

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ібрагімов Мехман Саядулла огли

УДК 669.162.213:658.8(043)

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва» (05 – Технічні науки)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ **М.С. Ібрагімов**

Науковий керівник: **Білодієнко Сергій Валентинович**,
доктор технічних наук, професор.

Дніпро – 2020

АНОТАЦІЯ

Ібрагімов М.С. Удосконалення обслуговування устаткування доменного цеху шляхом діагностування його технічного стану. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва» (05 – Технічні науки). – Національна металургійна академія України, 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 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.

Проведено аналіз економіко-статистичних моделей оптимізації термінів

служби або інспекцій та показано, що більшість мають ймовірнісний характер і слушні, якщо збитки від простоїв порівняні з вартістю ремонтів, а витрати на інспектування значно менше їх. У механічних системах доменного виробництва є базові і відповідальні елементи, відмова яких небажана, оскільки пов'язана з наслідками, та експлуатація яких доцільна до перед відмовного стану, з контролем діагностичних параметрів. Якщо в цьому аспекті в розглянутих моделях змінити вартісно-ймовірнісні пропорції, то моделі стануть малопридатними (нечутливими) для розв'язання оптимізаційного завдання. До того ж економіко-статистичні моделі оперують із параметрами надійності всієї системи, а необхідно одержувати інформацію про залишковий ресурс окремих елементів, після чого поєднувати їх у єдиний комплексний показник. Окрім того, складність одержання представницької вибірки для встановлення типу і параметрів закону розподілу часу наробітку на відмову, обмежує дію економіко-статистичних моделей. Усе це дозволило сформулювати принцип побудови ймовірнісно-вартісних моделей витрат на ТОіР обладнання з урахуванням природи та параметрів деградаційного процесу.

У другому розділі 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. Це підтверджує пропозицію про позитивний вплив інспекцій на збільшення терміну експлуатації кожухів ДП.

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 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 ймовірісно-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. Показано, що глибину ідентифікації необхідно оцінювати за допомогою уточнюючої функції, форми якої наведені для лінійного деградаційного процесу. Ідентифікація тільки початкового параметра лінійного процесу дозволяє значно (на 25...50%, залежно від рівня надійності) збільшити інтервал відновлення.

У третьому розділі розроблено методу побудови деформаційної моделі втоми з контролем напружень та отримано необхідні моделі циклічного зміцнення сталі 09Г2С. Знайдені апроксимація деформаційної моделі втоми, що дало змогу визначати положення кривої втоми в напівлогарифмічних координатах по випробуванню тільки на одному рівні навантаження та числова форма рівняння розпорошення довговічностей металу кожуху ДП для деформаційних критеріїв. У сукупності знайдені залежності утворюють моделі опору втоми, які є достатніми для прогнозування ресурсу кожуху ДП.

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

Побудована модель циклічного зміцнення сталі 09Г2С, на підставі якої визначені максимальні еквівалентні напруження в фурменій і шахтній зонах ДП. На підставі чого роблено висновок, що незважаючи на незадовільний стан

оболонки ДП і самого кожуху, його метал залишає достатню деформаційну здатність та циклічну міцність. Такий висновок підтверджується подальшим розрахунком залишкового ресурсу.

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 довговічності при нестационарному навантаженні для деформаційної кривої втоми у напівлогарифмічних координатах.

Результати прогнозування ресурсу кожуху ДП показали що умови експлуатації металу кожуху в фурменій зоні є жорсткішими, аніж в зоні шахти. Тому в цій зоні є більшим пошкодження металу, що відбилося 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, при цьому побоювання визиває гарантований ресурс в зоні шахти при збільшенні параметра блоку навантаження c_{01} , який призводить до зменшення залишкового ресурсу. В наявному аналізі режим навантаження елементів кожуха ДП було прийнято на підставі отриманої для сталі 09Г2С моделі циклічного зміцнення. По фактичним службовим властивостям сталі, що відпрацювала у кожусі ДП повну кампанію, з'ясовані максимальні рівні напружень, що виникають під час експлуатації, які використано у якості перевантажувальних рівнів розрахункових блоків. Значення напружень основних рівнів обрано за рекомендаціями, які у 2,5 рази менші розрахункових. Тому фактичний режим навантаження є менш пошкоджуючим. В такому випадку є підстави вважати, що фактичний строк служби кожухів має бути більшим від прогнозованого.

У п'ятому розділі показано, що успішне функціонування системи ТОiP 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. Показано, що доцільність розробленої системи ТОiP 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. – Qualifying scientific work on the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences on specialty 05.05.08 – «Machines for metallurgical production» (05 – Engineering Sciences). – National Metallurgical Academy of Ukraine, 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 the technical condition on the dstavi resource forecasting models taking into account the degree of degradation of materials.

In the first chapter, based on the literature review of current trends in maintenance of metallurgical equipment, it is shown that at this stage there are grounds for functioning of the mixed repair system, which is the most rational and allows to maintain sufficient indicators of reliability while reducing the specific costs of M&R.

It is shown that high accidents and large losses from accidents make blast furnace production risky (compared to other metallurgical redistributions), and the greatest risk of exploitation is inherent in the design of BF. Given the sensitivity of the blast furnace technology to downtime, for the safe functioning of the blast furnace it is necessary to control the risk of operating the furnace structures. In this aspect, it is advisable to move to a proactive service strategy.

Economic-statistical models of optimization of service life or inspection have been analyzed and it is shown that most are probabilistic and correct if the costs of downtime are compared to the cost of repairs and the costs of inspection are much less. Mechanical systems in blast-furnace production have basic and responsible elements,

the failure of which is undesirable because of the consequences, and the operation of which is expedient before failure, with the control of diagnostic parameters. In this aspect, if the models under consideration change the value-likelihood proportions, then the models will become of little use (insensitive) for solving the optimization problem. In addition, economic and statistical models operate with the reliability parameters of the whole system, and it is necessary to obtain information about the residual life of individual elements, and then combine them into a single comprehensive indicator. In addition, the complexity of obtaining a representative sample to determine the type and parameters of the law of distribution of working time for refusal limits the effect of economic and statistical models. All this made it possible to formulate the principle of constructing probabilistic-cost models of equipment and equipment costs, taking into account the nature and parameters of the degradation process.

In the second chapter theoretically substantiates the principle of reducing the risk with time of operation by translating sudden failures into gradual failure, as well as by increasing the number of elements being diagnosed. This confirms the proposal for a positive impact of inspections on extending the life of BF shells. Based on the analysis of both mathematical-statistical optimization models and probabilistic-physical models, it is shown that with an increase in the relative cost of post-disaster repair, the optimum period between rehabilitation measures (preventive repair, inspection) decreases. This can lead to a situation where optimization expires. Therefore, for high-risk systems, such as BF designs, it is advisable to use a safety control operating strategy.

The possibility of using risk as a diagnostic parameter, which is a consequence of linking the risk with the specific operating costs, is considered. It is shown that the risks, as a diagnostic feature, are inherent in the same disadvantages inherent in 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. The principle of using a safety index for the operation of simple and complex mechanical systems up to the failure state is presented.

A method of identifying models of degradation processes is proposed with the aim of increasing security, which can be considered a procedure for minimizing systematic error, which reduces the degree of uncertainty of the degradation process. It has been shown that the depth of identification must be estimated by the refining function, the forms of which are given for the linear degradation process. Identification of only the initial parameter of the linear process can significantly (by 25...50%, depending on the level of reliability) increase the recovery interval.

In the third chapter the methods of building a deformation model of fatigue with stress control are developed and the necessary models of cyclic hardening of 09Г2С steel are obtained. The approximation of the deformation model of fatigue was found, which made it possible to determine the position of the fatigue curve in semilogarithmic coordinates for the test at only one load level and the numerical form of the equation for the durability spraying of the metal of the BF casing for deformation criteria. Taken together, the dependencies found form fatigue resistance models that are sufficient to predict BF casing life.

A linear relationship between the hardness and viscosity fracture indices of the 09Г2С steel after long-term operation in the BF casing was obtained, which is the basis for diagnosing the technical state of the BF casing metal during non-destructive methods.

The model of cyclic hardening of 09Г2С steel is constructed, on the basis of which maximum equivalent stresses in the Furmen and mine zones of the BF are determined. On the basis of which it is concluded that despite the unsatisfactory condition of the BF shell and the casing itself, its metal leaves sufficient deformation capacity and cyclic strength. This conclusion is confirmed by the subsequent calculation of the residual resource.

In the fourth chapter, an overview of known models to evaluate the bearing capacity of the BF casing, on the basis of which developed an algorithm for predicting the function of distribution of durability before the crack in the metal of the BF casing, which first invented a solution for standard deviation durability at a non-stationary loadformer.

BF casing resource prediction results have shown that the casing metal operating conditions in the tug zone 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 life of the casing in all zones significantly exceeds the 25-year service life, while fears cause a guaranteed resource in the mine area when increasing the load unit parameter, which leads to a decrease in the residual life. In the present analysis, the load regime of the BF casing elements was adopted on the basis of the cyclic hardening model obtained for the 09Г2С steel. According to the actual service properties of the steel that worked in the DP casing full campaign, the maximum levels of stresses that occur during operation, which are used as the overload levels of the calculation blocks. The values of the stresses of the basic levels are chosen according to the recommendations, which are 2,5 times lower than the calculated ones. Therefore, the actual load mode is less damaging. In this case, there is reason to believe that the actual service life of the housings should be greater than projected.

In the fifth chapter shows that successful operation of a domain name system in a domain complex is possible when it is organized 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. It is shown that the expediency of the developed M&R system is also evident from the dynamics of change of indicators: since its introduction, the relative 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.

Список публікацій здобувача (List of publication):

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. (**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. **Ібрагімов М.С.** Пристрій для підвищення стійкості засипного апарата доменної печі : пат. на корисну модель № 124206 Україна : МПК C21B7/18 (2006.01). № u201710538 ; заявл. 31.10.2017 ; опубл. 26.03.2018 ; Бюл. № 8.

12. **Ібрагімов М.С.** Спосіб прискореного введення доменної печі у експлуатацію після капітального ремонту та пристрій для його здійснення : пат. 82799 : МПК C21B5/00, C21B7/00 (2006.01). № а 200704032 ; заявл. 12.04.2007 ; опубл. 11.02.2008 ; Бюл. № 3.

13. **Ібрагімов М.С.** Рудний бункер зберігання і вивантаження плавильних шихтових матеріалів в доменну піч : пат. на корисну модель № 133080 Україна : МПК F27B7/38. № u201809832 ; заявл. 02.10.2018 ; опубл. 25.03.2019 ; Бюл. № 6.

Матеріали наукових конференцій і статті в науково-технічних журналах:

14. Білодіденко С.В., **Ібрагімов 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. 343–344.

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. Білодіденко, В.І. Гануш та інші. *Вісник сертифікації залізничного транспорту*. 2018. Том. 50. № 4. С.21–26.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДОМЕННОГО КОМПЛЕКСУ І МОДЕЛІ ПРЕВЕНТИВНОЇ СТРАТЕГІЇ.....	24
1.1 Сучасні тенденції обслуговування металургійного обладнання.....	24
1.1.1 Сучасні виклики для доменного устаткування.....	28
1.2 Аварійність доменного виробництва.....	29
1.3 Оптимізаційні моделі для превентивного обслуговування.....	36
1.3.1 Мінімізація часу простоїв.....	37
1.3.2 Мінімізація інтенсивності витрат на ТОіР.....	40
1.3.3 Ймовірно-вартісні моделі для оптимізації режимів ТОіР.....	43
1.3.4. Можливості економіко-статистичних оптимізаційних моделей для ТОіР механічних систем промислових виробництв.....	48
1.4 Особливості застосування оптимізаційних алгоритмів ТОіР в умовах вітчизняної металургії.....	51
1.5 Висновки.....	55
РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЙНІ МОДЕЛІ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ РИЗИКУ.....	57
2.1 Послідовний режим інспектування для мультидеградаційних процесів.....	57
2.2 Моделі експлуатаційних режимів і витрат, що мінімізують ризик.....	60
2.3 DT-моделі для інспекційних режимів.....	64
2.3.1 Мінімізація часу простоїв.....	66
2.3.2 Мінімізація питомих витрат.....	68
2.4 DT-моделі для контролю багатокомпонентних систем.....	70
2.5 Ймовірно-фізичні підходи до моделювання режимів технічного обслуговування.....	72
2.5.1 Ідентифікація діагностичних моделей.....	73
2.6 Модель технічного обслуговування з гарантованим рівнем безпеки.....	78

2.6.1 Тенденції розвитку моделей режимів технічного обслуговування і передумови до побудови моделі технічного обслуговування з гарантованою безпекою.....	78
2.6.2 Концепція прийняттого ризику при оцінці технічного стану.....	84
2.6.3 Індекс безпеки – комплексний показник технічного стану.....	87
2.7 Висновки.....	92
РОЗДІЛ 3. РОЗСЛІДУВАННЯ ДЕГРАДАЦІЇ МЕТАЛУ КОЖУХУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ МАЛОГО ОБ’ЄМУ ПІД ВПЛИВОМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	
3.1 Постановка і задача досліджень.....	95
3.2 Характеристика об’єкта досліджень.....	97
3.3 Зразки для досліджень.....	101
3.4 Методика досліджень при циклічному навантаженні.....	103
3.5 Методика обробки результатів повторно-статичних випробувань і модель зміцнення.....	106
3.6 Моделі втоми.....	110
3.6.1 Характеристика тріщиноутворення і руйнування.....	110
3.6.2 Результати циклічних випробувань.....	112
3.7 В’язкість руйнування.....	119
3.7.1 Визначення КІН.....	119
3.7.2 Результати випробувань.....	121
3.8 Дослідження твердості.....	122
3.8.1 Метода вимірювань твердості.....	123
3.8.2 Результати дослідження твердості.....	124
3.9 Результати комплексного дослідження деградації металу кожуху ДП.....	129
3.10 Висновки.....	131
РОЗДІЛ 4. ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ КОЖУХІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ.....	
4.1 Моделі для оцінки несучої спроможності кожуху ДП (огляд методик).....	134

4.2 Алгоритм прогнозування функції розподілу довговічностей до появи тріщини в металі кожуху доменної печі.....	136
4.3 Результати прогнозування ресурсу кожуху ДП.....	144
4.4 Об'єднання показників надійності елементів крупних конструкцій (поелементний розрахунок безпеки кожуху ДП).....	148
4.5 Висновки.....	152
РОЗДІЛ 5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ДІАГНОСТУВАННЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ОБСЛУГОВУВАННЮ ОБЛАДНАННЯ ДОМЕННОГО КОМПЛЕКСУ.....	
5.1 Змішана стратегія експлуатації для механічного обладнання доменного цеху.....	155
5.2 Деякі особливості капітального ремонту ДП при змішаній стратегії технічного обслуговування.....	163
5.3 Модель безпеки кожуха ДП на стадії зростання тріщини.....	169
5.4 Періодичність інспектування кожуха шахти ДП.....	173
5.5 Особливості застосування оптимізаційних моделей для обслуговування доменного комплексу.....	175
5.6 Висновки.....	178
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	180
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	183
ДОДАТОК А.....	196
ДОДАТОК Б.....	198
ДОДАТОК В.....	200
ДОДАТОК Г.....	202
ДОДАТОК Д.....	203
ДОДАТОК Е.....	204
ДОДАТОК Ж.....	205

ВСТУП

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 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 за технічним станом акцент у витратах засобів на ТОіР зміщається 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 навчанню 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 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'єднування 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 ДП.

Відповідно до зазначеної мети в роботі поставлені наступні задачі:

1) проаналізувати існуючі моделі для визначення режимів ТОiP 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 ймовірісно-вартісних моделей, що полягає в додаванні добутків ймовірності на вартість перебування об'єкту в відповідній фазі технічного стану. Знайдено явище насичення функції уточнення, що кількісно характеризує процедуру ідентифікації апіорних 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 нестаціонарного 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 подовження кампанії вітчизняних доменних печей потрібно застосовувати проактивну стратегію їх технічного обслуговування.

Практичне значення отриманих результатів. 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.

Результати дисертаційної роботи у вигляді рекомендацій щодо діагностування технічного стану і залишкового ресурсу кожуху доменної печі впроваджено на ПрАТ «Дніпровський металургійний завод» (ПрАТ «ДМЗ») (акт промислового впровадження від 22.02.2020 р.).

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.

