

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу здобувача  
**ІБРАГІМОВА МЕХМАНА САЯДУЛЛА ОГЛИ**  
**«Удосконалення обслуговування устаткування доменного цеху  
шляхом діагностування його технічного стану»,**

представлену до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва»

### **1. Актуальність теми дисертаційної роботи**

Питання експлуатації та ремонту механічних систем технологічного обладнання є важливими для промислового сектору, особливо це актуально для металургійного виробництва через значні операційні витратами, а саме, на технічне обслуговування і ремонт.

В середовищі основних світових виробників металургійного обладнання остаточно сформовано принцип виготовлення виробів під їх обслуговування за фактичним технічним станом. Вітчизняний менеджмент металургійних підприємств залишає за планово-попереджувальною системою обслуговування деякі об'єкти, переважно, енергетичного походження. Таким чином, склалися підстави для функціонування змішаної системи ремонтів, яка на даному етапі є найбільш раціональною. Вона дозволяє зберегти достатні показники надійності при зменшенні питомих витрат. В цьому аспекті виробники обладнання надають великого значення сучасним способам діагностування, а також розробці оптимізованих алгоритмів планування відновлювальних заходів.

Доменне виробництво порівняно з іншими металургійними переділами є біль небезпечним, оскільки, на нього припадає 20...30 % аварій і 10...20 % летальних випадків. Серед обладнання доменного комплексу, механічне обслуговування безпосередньо доменної печі є лідером в поточних витратах на технічне обслуговування. Нові реалії функціонування доменного комплексу передбачають подовження кампанії доменної печі понад 25 років при коефіцієнті готовності не менш 95 %. Тому для доменних печей доцільно використовувати стратегії обслуговування за фактичним технічним станом з контролем ризику і безпеки.

На підставі вище викладеного, можливо зробити висновок, що розробка системи технічного обслуговування та ремонту обладнання доменного комплексу на підставі комбінованих стратегій експлуатації, складовими частинами якої є діагностичні алгоритми та моделі технічного стану несучих конструкцій доменної печі є актуальною науковою задачею.

## 2. Оцінка змісту дисертації

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів з висновками по кожному з них, загальних висновків, списку використаних джерел зі 120 найменувань, містить 196 сторінок та 7 додатків.

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.

В **першому розділі** на підставі проведеного літературного огляду виконано аналіз існуючих сучасних тенденцій обслуговування металургійного обладнання, автором 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 технічне обслуговування та ремонт, також показано, що висока аварійність і великі збитки від аварії роблять доменне виробництво ризикованим (порівняно з іншими металургійними переділами), а найбільший ризик експлуатації притаманний конструкціям доменних печей. В результаті дослідження моделей оптимальних періодів відновлювальних заходів при превентивній стратегії автором встановлено, що за критеріями мінімізації часу простоїв і питомих витрат раціональна кількість перевірок технічного стану не перевищує 5...6 інспекцій за увесь період нормативного терміну експлуатації. Такий висновок став можливий завдяки представленню моделей в безрозмірних, відносних величинах. Автором сформульовано принцип побудови імовірнісно-вартісних моделей витрат на технічне обслуговування та ремонт механічного обладнання.

В **другому розділі** автором на підставі аналізу, як математико-статистичних оптимізаційних моделей, так і моделей ймовірнісно-фізичного типу показано, 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 доменної печі, 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. Автором показано, що ризику, як діагностичній ознаці, притаманні ті ж самі недоліки, які властиві імовірнісно-вартісним моделям. У яко-

сті 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.

Автором теоретично обґрунтовано принцип зменшення ризику з часом експлуатації за рахунок переведення раптових відмов у відмови поступового типу, а також за рахунок збільшення кількості елементів, що діагностуються.

**У третьому розділі** автором висвітлено результати проведених комплексних досліджень деградації металу кожуху доменної печі після 14-річної експлуатації. Наведено методу побудови деформаційних моделей втомки за результатами випробувань в «м'якому» режимі з контролем напружень.

Побудовані моделі опору втомки, які є достатніми для прогнозування ресурсу кожуху доменної печі.

Отримано лінійний зв'язок між показниками розпорошення твердості і в'язкості руйнування сталі 09Г2С після її довготривалої експлуатації в кожусі доменної печі, що є основою для діагностування технічного стану металу кожуху доменної печі в процесі експлуатації неруйнівними методами.

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.

**У четвертому розділі** виконано огляд відомих моделей для оцінки несучої спроможності кожуху доменної печі, на підставі чого автором розроблено алгоритм прогнозування функції розподілу довговічності до появи тріщини в металі кожуху, та вперше винайдено рішення для середньоквадратичного відхилення довговічності при нестационарному навантаженні для деформаційної кривої втомки у напівлогарифмічних координатах.

