

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**ІБРАГІМОВ МЕХМАН САЯДУЛЛА ОГЛИ**

УДК 669.162.213:658.8(043)

**УДОСКОНАЛЕННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ УСТАТКОВАННЯ ДОМЕННОГО  
ЦЕХУ ШЛЯХОМ ДІАГНОСТУВАННЯ ЙОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**

Спеціальність 05.05.08 «Машини для металургійного виробництва»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Машини і агрегати металургійного виробництва» Національної металургійної академії України Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**БІЛОДІДЕНКО Сергій Валентинович**,  
Національна металургійна академія України, завідувач кафедри  
«Машини і агрегати металургійного виробництва», м. Дніпро

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**КРАВЧЕНКО Володимир Михайлович**,  
професор кафедри «Механічне обладнання заводів чорної  
металургії» Приазовського державного технічного університету,  
м. Маріуполь

кандидат технічних наук, доцент  
**ПОПОЛОВ Дмитро Володимирович**,  
завідувач кафедри «Інжинірингу з галузевого  
машинобудування» Навчально-наукового технологічного  
інституту Державного університету економіки і технологій,  
м. Кривий Ріг

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р. о \_\_\_\_\_ на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 08.084.03 при Національній металургійній академії України за  
адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Факс +38(0562)47-44-61. E-mail: lydmila\_kamkina@ukr.net

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національної металургійної  
академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03, д.т.н., проф.

Л.В. Камкіна

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Питання експлуатації та ремонту механічних систем технологічного устаткування завжди були важливі для промислового сектору, але мають особливу актуальність для металургійного виробництва. Це обумовлено значною часткою витрат на технічне обслуговування і ремонт (ТОіР) у загальновиробничих витратах виробництва металу. У світовій металургії витрати на ТОіР є більш ніж удвічі вищими, чим в цілому по промисловості. Беручи до уваги особливу актуальність технологій ТОіР для металургійного виробництва, з метою оптимізації витрат по цій статті менеджмент підприємств став поступово відходити від традиційної планово-попереджувальної системи ремонтів з їх жорстким графіком у бік стратегії обслуговування за фактичним технічним станом обладнання (ТСМ). Дана стратегія припускає використання гнучкого графіка ремонтів і характеризується активним застосуванням методів технічної діагностики. Завдячуючи їй зменшуються кошти на ТОіР і збільшується готовність обладнання.

Враховуючи сказане, провідні виробники металургійного устаткування стали оснащувати його вбудованими системами контролю функціонування, а також пропонують сервісне обслуговування. При переході до стратегії обслуговування по технічному стану акцент у витратах засобів на ТОіР зміщується з ремонтних операцій на діагностування технічного стану, коли вирішується питання про наступні дати і обсяги відновлювальних заходів. Інформація про роботу устаткування, нарівні з матеріальними ресурсами, стає реальним фактором виробництва, що впливає на його ефективність. У подібній ситуації зростає актуальність не стільки графіка ремонтів устаткування, скільки графіків його оглядів, інспекцій і контролів технічного стану.

При ТСМ-стратегії термін експлуатації обладнання може бути продовженим, і тоді питомі витрати на ТОіР зменшуються. Зменшення витрат матеріальних ресурсів є однією зі складових концепції екологічно орієнтованого виробництва або «зеленої металургії». В цьому аспекті виробники обладнання надають великого значення навчання персоналу сучасним способам діагностування, а також, власне, розробці оптимізованих алгоритмів планування відновлювальних заходів.

Металургійне виробництво за інтенсивністю втрат від аварій займає 4 місце серед всіх галузей техніки. Найбільш небезпечним в металургійному комплексі є доменне виробництво. На нього припадає 20-30% аварій і 10-20% летальних випадків. Серед обладнання доменного комплексу механічне облаштування безпосередньо доменної печі (ДП) лідирує в поточних витратах на технічне обслуговування. Нові реалії функціонування доменного комплексу передбачають подовження кампанії ДП понад 25 років при коефіцієнті готовності не менш 95%. Тому для ДП доцільно використовувати ТСМ- стратегію з контролем ризику і безпеки.

Таким чином, тема роботи, яка націлена на оптимізацію режимів ТОіР доменного обладнання, розробку методів оцінки технічного стану конструкцій ДП, є актуальною. Вагомий внесок в розвиток методів технічного обслуговування металургійного обладнання зробили вітчизняні вчені В.М, Кравченко, В.Я. Седуш, Г.В. Сопілкін, М.А.Ченцов. В області досліджень роботи безпосередньо конструкцій

доменної печі значних результатів досягли Ю.П. Байшев, С.В. Білодіденко, В.І. Большаков, В.К. Востров, В.М. Горицький, Г.П. Кандаков, А.Є. Любін, М.М. Можаренко, В.А. Чеченєв.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи пов'язана з напрямком наукової діяльності кафедри «Машини і агрегати металургійного виробництва» Національної металургійної академії України – «Технічне обслуговування та діагностування механічних систем за контролем їх безпеки та ризику».

Дисертація є складовою частиною науково-дослідної роботи «Дослідження правил об'єднання показників надійності елементів силових систем стосовно стратегії обслуговування промислового обладнання за фактичним технічним станом» (державна реєстрація № 0119U100885) при участі здобувача як виконавця.

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертації є розробка системи ТОіР обладнання доменного комплексу на підставі змішаних (комбінованих) стратегій експлуатації, складовими частинами якої є діагностичні алгоритми та моделі технічного стану несучих конструкцій доменної печі.

Відповідно до зазначеної мети в роботі поставлені наступні задачі:

- 1) проаналізувати існуючі моделі для визначення режимів ТОіР механічних систем, розглянути сучасний стан обслуговування устаткування вітчизняного доменного комплексу в контексті світових тенденцій розвитку металургійного обладнання;
- 2) розробити принцип визначення технічного стану конструкцій за контролем ризику;
- 3) дослідити ступінь деградації металу кожуху доменної печі після її довготривалої експлуатації;
- 4) розробити алгоритм оцінювання залишкового ресурсу кожуху доменних печей за критерієм появи тріщини, а також перевірити можливості збільшення ресурсу елементів кожуху за умов подовження кампанії доменних печей;
- 5) розробити основи змішаної стратегії обслуговування обладнання доменного комплексу і впровадити її у виробництво разом із рекомендаціями щодо діагностування технічного стану несучих конструкцій доменної печі.

**Об'єкт дослідження:** процеси технічного обслуговування механічних систем доменного комплексу.

**Предмет дослідження:** показники надійності, ризику, безпеки, а також технічного стану елементів доменного комплексу.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження виконані з використанням фундаментальних закономірностей і аналітичних методів математичної статистики і ризик-аналізу, теорії технічного обслуговування, теорії надійності складних технічних систем. Експериментальні дослідження виконано з урахуванням методів експериментальної механіки за допомогою атестованої випробувальної техніки і апаратури. Обробку експериментальних результатів і побудову моделей виконано з використанням методів планування експерименту, теорій опору втомі і механіки руйнування.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

**1. Отримали подальший розвиток засади планування процесів технічного обслуговування механічних систем в металургії.** Сформульовано принцип

побудови ймовірно-вартісних моделей, що полягає в додаванні добутоків ймовірності на вартість перебування об'єкту в відповідній фазі технічного стану. Знайдено явище насичення функції уточнення, що кількісно характеризує процедуру ідентифікації апріорних моделей технічного стану, яка відбувається під час його контролю або інспектування. Встановлено, що оптимальний період між інспекціями зменшується при зростанні ризику і, навпаки, збільшується при зростанні вартості діагностування.

**2. Вперше комплексно досліджено ступінь деградації металу кожуху доменної печі малого об'єму після її довготривалої експлуатації.** Для трьох зон шахти, які різняться умовами експлуатації, отримано моделі циклічного зміцнення, моделі опору втомі, показники циклічної в'язкості руйнування і твердості. Найбільше пошкодження метал кожуху отримує в фурменій зоні: за показниками в'язкості руйнування падіння складає 16%. При цьому розпорошення твердості збільшується в 3,4 рази. Найменше пошкодження метал кожуху отримує в охолоджуваній зоні шахти, хоча зазвичай, розрахункові механічні напруження тут є більшими, ніж угорі шахти в неохолоджуваній зоні.

**3. Вперше знайдено зв'язок між амплітудою повної деформації і числом циклів до появи тріщини у формі рівняння квадратичної гіперболи.** Деформаційна модель, яка була отримана, є універсальною, такою, що годиться для умов складного напруженого стану металу в кожусі печі зі змінною асиметрією циклу. В моделі є невідомим один параметр, який залежить від пластичності матеріалу і обирається з урахуванням запасу безпеки.

**4. Вперше отримано лінійний зв'язок між коефіцієнтом варіації твердості і середнім рівнем в'язкості руйнування сталі 09Г2С після її довготривалої експлуатації в кожусі доменної печі.** Означена модель є підставою для діагностування технічного стану металу кожуху ДП в процесі експлуатації неруйнівними методами.

**5. Вперше винайдено рішення для показника розпорошення довговічності за умов нестационарного навантаження при використанні деформаційної кривої втомі у напівлогарифмічних координатах.** Це рішення є одним з етапів реалізації алгоритму прогнозування гарантованої довговічності до появи тріщини в окремих елементах кожуху доменної печі. Оцінка технічного стану всього кожуху як системи здійснюється шляхом об'єднання окремих ресурсних індексів безпеки. З досліджень впливу експлуатаційних чинників доведено, що середній фізичний ресурс кожуху значимо перевищує 25-річний термін експлуатації за будь-яких її умов. Для гарантованого подовження кампанії вітчизняних доменних печей потрібно застосовувати проактивну стратегію їх технічного обслуговування.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Запропонована методологія підтримки технічного стану механічних систем шляхом контролю ресурсного індексу безпеки. На його підставі визначено раціональний режим моніторингу, при якому фіксуються тільки факти викиду діагностичних параметрів за встановлені межі, після чого коригується залишковий ресурс.

