R_q вмикається паралельно з опором витоку цієї фази. Струм, що протікає через людину, буде дорівнювати:

$$I_q = \frac{U_c}{2R_q + r} \quad (6.1)$$

де $r = r_1 = r_2$ - опір ізоляції або витоку.

З урахуванням опору взуття r_0 і опору підлоги r_n , які вмикаються послідовно з опором людини, величина струму, що проходить через людину, буде дорівнювати:

$$I_q = \frac{U_c}{2(R_q + r_0 + r_n) + r}; \quad (6.2)$$

де r_0 - від декількох мОм до декількох Ом; r_n - 60 кОм - дерев'яна суха підлога.

Розглянемо 2-х полюсне дотикання до однофазної мережі (рис. 6.2.)

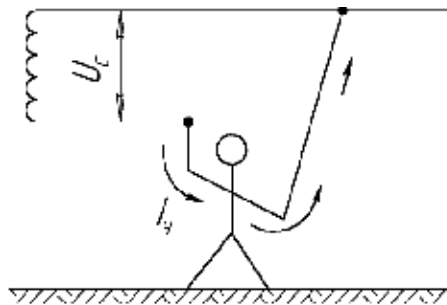


Рис. 6.2. Двополюсне дотикання до однорідної мережі змінного струму

Струм, що проходить через людину, буде дорівнювати:

$$I_q = \frac{U_c}{R_q} \quad (6.3)$$

Дотикання до однієї фази 3-х фазної мережі з ізолюваною нейтраллю (рис. 6.3.).

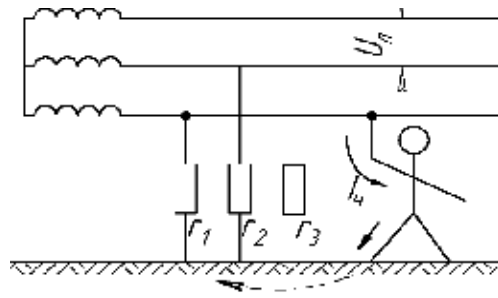


Рис. 6.3. Однополюсне дотикання до 3-х фазної мережі з ізольованою нейтраллю.

Струм, що проходить через людину, дорівнює:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{ч}} + \frac{r}{3}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} \left(R_{\text{ч}} + \frac{r}{3} \right)} \quad (6.4)$$

Дотикання до однієї фази 3-х фазної мережі із заземленою нейтраллю (рис. 6.4.).

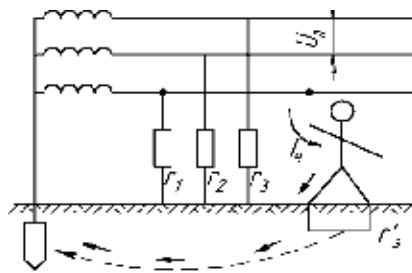


Рис. 6.4. Однополюсне дотикання до 3-х фазної мережі із заземленою нейтраллю

У мережах із заземленою нейтраллю напруга фаз відносно землі дорівнює фазній напрузі джерела, оскільки опір заземлення напруги нейтралі r_3 набагато менший опору витоків r , ємнісного опору фаз відносно землі і самої людини $R_{\text{ч}}$, r'_3 - опір розтікання струму в землі при

стіканні струму з людини в землю. У разі, коли $r_3' \ll R_q$, то $I_q = \frac{U_\phi}{R_q}$. При обчисленні r_0 і r_n :

$$I_q = \frac{U_\phi}{R_q + r_0 + r_n}; \quad (6.5)$$

Двополюсне дотикання людини до 3-х фазної мережі (рис. 6.5.).

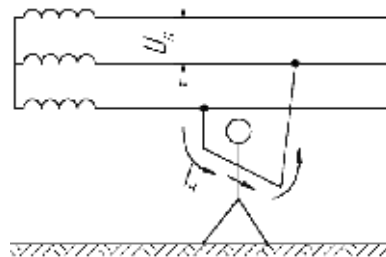


Рис. 6.5. Двополюсне дотикання до 3-х фазної мережі

6.5. Крокова напруга

Крокова напруга - це різниця напруг в 2-х точках зони розтікання струму (на довжину кроку людини). При зіткненні будь-якої струмопровідної частини із землею, наприклад, при обриві і падінні на землю будь-якого дроту відбувається розподіл потенціалів на поверхні землі. Цей розподіл потенціалів підлягає закону гіперболи і має вигляд (рис. 6.6.). Струм, що проходить через людину I_q , дорівнюватиме:

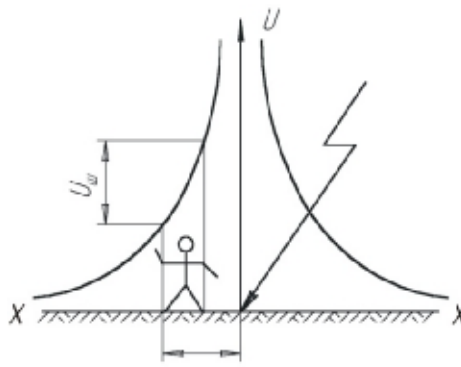


Рис. 6.6. Схема розподілу потенціалів при кроковій напрузі

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{ш}}}{R_{\text{ч}} + R_{\text{ш}}} \quad (6.7)$$

де $U_{\text{ш}}$ – крокова напруга;

$R_{\text{ш}}$ - опір розтікання струму в землі від однієї ноги до іншої;

$R_{\text{ч}}$ – опір тіла людини.

Чим ближче людина буде знаходитись до дроту, тим під більшою кроковою напругою вона буде знаходитись. У мережі із заземленою нейтраллю (рис. 6.7.) при замиканні фази на землю через малий перехідний опір матиме місце однофазне коротке замикання. В цьому випадку струм замикання на землю може бути великої величини, а отже, крокова напруга може досягати небезпечного значення. Але, враховуючи, що фазне коротке замикання призведе до спрацьовування релейного захисту, імовірність ураження людини буде малою.

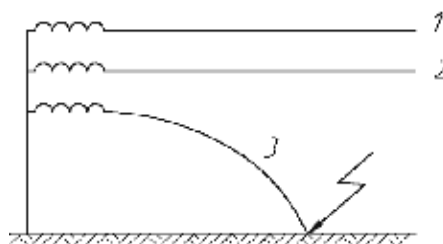


Рис. 6.7. Схема замикання фази на землю в мережі із заземленою нейтраллю

В разі ізольованої нейтралі (рис. 6.8) внаслідок великого опору витоків і ємкісного опору відносно землі, струм замикається на землю набагато менше струму однофазного короткого замикання. Захист не спрацює і виникає небезпека ураження людей.

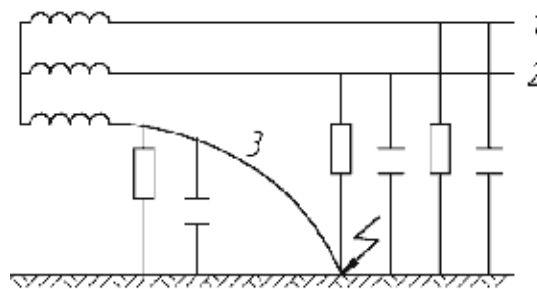


Рис. 6.8. Схема замикання фази на землю в мережі з ізольованою нейтраллю

Напруга дотикання - це напруга між точками ланцюга струму, яких одночасно торкається людина (ГОСТ 12.1.009 - 76). Гранично допустимі рівні напруги дотикання U_{np} встановлені по ГОСТ 12.1.038-82 для шляхів струму від однієї руки до іншої і від руки до ніг. Напруга U_{np} і сила струму I , що протікає через тіло людини, при нормальному (не аварійному) режимі електричних установок, не повинні перевищувати наступних значень (табл. 6.1)

Таблиця 6.1 Граничні значення напруги та струму що вражають тіло людини, при нормальному (не аварійному) режимі електричних установок

Струм	U_{np} , В не більше	I , мА, не більше
Змінний, 50 Гц	2,0	0,3
Змінний, 400 Гц	3,0	0,4

Постійний	8,0	1,0
-----------	-----	-----

ВИСНОВКИ

Виявлено основні закономірності параметрів мікроструктурної деградації, твердості, мікротвердості, в'язкості руйнування матеріалу роликів МБЛЗ від напрацювання. З використанням скануючої електронної мікроскопії встановлено механізми зародження тріщин та руйнування сталі роликів МБЛЗ.