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 результатах лабораторних і промислових досліджень, які збігаються 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 [61, 96, 105]; дослідження чинників впливу на оптимальний інтервал між інспекціями [32, 33, 34, 62]; формулювання шляхів зменшення витрат на ТОіР [33]; категоризація обладнання доменного комплексу для реалізації змішаної стратегії ТОіР [78]; огляд несучих конструкцій ДП [120].

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 симпозіумі 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 індексується у міжнародній науково-метричній базі Scopus, 4 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.

РОЗДІЛ 1

ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДОМЕННОГО КОМПЛЕКСУ І МОДЕЛІ ПРЕВЕНТИВНОЇ СТРАТЕГІЇ

1.1 Сучасні тенденції обслуговування металургійного обладнання

У собівартості металургійної продукції переважну частку (суттєво більш 50%) становлять витрати на сировину і енергію. Витрати на ТОіР займають невелику частку (близько 10%). Враховуючи, що частка інших витрат не перевищує цю величину (іноді в 3 рази менше), то в прихованій вартості продукції металургії частка витрат, пов'язана з утриманням устаткування, стабільно займає більше половини, іноді доходючи до 70% і вище [1].

Частка ремонтного персоналу може доходити до 35% усього облікового складу металургійного підприємства [1]. Навіть у сучасних умовах аутсорсингу допоміжних служб і оптимізації кадрового складу число ремонтників не опускається нижче 20-25%, що видно на прикладі ПрАТ «ДМЗ». Подібна ситуація характерна і для закордонного промислового виробництва, що помітно по індексах, які характеризують стан ТОіР. Так, перший індекс у вигляді відносини витрат на ТОіР до всіх витрат загальнопромислового виробництва становить 5%, для хімічного виробництва – 6,8%, для сталеливарного виробництва (читай – металургії) – 12,8%. У металургії витрати на ТОіР становлять 8,6% проти 3,8% у хімії (третій індекс) [2, 3].

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 їхнім жорстким графіком (превентивне обслуговування – РМ, рис. 1.1). На деяких підприємствах скрутність у коштах на ТОіР привела до коригувальної стратегії обслуговування, коли заходи відновлення, проводяться після фактів відмов (СМ, рис. 1.1). Як видно, в обох стратегіях витрата коштів С далеко не оптимальна і використання РМ і СМ стратегій може бути виправдано тільки на

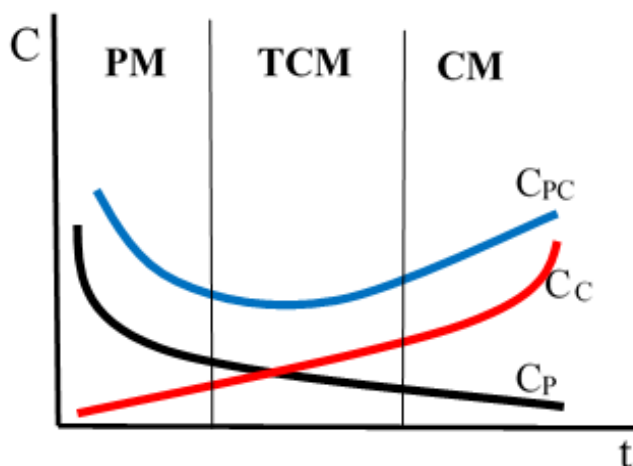


Рисунок 1.1 – Графіки зміни загальних ремонтних витрат C_{PC} , витрат на профілактичні C_P і післявідмовні C_C ремонти в часі експлуатації t , а також відповідність їх періодів стратегіям ТОіР (PM – превентивне обслуговування, CM – коригувальне обслуговування, TCM – обслуговування за технічним станом)

окремих етапах експлуатації. Мінімізації витрат на обслуговування устаткування і максимізації його готовності сприяє стратегія обслуговування за технічним станом (technical condition maintenance – TCM, рис. 1.1). Дана стратегія припускає використання гнучкого графіка ремонтів і характеризується активним застосуванням методів технічної діагностики, внаслідок чого в закордонній літературі такі стратегії іменуються як proactive (predictive) maintenance [2, 3], imperfect maintenance [4]. Крім розглянутих типів стратегії обслуговування по стану з контролем параметрів, відомий і широко застосовується тип стратегії з контролем надійності (Reliability centered maintenance – RCM) [2]. Тут вже виникає завдання оцінки наслідків відмов, що привело до створення стратегії з контролем ризику і безпеки (концепція RBI, див. розділ 2).

Враховуючи сказане, виробники металургійного устаткування (наприклад, SMS Meyer, SMS Siemag, Danieli, Eirich) стали оснащувати його вбудованими системами контролю функціонування, а саме примітне, пропонують після продажне сервісне обслуговування [5, 6]. По суті, це рекомендації з дат замін вузлів, які здійснюються (іноді в он-лайн режимі) за результатами моніторингу технічного стану. Така тенденція актуальна, оскільки, беручи до уваги моду на

аутсорсинг, від устаткування відторгаються його фахівці – механіки, що постійно спостерігають, а кількість інформації, що характеризує технічний стан, зростає й ускладняється.

В основі більшості моделей технічного стану і алгоритмів їх оцінки переважають математико-статистичні методи надійності. Вони орієнтовані на економічні критерії і не пов'язані з фізичною сутністю деградаційних процесів. Багато в чому цьому сприяло те, що бурхливий розвиток теорії надійності в 50-х роках минулого століття було обумовлено її додатком до електронних систем. Їх відрізняє від механічних систем значна кількість порівняно недорогих елементів, що робить виправданим використання в такій ситуації математико-статистичних методів.

На початкових етапах розвитку методів планування ТОіР питання підвищення його ефективності успішно вирішувалися в рамках організації виробництва. Сучасні системи ТОіР характеризуються уточненням прогнозуванням ресурсів на різних фазах експлуатації, оцінкою розвитку несправностей і дефектів. Такі завдання неможливо вже розв'язати методами менеджменту, які на даному напрямку вичерпали себе. Проте, одна з основних завдань менеджменту – зниження питомих витрат на ТОіР, збігається з основною метою механічної служби підприємств – збільшення коефіцієнта готовності устаткування. Тобто, виконання одного завдання – ріст готовності, автоматично приводить до розв'язання ще одного завдання – скорочення витрат.

Комбінація математико-статистичних і ймовірно-фізичних підходів до проблеми надійності механічних систем, з одного боку, збагачує її інструментарій, роблячи проблему комплексною. Це залучає в дану область дослідників різних профілів. З іншого боку, така велика кількість методів ускладнює знаходження оптимального шляху для практичного використання результатів оцінки надійності. Зокрема, це стосується стадії експлуатації устаткування: його технічне обслуговування зі зводу правил перетворилося в технологію зі своїми специфічними методами. Виникла теротехнологія – міждисциплінарна область діяльності, що поєднує вплив технологічних,

технічних, організаційних і фінансових факторів на ефективність використання устаткування. Особливу актуальність вона одержала через широке впровадження у виробництво засобів технічного діагностування і повсюдного переходу до стратегії обслуговування по технічному стану (ТСМ). Зростання кількості інформації про технічний стан об'єкта веде до неповного її використання для передбачення поведінки механічних систем при експлуатації. Тому, поряд з основним завданням ТСМ (скорочення витрат на ТОіР), фахівцями розробляються підходи до використання методів оцінки і підтримки кондицій устаткування для поліпшення якості продукції чорної металургії, а також для зниження ризику і забезпечення безпеки металургійного виробництва. Тим самим досягається більш ефективне використання систем моніторингу за функціонуванням устаткування.

У питаннях періодичності діагностування, інспектування, контролю технічного стану погляди фахівців докорінно відрізняються: від принципового неприйняття діагностування до суцільного моніторингу значного числа параметрів. Про конфлікт інтересів ремонтного персоналу і виробничого менеджменту добре відомо у вітчизняній металургії. Але його наявність визнана і у світовій промисловості, коли ремонтники прагнуть до надмірної «опіки» над устаткуванням (overmaintenance), а виробничники не бачать у цьому необхідності (undermaintenance). У теорії стимулювання таке явище назване проблемою морального ризику.

Незважаючи на очевидну актуальність питань періодичності контролів технічного стану металургійного устаткування, вони зовсім не знаходять відбиття в сучасній вітчизняній навчальній літературі по технічній діагностиці і експлуатації машин.

1.1.1 Сучасні виклики для доменного устаткування

Згідно стандартів Індустрія 4.0 сучасні ДП повинні бути адаптованими до збільшених витрат пилувугільного палива, до погіршення якості шихти, до неритмічності виробництва. При цьому, як вже було сказано вище, кампанія ДП повинна складати понад 20...25 років з коефіцієнтом готовності не меншим 95% [7, 8]. Підвищення надійності ДП витікає з тенденції зменшення їх кількості в межах одного виробництва (підприємства) і збільшення одиничної потужності печей [9]. Це призводить до скорочення ступеню резервування і збільшенню втрат від простоїв, тобто веде до зростання ризику. Така ситуація повинна бути компенсована збільшенням надійності елементів доменного комплексу.

Конструкція печі повинна сприяти її пришвидшеному монтажу і ремонту. Для цього використовується модульна технологія, за якою оболонка ДП розділена на окремі елементи, що можуть обслуговуватися за власними програмами [7, 10].

Наявність великої кількості датчиків, що об'єднані в систему моніторингу, дає можливість більш повно використати ресурс обладнання. Це є результатом переходу до TSM-стратегії. Термін експлуатації обладнання може бути продовженим, або як висловлюються фахівці, «повторно використаним» [11, 12]. Зменшуються питомі витрати на ТОіР. Зменшення витрат матеріальних ресурсів є однією зі складових концепції екологічно орієнтованого виробництва або «зеленої металургії». Отже, «зелена металургія» щільно асоціюється із обслуговуванням за технічним станом. В цьому аспекті виробники обладнання надають великого значення навчанню персоналу сучасним способам діагностування, а також, власне, розробці оптимізованих алгоритмів планування відновлювальних заходів [11, 12].

1.2 Аварійність доменного виробництва

Металургійне виробництво за інтенсивністю втрат від аварій займає 4 місце серед всіх галузей техніки [1]. В металургійному комплексі України нараховується 70 об'єктів підвищеної небезпеки [2]. Дані про аварійність в ньому дещо суперечливі, що очевидно, пояснюється різним підходом до реєстрування аварій за їхньою тяжкістю. Так, за одними джерелами інтенсивність аварій на металургійних виробництвах України стабілізована на рівні 5-7 щорічно [3]. Хоча за іншими відкритими джерелами інтенсивність є значно більшою і складає 3-6 аварій за місяць [2].

Найбільш небезпечним в металургійному комплексі, в якому разом з кольоровою металургією нараховується до 30 різновидів виробництв, є доменне виробництво. На нього припадає 20-30% аварій і 10-20% летальних випадків [2, 3]. Особливість безперервного доменного процесу в тому, що він вкрай чутливий до позапланових зупинок. Збільшення частоти простоїв на 5% зменшує питому продуктивність печі на 25-30% [3]. Окрім високої аварійності, доменне виробництво відрізняється ступенем важкості наслідків аварій.

Особливою рисою аварій в доменному виробництві є те, що її наслідком може бути повне знищення агрегату. Такі аварії, як правило, трапляються після вибухів у пічному просторі.

7 вересня 1993 року на Дніпровському металургійному комбінаті сталася, можливо, найбільша в чорній металургії аварія, що знищила доменну піч №7, забрала життя 18 осіб і постраждалими стали близько 30 чоловік. Безпосередньо причиною руйнування конструкції печі послужив вибух всередині неї (рис.1.2). Вибух є наслідком взаємодії води з гарячими розплавленими продуктами. Згідно з актом розслідувань, йому передувало ланцюжок подій і дій персоналу, які порушили 11 пунктів положень про технічної експлуатації. Причому кожне порушення окремо не могло привести до подібного результату. Спостерігалось несприятливе поєднання 8 виробничих факторів (рис. 1.3). Подібний сценарій

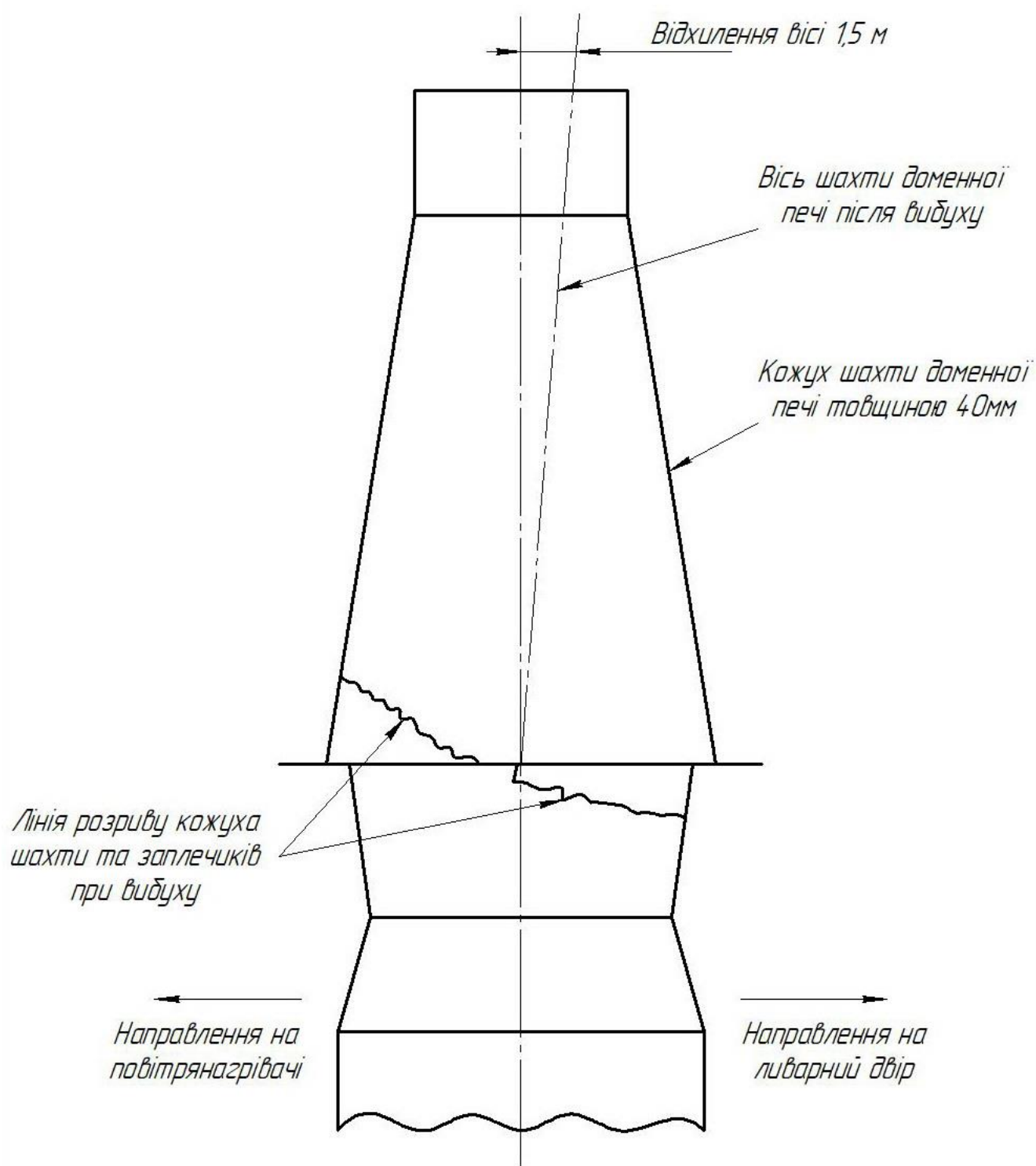


Рисунок 1.2 – Схема руйнування ДП №7
(розроблена д.т.н. В.А. Чеченьовим)

Аварія розвивалась на протязі двох діб, коли персонал намагався нормалізувати режим ходу печі (рис. 1.4). Не було своєчасно виявлено витoku води з холодильників в піч. Потрапляння води в ДП визвало її охолодження, твердіння матеріалів і підвисання шихти.

Суд покарав фірму «Корус», яка на той час керувала заводом, на 1,33 млн. фунтів, і призначив відшкодування збитків на 1,75 млн. фунтів. Сюди не враховано збитки виробництва. За два з гаком роки на місці зруйнованої ДП фірма побудувала нову піч об'ємом 2560 м³, продуктивністю 6500 тон на добу.

Аварія була ретельно розслідувана і висвітлена [4, 5]. Винесено багато уроків, на підставі яких розроблено рекомендації, щоб запобігти аналогічних випадків. Окрему увагу було приділено стану болтів, що кріплять шахту печі. Вони були зруйновані задовго до вибуху і не утримували піч від її руху вгору. Болти виготовлялися з різних марок сталі і були схильні до крихкого руйнування. Якби вони вироблялись зі сталі, передбаченої кресленнями, міцність з'єднання була збережена.