2. Результати дисертаційної роботи у вигляді рекомендацій щодо діагностування технічного стану і залишкового ресурсу кожуху доменної печі

впроваджено на ПрАТ «ДМЗ» (акт промислового впровадження від 22.02.2020 р.).

3. Впроваджено категоризацію механічного обладнання доменного цеху ПрАТ «ДМЗ», яка регламентує основні засади побудови змішаної стратегії технічного обслуговування і ремонту в доменному комплексі (акт промислового впровадження від 22.02.2020 р.). Сукупний економічний ефект від впровадження змішаної стратегії ремонтів за час її дії склав 150 млн. грн.

4. Результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес у Національній металургійній академії України (акт впровадження у навчальний процес від 04.03.2020 р.).

**Достовірність наукових результатів та висновків** підтверджується коректністю постановки задач на підставі всебічного аналізу та узгодженості вихідних даних, застосуванням апробованих теоретичних методів з урахуванням загальноприйнятих чи обґрунтованих припущень. Обґрунтованість математичних моделей опору втомі і руйнуванню, циклічного зміцнення і твердості базується на сходимості результатів лабораторних і промислових досліджень з прогнозними розрахунками.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертації не використані ідеї співавторів публікацій. Усі принципові теоретичні й експериментальні результати, що отримані в дисертації, базуються на дослідженнях, проведених автором самостійно. Особистий внесок здобувача в публікаціях зі співавторами полягає в наступному: алгоритм визначення залишкового ресурсу елементів кожуху доменної печі [1, 3, 4]; дослідження чинників впливу на оптимальний інтервал між інспекціями [2, 6, 7, 10]; формулювання шляхів зменшення витрат на ТОіР [10]; категоризація обладнання доменного комплексу для реалізації змішаної стратегії ТОіР [8]; огляд несучих конструкцій доменних печей [9].

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Надійність металургійного обладнання RME-2015» (м. Дніпропетровськ, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні науково-технічні дослідження» (м. Івано-Франківськ, 2017р.); V Міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування та прогнозування» (м. Тернопіль, 2017 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Механіка машин - основна складова прикладної механіки» (м. Дніпро, 2017 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Надійність і динаміка важких машин RDHM-2018» (м. Дніпро, 2018 р.); I Міжнародному симпозиумі з аналізу ризиків і безпеки складних конструкцій (IRAS 2019, м. Порто, 2019 р.); об'єднаному науковому семінарі механіко-машинобудівного факультету Національної металургійної академії України та Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, 2020 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено у 19 наукових працях, в тому числі: 8 статей у наукових фахових виданнях, затверджених ДАК МОН України, 1 з яких опублікована у виданнях, що індексуються у науково-метричній базі Scopus, 3 з яких опубліковані у виданнях, що індексуються у міжнародних науково-метричних базах (Index Copernicus, Google Scholar), 2 монографії, 3 патенти України, 6 матеріалів праць і тез науково-технічних конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів з висновками по кожному розділу, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел (120 найменувань, з урахуванням публікацій автора) та додатків. Загальний обсяг роботи складається з 205 сторінок і містить: 57 рисунків та 16 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета і задачі дослідження, визначені об'єкт, предмет і методи досліджень, представлені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача в розробку і рішення проблемних задач, результати роботи і їхня апробація, публікації, структура і обсяг дисертації.

У першому розділі на підставі літературного огляду сучасних тенденцій обслуговування металургійного обладнання показано, що на даному етапі склалися підстави для функціонування змішаної системи ремонтів, яка є найбільш раціональною та дозволяє зберегти достатні показники надійності при зменшенні питомих витрат на ТОіР. Показано, що висока аварійність і великі збитки від аварії роблять доменне виробництво ризикованим (порівняно з іншими металургійними переділами), а найбільший ризик експлуатації притаманний конструкціям ДП. Враховуючи чутливість доменної технології до простоїв, для безпечного функціонування доменного комплексу необхідно контролювати ризик експлуатації конструкцій печі. В цьому аспекті доцільно перейти до проактивної стратегії обслуговування, при якій актуально знати періодичність інспектування.

Маючи час служби  $T_0$ , відносну вартість ремонтних витрат  $c_r$  і відносний до часу інспектування час ремонтів  $T_r$  за критеріями мінімумів цих показників одержуємо оптимальний міжінспекційний інтервал:

$$\delta_{opt} = \frac{1}{\ln \frac{T_r \cdot c_r}{T_0}}. \quad (1)$$

Зв'язок міжінспекційного інтервалу з заданим терміном служби  $T_0$  знайдено за умови незмінності інтенсивності витрат на ТОіР для експонентного закону надійності:

$$\delta_{opt} = (2T_0/c_r)^{1/2}. \quad (2)$$

За таких самих умов відома ще одна форма зв'язку:

$$(\delta/T_0) - (1 - \exp(-\delta/T_0)) = 1/(T_0 \cdot c_r). \quad (3)$$

З цього рівняння прийнявши  $T_0$  можна отримати оптимальний відносний міжінспекційний період  $\delta_{opt}^r$ .

Із графіків залежностей (1 – 3) для відносних періодів  $\delta_{opt}^r$  можна вважати, що розбіжність між трьома моделями незначна (рис. 1). Чим дорожче ремонт, чим менше вартість інспекції, тим частіше можна її проводити. При величинах

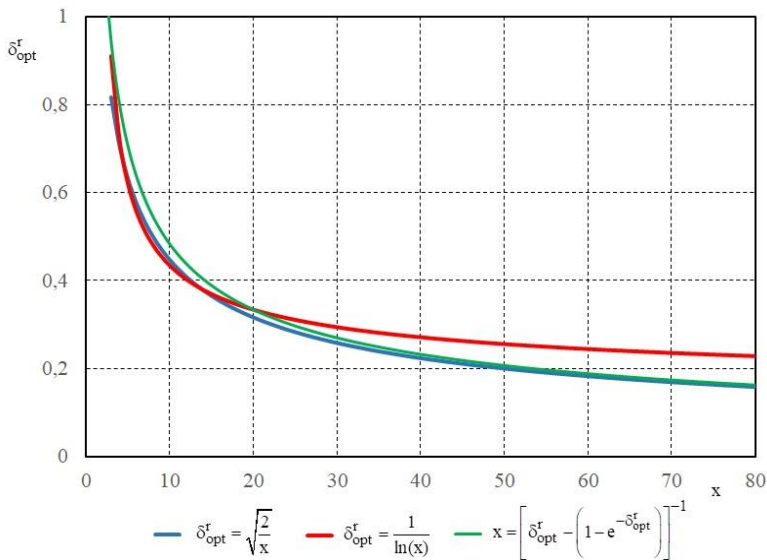


Рис. 1. Графіки для оптимальних відносних міжінспекційних інтервалів  $\delta_{opt}^r$ , отримані для моделі (1) ( $x = T_r \cdot c_r$ ), для моделі (2) ( $x = c_r$ ), а також для моделі (3) ( $x = c_r$ )

перебування системи у фазі технічного стану в момент часу контролю  $t_j$  і «вартості» перебування системи в даній фазі  $C_k$ :

$$C(t) = \sum_{k=1}^k P_k(t_j) \cdot C_k. \quad (4)$$

Ймовірність  $P_k(t_j)$  відіграє тут роль вагового коефіцієнта. У найпоширенішому випадку стан технічної системи описується двома фазами: превентивного ремонту, де питомі витрати  $c_p$ , і коригувального ремонту, з питомими витратами  $c_c$ , у яких відображені і наслідки відмов. Тому для них величиною  $P_p(t_j)$  є ймовірність безвідмовної роботи системи  $P(t)$ , а ймовірність перебування у фазі коригувального ремонту  $P_c(t_j)$  відповідає ймовірності відмови, тобто  $P_c(t_j) = 1 - P(t)$ . Тоді (4) буде виглядати як:

$$C(t) = C_p(t) + C_c(t) = P(t) \cdot C_p + [1 - P(t)] \cdot C_c. \quad (5)$$

Щоб одержати потрібну для оптимізації функцію інтенсивності витрат, слід це вираження розділити на середнє значення наробітку на відмову на інтервалі від 0 до максимально встановленого часу експлуатації  $T_0$ , в якості якого для даного завдання вибирається міжремонтний (міжінспекційний) інтервал  $\delta$ .

Графіки складових функції інтенсивності витрат  $c_p(t)$  та  $c_c(t)$  симетричні горизонтальній лінії, що проходить через крапку  $0,5 \cdot c_p$  при рівності  $c_p = c_c$ , тобто якщо відносні витрати, які в цьому випадку зручно позначати, як  $c_r = c_c/c_p$ , рівні одиниці (рис. 2). У такій ситуації функція витрат постійна ( $c_c = c_p = c = \text{const}$ ) і

$c_r > 20 \dots 30$  оптимальна відносна величина міжінспекційного періоду перестає суттєво залежати від цього фактору. Для об'єктів, що визначають безпеку виробництва, у яких висока відносна вартість ремонту  $c_r > 80 \dots 100$ , оптимальний відносний інтервал становить  $\delta_{opt}^r = 0,15 \dots 0,20$ . Таким чином, для механічних систем промислового виробництва, дотримуючись даних моделей, можна рекомендувати 3–6 інспекцій за весь термін служби.