Запропоновано методику імовірнісного прогнозування швидкості РВТ за регулярного навантаження може бути використана для визначення довговічності на етапі проектування, а також оцінки залишкового ресурсу різноманітних типів елементів конструкцій з тріщинами.

Розроблено алгоритм оптико-цифрового контролю втомних дефектів на поверхні ролика МБЛЗ, який має функції самоналаштування і дозволяє розпізнавати на зображенні витягнуті криволінійні об'єкти (наприклад, тріщини) без спеціальної адаптації до зображень певного виду.

Алгоритм апробовано на зразках отриманих з роликів МБЛЗ, які мають різне експлуатаційне напрацювання. Як складову частину алгоритм використовує базову техніку для розпізнавання каркасу тріщин. Отримана при різних наборах значень параметрів сукупність розпізнаних елементів формує нечітку множину, яка дозволяє оцінити імовірність (з точки зору використаного базового алгоритму) приналежності певного елемента зображення каркасу об'єкта. Розрахована нечітка множина містить деталізовану інформацію про розпізнаний при різних наборах значень параметрів каркас об'єктів і дозволяє обчислити відхилення розрахованого положення каркасу в даній точці.

При необхідності, для зменшення обчислювальних витрат початкове зображення можна попередньо зменшити, а після аналізу зменшеного зображення масштабувати його до початкових розмірів. З метою

оцінювання допустимого ступеня стискання запропоновано використати піраміду зображень.

Досліджено вплив форми фронту початкового поверхневого дефекту на втомну довговічність ролика машини безперервного лиття заготовок. Запропонований підхід оцінювання залишкової довговічності роликів МБЛЗ ґрунтується на аналізі напружено–деформованого стану та характеристик циклічної тріщиностійкості сталі в умовах, близьких до експлуатаційних із урахуванням їх статистичного розподілу. Такий підхід дозволив узагальнити вплив параметрів експлуатаційного навантаження і корозійно-агресивних та наводнюючих середовищ на механізми зародження, і докритичного росту тріщин.

Отримані залежності втомної довговічності ролика МБЛЗ від форми початкового дефекту за температури 600 °С. Із збільшення коефіцієнта форми початкової тріщини від 1/16 до 1/2 довговічність зростає приблизно у 2 рази.

Побудовано розподіли втомної довговічності ролика МБЛЗ у припущенні нормального розподілу характеристик циклічної тріщиностійкості сталі для різної початкової форми і кінцевої глибини тріщини.

Побудовано послідовність зображень форми фронту півеліптичних втомних тріщин із початковим коефіцієнтом форми 1/16 та 1/2. Одержані результати можуть бути корисними при переточуванні роликів на новий (ремонтний) розмір і відновлювального наплавлення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Буланов Л.В. Машины непрерывного литья заготовок / Л.В. Буланов, Л.Г. Корзунин, Е.П. Парфенов и др. // Теория и расчет. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. – 319 с.
2. Домбровский Ф.С. Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок / Ф.С. Домбровский, Л.К. Лещинский.-К.: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 1995. - 198 с.
3. Гостев А. А. Совершенствование работы роликового аппарата зоны вторичного охлаждения МНЛЗ: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.04.04 / А. А. Гостев. – Екатеринбург, 1994.– 28 с.
4. Коротков В.А. Трещиностойкость роликов установок непрерывной разливки стали / В.А. Коротков, Л.В. Баскаков // Сварочное производство. - 1993. - №4. – С. 17-19.
5. Ясній П.В. Ролики МБЛЗ: Деградація і тріщиностійкість матеріалів / П.В. Ясній, П.О. Марущак.-Тернопіль, Джура, 2009. - 232 с.
6. Мазур Н. В. Повышение стойкости роликов МНЛЗ на основе результатов исследования и моделирования процессов при их изготовлении, восстановлении и эксплуатации: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Н. В. Мазур. – Магнитогорск, 2009. - 20 с.
7. Гопкало О. П. Вплив відмінностей фізико-механічних властивостей металу наплавлення та основи на НДС роликів машин безперервного лиття заготовок / О.П. Гопкало, В.В. Клипачевський // Вісник Тернопільського національного технічного університету. - 2011. - Том 16. - № 4. - С.46-57.