Для безпечного функціонування доменного комплексу рекомендовано контролювати ризик експлуатації. Для цього необхідно застосовувати інструменти ризик-аналізу: дерево відмов (Fault Tree Analysis), аналіз відмов і їх причин (Failure Modes and Effects Analysis), дослідження небезпеки і роботоспроможності (Hazard and Operability Studies), аналіз захисту (Layers of Protection Analysis) [5]. До такого ж висновку прийшли і вітчизняні фахівці [3, 6, 13, 14].

У 2013 році Кабінетом Міністрів України прийнято «Технічний регламент безпеки машин», який наказує здійснювати оцінку ризику після капітального ремонту обладнання, якщо воно небезпечне не тільки для здоров'я людей, а й для цілісності майна. У металургії більш детально опрацьовані пожежонебезпечні аспекти ризику, але недостатньо уваги приділяється, так званій, конструкційній безпеці [15]. Хоча саме поломки елементів конструкцій є джерелами ініціюючих відмов, які є причиною таких аварій, як падіння вантажів, травмування рухомими частинами машин. Їх частка - не менше 60% з усіх причин аварій [16]. Руйнування

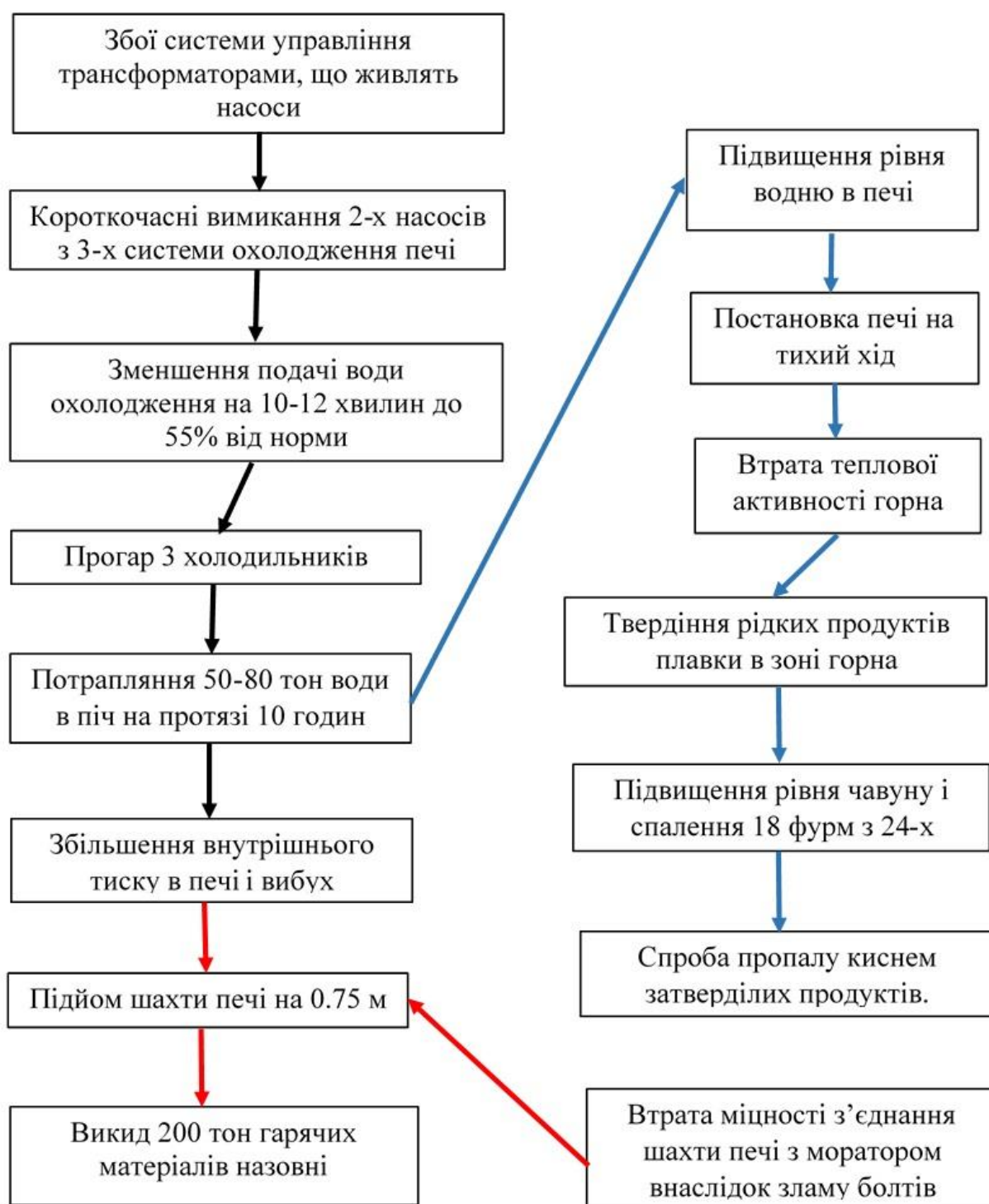


Рисунок 1.4 – Сценарій аварії ДП № 5 в Порт Талботі

конструкцій також є джерелом багатьох аварій з викидом розплавленого металу [17].

Великі збитки приносять і менш резонансні аварії, які пов'язані з розкриттям кожухів і розгерметизацією ДП. Нерідко трапляються аварії внаслідок прогару горну. В кращому випадку це тягне до переведення печі на тихій хід. Так, на згаданий вже ДП №1м ДМК аналогічний збій трапився у липні 2015 року. При ремонті горна піч зменшила виробіток чавуну на третину (тобто приблизно на 900 тон на добу) на протязі трьох тижнів. Недостача становить десь 18 тис. тон металу. Про грошовий розмір збитків можна судити з наступного прикладу. Ліквідація вертикальної тріщини від поду до фурменної зони на ДП «вартувала» ДМК 190 годин простою, недостачі близько 11 тис. тон чавуну і втраті понад 2 млн. доларів [13, 14].

Досить часто відмови кожуху в нижній частині ДП трапляються в перші 3...4 році експлуатації або ж при задуванні печі. Це також приносить відчутні втрати. Так, найкрупніша в Європі ДП №9 комбінату «Арселор Міттал Кривий Ріг» повинна була почати працювати після тримісячного капітального ремонту. При його проведенні відчутно зменшилося виробництво сталі не тільки на комбінаті, а й в Україні. Тому запуску печі чекали з надією на нарощування виробництва відносно 2017 року. Але 28 квітня 2018 року при пробній виплавці з 10% завантаженням відбувся швидкоплинний прогар холодильної плити площею 0,5 м², крізь який розлилося 40 т чавуну. В результаті піч знов опинилася в декілька місячному ремонті. З наведеного прикладу видно, що наслідки руйнування металоконструкцій ДП ліквідуються значно довше, ніж наслідки аварій на обладнанні інших металургійних переділів. А надпланові простої відчуються навіть при виробництві прокату.

Серед обладнання доменного комплексу, який є найбільш аварійно небезпечним переділом, механічне обладнання безпосередньо ДП лідирує в поточних витратах на технічне обслуговування. На ДП велика частина аварійних випадків приходить на прогари фурм (24,5%), прориви горна, холодильників, газопроводів та повітряпроводів ДП (20,2%), викиди металу, шлаку, агломерату з

металургійних агрегатів (18,1%) [3]. Не суперечать цим даним і результати досліджень, які наведені на рис. 1.5. Це разом свідчить, що ключову роль, як в аварійності, так і в кількості простоїв (наслідках аварій) відіграють конструкції і устаткування безпосередньо доменної печі. На фурми, кожухи, холодильники, викиди металу (зазвичай, вони пов'язані з руйнацією металевих конструкцій) приходить більше половини аварій і втрат від них.

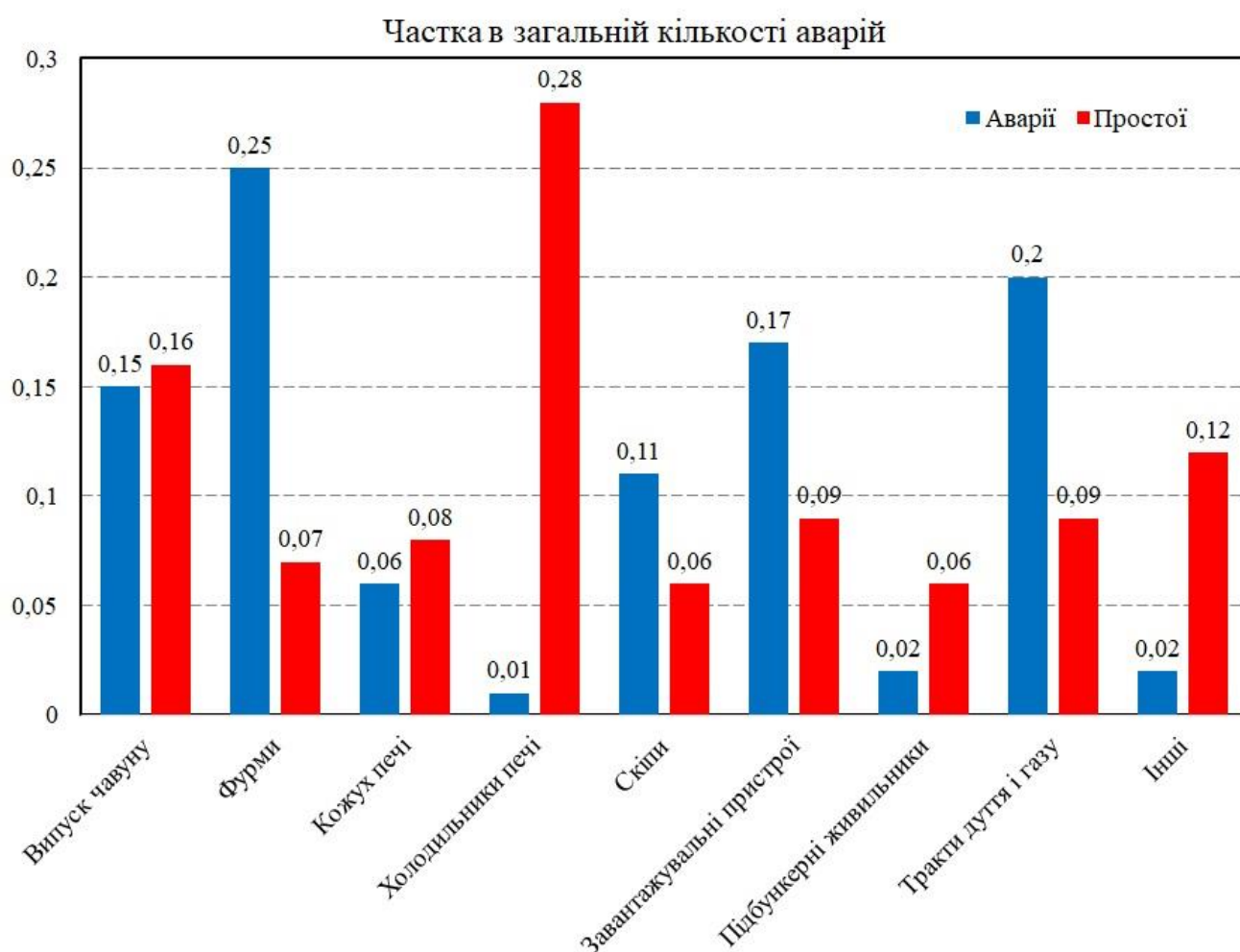


Рисунок 1.5 – Розподіл аварій доменного комплексу [6].

1.3 Оптимізаційні моделі для превентивного обслуговування

В даному підрозділі розглянуто можливості зменшення витрат на технічне обслуговування в рамках діючої системи планово-попередніх ремонтів.

Ремонт обладнання може здійснюватися з використанням наступних стратегій ремонту [18]:

- регламентна або превентивна (I);
- змішана (II);
- за технічним станом (III);
- за потреби або коригувальна (IV).

Сутність стратегії регламентного ремонту полягає у тому, що ремонт виконується з періодичністю і в об'ємі, встановленому у експлуатаційній документації незалежно від технічного стану складових частин обладнання на момент початку ремонту.

Сутність стратегії ремонту за технічним станом полягає у тому, що контроль технічного стану виконується з періодичністю і в об'ємі, встановленому у нормативно-технічній документації, а момент початку ремонту і об'єм відновлення визначається технічним станом складових частин обладнання.

Сутність стратегії ремонту за потреби полягає у тому, що ремонт обладнання виконується тільки у випадку відмови або пошкодження складових частин обладнання.

Стратегія I застосовується для забезпечення ремонту обладнання, експлуатація якого пов'язана з підвищеною небезпекою для обслуговуючого персоналу, в тому числі обладнання, підконтрольного органам Держпромнагляду.

На підставі стратегії II забезпечується ремонт всього іншого основного та неосновного обладнання підприємства.

За рішенням керівництва підприємства частина обладнання може бути переведена на ремонт за технічним станом (стратегія III). Перелік такого обладнання складається керівником підрозділу, погоджується головним механіком та затверджується головним інженером підприємства.

Стратегія IV рекомендована до застосування для обладнання першої та другої амортизаційної груп. Вона частково реалізується у формі позапланових ремонтів після відмов.

Система ТОіР із превентивними ремонтами (РМ – preventive maintenance) відноситься до стратегії використання устаткування по нормативу і представляє послідовність запланованих періодичних РМ-ремонтів, графік яких порушується випадково проведеними післявідмовними коригувальними ремонтами (СМ – corrective maintenance). Модель ТОіР для даної стратегії розглянута Диллоном [19, 20]. Вона заснована на марковських процесах переходу з інтенсивностями λ , λ_p , μ , μ_p із працездатного справного стану (G, рис. 1.6) у фазу РМ- або СМ-ремонтів (і назад).

Інспектування при такій стратегії покликане знизити кількість СМ-ремонтів, взявши на себе частину витрат на ТОіР.

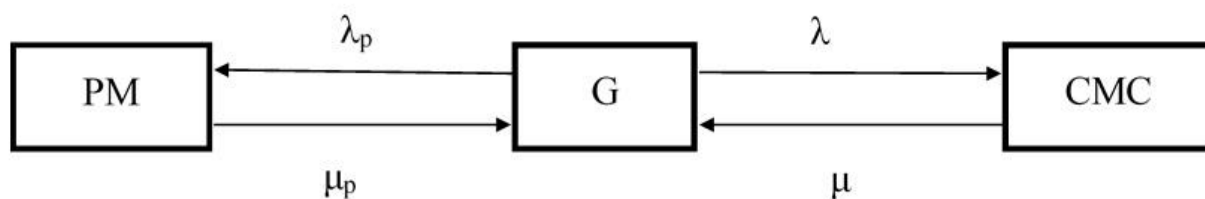


Рисунок 1.6 – Схема моделі для превентивного обслуговування

1.3.1 Мінімізація часу простоїв

Загальний час простоїв може бути виражений в такий спосіб:

$$TDT = n_i \cdot T_i + \frac{m \cdot T_b}{n_i}, \quad (1.1)$$

де n_i – число інспекцій в одиницю часу (частота інспекцій); T_i і T_b – час, витрачений, відповідно, на інспектування і на відновлення після відмови; m – постійна, пов'язана з особливостями технічної системи.

Цілком очевидно, що загальний час простоїв TDT пропорційний частоті і часу інспекцій (графік 1, рис. 1.7). Не зовсім ясно, на перший погляд, за рахунок чого частота інспекцій сприяє зменшенню величини TDT (графік 2, рис. 1.7). Це може пояснюватися вищевказаним зниженням числа відмов, що можливо, коли інспектування (ревізія), поряд з контролем параметрів технічного стану, супроводжується терміновим ремонтом змінних елементів. Така ситуація безумовна не для будь-якої технічної системи, зокрема, не завжди дана модель працює стосовно до механічних систем у металургії. Для них під час інспектування слід робити заміну змащення, регулювання вузлів, підтягування кріплення, тобто дії, «зм'якшуючі» умови експлуатації. У такому регламенті дана модель придатна для механічного устаткування промислових виробництв.