Ймовірнісно-вартісна модель у загальному випадку представляє суму добутоків ймовірності  $P_k(t_j)$



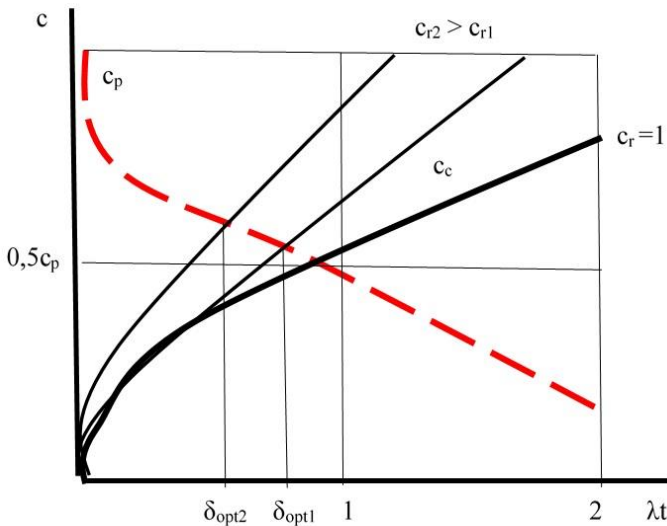


Рис. 2. Графіки інтенсивності витрат на профілактичні (пунктир) і після відмовні (суцільні) відновлення для різних відносних вартостей  $c_r$

що при зростанні відносної вартості післяаварійного ремонту оптимальний період між відновлювальними заходами (попереджувальний ремонт, інспекція) зменшується. Це може призвести до ситуації, коли відпаде доцільність оптимізації. Тому для систем з великим ризиком, таким як конструкції ДП, доцільно використовувати стратегію експлуатації за контролем безпеки.

Розглянута можливість використання ризику у якості діагностичного параметру, який є наслідком зв'язку ризику з питомими витратами на експлуатацію. Показано, що ризику, як діагностичній ознаці, притаманні ті ж самі недоліки, які властиві імовірно-вартісним моделям. У якості альтернативного показника ризику запропоновано комплексний діагностичний параметр у вигляді ресурсного індексу безпеки. Використання методу індексу безпеки дозволяє вирішити проблему знаходження компромісу між чотирма параметрами режиму інспектування, кожний з яких має оптимальне значення. Наведено принцип використання індексу безпеки для експлуатації простих і складних механічних систем до перед відмовного стану.

Запропоновано методу ідентифікації моделей деградаційних процесів з метою збільшення безпеки, якою можна вважати процедуру мінімізації систематичної помилки, яка дає зниження ступеня невизначеності деградаційного процесу.

Разом із цим, ідентифікацію можна трактувати як зниження ступеня невизначеності деградаційного процесу. В ідеалі – це перехід від стохастичного процесу до детермінованого. Кількісно це можна виразити за допомогою зменшення дисперсії діагностичного параметра  $S_y^2$  (зовнішнього фактора), що тягне за собою зменшення варіації очікуваної довговічності  $v_n$ , внесок у яку вносить ще і варіація  $v_a$ , пов'язана із природою деградаційного процесу (внутрішній фактор):

$$v_N = \sqrt{v_a^2 + v_y^2} = \sqrt{v_a^2 + (S_y/y_m)^2}. \quad (6)$$

оптимізації не підлягає. У дійсності для механічних систем  $c_p < c_c$ , функції  $c_p(t)$  та  $c_c(t)$  убувають і зростають із різною інтенсивністю, а їх сумарна функція буде мати мінімум у крапці їх перетинання, яка відповідає  $\delta_{opt}$ . Чим більше величина  $c_r$ , тим менше інтервал  $\delta_{opt}$  і тим крутіше область графіка що сходиться  $c(t)$ . У принципі, при  $c_p \ll c_c$  можлива ситуація, коли  $\delta_{opt} \rightarrow 0$ .

У другому розділі на підставі аналізу, як математико-статистичних оптимізаційних моделей, так і моделей ймовірно-фізичного типу показано,

На цій основі росте оцінка гарантованого ресурсу  $i$ , у підсумку, збільшується безпека разом зі ступенем виробітку ресурсу. У свою чергу, зазначені можливості досягаються за допомогою реалізації концепції покрокового уточнення оцінок параметрів деградаційного процесу. Уточнююча функція представляє собою відношення середньоквадратичних відхилень параметрів, встановлених при інспекції (фактичні)  $S_j$ , до обраних апріорно при моделюванні  $S_m$ . Для лінійного деградаційного процесу таким параметром є його інтенсивність або швидкість  $V_y$ . Тоді уточнююча функція буде виглядати так:

$$p(j) = S_{Vj} / S_{Vm}. \quad (7)$$

Її вплив на розсіювання довговічностей (7) здійснюється таким чином:

$$v_y = y_j \cdot V_y \cdot p(j). \quad (8)$$

Відомі формули для отримання уточнюючої функції, в залежності від типу моделі деградаційного процесу і кількості інспекцій  $j$ .

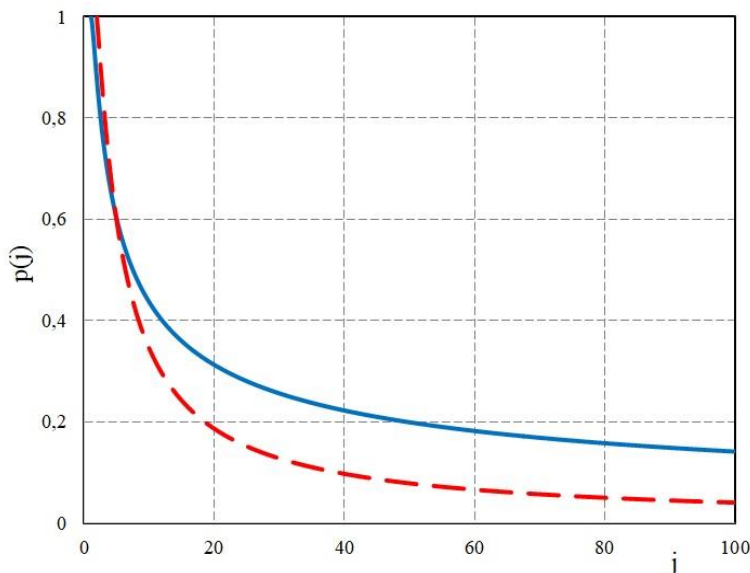


Рис. 3. Графіки уточнюючих функцій (11) (пунктир) і (12) (суцільна)

Із графіків функцій  $p(j)$  (рис.

3) видно, що завдяки контролю можна в кілька раз зменшити початково обрану варіацію параметрів деградаційного процесу, представивши його, практично, детермінованим. Після 10...30 контрольних крапок відбувається своєрідне «насичення» і функція  $p(j)$  змінюється незначно. Тому таку кількість  $j$  до заміни об'єкта можна вважати раціональною. Вона на порядок більше, ніж оптимальна кількість інспекцій, одержувана за економічними критеріями.

**У третьому розділі** проведено комплексні дослідження деградації металу кожуху ДП після 14-річної експлуатації. Обстеження оболонки ДП показало, що вона знаходиться в незадовільному стані внаслідок жорстких умов експлуатації і обслуговування. До 50...5% поверхні кожуху шахти ДП деформовано, 30% холодильників вийшли з ладу, залишкова товщина футеровки склала 30...40%. Зразки для досліджень було вирізано з трьох ділянок демонтованого кожуху. З неохолоджуваної ділянки шахти кожуху (1 зона, висота 24,9 м), з охолоджуваної ділянки шахти кожуху (2 зона, висота 20 м), з фурменної ділянки кожуху (3 зона).

Розроблено методу побудови деформаційної моделі втоми з контролем напружень та отримано необхідні моделі циклічного зміцнення сталі 09Г2С. В даному випадку модель зміцнення мала на меті з'ясування рівнів напруження, від яких потерпав матеріал під час експлуатації. Різниця в показниках міцності матеріалу з різних зон кожуху при майже однаковому хімічному складі свідчить про різний рівень діючих напружень в зонах кожуху.

Повторно-статичні випробування при триточковому згині підтвердили більш високі показники міцності металу фурменої зони (табл. 1). Таке явище варто розглядати як різні фази зміцнення одного матеріалу. Більш інтенсивне окислення

Таблиця 1 – Показники циклічного зміцнення сталі 09Г2С для зон кожуху ДП.

Зона	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_{e0}$ , МПа	$\sigma_{ec}$ , МПа	$\sigma_{T0}$ , МПа	$\sigma_{Tc}$ , МПа	$\alpha_e$	$\alpha_T$
1, 2	470	374	470	515	547*	1,26	1,06
3	582	548	565	590	605*	1,03	1,025

\* - отримано шляхом екстраполяції кривої деформування за модулем зміцнення

металу фурменої зони супроводжується підвищеними напруженнями теплового походження.