8. Thomas B. G. Continuous Casting, the encyclopedia of materials: science and technology / B.G. Thomas // Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, 2001.- 2. – P. 1595-1599.
9. Thomas B. G. Modeling of the continuous casting of steel - past, present and future / B.G. Thomas // Metallurgical and Materials Transactions B. - 2002. - 33B. – P. 795-812.
10. Wei Ji Mathematical modeling of temperature field in continuous casting rolls for design optimization of internal cooling system / Ji Wei, Li Jin, Li Fu-Shuai // Num. Heat Transfer, Part A: Applications: An Int. Journ. of Comp. and Method. – 2009. – Vol. 56. – P. 269-285.
11. В.А. Пиксаев Влияние технологических и геометрических параметров МНЛЗ на распределение нагрузки от распрямления заготовки по роликам роликовой проводки / В.А. Пиксаев, В.А. Зубачев, Е.В. Пиксаев // Metallургические машины и процессы: Сб. науч. тр. Магнитогорск: Магнитог. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. - 1998. - С. 17-22.
12. Пиксаев Е.В. Совершенствование методики проектирования жесткой роликовой проводки МНЛЗ с целью повышения долговечности роликов и качества заготовки : автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.02.13 / Е.В. Пиксаев. - Магнитогорск, 2010. - 20 с.
13. Лукьянов С. И. Ограничение продольных усилий в заготовке электроприводом тянущих роликов машин непрерывного литья / С. И. Лукьянов, А. Е. Васильев, Д. В. Швидченко и др. // Известия вузов. Электромеханика. - 2004. - N 2. - С. 58-64.
14. Лукьянов С. И. Исследование распределения моментов вытягивания слитка по электроприводам тянущих роликов машины непрерывного литья заготовок / С. И. Лукьянов // Известия вузов. Электромеханика. - 2009. - N 1. - С. 32-37.

15. Швидченко Д.В. Влияние буксовых тянущих роликов на качество макроструктуры непрерывнолитой заготовки / Д.В. Швидченко // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГТУ, 2003. Вып. 7. - С. 119 - 122.
16. Вдовин К.Н. Проектирование криволинейных участков машин непрерывного литья заготовок / К.Н. Вдовин, В.А. Пиксаев, В.А. Зубачев, Е.В. Пиксаев. // Metallurg. – 1998. - №7. – С. 37-38.
17. Шапран Л. О. Розробка та освоєння технології виготовлення біметалевих відцентроволитих роликів машин безперервного лиття заготовок : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.16.04 / Л. О. Шапран; Нац. металург. акад. України. - Дніпропетровськ, 2009. - 18 с.
18. Кащенко Ф.Д. Восстановление роликов МНЛЗ наплавкой. Сварка Урала 2001 / Ф.Д. Кащенко, В.А. Зубачев // Тезисы доклада 20-й научно-технической конференции сварщиков Урала. Г. Нижний Тагил, 27 февраля-2 марта 2001 г. С. 134-135.
19. Кащенко Ф. Д. Восстановление наплавкой роликов МНЛЗ / Ф.Д. Кащенко // Metallургические машины и процессы (теория и практика) Сборник научных трудов. - Магнитогорск: МГТУ, 1998.- С. 13-16.
20. Кащенко Ф. Д. На роликов МНЛЗ / Ф. Д. Кащенко, А. И. Беляев, И. А. Рябцев // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения. Международный сборник научных трудов/Под ред. Н.Н. Огаркова. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006.- С. 13-18.
21. Кащенко Ф.Д. Ремонт роликов МНЛЗ / Ф.Д. Кащенко, И.В. Боровиков // Процессы и оборудование металлургического производства. Сборник научных трудов. Выпуск 3. Магнитогорск: МГТУ, 2001. С. 13-15.
22. Коротков В.А. Опыт упрочнения деталей металлургического оборудования / В.А. Коротков, А.С. Веселов, И.Д. Михайлов // Metallurg. - 2000. - № 5.- С. 14-18.