Дослідивши функцію $TDT(n_i)$ на мінімум (графік 3, рис. 1.7), одержують оптимальне значення частоти інспекцій [19]:

$$n_{i\text{opt}} = \sqrt{(m \cdot T_b)/T_i}. \quad (1.2)$$

Позначивши відносний час ремонтів, як $T_r = T_b/T_i$, одержуємо оптимальний міжінспекційний інтервал:

$$\delta_{\text{opt}} = (m \cdot T_r)^{-0,5}. \quad (1.3)$$

Друга модель простоїв, запропонована в [19], являє собою суму питомого часу на ремонт DT_b і на інспектування DT_i :

$$TDT = DT_b + DT_i.$$

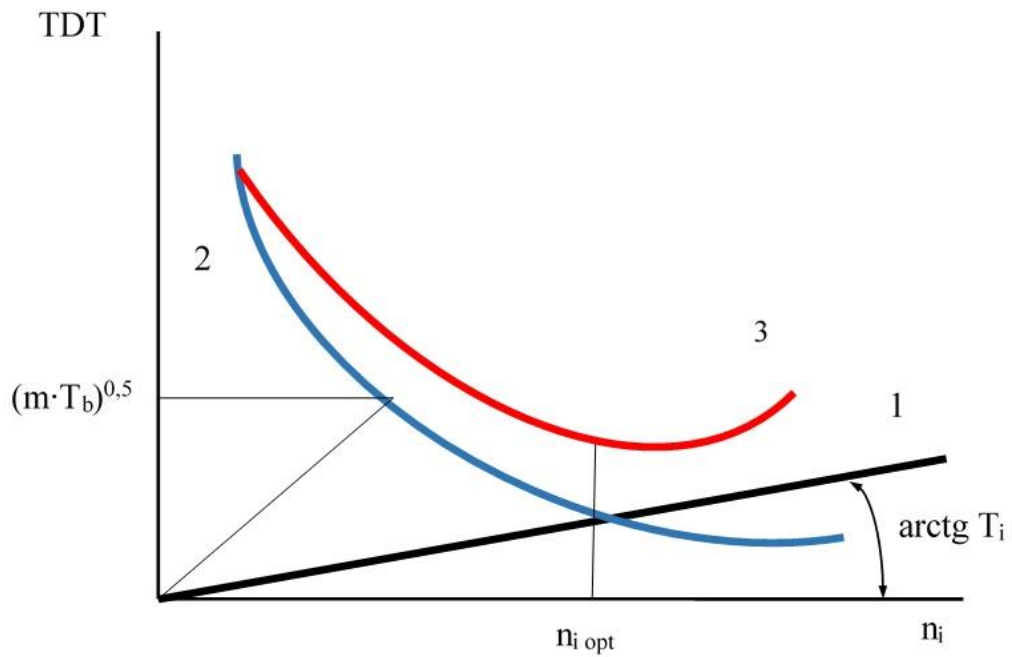


Рисунок 1.7 – Графічна інтерпретація моделі простоїв (1.1)

Звідки

$$TDT = \frac{\lambda}{\mu} + \frac{n_i}{\theta}, \quad (1.4)$$

де θ – інтенсивність часу виходу з фази інспектування.

Графік даного рівняння подібний графіку 3 (рис. 1.7). Дорівнявши нулю похідну $\frac{d(TDT)}{dn_i} = 0$, одержуємо залежність для визначення оптимальної частоти інспекцій:

$$\frac{d\lambda}{dn_i} = \frac{\mu}{\theta} = \frac{T_i}{T_b} = \frac{1}{T_r}. \quad (1.5)$$

Порівняно просте розв’язання даного рівняння можна одержати для експонентного закону наробітку на відмову, коли його інтенсивність представлена у вигляді [19]:

$$\lambda = \frac{1}{T_0} \exp(-n_i), \quad (1.6)$$

де T_0 – встановлений термін служби при відсутності ТОіР.

Тут підтримується основне положення першої моделі про позитивний вплив інспекцій: зі збільшенням їх частоти інтенсивність відмов падає, а наробіток росте. Як і для першої моделі, слід звернути увагу, що дане положення слушне не для всіх деградаційних процесів, а лише для тих, які контролюються по прямій діагностичній ознаці (зношування, вібрація). Процес накопичення втомних ушкоджень контролюється по непрямим ознаках, тому в цьому випадку позитив від інспекцій слабшає.

З рівняння (1.6) одержуємо:

$$n_{i\text{opt}} = \ln\left(\frac{\theta}{\mu \cdot T_0}\right); \quad \text{або} \quad \delta_{\text{opt}} = \left(\ln \frac{T_r}{T_0}\right)^{-1}. \quad (1.7)$$

Дана форма зручна, тому що дозволяє одержати відносний інтервал δ_{opt}^r , прийнявши $T_0 = 1$ (модель дійсна при $T_r/T_0 > 1$).

1.3.2 Мінімізація інтенсивності витрат на ТОіР

Оцінивши загальні (усі) втрати від простоїв в одиницю часу c_m , баланс інтенсивності витрат представляємо як [19]:

$$c = c_m - \frac{c_m \cdot n_i}{\theta} - \frac{c_m \cdot \lambda}{\mu} - \frac{n_i \cdot c_i}{\theta} - \frac{c_{pc} \cdot \lambda}{\mu}, \quad (1.8)$$

де c_i і c_{pc} – питомі витрати на проведення одного акту, відповідно, інспекції і ремонту.

Величина, що перебуває в лівій частині даного рівняння, являє собою невраховану частину інтенсивності втрат і, фактично, є характеристикою ризику експлуатації, пов'язану з упущеною вигодою і соціальними наслідками [21].

Продиференціював рівняння (1.8), позначив відносну вартість ремонтних витрат як $c_r = (c_m + c_{pc}) / (c_m + c_i)$, одержуємо оптимальний міжінспекційний інтервал:

$$\delta_{opt} = \frac{1}{\ln \frac{T_r \cdot c_r}{T_0}}. \quad (1.9)$$

Ясно, що інтервали, визначені по (1.7) і по (1.9), не збігаються. Враховуючи, що $T_r > 1$, $c_r > 1$, то оптимальний міжінспекційний інтервал, визначений по моделі мінімуму інтенсивності витрат буде менше, ніж величина δ_{opt} , визначена по моделі мінімуму часу простоїв. Однак, подібне співвідношення, як буде показано нижче, дотримується не для всіх моделей.

Зв'язок міжінспекційного інтервалу з заданим терміном служби T_0 знайдено в роботі [22] з умови постійності інтенсивності витрат на ТОіР c_1 для експонентного закону надійності:

$$\delta_{opt} = \left(2T_0 \frac{c_i}{c_1} \right)^{1/2}. \quad (1.10)$$

Враховуючи, що частка витрат на інспектування c_i незначна в загальних витратах c_1 , використовуючи прийняті позначення, дана формула може бути перетворена до вигляду, зручного для порівняння:

$$\delta_{\text{opt}} = \left(\frac{2T_0}{c_r} \right)^{1/2}. \quad (1.11)$$

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

$$\left(\frac{\delta}{T_0} \right) - \left(1 - \exp \left(\frac{\delta}{T_0} \right) \right) = \frac{1}{T_0 \cdot c_r}. \quad (1.11. a)$$

Із графіків залежностей (1.9) і (1.11) для відносних періодів δ_{opt}^r можна вважати, що розбіжність між двома моделями незначна (рис. 1.8). Чим дорожче ремонт, чим менше вартість інспекції, тим частіше можна її проводити. При величинах $c_r > 20 \dots 30$ 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 $\delta_{\text{opt}}^r = 0,15 \dots 0,20$. Таким чином, для механічних систем промислового виробництва, дотримуючись даних моделей, можна рекомендувати 3–6 інспекцій за весь термін служби. Подібний результат також отриманий для моделей, заснованих на ймовірнісно-фізичних інтерпретаціях деградаційного процесу [23].

У своїй першій TDT-моделі (1.1) – (1.4) Диллон не пояснює, як вибирати постійну m . З порівняння двох моделей стає ясно, що вона має розмірність квадрата частоти експлуатаційних подій, та залежить від частоти інспекцій p_i . Внаслідок цього, використання моделі (1.1) проблематичне для механічних систем, у яких значний час простоїв від відмов, коли $T_b \gg T_i$.

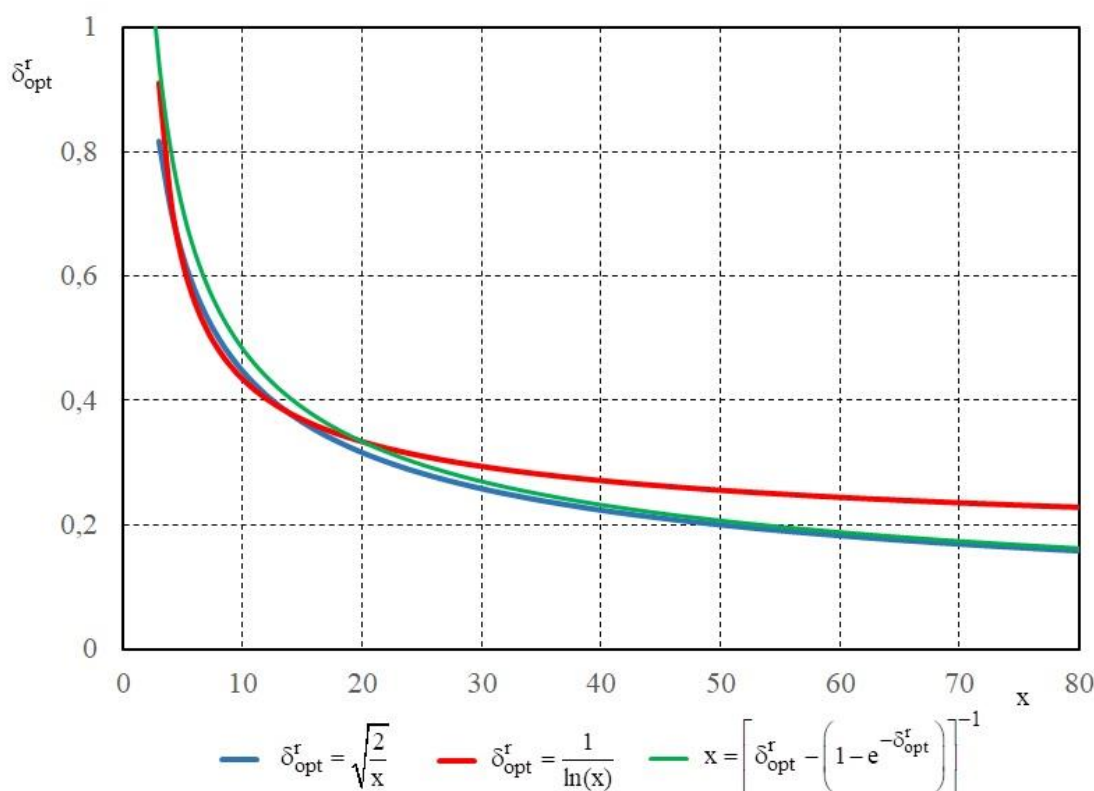


Рисунок 1.8 – Графіки для оптимальних відносних міжінспекційних

інтервалів δ_{opt}^r , отримані для моделі (1.9) ($x = T_r \cdot c_r$),

для моделі (1.11) ($x = c_r$), а також для моделі (1.11, а) ($x = c_r$)

1.3.3 Ймовірнісно-вартісні моделі для оптимізації режимів ТОіР

У багатьох експлуатаційних практиках операції інспектування, діагностичного контролю, ревізії є складовою частиною профілактик, при яких здійснюється відновлення системи. Періодичні інспекції визначають обсяг попереджувальних ремонтів. У такій ситуації періодичність ремонтів і інспекцій збігаються і можна скористатися відомими рішеннями для знаходження інтервалів профілактичних (превентивних) ремонтів.

Ймовірнісно-вартісна модель у загальному випадку представляє суму добутків ймовірності $P_k(t_j)$ перебування системи у фазі технічного стану в момент часу контролю t_j і «вартості» перебування системи в даній фазі C_k :

$$C(t) = \sum_k^k P_k(t_j) \cdot C_k. \quad (1.12)$$

Ймовірність, що змінюється в часі, $P_k(t_j)$ відіграє тут роль вагового коефіцієнта. Оскільки вона зв'язана, згодом (фактично, маючи розмірність імовірність/час), знайдені по (1.12) витрати C отримують зміст питомих витрат c , тобто витрат за час експлуатації t_j . У статистичному аспекті зворотною до функції $P_k(t_j)$ є функція розподілу часу перебування об'єкта у відповідній фазі технічного стану. Так, для функції надійності зворотною є функція розподілу наробітку на відмову $T(P)$ або функція розподілу довговічностей T_p . Однак, визначати функцію витрат C через функцію $(T_p)-1$, поставлену у формулу (1.12) замість $P_k(t_j)$, принципово можливо тільки, якщо експлуатаційна модель представлена не більш, ніж двома фазами технічного стану, що утворюють повну групу подій. Хоча результати розрахунків не будуть однакові.

Якщо не інтерпретувати технічний стан різними його фазами, то для питомих витрат використовується залежність $c(t) = C\Sigma/T_p$, де в чисельнику розташовані загальні витрати на відновлення [24]. Крім обмеженості застосування, серед незручностей слід зазначити її апостеріорний характер і не явність наявності екстремуму. Адже не ясно, як буде зростати число після відмовних ремонтів і витрат на них при збільшенні строку експлуатації. Даний підхід придатний для оцінки оптимальності експлуатаційних стратегій, але не для оптимізації параметрів режимів ТОіР.

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. У порівнянні зі схемою моделі для превентивного обслуговування, представленої на рис. 1.1, у цьому випадку фази G (справний стан) і PM (профілактика) об'єднані. Тому для

них величиною $P_p(t_j)$ є імовірність безвідмовної роботи системи $P(t)$, а імовірність перебування у фазі коригувального ремонту $P_c(t_j)$ відповідає ймовірності відмови, тобто $P_c(t_j) = 1 - P(t)$. Тоді (1.12) буде виглядати як:

$$C(t) = C_p(t) + C_c(t) = P(t) \cdot C_p + [1 - P(t)] \cdot C_c. \quad (1.13)$$

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 δ [22, 25]:

$$c(t) = c_p(t) + c_c(t) = \frac{P(t) \cdot C_p + [1 - P(t)] \cdot C_c}{\int_0^{\delta} P(t) dt}. \quad (1.14)$$

Величина інтеграла, що стоїть в знаменнику цього вираження, виявляється трохи менше верхньої межі δ , а для нормованого часу $\lambda_t < 2$ його можна ухвалювати рівним δ .

Графіки складових функції інтенсивності витрат $c_p(t)$ та $c_c(t)$ симетричні горизонтальній лінії, що проходить через точку $0,5 \cdot c_p$ 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. 1.9). У такій ситуації функція витрат постійна ($c_c = c_p = c = \text{const}$) і 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 точці їх перетинання, яка відповідає δ_{opt} . Чим більше величина c_r , тим менше інтервал δ_{opt} і тим крутіше область графіка

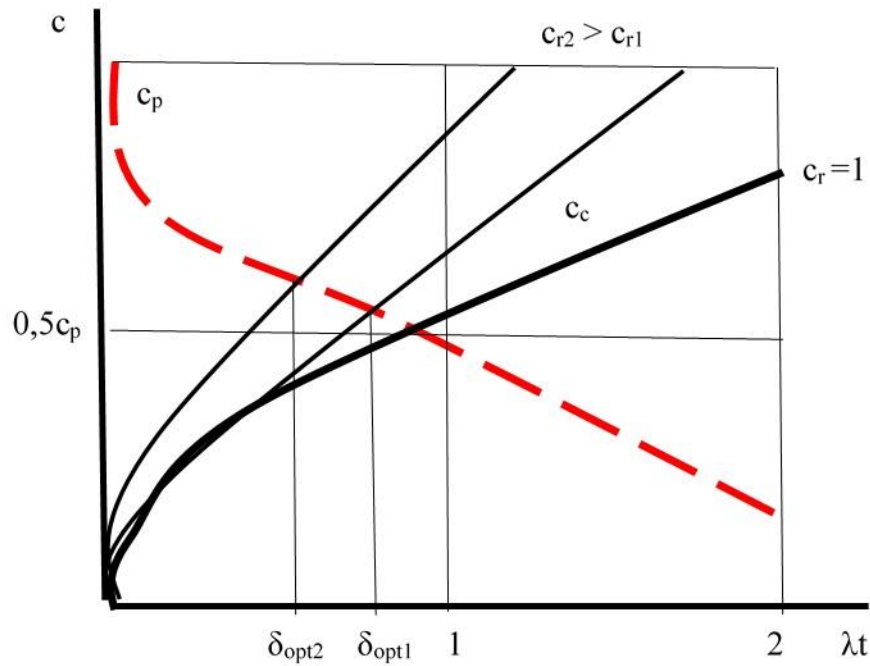


Рисунок 1.9 – Графіки інтенсивності витрат на профілактичні (пунктир) і після відмовні (суцільні) відновлення для різних відносних вартостей c_r

що сходять $c(t)$. У принципі, при $c_p \ll c_c$ можлива ситуація, коли $\delta_{opt} \rightarrow 0$.