Ступень циклічного зміцнення  $\alpha_e$  сталі 09Г2С отримано експериментально, а модель оброблена на підставі повного факторного експерименту. Вона побудована для відносних значень  $\bar{\sigma}_{\max} = \sigma_{\max} / \sigma_{e0}$ ,  $\bar{\sigma}_{e0} = \sigma_{e0} / \sigma_{e00}$ :

$$\alpha_e = -0,69 + 1,67 \cdot \bar{\sigma}_{\max} + 0,71 \cdot \bar{\sigma}_{e0} - 0,79 \cdot \bar{\sigma}_{\max} \cdot \bar{\sigma}_{e0}. \quad (9)$$

Тут через  $\sigma_{e00}$  позначена первісна межа пружності при розтягуванні недеформованого металу. Якщо ступінь зміцнення після експлуатації кожуху прийняти по відношенню меж плинності металу фурменої зони до металу з шахти ДП –  $\alpha_e = 427/417 = 1,02$  (табл. 1), відносні максимальні напруження в 3-ій зоні становлять  $\bar{\sigma}_{\max} = 1,136$ . Або  $\sigma_{\max} = 340$  МПа. З тих же міркувань максимальні напруження в зоні шахти (1, 2 зони) становили  $\sigma_{\max} = 300$  МПа.

За результатами випробувань можна приймати модуль зміцнення  $E_p = 10^{-6}$  МПа. Діаграми деформування до максимального напруження циклу, а також до початку процесу стабілізації, реєструвались для кожного зразка. Це саме дає можливість отримати моделі втоми в силовій  $N(\sigma)$  і деформаційній  $N(\epsilon)$  трактовках.

Аналіз тріщиноутворення та руйнування має на меті отримання якісних ознак для діагностування технічного стану металу кожуху ДП. Тріщини утворюються на розтягнутій зоні зразків в декількох місцях, демонструючи багатоджерельність пошкодження. Така ситуація характерна для високих рівнів напружень, коли тріщини не встигають об'єднатися в єдину магістральну.

Суттєвої різниці довговічності  $N$  до появи тріщини між зразками, що вирізані були з різних зон кожуху ДП, не виявлено. Це дає підставу побудувати єдину криву втоми для всіх випробуваних зразків.

В багатьох випадках деформаційні критерії є інваріантними, як до асиметрії циклу, так і до складного напруженого стану. Тому представляє інтерес для розрахунків довговічності кожуху ДП до появи тріщини застосувати деформаційні критерії. Такі спроби для кожухів доменних агрегатів мали місце раніше. Але в цих розрахунках враховуються тільки деформації, що призводять до малоциклових

пошкоджень. Зараз поставлена задача збільшити цей термін, практично, удвічі. Тому відомі моделі і алгоритми потребують, принаймні, перевірки і удосконалення.

Для металургійного обладнання була успішно застосована модифікована модель Басквіна–Менсона–Коффіна у компактному вигляді:

$$\varepsilon_a = A \cdot N^{-0,6} + B \cdot (N_G/N)^{1/m}. \quad (10)$$

де  $N_G$  – кількість циклів, що відповідає границі витривалості;  $\varepsilon_a$  – амплітудна деформація циклу;  $m$  – показник нахилу кривої багатоциклової втоми з рівнянням ступеневого типу;  $A$  і  $B$  – параметри рівняння.

Таке рівняння варто застосовувати в широкому діапазоні навантажень, і коли є результати експериментальних випробувань в «м'якому» режимі (з контролем напружень, а не деформацій) для багатоциклової області. Зважаючи на результати статичних і циклічних випробувань, можна прийняти такі параметри деформаційної моделі втоми:  $A = 0,25$ ;  $B = 0,0008$ ;  $N_G = 2 \cdot 10^6$ ;  $m = 10$ .

За визначеними, таким способом, амплітудами деформацій побудована в напівлогарифмічних координатах експериментальна крива втоми може бути апроксимована ступеневим рівнянням (рис. 5):

$$\varepsilon_a = \left(21,2 \cdot 10^{-3}\right) / (\lg N)^{1,73}. \quad (11)$$

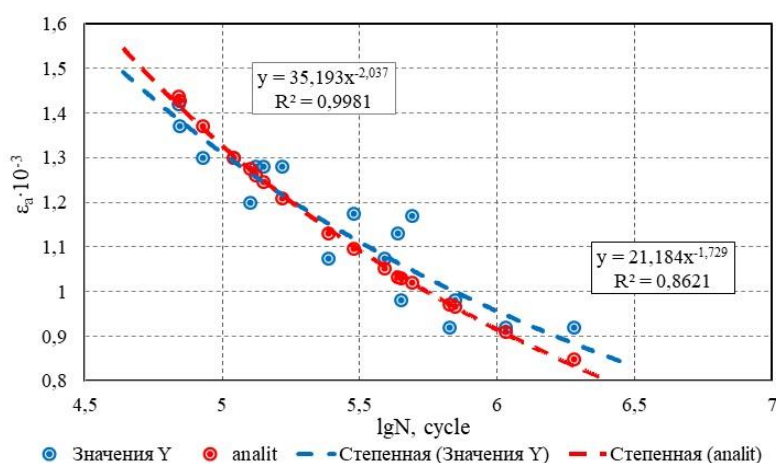


Рис. 4. Результати втомних випробувань для деформаційних критеріїв (значення  $Y$ ), експериментальна крива втоми (ступенева, значення  $Y$ ), а також аналітична крива втоми (analit)

рахунок цього підвищити рівень прогнозованої безпеки.

Графік аналітичної моделі (10), який побудований в тих самих напівлогарифмічних координатах, показує, що вона також може бути представлена аналогічною ступеневою залежністю (analit, рис. 4):

$$\varepsilon_a = \left(35,2 \cdot 10^{-3}\right) / (\lg N)^2. \quad (12)$$

Різниця між довговічностями, які визначаються за обома рівняннями не перевищує 3%. Тому деформаційна модель втоми для матеріалу кожухів ДП може мати наступну загальну форму квадратичної гіперболи:

Тіснота зв'язку між змінними цього регресивного рівняння характеризується коефіцієнтом кореляції, який на рис. 4 позначений, як  $R^2 = 0,86$ . Для рівняння регресії, отриманому за цими ж даними в силівій постановці, коефіцієнт кореляції є меншим і складає  $R^2 = 0,81$ . З цих міркувань варто надати перевагу деформаційній моделі. Це також свідчить про зменшення розпорошення довговічності при використанні деформаційних критеріїв, що підтверджує можливість за

$$\varepsilon_a = E_0 / (\lg N)^2. \quad (13)$$

Випробування при циклічному навантаженні для кожного зразка проведено при 2-3 рівнях згинального моменту. Спочатку на 1 рівні «виросувалась» тріщина і визначалось значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН)  $K_{fc1}$ . Після цього навантаження зменшувалось, тріщина зростала далі до переходу до в'язкої фази руйнування. В області практичних випадків для КІН запропонована залежність:

$$K_I = 0.368 \cdot \sigma \cdot \exp(3,33 \cdot a_r) \cdot \sqrt{h}. \quad (14)$$

де  $a_r$  – відносна довжина тріщини до висоти зразка  $h$ .

Деформування на подальших рівнях відбувається при збільшенні асиметрії циклу від значень 0,12...0,16 до значень 0,30...0,32. Водночас зменшується розмах напружень  $\Delta\sigma$  та КІН  $\Delta K$ . Зростання асиметрії циклу зазвичай веде до зменшення критичного  $K_{fc}$ . Натомість спостерігається його зростання на 20...25% для максимальних КІН циклу  $K_{fcmax}$ . Такого зростання не відбувається для КІН, виражених для розмахів напружень  $\Delta K$ . Це свідчить про зменшення впливу чинника асиметрії для процесу циклічного руйнування, якщо він моделюється розмахами КІН. Коефіцієнти варіації величин  $K_{fc}$  зменшуються в 2...3 рази при переході від  $K_{fcmax}$  до  $\Delta K_{fc}$  (табл. 2). Такий результат відповідає сталим уявленням про процес розвитку тріщини.

Таблиця 2 – Критичні КІН для зон кожуху, а також КІН  $K^*$  для  $v = 10^{-7}$  м/цикл

Зона розташування зразків	Середні значення $K_{fcmax}$ , МПа $\cdot \sqrt{м}$	Коефіцієнти варіації $K_{fcmax}$	Середні значення $\Delta K_{fc}$ , МПа $\cdot \sqrt{м}$	Коефіцієнти варіації $\Delta K_{fc}$	$K_{max}^*$ МПа $\cdot \sqrt{м}$	$\Delta K^*$ МПа $\cdot \sqrt{м}$
1 зона	99	0,190	78	0,060	60	42
2 зона	103	0,116	87	0,049	86	60
3 зона	87	0,087	73	0,057	70	50

Дослідження твердості проводили на зразках, які попередньо були випробувані на триточковий згин. Вимірювалась твердість зразків з різних зон кожуху. Вимірювання здійснюється контактним-резонансним методом за допомогою алмазного індентора. Перед початком вимірювань усі зразки були відшліфовані. Потім їх поверхня була поділена на ділянки розміром 10×10 мм. Кількість ділянок в залежності від розміру зразка складала від 36 до 42.

У якості ознаки пошкодження використовувалася не сама величина твердості, а показники її розпорошення (LM-метода). В її канонічній формі розпорошення запропоновано контролювати, так званим, коефіцієнтом гомогенності Вейбула  $m$ , який розраховують за формулою Гумбеля.

Для прийнятих умов експерименту коефіцієнт гомогенності з урахуванням середньоквадратичного відхилення логарифма твердості  $S_{\lg H}$  є зв'язаним з

коефіцієнтом варіації  $v_{HB}$ :

$$m = 0,4343/S_{lg HB} = 0,4343/(0,4343 \cdot v_{HB}) = 1/v_{HB}. \quad (15)$$

У підсумку коефіцієнт гомогенності є оберненою величиною до звичайного коефіцієнту варіації твердості  $v_{HB}$ . Тому в наданих дослідженнях у якості показника пошкодженості використано цю характеристику (табл. 3). В даному випадку коефіцієнт варіації  $v_{HB}$  підраховано за середніми показниками твердості на ділянках  $10 \times 10$  мм і характеризує розсіяння твердості на площі усього зразка. У останньому стовбці цієї таблиці приведено відносний коефіцієнт варіації, де за базу (за знаменник) взято величину  $v_{HB} = 0,035$  для 2 зони як найменшої.