23. Hetzner D.W. Sub ARC roll repair improves performance / D.W. Hetzner // *Advanced Materials & Processes*, 2005, P. 43-45.
24. Toit M. Du. Improving the life of continuous casting rolls through submerged arc cladding with nitrogen-alloyed martensitic stainless steel / M. Du Toit, J. Van Niekerk // *Welding in the World*, 2010, Vol. 54, Issue 11, pp R342-R349.
25. Самойлович Ю.А. Повышение долговечности опорных роликов МНЛЗ / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский, В.А. Горяинов, С.М. Кабишов // *Литье и металлургия*. - 2008. - №1. - С. 49-55.
26. El-Bealy M.O. Improving thermo-mechanical rigidity of caster rolls in continuous casting machines / M.O. El-Bealy // *Steel Times International* – May/June 2013 – 1-10.
27. Телин Н. В. Динамика осесимметричного температурного поля ролика МНЛЗ / Н.В. Телин, Н.И. Шестаков // *Мат - лы IV межд. научно-техн. конф., посв. 120-летию И.П. Бардина, Череповец. 2003.* - С. 146-148.
28. Гопкало А. П. Термические напряжения в роликах машин непрерывного литья заготовок при варьировании свойств металлов основы и наплавки / А.П. Гопкало, Г.В. Цыбанев, В.В. Клипачевский // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 7. – С. 24–28.
29. Голицына Е. В. Математическое моделирование температурного поля в полом вращающемся цилиндре при нелинейных граничных условиях / Е. В. Голицына // *Тепломассообмен и физическая газодинамика*. – 2008. – Т.46. - №:6. – С. 905-910.
30. Опарин Л. И. На роликов слябовых машин непрерывного литья заготовок. / Л.И. Опарин, В.Л. Маликин, П.В. Гладкий // *Автоматическая сварка*. – 1991. - № 4. - С. 63-66.
31. Малинов В. Л. Развитие теоретических основ создания электродных материалов, обеспечивающих деформационное мартенситное превращение в наплавленном металле [Текст] : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.03.06 / Малинов Владимир Леонидович.- Приазов. гос. техн. ун-т. - Мариуполь, 2015. - 40 с.

32. Мазур Н.В. Исследования свойств материала роликов МНЛЗ / Н.В. Мазур, А.А. Подосян, Н.Н. Огарков // Процессы и оборудование металлургического производства: Межрегион. Сб. науч. тр. / Под ред. Железкова О.С. Вып. 7. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С.48-53.
33. Огарков Н.Н. Моделирование процесса трещинообразования в поверхностном слое роликов МНЛЗ / Н.Н. Огарков, Н.В. Мазур // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск. 2006-№ 1. С. 70-74.
34. <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2015/12/matching-filler-metals-to-stainless-steels/>
35. Кащенко Ф.Д. Реновация деталей металлургического оборудования наплавкой / Ф.Д. Кащенко, А.И. Беляев // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2006. – С. 3-6.
36. <http://corewire-ltd.blogspot.com/>
37. <http://weldtech-group.com/rus/germany2016>
38. <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/C7720.pdf>
39. <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2012/01/tips-for-overlaying-journals-and-caster-rolls/>
40. <http://weldtech-group.com/rus/germany2016>
41. <https://www.yumpu.com/en/document/view/15798369/corewire/24>
42. <http://poleznayamodel.ru/model/5/53948.html>
43. <http://www.metallisation.com/applications/laser-cladding-for-continuous-caster-rolls.html>
44. Yang Ke A new type of submerged-arc flux-cored wire used for hardfacing continuous casting rolls / Ke YANG, Zhi-xi ZHANG, H U Wang-qin, BAO Ye-feng, JIANG Yong-feng // Journal of Iron and Steel Research, International. 2011, 18(11): 74-79.
45. Ray A. Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterisation and on-field performance evaluation / A. Ray, K.S. Arora, S. Lester, M. Shome //Journal of Materials

Processing Technology, Volume 214, Issue 8, August 2014, Pages 1566–1575.