Якщо в інтегралі (1.14) не обмежувати верхню межу, то через нього можна знайти середній ресурс T_0 , який реалізується для системи, що не обслуговується

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.15)$$

Якщо система періодично обслуговується з інтервалом δ , її ресурс зростає відповідно до вираження [19]:

$$T_{0p} = \frac{\int_0^{\infty} P(t) dt}{1 - P(\delta)}. \quad (1.16)$$

У знаменнику цього вираження перебуває ймовірність відмови системи до кінця міжінспекційного інтервалу. Чим вона менше, тим ресурс регулярно відновлюваної системи вище.

Щоб відчуті ефективність наведених моделей, розглянемо систему із двох паралельно і одночасно працюючих елементів, з яких одного досить для функціонування об'єкта. Інтенсивність потоку відмов становить $\lambda = 0,1 \text{ років}^{-1}$, а відносна вартість непланового ремонту – $c_r = 20$. Функція надійності для системи такої конфігурації буде:

$$P(t) = 2\exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t). \quad (1.17)$$

Апроксимація інтеграла в (1.14) дає середній наробіток на відмову за експлуатаційний цикл (до кінця інтервалу δ), який виглядає як:

$$T_\delta = \frac{3}{2\lambda} - \frac{2}{\lambda} \exp(-\lambda\delta) + \frac{1}{2\lambda} \exp(-2\lambda\delta). \quad (1.18)$$

Тоді для систем, що не обслуговуються, $T_0 = 3 / (2\lambda)$.

Рішення для мінімуму функції $c(t)$ при використанні функції надійності у вигляді закону Вейбулла–Гнеденко протабульовані для відносного інтервалу δ_{opt}^r . Вони є в спеціальній літературі. У загальному вигляді мінімум визначається графічно побудовою функції $c(t)$. Отриманий таким чином для розглянутого прикладу оптимальний інтервал становить $\delta_{\text{opt}} = 3$ роки [25]. При цьому ймовірність безвідмовної роботи буде $P_p = 0,929$, ресурс системи, що не обслуговується, складе $T_0 = 15$ років, а системи, що обслуговується з оптимальним інтервалом – $T_{0p} = 43$ роки. Отже, відносний оптимальний інтервал становить $\delta_{\text{opt}}^r = 3/15 = 0,2$, що відповідає наведеним вище рекомендаціям. Якщо

збільшити δ до 8 років, то інтенсивність витрат зросте в 1,24 рази, а ресурс, що обслуговується, знизиться до $T_{0p} = 23,4$ роки. Таким чином, оптимальна стратегія ТОіР дає не тільки скорочення витрат на них, але і сприяє продовженню строку експлуатації системи, що ще більш вигідно.

1.3.4. Можливості економіко-статистичних оптимізаційних моделей для ТОіР механічних систем промислових виробництв

Економіко-статистичні моделі, де критеріями оптимізації виступають максимізація функції готовності, а також мінімізація простоїв і питомих витрат на ТОіР, досить широко освітлені в літературі по надійності [19, 20, 25, 26 – 29]. Незважаючи на це, вони ще не знаходять належного їм застосування в практиці ТОіР технологічного устаткування, залишаючи місце більш комфортній, але більш витратній системі планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Якоюсь мірою її поширеність пов'язана з організаційними факторами: система ППР допускає проведення ремонтів одночасно для устаткування всього технологічного комплексу, що важливо для безперервних процесів виробництва. При цьому дотримується твердий графік планування. Використання оптимізаційних моделей припускає відхід від цього принципу, а їх результативність у рамках системи ППР виражається в зниженні витрат на ТОіР на кілька десятків відсотків. Більш ефективно їх використання при системі обслуговування по технічному стану. Однак, необхідно створювати устаткування під подібне обслуговування. Однією з вимог якого є резервування елементів технічної системи. Завдяки цьому ТОіР проводиться для окремих підсистем, виходячи з розв'язання оптимізаційних моделей. Крім цього, передбачається коректне використання розглянутих моделей, що має кілька аспектів.

1. Процедура інспектування припускає, що виявлений у процесі контролю дефектний елемент технічної системи буде замінений при інспектуванні. У такій постановці працюють моделі Диллона. Це актуально для незначних, але

порівняно частих відмов. Чи навряд, можлива подібна короткострокова заміна дорогого елемента, відмова якого сполучена з істотними наслідками (з високим ризиком). А саме подібні дефекти різного ступеня небезпеки зустрічаються при діагностуванні технологічного устаткування.

2. Основна передумова, що обумовлює можливість процедури оптимізації, пов'язана з монотонним ростом з часом експлуатації ймовірності відмови і аналогічним зниженням ймовірності безвідмовної роботи. Подібно цьому поводяться функції інтенсивності післявідмовних і профілактичних відновлень. Внаслідок взаємовпливу конкуруючих процесів обслуговування функція інтенсивності загальних витрат $c(t)$ не є монотонною, маючи мінімум, відповідний до оптимального інтервалу відновлення. Зі зростанням відносної вартості післявідмовного відновлення, яка є параметром функції $c(t)$, оптимальний інтервал відновлення знижується. Це може привести до ситуації, коли відпаде доцільність оптимізації.

Концепція інспекцій, що суміщають обстеження об'єкта і його превентивний ремонт, вдала, у першу чергу, для електронних технічних систем, де регулярно виходять із ладу дрібні елементи низького ризику експлуатації, і ремонт їх є оперативним, який не вимагає багатьох місяців підготовки. Також така концепція актуальна для технічних систем, які відновлюються шляхом регулювань, налаштувань. У такій ситуації безперечна ідея Диллона про продовження вихідного ресурсу за рахунок регулярної профілактики. Безумовно, підтримка необхідних параметрів зубчастих зачеплень сприяє тривалій експлуатації редуктора. Однак, складно представити, як регулярні огляди (навіть діагностування) можуть вплинути на накопичення втомних ушкоджень у силових елементах конструкцій.

Викладені економіко-статистичні моделі застосовні для тих механічних систем, у яких переважають відмови невідповідальних елементів, що ведуть до несправного стану. Такі елементи, як правило, не розраховуються при проектуванні, а вибираються конструктивно. До цієї ж категорії відносяться вузли, працездатність яких складно спрогнозувати розрахунково. Це, наприклад,

елементи футеровок і охолоджувальних систем, робочі органи машин для переробки сипучих матеріалів (дробарки, млини, змішувачі й т.п.). Основою моделей є функція надійності, яку звичайно одержують шляхом вивчення об'єкта в процесі експлуатації (апостеріорно). Це пов'язано з тимчасовими витратами і додатковими витратами матеріальних засобів, які не завжди враховуються в алгоритмах оптимізації.

3. Поява мінімуму на графіку функції витрат на ТОіР багато в чому пов'язане з ванноподібною формою функції інтенсивності відмов $\lambda(t)$ [22], на якій спостерігаються 3 характерних ділянки: I – зниження інтенсивності відмов (іноді званий фазою «згоряння» - burn-in), II – стала фаза, III – прискорення потоку відмов (фаза катастрофічного зношування – wear-out) (рис. 1.10). Подібна поведінка функції $\lambda(t)$ безумовна для електронних технічних систем, а також для технічних систем, у яких відмови обумовлені S-подібною кінетикою процесів, що ушкоджують. Зокрема, до таких відносяться процеси зношування. Крива зношування має початкову ділянку приробляння, де швидкість зношування вище, чим на сталій ділянці, але нижче, чим при катастрофічному зношуванні. На цій підставі ванноподібна форма кривої $\lambda(t)$ була поширена на механічні технічні системи, що дало можливість застосовувати для них математико-статистичні моделі, отримані для електронних систем. Суб'єктивними факторами наявності первісної ділянки інтенсивних відмов є неякісне складання машини (дефекти усуваються на стадії експлуатації) і невідповідність персоналу (для устаткування нового типу можливі помилки в правилах експлуатації).

Фахівці, що займаються загальною теорією надійності, звертали увагу на різницю в поведінці експлуатаційних показників електронних і механічних систем. Для останніх може мати місце експонентна форма кривої $\lambda(t)$ (рис. 1.10) [25]. Вона обумовлена важкими відмовами, які відбуваються внаслідок процесів, що ушкоджують, з монотонною кінетикою (втома, перевантаження).

Оптимізаційні алгоритми засновані на теоремах теорії відновлення про монотонне зростання інтенсивності після аварійних ремонтів (СМ) і монотонне

спадання інтенсивності профілактичних ремонтів (РМ) [22]. Найбільш задовільно цьому відповідають моделі марковських перехідних процесів, що передбачають 2 фази технічного стану (працездатне – непрацездатне, справне – несправне), а також дискретність переходу з однієї фази в іншу [23]. Це припускає раптовість відмов. Насправді, практично, усі відмови мають поступовий характер. Але головний недолік такого підходу полягає в тому, що слідуючи йому, залишковий ресурс залежить лише від останнього стану об'єкта, і не залежить від історії експлуатації, що також не є цілком виправданим.

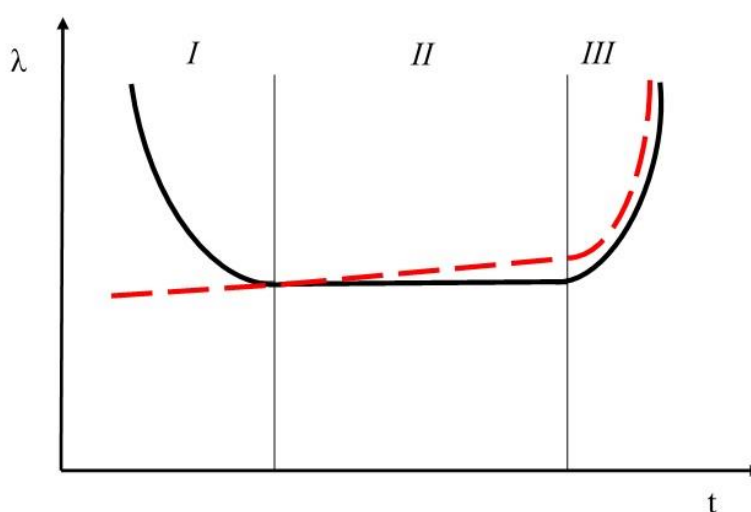


Рисунок 1.10 – Фази інтенсивності потоку відмов для електронних (суцільна) і механічних (пунктир) систем

1.4 Особливості застосування оптимізаційних алгоритмів ТОіР в умовах вітчизняної металургії

Технологічні лінії безперервних металургійних процесів складаються з послідовно розташованих ланцюгів машин і агрегатів. З точки зору надійності такі технологічні ланцюги являють прості технічні системи, які вразливі щодо відмов окремих елементів. Щоб цьому запобігти, застосовують паралельно працюючі ланцюжки агрегатів. В загальному випадку окремі елементи технічної системи у вигляді обладнання доменного комплексу мають суттєво різну (різниця

може становити декілька порядків) інтенсивність відмов. Тому ефективно планувати технічне обслуговування, тим більше, оптимізувати графіки ремонтів досить проблемно.

Рациональним є планування обслуговування на рівні окремих груп обладнання, яке має однорідні показники інтенсивності відмов. Таким чином утворюється змішана стратегія ТОіР. За превентивною стратегією обслуговується, головним чином, енергетичне обладнання, нагляд за яким регламентовано державними контролюючими органами. Решта обладнання обслуговується за різноманітними варіантами визначення фактичного технічного стану. Змішана стратегія призводить до зменшення питомих витрат. Зараз на більшості підприємств металургійного комплексу України витрати на ТОіР зменшено настільки, що відпадає необхідність їх оптимізувати. Наприклад, за умов відсутності капітальних ремонтів та аварій в доменному цеху витрати на ТОіР складають приблизно 1% собівартості чавуну (табл. 1.1). Це свідчить про те, що кошти витрачаються, в основному, на матеріали для превентивних або коригуючих ремонтів. І, практично, немає вкладень в інспектування і діагностування обладнання. Воно може працювати до повного виробітку ресурсу. Якщо для невідповідального обладнання (у якого невеликий параметр c_T в оптимізаційних моделях) така ситуація припустима, то для обладнання зі значними потенційними наслідками це, навпаки, неприпустимо.

До таких об'єктів відносяться несучі конструкції ДП. Вважається, що вони обслуговуються за превентивною стратегією (РМ, рис. 1.11). В проміжок між капітальними ремонтами витрати на обслуговування конструкцій, як являють результати досліджень табл.1.1, невеликі (C_{pm} , рис. 1.11). В такій ситуації збільшується імовірність аварійних відмов і зменшується періодичність коригуючих (після аварійних) ремонтів t_{pm} . Збитки від аварій S_{pm} перевищують, зазвичай, поточні витрати C_{pm} .

Таблиця 1.1 – Витрати на поточні ремонти в доменному цеху ДМЗ.

Показник	Одиниці виміру	2012р.	2013р.	2014р.	2015р.	2016р.	2017р.
Витрати на ремонти	млн. грн.	28,2	23,2	11,9	57,1	32,9	18,9
Доля ремонтів в собівартості чавуну	%	1,0	0,8	0,3	1,3	0,6	0,5

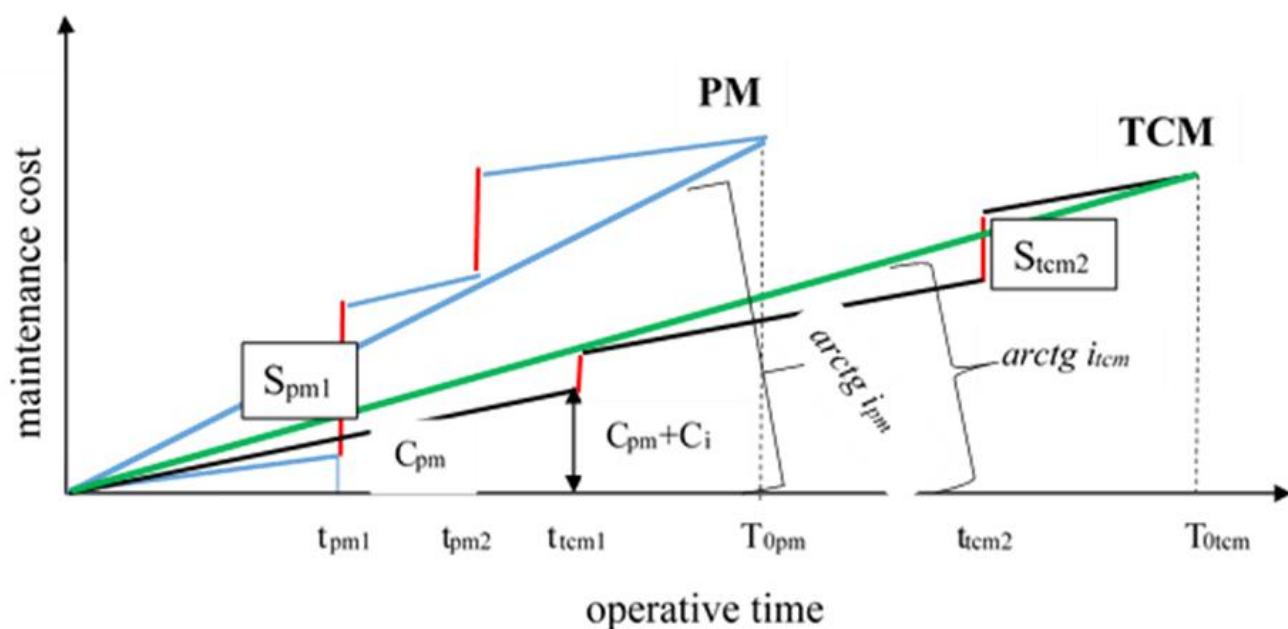


Рисунок 1.11 – Збільшення терміну кампанії ДП при проактивній стратегії обслуговування (TCM) T_{0tcm} у порівнянні з превентивною стратегією (PM) T_{0pm} шляхом збільшення коштів C_i на діагностування конструкцій, що призводить, як до зменшення частоти аварій ($t_{tcm} > t_{pm}$) і втрат від них S ($S_{pm} > S_{tcm}$), так і до зменшення ризику i ($i_{pm} > i_{tcm}$)

При проактивній стратегії (ТСМ, рис. 1.11) до поточних витрат додаються витрати на інспектування C_i . Це призводить до зменшення частоти аварій і збільшення періоду між коригуючими ремонтами t_{tcm} . Такий результат витікає з вищерозглянутої концепції позитивного впливу інспекцій на експлуатаційні показники. Разом з тим, зменшуються втрати від аварій S_{tcm} . У підсумку загальні витрати разом зі збитками при ТСМ-стратегії стають меншими, ніж при превентивній РМ-стратегії. Це віддзеркалюється на моделі витрат: нахил лінії питомих підсумкових витрат $C(t)$ для ТСМ є меншим, ніж за умов превентивної стратегії. Кут нахилу лінії $C(t)$ є пропорційним до ризику i . Збільшення ризику характеризує зростання інтенсивності втрат і сигналізує про припинення експлуатації [21]. Тому для ДП доцільно використовувати проактивну стратегію з контролем ризику.