Слід звернути увагу на однорідність коефіцієнта варіації в межах одного зразка і однієї зони кожуху. Його значення суттєво не змінюється навіть в охресті вершини тріщини. Можна припускати, що LM-метода реагує тільки на розсіяне втомне пошкодження.

Таблиця 3 – Результати вимірювань твердості зразків кожуху

Зона розташування зразків	Кількість ділянок в зразку	Середня твердість по зразку HB, МПа	Коефіцієнт варіації твердості по зразку, $v_{HB}$	Відносний коефіцієнт варіації твердості
1 зона	36	180,7	0,06	1,7
2 зона	36	146,9	0,035	1,0
3 зона	42	127,5	0,12	3,4

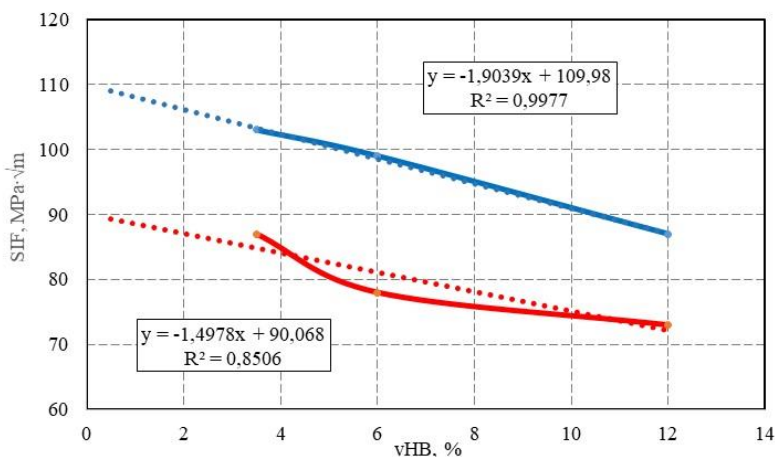


Рис. 5. Взаємозв'язок між критичним циклічним КІН (SIF), вираженим через максимальні напруження  $K_{fcmax}$  (верхня крива) і розмахи напружень  $\Delta K_{fc}$  (нижня крива), і коефіцієнтом варіації твердості

лінійний характер (рис. 5). Якщо представити експериментально знайдені показники в'язкості руйнування як поточні значення процесу старіння або пошкодження матеріалу, то їх поведінка може бути формалізована рівнянням:

$$K_{fc}^d = K_{fc} - r_{HBS} \cdot v_{HB}. \quad (16)$$

Натомість, поміж зонами кожуху спостерігається суттєва різниця в значеннях  $v_{HB}$ . Відносний коефіцієнт варіації показує відносне пошкодження металу. За його значенням видно, що найменше пошкодження отримав метал у 2-гій зоні. Найбільше пошкодження, а саме в 3,4 рази відносно 2-ої охолоджуваної зони, спостерігається для 3-ої фурменої зони.

Із співставлення результатів дослідження твердості і в'язкості руйнування сталі 09Г2С видно, що вказана кореляція має

В такому випадку присутній тут КІН  $K_{fc}$  має зміст циклічної в'язкості руйнування для ідеального непошкодженого металу. Найбільш тісна кореляція спостерігається для максимальних КІН. Для них в цьому рівнянні  $K_{fc} = K_{fcmax} = 110 \text{ МПа} \cdot \sqrt{m}$ , а коефіцієнт пропорційності  $r_{HBS} = 1,9 \text{ МПа} \cdot \sqrt{m}/\%$ .

Досліджену зміну критичних КІН можна вважати наслідком впливу експлуатаційного пошкодження. Тобто, критична в'язкість руйнування сталі 09Г2С реагує на експлуатаційний наробіток кожуху ДП і може слугувати за діагностичний параметр. Такий спосіб діагностування технічного стану кожуху ДП є відомим. При цьому з кожуху відбирають мікрозразки для випробувань шляхом руйнування. Така операція не завжди можлива. Тому доцільно проводити діагностування неруйнівними способами, таким як дослідження твердості. Отримана модель (16) дає таку можливість.

На підставі цієї моделі можна вважати значення  $K_{fcmax} = 110 \text{ МПа} \cdot \sqrt{m}$  за первісне. Під впливом експлуатаційного процесу цей показник зменшується на 7...25% (в залежності від зони кожуху). Таким чином довготривала експлуатація сталі 09Г2С в оболонці ДП не призвела до її теплового окрихчення. Принаймні, це стосується ділянок кожуху, з якого було вирізані піддослідні зразки.

За результатом статичних і циклічних випробувань отримано деформаційні моделі опору втомі, циклічного зміцнення, опору розповсюдження тріщини і руйнуванню для зон кожуху. Завдяки цьому було зроблено висновки щодо ступеню пошкодженості металу по зонах кожуху. Незважаючи на незадовільний стан самого кожуху, його метал залишає достатні деформативні та міцності властивості.

Висока деформаційна здатність є ознакою високої в'язкості руйнування і ознакою відсутності окрихчення. Можна вважати, що довготривале циклічне напруження не призводить до деградації сталі 09Г2С.

Випробування твердості металу кожухів за допомогою портативних твердомірів передбачено рекомендаціями по діагностуванню технічного стану ДП. На відміну від цього способу, ЛМ-спосіб є більш інформативним і придатний до прогнозування залишкового ресурсу.

В ієрархії діагностичних ознак металу в конструкції ДП проглядається така залежність. Механічні властивості при статичному навантаженні, практично, ніяк не реагують на наробіток і не можуть використовуватися для оцінки пошкодження. Теж саме можна сказати про структуру і хімічний склад металу. Характеристики опору втомі до появи тріщини відносно слабо реагують на наробіток. Необхідно мати великий обсяг зразків, що робить такий спосіб трудомістким і нереальним. Натомість характеристики опору руйнуванню і розвитку дефектів (16) змінюються при наробітку на десятки відсотків від первісного значення (рис. 6). Тому вони і використані для діагностування.

Показники розпорошення твердості сталі 09Г2С при наробітку змінюються на сотні відсотків (тобто, в рази) (рис. 6). Це є сильною діагностичною ознакою. Тому вимірювання твердості є перспективним способом оцінки технічного стану металевих конструкцій доменного комплексу.

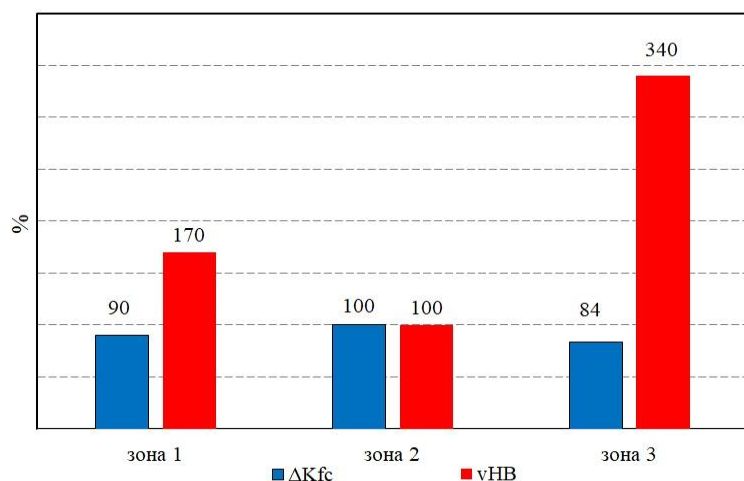


Рис. 6. Показники пошкодженості зон кожуху ДП у вигляді відносних величин  $\Delta K_{fc}$  і  $v_{HB}$

Перехід від розсіяння деформації до розсіяння логарифма довговічності  $S_{y \lg N}$  робиться за допомогою показника нахилу кривої втоми  $m$ :

$$S_{y \lg N} = S_{\varepsilon} / m = (\varepsilon_{ae} \cdot v_{\varepsilon}) / m. \quad (17)$$

Показник нахилу кривої втоми в точці з координатами  $\varepsilon_{ae}$ ,  $\lg N$  визначається як похідна рівняння:

$$m = \left. \frac{d\varepsilon}{d \lg N} \right|_{\varepsilon_{ae}}. \quad (18)$$

Зважаючи на форму рівняння (17), отримуємо:

$$m = (2 \cdot \varepsilon_{ae}) / (\lg \bar{N})^3. \quad (19)$$

Тоді складова СКВ логарифма довговічності від зовнішнього чинника остаточно набуде вигляд:

$$S_{y \lg N} = 0,5 \cdot v_{\varepsilon} \cdot (\lg \bar{N})^3. \quad (20)$$

Медіанний логарифм довговічності  $\overline{\lg N}$  в формулі (20) розраховується в залежності від СКВ довговічності при нестационарному навантаженні як:

$$\overline{\lg N} = \lg \bar{N} - 1,15 \cdot S_{\lg N}^2. \quad (21)$$

Для можливості користування методом індексу безпеки необхідно враховувати розсіяння числа циклів наробітку. Це здійснюється через варіацію частоти навантаження  $v_f$ , яка залежить, головним чином, від кількості випусків чавуну і кількості «тихих ходів» ДП. За рекомендаціями обрано середню частоту зміни напружень в кожусі  $f = 152$  цикли на місяць при коефіцієнті варіації  $v_f = 0,37$ . Запропоновано модель розширення СКВ логарифма довговічностей до  $S_{y \lg Nf}$ :

$$S_{\lg Nf} = \sqrt{(v_f / 2,3)^2 + S_{\lg N}^2}. \quad (22)$$

Такий спосіб дає можливість користуватися при діагностуванні тільки середнім значенням частоти  $f$ . З урахуванням розсіяння наробітку відповідно (28) змінюється

У четвертому розділі виконано огляд відомих моделей для оцінки несучої спроможності кожуху ДП, на підставі чого розроблено алгоритм прогнозування функції розподілу довговічності до появи тріщини в металі кожуху ДП, в якому вперше винайдено рішення для середньоквадратичного відхилення (СКВ) довговічності при нестационарному навантаженні для деформаційної кривої втоми у напівлогарифмічних координатах.