Режим навантаження елементів кожуха доменної печі було прийнято на підставі отриманої для сталі 09Г2С моделі циклічного зміцнення. По фактичним механічним властивостям сталі, що відпрацювала у кожусі доменної печі повну кампанію, були визначені максимальні рівні напружень, що виникали під час експлуатації. Ці значення напружень використано у якості перевантажувальних рівнів розрахункових блоків.

Отримані моделі для визначення довговічності елементів кожуху належать до моделей ресурсного типу. За наявності таких моделей діагностування технічного стану кожухів відбувається, не стільки шляхом контролю стану металу, а в основному, за рахунок контролю режиму навантаження зон кожуху. Напряму здійснювати такий контроль є нереальним. Тому варто оцінювати навантаженість опосередкованими способами, такими, як вимірювання температури зон кожухів, товщини футеровки, тощо.

У п'ятому розділ наведені результати впровадженню в практику теоретичних розробок і результатів експериментальних досліджень. Оскільки машини, механізми та конструкції доменного комплексу мають різну значимість за наслідками відмови, 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 технічного обслуговування та ремонту.

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 технічного обслуговування та ремонту 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 доменної печі при змішаній стратегії.

### **3. Наукова новизна дисертаційної роботи** полягає в наступному:

1. Отримали подальший розвиток засади планування процесів технічного обслуговування механічних систем в металургії. Сформульовано принцип побудови ймовірнісно-вартісних моделей, що полягає в додаванні добуток 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 згодиться 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 доменної печі в процесі експлуатації неруйнівними методами.

5. Вперше винайдено рішення для показника розпорошення довговічності за умов нестационарного навантаження при використанні деформаційної кривої втоми 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 продовження кампанії вітчизняних доменних печей потрібно застосовувати проактивну стратегію їх технічного обслуговування.

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

Практичне значення результатів роботи полягає у наступному:

– 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;

– впроваджено на ПрАТ «ДМЗ» рекомендацій щодо діагностування технічного стану і залишкового ресурсу кожуху доменної печі;

- впроваджено категоризацію механічного обладнання доменного цеху ПрАТ «ДМЗ», яка регламентує основні засади побудови змішаної стратегії технічного обслуговування і ремонту в доменному комплексі;
- результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес у Національній металургійній академії України.

## **5. Оцінка ступеня обґрунтованості й достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій**

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 й руйнуванню, циклічного зміцнення і твердості базується на збіжності результатів лабораторних і промислових досліджень з прогнозними розрахунками.

## **7. Зауваження й висновки по роботі**

1. Не ясно з тексту дисертації та автореферату, яка точність вимірювання розміру тріщини в зразках фотографічним способом.
2. Для діагностування стану металу кожуху доменної печі автор пропонує, так званий LM-метод, де у якості діагностичного параметра використано коефіцієнт варіації твердості певної зони конструкції. Але чомусь автор не помічає, що в його дослідженнях з мірою пошкодження добре корелює і середня величина твердості. Вона є більш звичним діагностичним параметром і потребує меншої кількості вимірювань.
3. Назва дисертації стосується всього обладнання доменного цеху. Але фактично, детально досліджується тільки металеві конструкції самої доменної печі. Тому варто було б обмежити назву дисертації тільки цими об'єктами.
4. В третьому розділі на рис. 3.24 наведений взаємозв'язок між критичним циклічним КІН (SIF), вираженим через максимальні напруження (верхня крива) і розмахи напружень (нижня крива), і коефіцієнтом варіації твердості. З тексту не зрозуміло чому проведені експериментальні данні та отримані апроксимуючі функції мають різні області визначення.
6. В п'ятому розділі наведено практичні результати впровадження проведених досліджень. Зокрема, наведена категоризація доменного обладнання, хоча в перших двох розділах, присвячених теоретичному обґрунтуванню удосконалення технічного обслуговування про цей етап нічого не було сказано.

Не зважаючи на наведені зауваження, дисертаційна робота Ібрагімова Мехмана Саядулла огли є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена важлива наукова задача, отримані нові обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати.

Дисертація за науковим рівнем, практичним значенням отриманих результатів, об'ємом, змістом, оформленням відповідає вимогам пункту 8 «Положення про порядок присудження наукових ступенів», відповідає паспорту спеціальності 05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва», а її автор Ібрагімов Мехман Саядулла огли заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва».

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук, доцент  
в.о. завідувача кафедри «Інжинірингу з  
галузевого машинобудування»  
Технологічного навчально-наукового  
інституту Державного університету  
економіки і технологій

Д. В. Пополов

Підпис Пополова Д. В. засвідчую  
В.о. ректора Державного  
університету економіки і  
технологій



А. В. Шайкан