Зменшення ризику експлуатації дає можливість суттєво збільшити її термін. Подовження кампанії ДП від $T_{0\text{pm}}$ до $T_{0\text{tcm}}$ стає економічно вигідним (питання морального старіння тут не приймаються до уваги). Про можливість збільшення кампанії ДП понад 40 років при застосуванні стаціонарних систем діагностування оболонки печі напряду вказано в нормативному документі щодо визначення технічного стану кожухів [30]. Окрім того, відомо, що подовженню на 12 років кампанії ДП №5 «Северсталі» після її 20 річної експлуатації сприяло функціонування системи діагностування охолодження кожухів печі на базі програмного комплексу SCADA TRACE [31].

1.5 Висновки

Підводячи підсумок сказаного, слід зазначити, що більшість економіко-статистичних моделей оптимізації термінів служби або інспекцій мають ймовірнісний характер. Вони слушні, якщо збитки від простоїв порівняні з вартістю ремонтів, а витрати на інспектування значно менше їх. Допускається поява відмов, важливо лише, щоб їх частота була економічно виправдана. Разом із цим, у механічних системах доменного виробництва є базові і відповідальні елементи, відмова яких небажана (неприпустима), оскільки пов'язані з наслідками, тобто експлуатованих з високим ризиком. Використання таких елементів до нормативного терміну служби економічно не вигідне, тому що залишається невиробленим, як правило, більш половини технічного ресурсу. Доцільно експлуатувати їх до перед відмовного стану, контролюючи його діагностичні параметри. Якщо в розглянутих моделях змінити в зазначеному аспекті вартісно-ймовірнісні пропорції, то моделі стануть малопридатними (нечутливими) для розв'язання оптимізаційного завдання. До того ж економіко-статистичні моделі оперують із параметрами надійності всієї системи (у цілому), а необхідно одержувати інформацію про залишковий ресурс окремих елементів, після чого поєднувати їх у єдиний комплексний показник.

Ще один мотив, що обмежує дію економіко-статистичних моделей, пояснюється складністю (іноді неможливістю) одержання представницької вибірки для встановлення типу і параметрів закону розподілу часу наробітку на відмову. Усе це підтверджує необхідність переходу до моделей ТОіР на основі ймовірнісно-фізичних підходів, що враховують природу і параметри деградаційного процесу.

1. В середовищі основних світових виробників металургійного обладнання остаточно сформовано принцип виготовлення виробів під їхнє 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. Остання обставина відповідає концепції «зеленої металургії», що є сучасним загальносвітовим трендом.

2. Висока аварійність і великі збитки від самої аварії роблять доменне виробництво ризикованим порівняно з іншими металургійними переділами. Найбільший ризик експлуатації притаманний конструкціям безпосередньо ДП. Враховуючи чутливість доменної технології до простоїв, для безпечного функціонування доменного комплексу рекомендовано контролювати ризик експлуатації конструкцій печі. В цьому аспекті доцільно подолати тенденцію зменшення складової витрат на ТОіР в собівартості вітчизняного чавуну і перейти до проактивної стратегії обслуговування. При цьому, попри збільшення витрат на інспектування, збільшується термін безпечної експлуатації ДП, і як наслідок, разом з питомими витратами зменшується ризик експлуатації.

3. В результаті дослідження моделей оптимальних періодів відновлювальних заходів при превентивній стратегії 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. Можливість такого висновку сталася завдяки представленню моделей в безрозмірних, відносних величинах (координатах) $\delta_{\text{opt}}^r - c_r$. В цьому випадку оптимізаційні моделі періодичності переходять в інваріантну до інтенсивності відмов форму.

4. Сформульовано принцип побудови імовірісно-вартісних моделей витрат на ТОіР механічного обладнання у роботах [32 – 35]. Параметр відносної вартості післяаварійного (коригуючого) ремонту c_r відіграє в них роль показника ризику.

РОЗДІЛ 2

ОПТИМІЗАЦІЙНІ МОДЕЛІ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ РИЗИКУ

2.1 Послідовний режим інспектування для мультидеградаційних процесів

Для стратегій ТОіР, орієнтованих на зниження ризику, актуальні інспекційні режими зі зменшуваним інтервалом δ_j після кожної інспекції $j = 1 \dots N$:

$$\delta_j = t_j - t_{j-1} = \alpha^{j-1} \cdot \delta_1 \quad \text{або} \quad t_j = \sum_{j=1}^N \alpha^{j-1} \cdot \delta_1, \quad (2.1)$$

де $0 < \alpha < 1$ – основа прогресії, звичайно приймаємо $\alpha = 0,8 \dots 0,97$ [26, 36].

Нерівномірність міжінспекційних інтервалів логічна, тому що при підході до граничного стану впевнене прогнозування можливе на короткий період, що вимагає частішого контролю. Тоді ризик є визначальним чинником у зниженні міжінспекційних інтервалів [37]. Передумовою до такого рішення є доведена теорема про монотонне спадання інтервалів δ_j , як ознаки оптимальності стратегії обслуговування [22].

Завдання визначення інспекційного режиму зводиться до визначення, у першу чергу, оптимального інтервалу першої інспекції δ_{1opt} . Це завдання схоже на оптимізацію строку експлуатації до відновлення. Воно вирішується з умови мінімізації функції витрат на експлуатацію $C(t)$ за час t [29]:

$$C(t) = C_i \cdot n_i + C_p \cdot P_p + C_c \cdot P_c + c_m \cdot TDT, \quad (2.2)$$

де $C_i < C_p < C_c$ – вартість, відповідно, інспекції, профілактичного і післяаварійного ремонтів; n_i – середня кількість інспекцій за час

експлуатаційного циклу; c_m – збитки за час простоїв; TDT – середній час простоїв за експлуатаційний цикл; $P_p = 1 - P_c$ – імовірність того, що цикл експлуатації об'єкта закінчиться профілактичним (P_p) або після аварійним (P_c) ремонтом.

У цілому, бажано, щоб дотримувалася нерівність $P_p > P_c$, якщо тільки не використовується суцього після відмовна стратегія (corrective policy). Враховуючи, що величина c_m , по суті, являє собою ризик, то останній доданок визначає загальний збиток.

Знаючи рівняння кожного з деградаційних процесів, що ушкоджують, $y(t)$, маючи найменше значення діагностичних параметрів $[Y]$, визначають моменти першої інспекції δ_1 . Для кожного деградаційного процесу також відома гранична величина Y_0 , що забезпечує наявність допусків, що випереджають, як по параметрах $\Delta Y = Y_0 - [Y]$, так і по терміну служби $\Delta T = T_0 - \delta_1$. У результаті цього на підставі моделі (2.2) одержують функцію витрат $C(\delta_1, [Y])$, яка досліджується на мінімум. При одержанні даної функції «частотні» співмножники рівняння (2.2) – p_i , TDT , P_p , P_c визначались за допомогою імовірностно-фізичних, а не математико-статистичних методів. Кожний із цих співмножників враховує дію кожного деградаційного процесу, поєднуючи їх на цьому етапі (кроці) алгоритму в єдиний мультидеградаційний процес.

Реалізуючи розроблений $6 \div 8$ кроковий ітераційний алгоритм, одержують сімейство оптимумів $(\delta, [Y]_1, [Y]_2, \dots, [Y]_j)$, з якого вибирається той, що забезпечує найбільшу імовірність P_p (рис. 2.1, б) [36]. Об'єднання дії декількох деградаційних процесів на етапі знаходження мінімуму функції витрат робить алгоритм проф. Фама трохи громіздким, хоча і універсальним.

Для ситуації, коли об'єкт зазнає двох деградаційних процесів, один з яких є «шоковим», накопичувальної дії, графічне зображення функції витрат $C(\delta_1; [Y])$

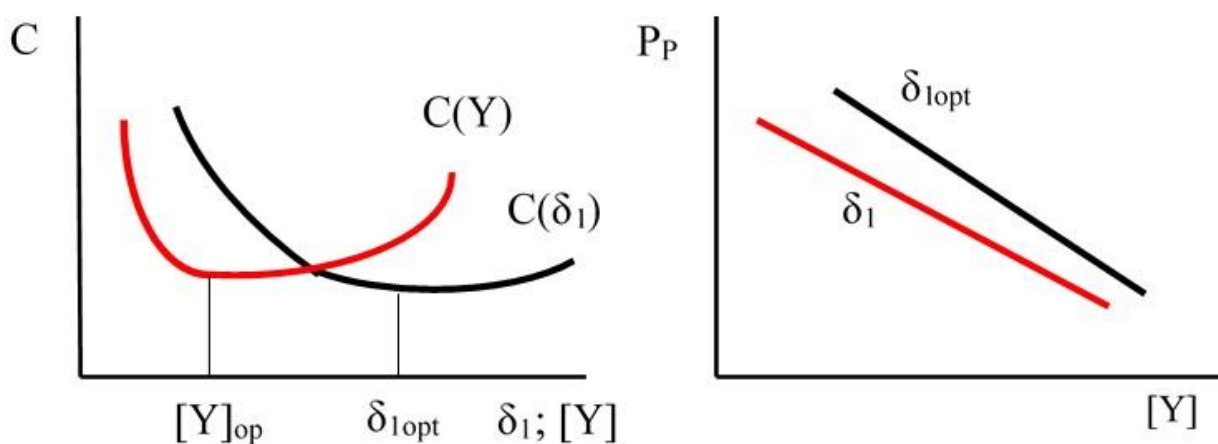


Рисунок 2.1 – Залежність витрат на ТОіР від міжінспекційного інтервалу δ_1 і найменшого перед відмовного значення діагностичного параметра $[Y]$ (а), а також залежність ймовірності профілактичного ремонту від фактору $[Y]$ при незмінних параметрах δ_j (б)

буде представляти вгнуту поверхню (рис. 2.1, а). Убування функції $C(Y)$ обумовлене тим, що збільшення допустимого параметра $[Y]$, дає зниження частоти профілактичних ремонтів, а її зростання пов'язане зі збільшенням ймовірності після відмовних ремонтів P_c . Убування функції $C(\delta)$ відбувається за рахунок зниження витрат на інспектування, її зростання пояснюється тим, що збільшення періоду δ_1 спричиняє ріст параметра, що допускається, $[Y]$. А при цьому частішають після відмовні ремонти (рис. 2.1, а). Середній час простоїв за експлуатаційний цикл TDT зростає, практично, пропорційно параметру $[Y]$.

Та обставина, що при визначенні режиму інспектування попереджувальні допуски обираються в імовірнісному аспекті, фактично, свідчить про приналежність даної моделі до проміжної фази технічного стану між справним і непрацездатним станами. Представлення в рівнянні витрат деградаційних процесів у кінетичній формі відносить дану модель до гібридних моделей, що поєднують як математико-статистичні, так і ймовірнісно-фізичні методи.

2.2 Моделі експлуатаційних режимів і витрат, що мінімізують ризик

У стратегіях обслуговування по фактичному стану ризик відіграє важливу (іноді і визначальну) роль у розробці режимів технічного обслуговування. Це привело до появи стратегії ТОіР з контролем ризику (RBI – risk based inspection) [38–41]. Її застосування дозволяє не збільшувати ризик у процесі експлуатації, який звичайно, навпаки, зростає з терміном служби, якщо застосовувати традиційні стратегії ТОіР (рис. 2.2) [38]. Концепція RBI розходиться з поширеною думкою, що надійність на стадії експлуатації не може бути вище проектної [42].

Таке положення слушне для технічних систем, що не обслуговуються. У стратегіях обслуговування по технічному стану (у тому числі і для RBI), завдяки активному використанню засобів технічної діагностики, вдається виявити частину дефектів на ранній стадії, не даючи їм перерости у відмову. За цей рахунок скорочується число поступових відмов N_p , які виникають у об'єктах, які не діагностуються. У системах, які діагностуються кількість поступових відмов N_{pd} залежить від закону ймовірності виявлення дефекту $P_d(t)$: $N_{pd} = N_p \cdot (1 - P_d(t))$. Загальний рівень надійності і безпеки зростає пропорційно частці поступових відмов у їх сумі з раптовими відмовами.

Концепція RBI, по суті, є методом системного аналізу, з якого можна встановити не тільки інтервал між інспекціями, але і їх зміст із алгоритмом знаходження необхідних показників технічного стану. Її застосування відноситься, переважно, до статичних конструкцій і допускає два протилежні підходи до визначення міжінспекційних інтервалів [43]. З одного боку, фахівці норвезької організації DNV для цієї мети пропонують використовувати розповсюджену в ризик-аналізі квадратну матрицю 5 порядку, тим самим сповідуючи нормативну стратегію (табл. 2.1).

Фактично, матриця ризиків (добуток ймовірності відмови на його вагу) звужено до розміру 5×3 . Проте, не можна такий підхід зараховувати до чисто

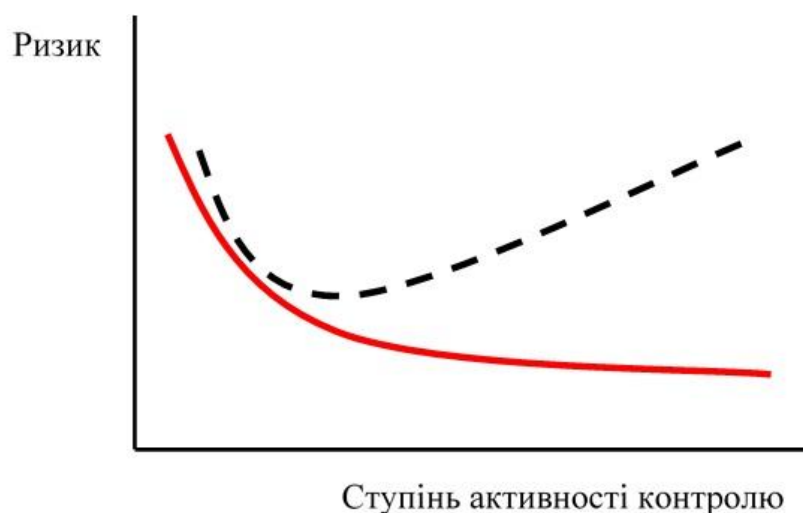


Рисунок 2.2 – Характер зміни ризику для стратегій ТОіР з використанням концепції RBI (суцільна) і без неї (пунктир) [34]

Таблиця 2.1 – Матриця ризиків (DNV 2009) для знаходження міжінспекційних інтервалів у роках [43]

Ймовірність відмови	Вага відмови				
	Невизначена	Другорядна	Обмежена	Критична	Катастрофічна
$>10^{-2}$	0	4	2	1	1
від 10^{-3} до 10^{-2}	0	4	2	1	1
від 10^{-4} до 10^{-3}	0	0	4	2	2
від 10^{-5} до 10^{-4}	0	0	8	4	4
$<10^{-5}$	0	0	8	8	8

нормативної стратегії, оскільки контроль ймовірності відмови, як діагностичного параметра, припускає його ріст і, отже, зниження інтервалу з максимальних 8 років до 1 року. До речі, не є незмінною і вага відмови, оскільки міняються його наслідки.

З іншого боку, згідно з принципом практично досяжно низького рівня ризику (ALARPPinciple), проводиться аналіз між витратами і вигодою (cost-

benefit analysis), після чого встановлюється частота інспекцій. Очевидно, застосування подібного методу визначення інтервалів між відновленням, характерного для превентивної стратегії, в умовах обслуговування за станом пояснюється вартістю інспектування, яке зростає, так і неприпустимістю відмов.