медіанний логарифм довговічності  $\overline{\lg N_f}$ . Це значення разом зі значенням  $S_{\lg N_f}$  утворює функцію розподілу довговічностей (ФРД)  $\lg N_{Pf}$  з урахуванням варіації наробітку.

Умови експлуатації металу в фурменій зоні кожуху є жорсткішими, ніж в шахті кожуху. Тому середній термін експлуатації  $\bar{T}_{(f)}$  кожуху в фурменій зоні на 30...40 % є меншим, ніж в зоні шахти. Але гарантований термін експлуатації  $T_{98}$  в фурменій зоні є дещо більшим, аніж в зоні шахти. Це є наслідком розрахунку кожуху шахти як єдиного великого елемента, а фурмена зона, фактично, розрахована як окремий компактний елемент. Тому варіація напружень  $v_{\sigma}$  в шахті значно вище, чим в фурменій зоні, що і зменшує в підсумку гарантований ресурс. Але для шахтної зони існують резерви збільшення безпеки. Вони обумовлені переходом від представлення кожуху як єдиного елемента до по-елементного розрахунку шахти. Це відбувається при покроковій оцінці технічного стану під час контролювання. В прийнятих моделях експлуатації їх ідентифікація втілюється шляхом зменшення величин  $v_{\sigma}$  і  $c_{ol}$ . Для шахтної зони кожуху за цей рахунок гарантований ресурс може бути збільшеним з 5,4 років до 15 років і вище.

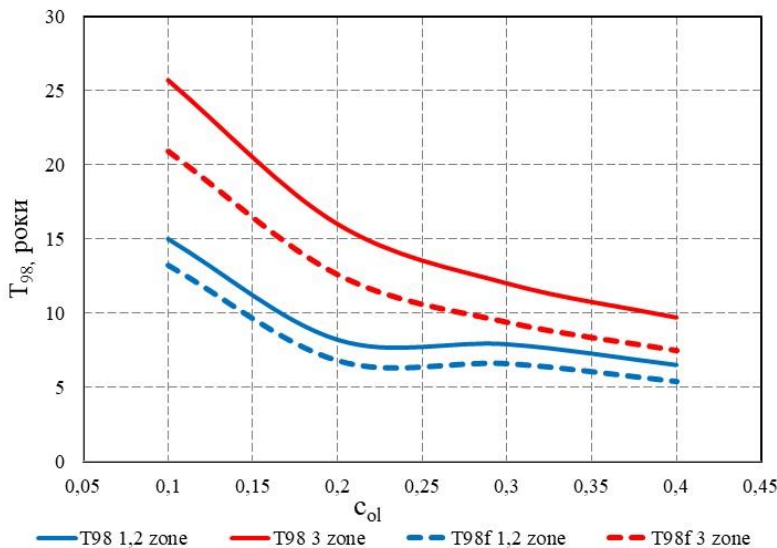


Рис. 7. Гарантовані ресурси зон кожуху ДП без урахування варіації наробітку (суцільні) і з урахуванням варіації наробітку (пунктир)

чинника варіації наробітку. Подолання його впливу відбувається за рахунок ідентифікації моделі навантаження під час експлуатації. Тобто діагностування та моніторинг циклозмін напружень дає таку можливість.

З модельних уявлень про ресурс витікає, що збільшення надійності та безпеки кожухів ДП відбувається за рахунок зменшення різниці між середнім та гарантованим значеннями строку служби:  $T_{Pf} \rightarrow \bar{T}$ . З цих же міркувань ще більші резерви криються в зменшенні чинника перевантажувального рівня, тобто при  $c_{ol} \rightarrow 0$ . На практиці це частіше за все означає зменшення часу роботи ДП зі зламаним холодильником або зменшення кількості непрацюючих холодильників.

Ще один резерв збільшення гарантованого ресурсу та наближення його до середнього обумовлений зменшенням впливу чинника варіації наробітку  $v_f$ . Середні строки служби зон кожуху, що прогнозовані без врахування варіації частоти навантаження  $\bar{T}$ , є майже на порядок більшими, аніж строки  $\bar{T}_{(f)}$  (рис. 7).

На відміну від гарантованих ресурсів, середній ресурс кожуху в шахтній зоні на 20...25% є більшим, аніж в фурменій зоні.

Це свідчить про впливовість

Враховуючи те, що досліджений метал вже відпрацював в кожусі ДП строк в 14 років, можна розглядати наведені розрахунки як залишковий ресурс. Додав цей строк до тих, які прогнозовані, можна бачити, що майже завжди метал витримає 25-річну кампанію ДП.

**П'ятий розділ** присвячено впровадженню в практику теоретичних розробок і результатів експериментальних досліджень. Оскільки машини, механізми та конструкції доменного комплексу мають різну значимість за наслідками відмови (різняються за рівнем ризику), відносяться до різних амортизаційних груп, маючи неоднакову вартість, цілком доцільно, що до механічного обладнання необхідний диференційований підхід в аспекті його експлуатаційних стратегій. В результаті утворюється змішана її форма. В її основі знаходиться, так звана, процедура категоризації (іноді, паспортизація) обладнання, коли обладнання поділяють за категоріями, які різняться стратегіями використання і ТОіР.

Ефективність застосування змішаної стратегії підтверджується тим, що за її умов показники простоїв і тихих ходів майже в 3 рази нижче, ніж в середньому по Україні і відповідають світовій практиці. Показано, що доцільність розробленої системи ТОіР також видна з динаміки зміни показників: від моменту її впровадження відносний час простоїв і тихих ходів знизився більш, ніж в 2 рази. Наведено особливості капітального ремонту ДП при змішаній стратегії.

Для кожухів шахти ДП розроблений алгоритм діагностування на основі контролю ресурсного індексу безпеки. Маючи параметри функції розподілу ресурсу, нескладно отримати функцію безпеки  $\beta(T)$  на цей період експлуатації. З визначення індексу безпеки, його зміна в часі буде виглядати таким чином:

$$\beta_R(t) = \beta_R^0 - \lg [T \cdot f \cdot (1 + v_f \cdot u_R)], \quad (23)$$

Первісний індекс безпеки  $\beta_R^0$  визначається за допомогою алгоритму прогнозування гарантованого ресурсу, який розроблено в 4 розділі. Ефективність процедури ідентифікації моделей технічного стану продемонстрована на прикладі кожуху ДП. Показано, як ідентифікація призводить до зменшення числа ремонтних операцій, що виражається в збільшенні періодів між заходами відновлення. Таке збільшення може складати понад 70% відносно прогнозованого на початку експлуатації ресурсу.

## ВИСНОВКИ

*У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача зменшення витрат на технічне обслуговування і ремонт устаткування доменного комплексу шляхом впровадження змішаної стратегії використання обладнання, складовою частиною якої є алгоритм визначення залишкового ресурсу елементів кожуху доменної печі.*

Основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

1. Обладнання доменного виробництва відрізняє від інших металургійних переділів найвищий ступінь аварійності, як по частоті відмов, так і по втратах від них. Також доменне виробництво вкрай чутливе до позапланових простоїв. В той же час, доля поточних витрат на ТОіР в собівартості вітчизняного чавуну зменшується

порівняно зі світовими тенденціями. Стандарти Індустрії 4.0, вимоги «зеленої металургії» диктують подовження кампанії доменних печей понад 20...25 років з готовністю устаткування не меншим 95%. Це є майже вдвічі більшим, аніж термін кампанії вітчизняних ДП. Проведений аналіз сценаріїв аварій двох ДП, що супроводжувалися їх знищенням, підтвердив доцільність використання проактивної стратегії обслуговування з контролем рівня безпеки до несучих конструкцій. Такий підхід сприятиме зменшенню частоти відмов зі зниженням збитків від них, подовженню кампанії ДП, попри збільшення поточних витрат на ТОiP за рахунок більшої вартості на інспектування.

2. Аналіз економіко-статистичних моделей показує, що оптимальний міжінспекційний інтервал зменшується при зростанні ризику, а при зростанні вартості інспектування, навпаки, зростає. Це може стати передумовою для оснащення обладнання вбудованими системами контролю, які здійснюють суцільний моніторинг. Втім, природа деградаційних процесів, а також властивості ідентифікації показують про своєрідне «насичення» інформацією, про наявність природної межі уточнення. Так, з економіко-статистичних критеріїв буде оптимальним 4...6 разів інспектувати об'єкт за його міжремонтний період. Функція уточнення слабо змінюється після 10...20 контролів діагностичного параметра. Тому суцільний моніторинг діагностичного параметра не завжди виправданий. Доцільніше **фіксувати факти виходу діагностичних параметрів за допустимі рамки** і після цього коригувати залишковий ресурс.