46. Winczek J. Temperature and phase transformations fields during surfacing by welding of CCS machine roll / J. Winczek // Archives of Foundry Engineering, 2008, Vol. 1, P. 117 - 122.
47. Пат. № 65053 Україна, МПК G01N 25/72. Спосіб фізичного моделювання експлуатаційних температурних умов роликів машин безперервного лиття заготовок / П. О. Марущак, Д. Я. Баран, Р. Т. Біщак; заявник і патентовласник Тернопіль нац. тех. ун-т. – № 65053; заявл. 26.04.2011 ; опублік 25.11.2011, Бюл. №22. 20.
48. Ясній П.В. Методика дослідження температурних полів модельного ролика машини безперервного лиття заготовок / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Р.Т. Біщак, Д.Я. Баран // Тез. допов. III Міжн. науково-техн. конф. “Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні”, (29-31 травня).-2007.-К.-ІПМіц ім. Г.С. Писаренка НАН України. - С. 219-220.
49. Пат. UA 26266 U МПК (2006) B22D 11/12 «Ролик для машини безперервного лиття заготовок (слябів)» / Гопкало О. П., Кліпачевський В. В. Опубл. 10.09.2007. Бюл. № 14.
50. Revel P. Experimental and numerical simulation of a stainless steel coating subjected to thermal fatigue / P. Revel, D. Kircher, V. Bogard // Materials Science and Engineering A. – 2000. – 290(1-2). – P. 25-32.
51. Fulop P. Thermal fatigue test of laser surface treated rollers / P. Fulop, Z. Csepeli, O. Szabados, B. Vero // Materials Science Forum. – 2003. – Vol. 414-415. – P. 207-212.
52. Голубев М. С. Исследование теплообмена в роликах металлургических машин для совершенствования их теплового расчета : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.14.04 / М. С. Голубев. - Череповец, 2009. - 19 с.
53. http://www.findpatent.ru/img_show/67638.html

54. Патент РФ на полезную модель №78710. Ролик зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок. / Кадошников В.И., Завьялов В.И., Белевская Е.Л. и др. Опубл. 10.12.2008. БИПМ №34.
55. Хитько А. Ю. Системный подход к совершенствованию технологии изготовления бандажированных роликов МНЛЗ / А. Ю. Хитько, Л. А. Шапран, В. Е. Хрычиков, Л. Х. Иванова, С. В. Лазуренко // Систем. технології. - 2011. - № 5. - С. 91-97.
56. Шапран Л. А. Технология литья роликов с биметаллическими бандажами для МНЛЗ / Л. А. Шапран, А. Ю. Хитько, В. Е. Хрычиков, Л. Х. Иванова // Metallurg. и горноруд. пром-сть. - 2011. - № 4. - С. 42-44.
57. Хитько Л. А. Выбор сплавов и разработка технологии центробежного литья биметаллических заготовок для роликов МНЛЗ / Л.А. Хитько // Теория и практика металлургии. – 1998. – № 4. – С. 33 – 34.
58. Адамов И.В. Выбор сплавов и разработка технологии центробежного литья биметаллических заготовок для роликов МНЛЗ / И.В. Адамов, Л.А. Хитько // Центробежное литье – прогрессивный технологический процесс производства труб и заготовок ответственного назначения: сб. науч. тр. / АН УССР. Ин-т пробл. литья. – К., 1990 – С. 73 – 78.
59. Жукаев В.И. Исследование центробежного литья биметаллических труб сочетания сталь 20Х25Н19С2Л + сталь 20 для роликов МНЛЗ / В.И. Жукаев, И.В.Адамов, Л.А. Хитько, Н.В. Сабанский // Научно – технический прогресс в производстве труб: тематич. сборн. науч. трудов. – М.: Металлургия. – 1987. – С. 52 – 55.
60. Адамов И.В. Сигма – фаза в сталях с 12 % хрома / И.В.Адамов, Ю.К. Бунина, Н.В. Сабанский, Л.А. Хитько // Теория и практика металлургии. – 1999. - № 4. – С. 54 – 56.