RBI-методологія, зародившись в 90-х роках минулого століття, була оформлена до початку XXI ст. у вигляді документа Американським інститутом нафти (API) стосовно для обслуговування посудин високого тиску. Втім, перші керівні принципи RBI, видані Центром дослідження і розвитку технологій Американського товариства інженерів-механіків (ASMECTR), відносилися до атомних станцій, а також до устаткування потенційно небезпечних промислових виробництв [17]. Завдання продовження ресурсу промислового устаткування, розрахованого спочатку на 15-літній термін служби, розширили коло об'єктів, де використовуються принципи RBI. Відповідно до них розроблені інспекційні моделі містять, крім витрат від простоїв в одиницю часу (власне, ризику), ще і безрозмірний параметр ризику.

У концепції технічного обслуговування з неприйняттям ризику (risk aversion maintenance) рівняння, яке оптимізує представлене у вигляді функції корисності [44, 45]:

$$U = \frac{1 - \exp(-\eta \cdot C)}{\eta}, \quad (2.3)$$

де $0 < \eta < 1$ – міра неприйняття ризику або його параметр; C – витрати на ТОіР у грошовому вираженні.

Після перетворень результуюча функція питомих витрат виглядає як:

$$c = i + \frac{\lg \left\{ +F(t) \cdot \left[\exp \left(\eta \cdot (C_{pc} - C_m) \right) - 1 \right] \right\}}{\eta \cdot T_0}, \quad (2.4)$$

де $i = C_m / T_0$ – ризик експлуатації; $F(t)$ – імовірність відмови, знайдена по функції розподілу наробітку; T_0 – математичне очікування часу роботи; C_{pc} та C_m – відповідно, витрати на безпосередньо відновлення після відмови та інші збитки, пов’язані з ним.

Як видно, тут загальні втрати від відмови розділені на дві частини. Мінімізуючи витрати по вираженню (2.4), одержують оптимальні строки до ремонтного впливу. Фактично, параметр ризику η у цій моделі відіграє роль допуску, що випереджує, ΔT . Чим менше величина η , тим менше час наробітку на відмову по функції $F(t)$ і, таким чином, параметр η зв’язаний імовірністю безвідмовної роботи. Тобто, ріст η дає збільшення ймовірності відмови. Зниження величини η веде до збільшення оптимального часу експлуатації до заміни (інспекції) об’єкта.

Ще одна оптимізаційна модель сумарних витрат за експлуатаційний цикл виглядає в такий спосіб:

$$C(t) = N_i \cdot C_i + (C_{pc} + \delta \cdot i) \cdot \left[N_i - \sum_j P_j(t) \right] \cdot (1 + \eta \cdot \delta), \quad (2.5)$$

де $N_i = T_0 / \delta$ – число інспекцій за середній термін служби T_0 ; $P_j(t)$ – імовірність безвідмовної роботи за міжінспекційний період $\delta = t$.

Графік даної функції в координатах $C - \delta$ має форму кривої другого порядку з мінімумом, абсциса якого дорівнює величині δ_{opt} . Ріст параметра $\eta \rightarrow 1$ показує збільшення ризику, що веде до росту витрат C і скороченню міжінспекційного інтервалу δ_{opt} . На жаль, у літературі не наведено рекомендацій з призначення параметра ризику η . Його ріст від 0 до 0,6 може привести до більш, ніж дворазового скорочення величини δ_{opt} . Це веде до збільшення числа інспекцій N_i , яке, у свою чергу, сприяє збільшенню ймовірності безвідмовної роботи $P_j(t)$

при першій інспекції $j=1$ і менш інтенсивному зниженню величин $P_j(t)$ від інспекції до інспекції, де $j = 2, 3 \dots N_i$.

2.3 DT-моделі для інспекційних режимів

Щоб подолати елементи схоластики економіко-статистичних методів, у них стали «вживляти» методи ризик-аналізу, які, у принципі, повинні відображати природу відмови. Наприклад, у розглянутих вище методах міститься, фактично, функція розподілу періоду живучості $(F(t), P_j(t))$, яку проблематично встановити без використання методів механіки руйнування і аналізу навантаженості. Адже мова йде про об'єкти з якимось ризиком, у яких за час експлуатації не набирається представницька вибірка результатів для обґрунтування виду функції живучості. Ознакою подібного переходу до імовірно-фізичних методів є також аналіз проміжної фази технічних станів. Тобто, при цьому здійснюється перехід від «марковської», 2-фазної класифікації технічних станів (працездатне – непрацездатне, справне – несправне) до класифікації, де враховуються додаткові ушкоджені стани.

Такий постановці завдання відповідають, так звані, DT-моделі. Їх назва (delaytime, буквально – затримка часу), мабуть, пояснюється тим, що з метою зниження часу простоїв і збільшення ступені виробітку ресурсу устаткування заміна його вузлів відбувається не відразу після виявлення дефекту, як це може бути при коригувальному обслуговуванні, а після його розвитку до критичного значення. Тобто, з деякою затримкою, яка обумовлена часом розвитку дефекту, який відповідає періоду живучості (рис. 2.3). Дана модель розроблена в 80-х роках Кристером, як один з інструментів для стратегії обслуговування за технічним станом. Фактично, тут розглядаються 3 фази технічного стану, одна з яких проміжна на шляху від працездатного стану до непрацездатного (unavailability) [46, 47].

Ідея методу полягає в тому, що період до наступної інспекції δ не може бути більше періоду живучості h : $\delta < h$. У подібних моделях час експлуатації t може виражатися за допомогою міжінспекційних інтервалів δ . В основі алгоритму лежить функція відмов від часу експлуатації:

$$F(t) = \lambda \cdot \int_0^{\delta} (\delta - h) \cdot f(h) dh, \quad (2.6)$$

де λ – інтенсивність появи дефектів (визначається звичайно, як їх число за інтервал часу експлуатації t); $f(h)$ – щільність розподілу часу живучості.

Дане рівняння може також трактуватися як число після відмовних ремонтів, виходячи з інтенсивності відмов за середній термін служби T_0 [48]:

$$N_f = \lambda \cdot h_0 = h_0 / T_0.$$

Тут позначений через h_0 середній період живучості.

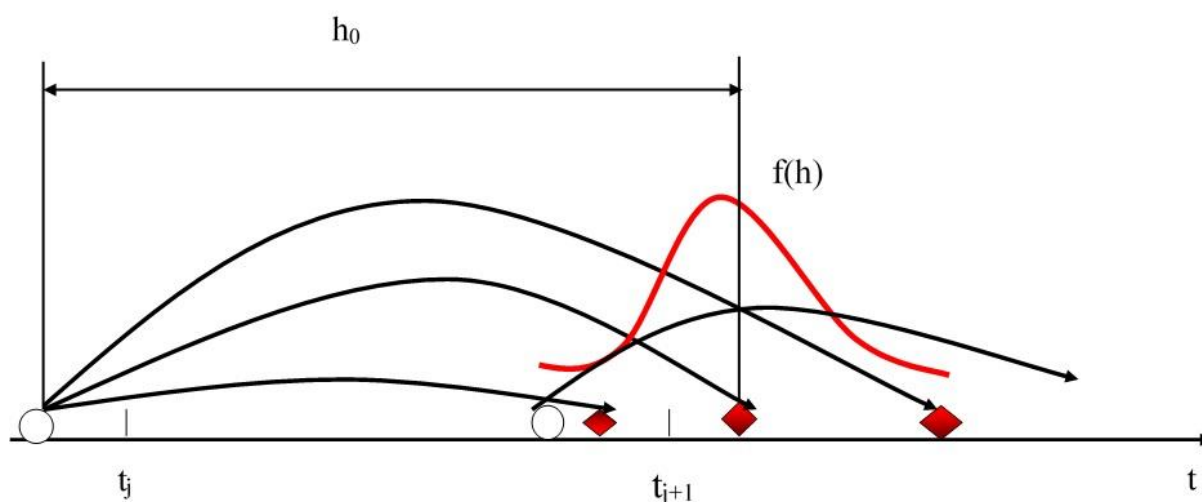


Рисунок 2.3 – Схема DT-моделі: виникнення дефекту (кружки), його розвиток (стрілки) протягом часу h , що приводить до відмов (ромби), а також строки інспекцій t_j та t_{j+1}

2.3.1 Мінімізація часу простоїв

Враховуючи час на інспектування T_i і час на ремонти T_p , одержуємо питомий (відносний) час простоїв за експлуатаційний цикл в імовірнісному аспекті [49]:

$$D(t) = \frac{T_i + \lambda \cdot \delta \cdot F(t) \cdot T_p}{\delta + T_i}. \quad (2.7)$$

У детермінованому аспекті маємо:

$$D(t) = \frac{T_i + T_p \cdot N_f}{\delta + T_i} = \frac{T_i + T_p \cdot \lambda \cdot \delta}{\delta + T_i}. \quad (2.8)$$

У цих моделях передбачається, що всі відмови будуть усунуті негайно, кожний – за час T_p . Якщо враховувати, що існують види дефектів, які не можна пропускати, а ремонти, що їх усувають, тривають час $T_c > T_p$, то формула (2.8) трансформується в:

$$D(t) = \frac{T_i + T_p \cdot N_f(\delta_{j-1}) + T_c \cdot N_c(\delta_j)}{T_i + \delta + T_c \cdot N_c(\delta_j)}, \quad (2.9)$$

де $N_f(\delta_{j-1})$ – число відмов за експлуатаційний цикл $j-1$; $N_c(\delta_j)$ – очікуване число дефектів, виявлених при j -ой інспекції.

З ростом часу δ знижується кількість і час простоїв. Це пояснюється зменшенням кількості інспекцій. Але в той же час зростає число раптових відмов за збільшений проміжок δ , що веде до зростання функції $D(t)$. Обидва фактори

обумовлюють немонотонність її поведінки. Мінімум функції простоїв $D(t)$ забезпечує максимум функції готовності за час циклу T_0 :

$$A(t) = \frac{T_0 - D(t)}{T_0}. \quad (2.10)$$

Загальний час простоїв за експлуатаційний цикл буде [50]:

$$TDT = \frac{T_0}{\delta_{opt}} \left(T_i + \lambda \cdot \delta_{opt} \cdot F(\delta) \cdot T_p \right). \quad (2.11)$$

Значення δ_{opt} , яке фігурує в (2.11), забезпечує мінімум величини простоїв (δ_{optD} , рис. 2.4) і максимум функції готовності.

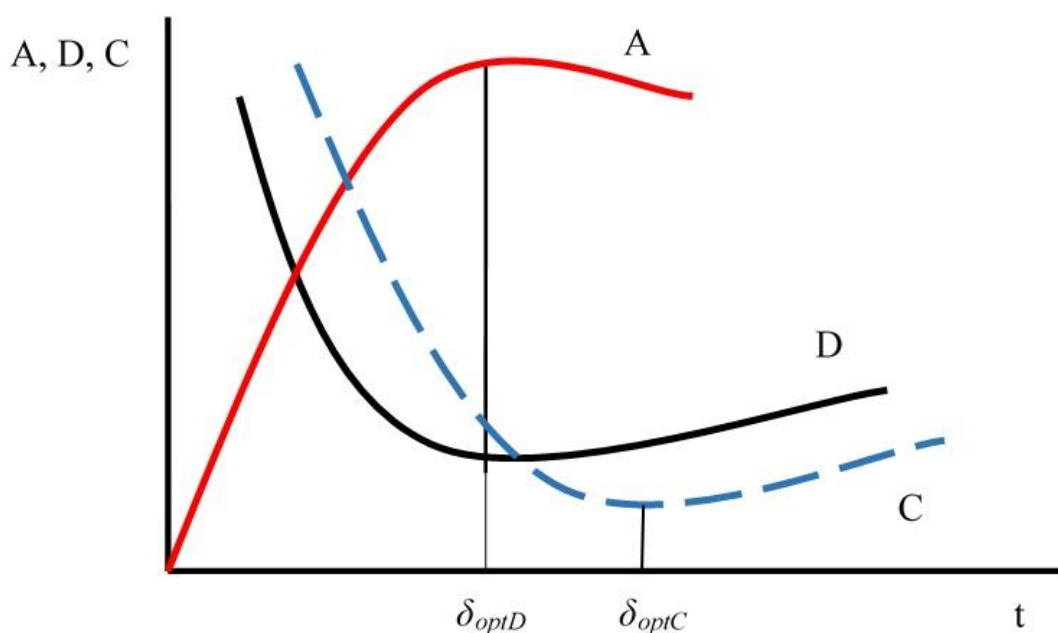


Рисунок 2.4 – Функції готовності (A), простоїв (D) і витрат (C) для DT-моделей

2.3.2 Мінімізація питомих витрат

На відміну від розглянутих вище економіко-статистичних моделей тут замість вартості профілактичного ремонту вводиться, як вихідна вступна для розрахунків, вартість після інспекційного ремонту C_{ir} . Рішення про строк і обсяг даного ремонту ухвалюється за результатами інспектування технічного стану. Отже, розглянутий алгоритм відноситься до стратегій обслуговування по фактичному технічному стану.

Витрати на ТОіР за міжінспекційний період виражаються так [49]:

$$c(\delta) = \frac{\lambda \cdot \delta \cdot [F(\delta) \cdot C_c + C_{ir} \cdot (1 - F(\delta))] + C_i}{\delta + T_i}. \quad (2.12)$$

Тут не враховуються збитки від простоїв. Їх, у принципі, можна врахувати у вартості ремонтів після раптової відмови C_c . Залежно від складових, що входять у розрахунки величин C_c , C_{ir} і C_i , хід функції $c(\delta)$ може мінятися. Це приводить до різниці між оцінкою величини δ_{optD} , отриманої по моделі простоїв Кристера (2.7) і величиною δ_{optC} , отриманої по вартісній моделі (2.12) (рис. 2.4). Хоча теоретично, розрахунки по обох моделях повинні кореспондуватися, адже час простоїв і їх вартісна оцінка зв'язані коефіцієнтом пропорційності [48, 49]. Але, як видно з вищерозглянутих моделей Диллона (2.7) і (2.9), оптимальна величина δ_{opt} , одержана мінімізацією часу простоїв і питомих витрат, буде різна.

Долати дане протиріччя запропоновано шляхом побудови діаграми «простої – витрати» $(D(t) - c(t))$ [50]. Вона утворюється із графіків тимчасових функцій питомих простоїв і витрат, з яких для фіксованих значень t_j знаходять значення c_j та TDT_j . Їх сукупність дає шукану криву $c(D)$, на якій визначають положення компромісної крапки (bestcompromise, рис. 2.5). По відповідних їй значеннях c та TDT знаходять величину δ_{opt} .

Дана модель у різних варіантах використовується в стратегіях ТОіР по технічному стану. Як і в превентивних стратегіях (по нормативу), тут використовується функція витрат $c(t)$. Однак, у цій ситуації її поведінка відрізняється від аналога, що фігурує в економіко-статистичних моделях. Підхід до мінімуму і відхід від нього стає більш крутим, а сам мінімум відчутно зміщується до нуля [48]. Грубо кажучи, в DT-моделях ліва спадаюча галузь функції $c(t)$ вироджується (рис. 2.6). Це дає підставу в якості результату оптимізації вести мову не стільки про регулярний міжінспекційний інтервал, скільки про перший інтервал інспектування. Як можна судити із прикладів, використання оптимізаційних моделей питомих витрат для стратегій превентивного періодичного обслуговування (РМ–СМ) дозволяє приблизно вдвічі скоротити витрати на ТОіР, а в стратегіях обслуговування за станом можна досягти їх 10-кратного скорочення [51, 52].

Ефект від DT-моделей можна розглядати в аспекті збереження засобів на ремонт за рахунок вчасно виявлених і усунутих несправностей, які загрожують обернутися післяаварійними ремонтами. Використання подібних моделей збереження засобів у будівельній індустрії демонструє стійку ефективність від скорочення інтервалів між інспекціями [48]. Це цілком зрозуміло, якщо мова йде про об'єкти з високим ризиком експлуатації.