3. Отримала подальший розвиток методологія ресурсного індексу безпеки, яка націлена на підтримку прийнятного рівня ризику при експлуатації, що практикується для відповідальних механічних систем. У цій концепції період контролю встановлюється на підставі величини безрозмірного ризику, допустима величина якого варіюється в залежності від різних умов. Гранична величина індексу безпеки очевидна при будь-яких умовах і дорівнює нулю. По ній без урахування попереджувальних допусків встановлюється дата контролю технічного стану.

4. Найбільше пошкодження метал кожуху отримує в фурменій зоні: за показниками в'язкості руйнування падіння складає 16%. При цьому розпорошення твердості збільшується в 3,4 рази. Показники статичної міцності фурменої зони після експлуатації збільшились на приблизно 15%, що також є ознакою появи більш високих робочих деформацій, і як наслідок, отриманого збільшеного пошкодження. Найменше пошкодження метал кожуху отримує в охолоджуваній зоні шахти, хоча зазвичай, розрахункові механічні напруження тут є більшими, ніж угорі шахти в неохолоджуваній зоні. Очевидно, в неохолоджуваній зоні з'являються додаткові термічні напруження. Побудована модель циклічного зміцнення сталі 09Г2С, на підставі якої визначено, що максимальні еквівалентні напруження в фурменій зоні становили 340 МПа, а в шахтній зоні – 300 МПа. Незважаючи на незадовільний стан оболонки ДП і самого кожуху, його метал залишає достатню деформаційну здатність та циклічну міцність.

5. Середній фізичний ресурс кожуху по всіх зонах значимо перевищує 25-річний термін експлуатації за будь-яких її умов. Побоювання визиває гарантований ресурс в зоні шахти при збільшенні параметра блоку навантаження  $c_{01}$ , який призводить до зменшення залишкового ресурсу. Тому для довготривалої

експлуатації необхідно, щоб кількість водночас несправних холодильників не перевищувала 10%.

6. Окрім зменшення параметра блока  $c_{01}$ , ще одним засобом збільшення гарантованого ресурсу і наближення його до середнього ресурсу є ідентифікація моделі навантаження, при якій зменшується варіація діючих напружень і деформацій. В цьому аспекті варто переходити від прогнозування надійності кожуху в цілому як монооб'єкта до поелементного розрахунку надійності окремих ділянок кожуху. За умов використання цієї методи запропоновані правила об'єднання індивідуальних показників надійності елементів крупних конструкцій. Завдяки цьому можна оцінювати гарантований термін експлуатації всієї конструкції. Цей проміжок часу відповідає міжвідновлювальному (міжінспекційному, міжремонтному) інтервалові.

7. Успішне функціонування системи ТОіР в доменному комплексі можливо при її організації на основі змішаних (комбінованих) експлуатаційних стратегій. Ефективність застосування змішаної стратегії підтверджується тим, що за її умов показники простоїв і тихих ходів майже в 3 рази нижче, ніж в середньому по Україні і відповідають світовій практиці. Доцільність розробленої системи ТОіР також видна з динаміки зміни показників: від моменту її впровадження відносний час простоїв і тихих ходів знизився більш, ніж в 2 рази.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

**Статті у виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз:**

1. **Ibragimov M.S.** Application of risk-analysis methods in the maintenance of industrial equipment / S.V. Belodedenko, G.M. Bilichenko and other. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 22. P. 51–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.007> (Scopus).
2. Belodedenko S.V., **Ibragimov M.S.** Models for optimization the preventive maintenance schedules of mechanical systems in metallurgy. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. № 2. С. 26–37. (Index Copernicus).
3. Belodedenko S., Grechany A., **Ibragimov M.** Risk indicators and diagnostic models for sudden failures. *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. 2017. Vol. 88. № 4. P. 111–118. DOI: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2017.04.111](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2017.04.111). (Index Copernicus).
4. **Ibragimov M.S.** Study and Development of Amalgamating Rules for the Reliability Indicators of Power train System Elements / S.V. Belodedenko, V.I. Hanush and other. *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 5. Issue 2. p. 18–29. DOI: <http://dx.doi.org/10.20431/2454-9711.0502003>. (Google Scholar).

**Статті в наукових фахових виданнях:**

5. **Ибрагимов М.С.** Смешанные стратегии эксплуатации для механического оборудования доменного комплекса. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 7. С. 31–35.
6. Белодеденко С.В., **Ибрагимов М.С.** Выбор интервалов между инспекциями при предупредительном обслуживании механического оборудования. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 3. С.93–102.
7. **Ибрагимов М.С.** Применение моделей диагностических параметров в виде

случайного процесса для контроля состояния технических систем / С.В. Белодеденко, В.И. Гануш и др. *Металургія: Збірник наукових праць ЗДІА*. 2018. Вип. 40. № 2. С. 115–119.

8. **Ибрагимов М.С.**, Шлемко Ю.И., Пелых И.В. Некоторые особенности капитального ремонта доменной печи при смешанной стратегии технического обслуживания. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2018. № 7. С. 219–223.

**Монографії:**

9. Рабер Л.М., Червинский А.Е., **Ибрагимов М.С.** Несущие конструкции металлургических агрегатов : монография. Днепро : ИМА-Пресс, 2016. 260 с.

10. Белодеденко С.В., **Ибрагимов М.С.** Вопросы периодичности контролей технического состояния механических систем в металлургии : монография. Днепр : Лизунов Пресс, 2017. 79 с.

**Патенти України:**

11. **Ибрагимов М.С.** Пристрій для підвищення стійкості засипного апарата доменної печі : пат. на корисну модель № 124206 Україна : МПК С21В7/18 (2006.01). № u201710538 ; заявл. 31.10.2017 ; опубл. 26.03.2018 ; Бюл. № 8.

12. **Ибрагимов М.С.** Спосіб прискореного введення доменної печі у експлуатацію після капітального ремонту та пристрій для його здійснення : пат. 82799 : МПК С21В5/00, С21В7/00 (2006.01). № a200704032 ; заявл. 12.04.2007 ; опубл. 11.02.2008 ; Бюл. № 3.

13. **Ибрагимов М.С.** Рудний бункер зберігання і вивантаження плавильних шихтових матеріалів в доменну піч : пат. на корисну модель № 133080 Україна : МПК F27В7/38. № u201809832 ; заявл. 02.10.2018 ; опубл. 25.03.2019 ; Бюл. № 6.

**Матеріали наукових конференцій і статті в науково-технічних журналах:**

14. Білодіденко С.В., **Ибрагимов М.С.** Тенденції розвитку моделей технічного обслуговування механічних систем. *Прикладні науково-технічні дослідження* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Івано-Франківськ : Академія Технічних Наук України. 2017. С. 57.

15. Белодеденко С.В., Гречаный А.Н., **Ибрагимов М.С.** Показатели риска и диагностические модели при внезапных отказах. *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування та прогнозування* : Праці V Міжнар. наук.-техн. конф. Тернопіль : ТНТУ, 2017. С. 118–122.

16. Белодеденко С.В., **Ибрагимов М.С.**, Осипов Д.С. Динамика расходов на техническое обслуживание и ремонт оборудования доменного цеха. *Механіка машин – основна складова прикладної механіки* : зб. матеріалів доп. учасн. Всеукр. наук.-техн. конф. Дніпро : НМетАУ, 2017. С. 38-39.

17. **Ibragimov M.S.** Application of risk-analysis methods in the maintenance of industrial equipment / S.V. Belodedenko, G.M. Bilichenko and other. *Proceedings of the First International Symposium on Risk Analysis and Safety of Complex Structures and Components* : Book of Abstracts. Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia. Porto, 2019. P. 340–341.

18. Белодеденко С.В., Гречаный А.Н., **Ибрагимов М.С.** Модели "отложенного ремонта" для обслуживания механических систем. *Вісник сертифікації залізничного транспорту*. 2017. Том. 43. № 3. С.6–12.

19. **Ібрагімов М.С.** Планування періодичності контролю технічних систем на підставі моделей діагностичних параметрів у вигляді випадкового процесу / С.В. Білодієнко, В.І. Гануш та інш. *Вісник сертифікації залізничного транспорту*. 2018. Том. 50. № 4. С.21–26.

## АНОТАЦІЯ

**Ібрагімов М.С. Удосконалення обслуговування устаткування доменного цеху шляхом діагностування його технічного стану. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва». – Національна металургійна академія України МОН, м. Дніпро, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі, яка полягає у вирішенні проблеми суттєвого збільшення кампанії доменних печей (ДП) шляхом удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) механізмів та конструкцій доменного цеху за рахунок розробки комплексного діагностичного показнику, який можливо використовувати для оцінки технічного стану простих і складних механічних систем, а також розробки алгоритмів визначення поточних значень комплексних показників і ресурсів при контролях технічного стану на підставі моделей прогнозування ресурсу з урахуванням ступеню деградації матеріалів.

У дисертаційній роботі отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що у сукупності є суттєвими для рішення актуальної науково-технічної задачі зменшення витрат на технічне обслуговування і ремонт устаткування доменного комплексу шляхом впровадження змішаної стратегії використання обладнання, складовою частиною якої є алгоритм визначення залишкового ресурсу елементів кожуху доменної печі.