61. Калинин В.Т. Ликвационные процессы в модифицированных Fe-C расплавах при литье роликов и валков / В.Т. Калинин, Л.А. Шапран, Л.Х. Иванова, А.А. Кондрат// Системные технологии: сб. науч. тр.– Д.: НМетАУ. – 2008.– № 5(58).– С. 89 – 94.
62. Иванова Л.Х. Выбор и оптимизация химического состава материалов для роликов МНЛЗ / Л.Х. Иванова, Л.А. Шапран, С.А. Щурова // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 48, ч. 2.– Д.: ПГАСА, 2009.– С. 137–142.
63. Шапран Л.А. О стойкости роликов зоны вторичного охлаждения слябовых МНЛЗ / Л.А. Шапран, Л.Х. Иванова // Східно-Європейський журнал передових технологій.– 2009.– № 2.– С. 10-15.
64. Иванова Л.Х. Выбор оптимального сочетания свойств материала для центробежнолитых биметаллических роликов МНЛЗ / Л.Х. Иванова Л.А. Шапран // Теория и практика металлургии.– 2009.– № 1-2.– С. 49 – 52.
65. А.с. 1290726 СССР, МКИ В22D 11/12. Сталь / И.В. Адамов, В.И. Жукаев, В.Д. Сурженко, Л.А. Хитько и др. (СССР). - № 3899926/31-02; заявл. 21.05.1985; опубл. 15.10.1986, Бюл. № 42.
66. А.с. 1329899 СССР, МКИ В22D 11/12. Ролик машины непрерывного литья заготовок / И.В. Адамов, А.В. Бородин, В.И. Жукаев, Л.А. Хитько и др. (СССР).- № 4047293/31-02; заявл. 01.04.1986; опубл. 15.04.1987, Бюл. № 30.
67. Ларионов А. А. Опыт применения роликов, бандажированных центробежнолитым биметаллом на слябовой МНЛЗ металлургического комбината им. Ильича / А. А. Ларионов, Н. В. Сабанский, Э. Н. Шебаниц и др. // Металл и литье Украины. – 1997. – № 2-4. – С. 31-33.
68. Огарков Н.Н. Расчет напряжений в бандажах сборных роликов МНЛЗ / Н.Н. Огарков, Н.В. Мазур // Современные методы

конструирования и технологии металлургического машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2008. с. 106-110.

69. Mohammad H.Karimi, Davud Asemani. Surface defect detection in tiling Industries using digital image processing methods: Analysis and evaluation. ISA Transactions, 53(2014). – pp.834–844.
70. Wenyu Zhang, Zhenjiang Zhang, Dapeng Qi and Yun Liu. Automatic Crack Detection and Classification Method for Subway Tunnel Safety Monitoring. Sensors, 2014, 14(10). – pp. 19307-19328.
71. Tomoyuki Yamaguchi, Shingo Nakamura, Ryo Saegusa, Shuji Hashimoto. Image-Based Crack Detection for Real Concrete Surfaces. Transactions on electrical and electronic engineering. IEEJ Trans, 2008; 3: pp.128–135.
72. Bugao Xu and Yaxiong Huang. Development of an automatic pavement surface distress inspection system. Center for Transportation Research at The university of Texas at Austin. 2005. – 15p.
73. V. Malekian¹, R. Amirfattahi, M. Rezaeian, A. Aghaei and P. Rahimi. Automatic Detection and Localization of Surface Cracks in Continuously Cast Hot Steel Slabs Using Digital Image Analysis Techniques. International Journal of ISSI, Vol.9 (2012), No.1, pp.30-40.
74. Prateek Prasanna, Kristin Dana, Nenad Gucunski and Basily Basily. Computer-vision based crack detection and analysis, Proc. SPIE 8345, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, (April 26, 2012).
75. P.Yasniy, P.Maruschak, I.Konovalenko, V.Gliha, T.Vuherer, R.Bishchak. Multiple cracks on continuous caster rolls surface: a three-dimensional view // 4th International conference processing and structure of materials proceeding.– Palic, Serbia, 2010.– pp.7-12.

76. I.V.Konovalenko, P.O.Maruschak. Error Analysis of Algorithm for Identifying Thermal Fatigue Cracks. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2011, Vol.47, No.4, pp.49-57.
77. Pavlo Maruschak, Vladimir Gliha, Igor Konovalenko, Tomaž Vuherer, Sergey Panin. Physical regularities in the cracking of nanocoatings and a method for an automated determination of the crack-network parameters // Materiali in tehnologije / Materials and technology, – Vol.46, No.5.– 2012.
78. Bradley, D., Roth, G. Adaptive Thresholding Using the Integral Image// Journal of Graphics Tools, Vol. 12, No. 2 pp. 13-21, 2007.
79. I. V. Konovalenko, O. A. Pastukh, and P. O. Marushchak. Using Fuzzy Sets to Estimate the Geometric Parameters of Surface Damage. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 319–327.
80. Ясній П.. Деградація поверхні ролика МБЛЗ під час експлуатації / П. Ясній , П. Марущак, Д. Баран [та ін.] // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – Т. 14, № 3. – С.10–16.
81. Anderson T. W. A Test of Goodness-of-Fit / T. W. Anderson, D. A. Darling // Journal of the American Statistical Association. – 1954. – Vol. 49, № 268. – P. 765–769.
83. Beretta S. Experiments and stochastic model for propagation lifetime of railway axles / S. Beretta, M. Carboni // Engineering Fracture Mechanics. – 2006. – Vol. 73, № 17. – P. 2627–2641.
84. Beretta S. Fracture mechanics and scale effects in the fatigue of railway axles / S. Beretta, A. Ghidini, F. Lombardo // Engineering Fracture Mechanics. – 2005. – Vol. 72, № 2. – P. 195–208.
85. Carpinteri A. Elliptical-arc surface cracks in round bars / A. Carpinteri // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 1992. – Vol. 15, № 11. – P. 1141–1153.
86. Castillo E. A statistical model for crack growth based on tension and compression Wöhler fields / E. Castillo, A. Fernández-Canteli, H. Pinto [et