У роботі розглянута можливість використання ризику у якості діагностичного параметру, який є наслідком зв'язку ризику з питомими витратами на експлуатацію. Показано, що ризику, як діагностичній ознаці, притаманні ті ж самі недоліки, які властиві ймовірно-вартісним моделям. У якості альтернативного показника ризику запропоновано комплексний діагностичний параметр у вигляді ресурсного індексу безпеки. Використання методу індексу безпеки дозволяє вирішити проблему знаходження компромісу між чотирма параметрами режиму інспектування, кожний з яких має оптимальне значення.

В роботі проведені комплексні механічні випробування та дослідження ступеню деградації зразків металу натурної товщини, вирізаних з трьох зон кожуху після 15 років експлуатації в умовах ДП. При цьому були розроблені моделі опору циклічному деформуванню і руйнуванню, а ступінь деградації визначалася шляхом аналізу показників твердості металу кожуху, діаграм циклічного зміцнення.

Це дозволило розробити методу побудови деформаційної моделі втоми з контролем напружень та отримати необхідні моделі циклічного зміцнення сталі 09Г2С. Побудовані деформаційної моделі втоми показують, що показники статичної міцності фурменої зони після експлуатації збільшились на приблизно 15%, що є ознакою появи більш високих робочих деформацій, і як наслідок, отриманого

збільшеного пошкодження. Найменше пошкодження метал кожуху отримує в охолоджуваній зоні шахти, хоча зазвичай, розрахункові механічні напруження тут є більшими, ніж угорі шахти в неохолоджуваній зоні. Очевидно, в неохолоджуваній зоні з'являються додаткові термічні напруження. Побудована модель циклічного зміцнення сталі 09Г2С, на підставі якої визначено, що максимальні еквівалентні напруження в фурменій зоні становили 340 МПа, а в шахтній зоні – 300 МПа. Отримано лінійний зв'язок між показниками розпорошення твердості і в'язкості руйнування сталі 09Г2С після її довготривалої експлуатації в кожусі ДП. Означена модель показала, що найбільше пошкодження метал кожуху отримує в фурменій зоні: за показниками в'язкості руйнування падіння складає 16%, при цьому розпорошення твердості збільшується в 3,4 рази. Незважаючи на незадовільний стан оболонки ДП і самого кожуху, його метал залишає достатню деформаційну здатність та циклічну міцність.

Розроблений алгоритм прогнозування функції розподілу довговічності до появи тріщини в металі кожуху ДП, в якому вперше винайдено рішення для середньоквадратичного відхилення довговічності при нестационарному навантаженні для деформаційної кривої втоми у напівлогарифмічних координатах показав, що умови експлуатації металу кожуху в фурменій зоні є жорсткішими, аніж в зоні шахти. Тому в цій зоні є більшим пошкодження металу, що відбилось на зменшенні на 20÷25% середнього прогнозованого ресурсу кожуху в фурменій зоні порівняно із шахтною зоною. В той же час, гарантований ресурс в шахтній зоні прогнозується в 1,5÷1,7 рази меншим, ніж в фурменій зоні, що є наслідком більш високої варіації напружень в шахтній зоні, оскільки її висота є на порядок більшою, чим висота фурменої зони. Це свідчить про впливовість чинника варіації напружень на гарантований ресурс. Показано, що середній фізичний ресурс кожуху по всіх зонах значимо перевищує 25-річний термін експлуатації.

Ще одним засобом збільшення гарантованого ресурсу і наближення його до середнього ресурсу є ідентифікація моделі навантаження, при якій зменшується варіація діючих напружень і деформацій. В цьому аспекті варто переходити від прогнозування надійності кожуху в цілому як монооб'єкта до по-елементного розрахунку надійності окремих ділянок кожуху. За умов використання цієї методи запропоновані правила об'єднання індивідуальних показників надійності елементів крупних конструкцій. Завдяки цьому можна оцінювати гарантований термін експлуатації всієї конструкції. Цей проміжок часу відповідає міжвідновлювальному (міжіспекційному, міжремонтному) інтервалові.

Показано, що успішне функціонування системи ТОіР в доменному комплексі можливо при її організації на основі змішаних (комбінованих) експлуатаційних стратегій. Ефективність застосування змішаної стратегії підтверджується тим, що за її умов показники простоїв і тихих ходів майже в 3 рази нижче, ніж в середньому по Україні і відповідають світовій практиці. Доцільність розробленої системи ТОіР також видна з динаміки зміни показників: від моменту її впровадження відносний час простоїв і тихих ходів знизився більш, ніж в 2 рази.

**Ключові слова:** технічне обслуговування і ремонт, доменна піч, кожух, технічний стан, ресурс, індекс безпеки, надійність, довговічність, втома.

## ABSTRACT

### **Ibragimov M.S. Improving the maintenance of blast furnace shop equipment by diagnosing its technical condition. – Manuscript.**

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences on specialty 05.05.08 – «Machines for metallurgical production». – National Metallurgical Academy of Ukraine MES, Dnipro, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific problem, which consists in solving the problem of significant increase of the blast furnace (BF) campaign by improving the system of maintenance and repair (M&R) of mechanisms and structures of the blast furnace due to the development of a complex diagnostic index that can be used to evaluate the technical state of simple and complex mechanical systems, as well as the development of algorithms for determining the current values of complex indicators and resources in the control of technical condition on the dstavi resource forecasting models taking into account the degree of degradation of materials.

In the dissertation, new scientifically grounded theoretical and experimental results are obtained, which are, in the aggregate, essential for solving the actual scientific and technical problem of reducing the cost of maintenance and repair of equipment of the blast furnace complex by implementing a mixed strategy of using the equipment, an integral part of which is the algorithm of determining the elements of the remainder blast furnace casing.

The paper considers the possibility of using risk as a diagnostic parameter, which is a consequence of linking the risk with the specific operating costs. It is shown that the risks, as a diagnostic feature, have the same disadvantages inherent in the probabilistic models. An alternative risk indicator is a comprehensive diagnostic parameter in the form of a resource security index. The use of the security index method helps to solve the problem of finding a compromise between four inspection mode parameters, each of which is of optimal value.

In the paper complex mechanical tests and studies of the degree of degradation of samples of metal of real thickness, cut from three zones of the casing after 15 years of operation in the conditions of BF were carried out. At the same time models of resistance to cyclic deformation and fracture were developed, and the degree of degradation was determined by analyzing the indices of hardness of the metal of the casing, the diagrams of cyclic strengthening.

This made it possible to develop a method of constructing a deformation model of fatigue with stress control and to obtain the necessary models of cyclic hardening of steel 09Г2С. The constructed fatigue deformation model shows that the static tensile strength indices after operation have increased by about 15%, which is a sign of higher working deformations, and as a result, increased damage. The least damage to the casing metal is in the mine cooling zone, although usually the calculated mechanical stresses here are greater than at the top of the mine in the non-cooled zone. Apparently, there are additional thermal stresses in the uncooled area. The model of cyclic hardening of steel 09Г2С was built, on the basis of which it was determined that the maximum equivalent stresses in the tandem zone were 340 MPa and in the mine zone – 300 MPa. A linear relationship was obtained between the hardness and toughness fracture indices of the 09Г2С steel after its long



service life in the BF casing. The indicated model showed that the casing metal receives the most damage in the tuft zone: according to the viscosity index of the fracture drop is 16%, with the hardness dispersion increasing 3,4 times. Despite the unsatisfactory condition of the BF shell and the casing itself, its metal leaves sufficient deformation and cyclic strength.

An algorithm for predicting the function of distribution of durability before the occurrence of a crack in the metal of the DP casing has been developed. In which, for the first time, a solution for the standard deviation of durability under non-stationary loading for a fatigue deformation curve in semilogarithmic coordinates showed that the conditions of operation of the metal of the casing are more stringent than in the mine area. Therefore, there is more damage to the metal in this zone, which reflected a 20÷25% decrease in the average predicted casing resource in the tug zone compared to the mine area. At the same time, the guaranteed resource in the mine zone is projected to be 1,5÷1,7 times smaller than in the trench zone, which is a consequence of the higher variation of stresses in the mine zone, since its height is an order of magnitude greater than the height of the trench zone. This testifies to the influence of the stress variation factor on the guaranteed resource. It is shown that the average physical resource of the casing in all zones significantly exceeds the 25-year service life.

Another means of increasing the guaranteed resource and bringing it closer to the average resource is the identification of a load model, which reduces the variation of the acting stresses and strains. In this aspect, it is worth moving from predicting the reliability of the casing as a whole as a single object to a more elemental calculation of the reliability of individual sections of the casing. Provided this method is used, the rules for combining individual reliability indices for large structural elements are proposed. Thanks to this, you can estimate the guaranteed lifetime of the whole structure. This time interval corresponds to the recovery (inter-inspection, inter-repair) interval.

It is shown that the successful functioning of the M&R system in a domain complex is possible in its organization on the basis of mixed (combined) operational strategies. The effectiveness of the mixed strategy is confirmed by the fact that, under its conditions, downtime and quiet moves are almost 3 times lower than the average in Ukraine and are consistent with world practice. The expediency of the developed TOR system is also evident from the dynamics of change of indicators: from the moment of its introduction the relative time of downtime and quiet moves has decreased more than 2 times.

**Keywords:** maintenance and repair, blast furnace, casing, technical condition, resource, safety index, reliability, durability, fatigue.



Підписано до друку 25.08.2020 р. формат 60×90/16  
Папір офсет. Різографія. Ум.друк.арк. 1,75.  
Тираж 100 прим. Зам. № 216

Надруковано «Поліграфцентр» ФОП Кочугурний Ю.М.  
свідоцтво про державну реєстрацію № 2224 0000 0000 073863  
м. Дніпро, вул. Воскресенська, 11, 49000