- al.] // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2008. – Vol. 75, № 15. – P. 4439–4449.
87. Grooteman F. A stochastic approach to determine lifetimes and inspection schemes for aircraft components / F. Grooteman // *International Journal of Fatigue*. – 2008. – Vol. 30, № 1. – P. 138–149.
88. Ichikawa M. Statistical characteristics of m and fatigue crack propagation law $da/dN=C(\Delta K)^m$ (2024-T3 Al alloy) / M. Ichikawa, M. Hamaguchi, T. Nakamura // *Journal of the Society of Materials Science*. – 1983. – Vol. 33, № 364. – P. 8–13.
89. Lin X. B. Shape evolution of surface cracks in fatigued round bars with semicircular circumferential notch / X. B Lin, R. A. Smith // *International Journal of Fatigue*. – 1999. – Vol. 21, № 9. – P. 965–973.
90. Madia M. An investigation on the influence of rotary bending and press fitting on stress intensity factors and fatigue crack growth in railway axles / M. Madia, S. Beretta, U. Zerbst. // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2008. – Vol. 75, № 8. – P. 1906–1920.
91. Mercado-Solis R. D. Simulation of thermal fatigue in hot strip mill work rolls / R. D. Mercado-Solis, J. H. Beynon // *Scandinavian Journal of Metallurgy*. – 2005. – Vol. 34, № 3. – P. 175–191.
92. Colás R. Damage in hot rolling work rolls / R. Colás, J. Ramyrez , I. Sandoval [et al.] // *Wear*. – 1999 – Vol. 230, № 1. – P. 56–60.
93. Revel P. Experimental and numerical simulation of a stainless steel coating subjected to thermal fatigue / P. Revel, D. Kircher, V. Bogard // *Materials Science and Engineering: A*. – 2000. – Vol. 290, № 1–2. – P. 25–32.
94. Riahi H. Random fatigue crack growth in mixed mode by stochastic collocation method. / H. Riahi, Ph. Bressollette, A. Chateauneuf // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2010. – Vol. 77, № 16. – P. 3292–3309.
95. Srivastava A. Computer modeling and prediction of thermal fatigue cracking in die-casting tooling / A. Srivastava , V. Joshi , R. Shivpuri // *Wear*. – 2004. – Vol. 256, № 1–2. – P. 38–43.

96. Varfolomeev I. V. Modeling of fracture of cracked structural elements with the use of probabilistic methods / I. V. Varfolomeev, O. P. Yasniy // *Materials Science*. – 2008. – Vol. 44, № 1. – P. 87–96.
97. Yasniy O. Probabilistic modeling of surface crack growth in a roll of continuous casting machine / O. Yasniy, P. Maruschak, Y. Lapusta // *International Journal of Fracture*. – 2011. – Vol. 172, № 1. – P. 113–120.
98. Yasniy P. Experimental study of crack growth in a bimetal under fatigue and fatigue–creep conditions / P. Yasniy, P. Maruschak, Y. Lapusta // *International Journal of Fracture*. – 2006. – Vol. 139, № 3–4. – P. 545–552.
99. Yasniy P. Thermal fatigue material degradation of caster rolls' surface layers / P. Yasniy, P. Maruschak, Y. Lapusta [et al] // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2008. – Vol. 15, № 6–7. – P. 499–507.
100. Zerbst U. The development of a damage tolerance concept for railway components and its demonstration for a railway axle / U. Zerbst, M. Vormwald, C. Andersch [et al] // *Engineering Fracture Mechanics* – 2005. – Vol. 72, № 2. – P. 209–239.