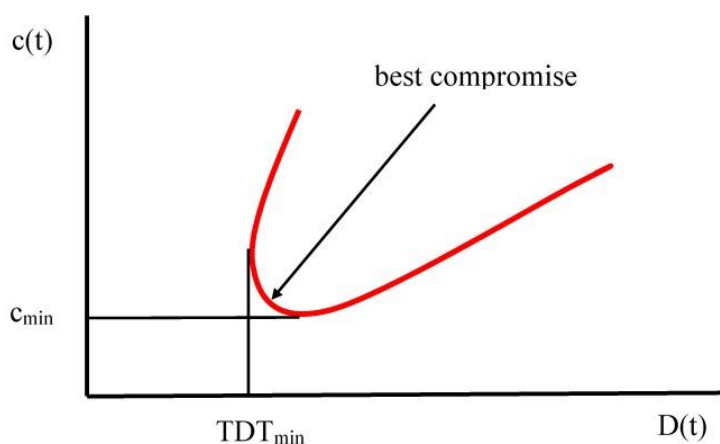


Рисунок 2.5 – Діаграма простої – витрати

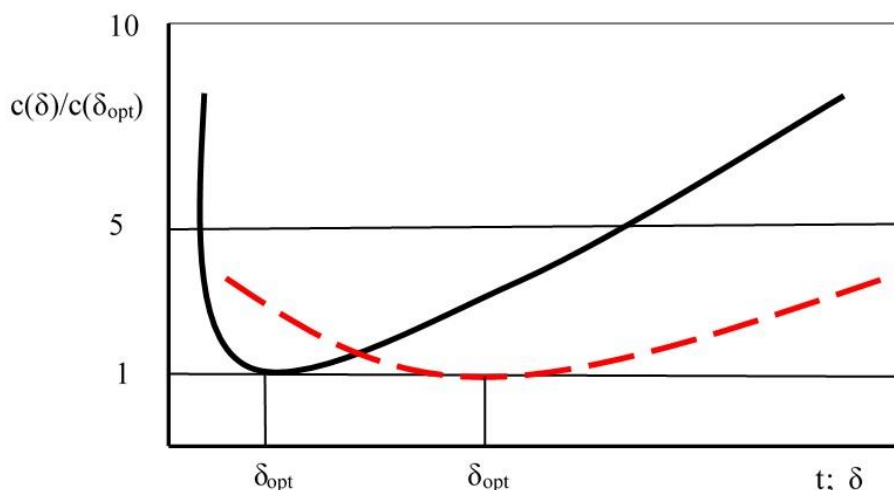


Рисунок 2.6 – Принципова відмінність функцій витрат на ТОіР $c(\delta)$ у відносному до мінімуму $c(\delta_{opt})$ вимірі для стратегій нормативного (превентивного) обслуговування (пунктир) і обслуговування по технічному стану (суцільна)

скоротити витрати на ТОіР, а в стратегіях обслуговування за станом можна досягти їх 10-кратного скорочення [51, 52].

Ефект від DT-моделей можна розглядати в аспекті збереження засобів на ремонт за рахунок вчасно виявлених і усунутих несправностей, які загрожують обернутися післяаварійними ремонтами. Використання подібних моделей збереження засобів у будівельній індустрії демонструє стійку ефективність від скорочення інтервалів між інспекціями [48]. Це цілком зрозуміло, якщо мова йде про об'єкти з високим ризиком експлуатації.

2.4 DT-моделі для контролю багатокомпонентних систем

Дані моделі розроблені для технічних систем, що складаються з послідовно і паралельно працюючих елементів (складні технічні системи), оснащених засобами технічного діагностування [51, 52]. Застосовні для змішаних стратегій обслуговування, коли в традиційну стратегію превентивно-коригувального обслуговування (РМ–СМ) вводяться елементи обслуговування за технічним

станом (автори такої стратегії називають її блоковим інспектуванням – block inspection). Детермінована модель питомих витрат виглядає традиційно, хоча і має особливості:

$$c(t) = c_{pc}(t) + c_m(t) + c_i(t). \quad (2.13)$$

Досліджуючи поведінку детермінованої моделі, її автори з'ясували, що форма закону розподілу періоду h не суттєво впливає на положення функцій витрат $c(t)$ і готовності $A(t)$. Остання обчислювалася в імовірнісному аспекті по залежності:

$$A(t_p) = \frac{T_{0p}}{T_{0p} + T_{rp} + T_{cp}}, \quad (2.14)$$

де T_{0p} , T_{rp} , T_{cp} – відповідно, час експлуатації, час профілактичного ремонту, час коригувального (післявідмовного) ремонту, знайдені по їх функціях розподілу для ймовірності P .

Найбільш впливовим щодо цього є середні значення періоду живучості h та міжінспекційного інтервалу δ . Більше того, був знайдений критерій оптимального періоду

$$\delta_{iopt} \approx \frac{1}{2}h. \quad (2.15)$$

Оскільки після $h/\delta > 2$ значення c та A змінюються незначно (рис. 2.7).

Примітне те, що дане положення встановлене в умовах істотного ризику, що виражене співвідношенням $c_m/c_{pc} = 104$.

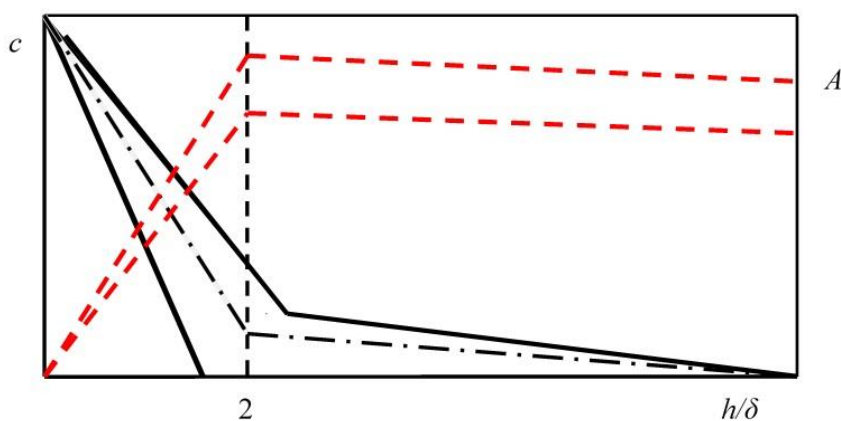


Рисунок 2.7 – Розташування полів значень c (суцільні) і A (пунктир), отримане по моделях (2.13 – 2.14) методом Монте- Карло

Таким чином, з аналізу моделей випливає, що ефективне технічне обслуговування може бути реалізоване шляхом збільшення числа інспектуємих елементів з високим ризиком експлуатації. При цьому важливо достовірно прогнозувати період h , оскільки при рості його варіації автори алгоритму рекомендують скорочувати відношення h/δ . Очевидний відхід від стратегії строго періодичного інспектування.

2.5 Ймовірісно-фізичні підходи до моделювання режимів технічного обслуговування

Для відповідальних елементів технічних систем розглянуті вартісні критерії можуть відходити на другий план при призначенні режимів ТОіР. У главу кута при цьому ставляться критерії надійності та безпеки, які успішно реалізуються в нормативних експлуатаційних стратегіях. Але такий прямолінійний підхід не відповідає тенденціям застосування ефективних стратегій ТОіР, у яких, з одного боку, дотримується принцип «прогнозування і попередження» (the fitness for service) взамін принципу «виявив – усунув». З іншого боку, вони забезпечують досить повний виробіток технічного ресурсу до моменту заміни (відновлення) технічної системи.

Один зі шляхів досягнення компромісу між такими суперечливими вимогами до стратегії ТОiP пов'язаний з контролем за деградаційними процесами. Їх моделювання, власно, і представляє ймовірносно-фізичний підхід у теорії технічного обслуговування. Цілком очевидно, що питання періодичності і частоти контролів для подібної технології догляду за устаткуванням мають важливе значення.

Крім того, подібний підхід дозволяє врахувати старіння механічних систем. Це відбувається шляхом контролю над фізико-технічними параметрами, що визначають експлуатаційну готовність системи [22].

2.5.1 Ідентифікація діагностичних моделей

Якщо характер поведінки діагностичного параметра в часі експлуатації $y(t)$ досліджується в її процесі, то до кількості і періодичності контролів технічного стану можна підійти з позицій обробки вимірювальної інформації. У математичній статистиці, у теоріях експерименту і надійності добре розроблені алгоритми визначення обсягу випробувань і числа експериментальних крапок. Наприклад, неперіодичний (послідовний) режим інспектування зі зменшуваною величиною δ_j , крім всього перерахованого, впливає також із принципу дотримання рівної точності для нелінійної функції $y(t)$ [53]. Під цим мається на увазі рівність збільшень $\Delta y = y_j - y_{j-1} = \text{const}$. Тоді наступний міжінспекційний інтервал визначиться як:

$$\delta_j = \delta_{j-1} \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{dy_{j-1}}{dt}\right)^2}{1 - \left(\frac{dy_j}{dt}\right)^2}}. \quad (2.16)$$

При визначенні виду функції деградації діагностичного параметра $y(t)$ вважається, що її погрішність S_y обумовлена систематичною помилкою із залишковою дисперсією S_0^2 і помилкою вимірів, що має дисперсію σ^2 [54]. Обидві помилки формують варіацію зовнішнього фактору v_y . Правильність вибору виду моделі характеризується наближенням величини S_0^2 до величини σ^2 . Якщо взяти до уваги число невідомих параметрів k_p , що впливають на хід $y(t)$, і число вимірів j , то зазначений принцип формалізується, як $S_y^2 \rightarrow (j - k_p) \cdot \sigma^2$. Для того, щоб компенсувати помилки вимірів вводять надмірність, коли $j \gg k_p$. Виходячи зі сказаного, ідентифікацією можна вважати процедуру мінімізації систематичної помилки.

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):

$$v_N = \sqrt{v_a^2 + v_y^2} = \sqrt{v_a^2 + \left(\frac{S_y}{y_m}\right)^2}. \quad (2.17)$$

На цій основі росте оцінка гарантованого ресурсу і, у підсумку, збільшується безпека разом зі ступенем виробітку ресурсу. Таким чином, процедура ідентифікації, співзвучна концепції ризик-орієнтованих інспекцій (RBI), лежить в основі індивідуального прогнозування технічного стану і концепції покрокового

уточнення ресурсу: від його проектного значення до залишкових, оцінюваним після інспектування.

У свою чергу, зазначені можливості досягаються за допомогою реалізації концепції покрокового уточнення оцінок параметрів деградаційного процесу [54]. 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:

$$p(j) = \frac{S_{Vj}}{S_{Vm}}. \quad (2.18)$$

Її вплив на розсіювання довговічностей (2.17) здійснюється таким чином:

$$v_y = y_j \cdot V_y \cdot p(j). \quad (2.19)$$

Для лінійної моделі деградаційного процесу при відомих початкових умовах ($S_{y0} = 0$) уточнююча функція визначається так [54]:

$$p(j) = \frac{\sqrt{2j-1}}{j}. \quad (2.20)$$

У загальному випадку лінійної моделі те ж джерело рекомендує:

$$p(j) = \frac{2 \cdot (2 \cdot j + 1)}{j \cdot (j - 1)} + \frac{12 \cdot j}{j^2 - 1} - \frac{12}{j - 1}. \quad (2.21)$$

Зрівнявши обидві функції, можна судити, що ідентифікація у вигляді визначеності початкових умов приблизно вдвічі знижує варіацію параметрів. Знання початкової фази поведінки монотонного процесу, як фактору ідентифікації моделі кінетики діагностичного параметра дуже важливо. Практично, як відзначено у фундаментальній роботі [22], це дозволяє однозначно прогнозувати хід функції $y(t)$. Ідентифікація початкового параметра лінійного процесу дозволяє значно (на 25...50%, залежно від рівня надійності) збільшити інтервал відновлення, що проводиться за рахунок уточнення функції його розподілу (див. 5 розділ).

Із графіків функцій $p(j)$ (рис. 2.8) 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 (див. рис. 1.3).

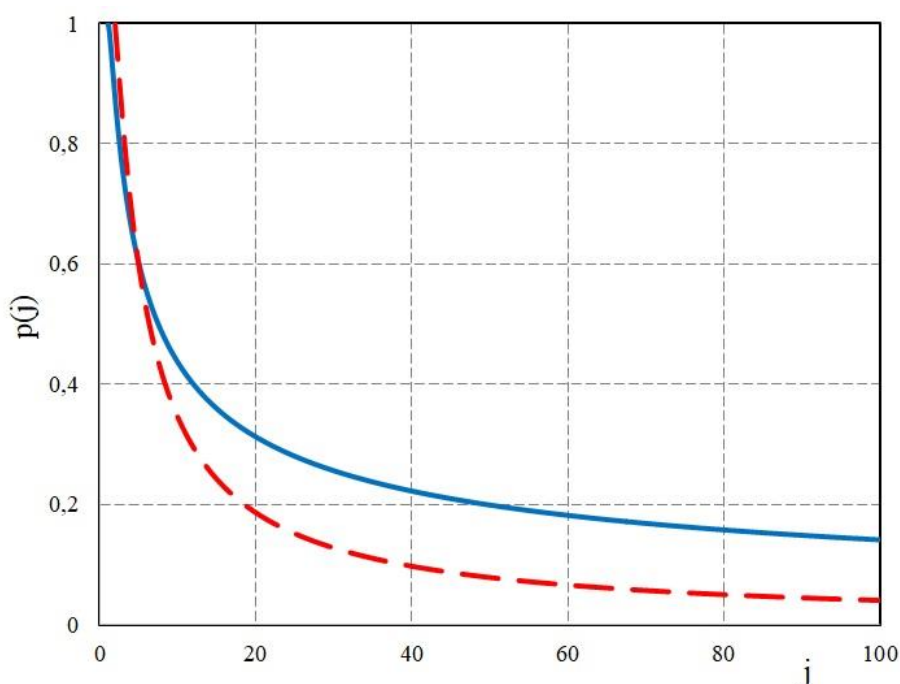


Рисунок 2.8 – Графіки уточнюючих функцій (2.20) (пунктир) і (2.21) (суцільна)

Отже, теоретично можна добитися того, що погрішність моделі буде обумовлена погрішністю вимірів. Однак, точність прогнозування залишкового ресурсу стримується не тільки точністю вимірювальних засобів. Як відзначалося вище, значний внесок у розсіювання довговічності вносить природа процесу, яка ушкоджує, що оцінюється через середньоквадратичне відхилення внутрішнього фактора S_a . Як правило, його значення зростає з довговічністю і часом експлуатації (наробітком) об'єкта. У цьому поведінка функції $S_a(t)$ відрізняється від ходу функції $S_y(t)$, яка може убувати при діагностуванні (рис. 2.9). Дані особливості варто брати до уваги при призначенні дати інспекції. У всякому разі, не слід повністю і повсюдно здійснювати суцільний моніторинг технічного стану.

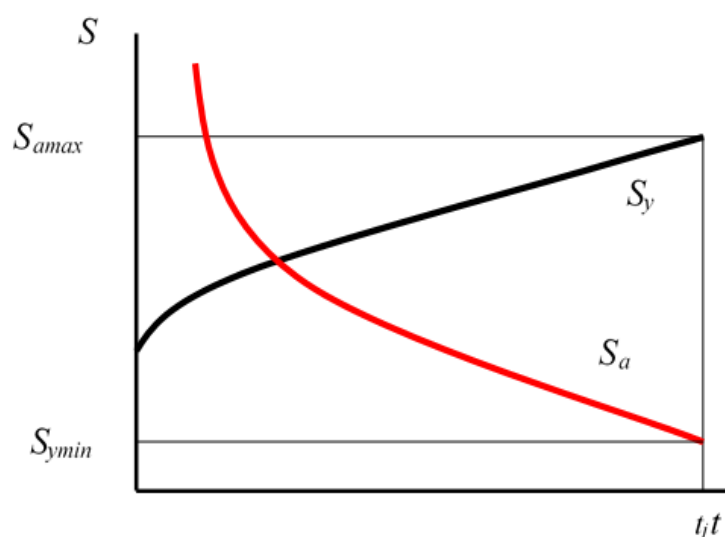


Рисунок 2.9 – Характер зміни складових середньоквадратичного відхилення, що визначає розсіювання прогнозованого наробітку на відмову

Прояв ефекту ідентифікації відомий і для економіко-статистичних моделей. Наприклад, вираження (1.11), отримане для експонентного закону розподілу наробітку на відмову, при відомому тільки лише математичному очікуванні наробітку T_0 трансформується в [22]:

$$\delta_{\text{opt}} = \left(\frac{T_0}{c_r} \right)^{1/2}. \quad (2.22)$$

Тобто, періодичність інспекцій зростає в $\sqrt{2}$ рази, якщо не відомий закон розподілу наробітку.

2.6 Модель технічного обслуговування з гарантованим рівнем безпеки

Дана модель розроблена для стратегій обслуговування за технічним станом і використовує ймовірнісно-фізичні методи для опису деградаційних процесів, що ушкоджують.

2.6.1 Тенденції розвитку моделей режимів технічного обслуговування і передумови до побудови моделі технічного обслуговування з гарантованою безпекою

Розглянувши сучасні моделі для вибору параметрів режимів технічного обслуговування на основі економіко-статистичних і ймовірнісно-фізичних критеріїв, серед яких фундаментальні розробки Диллона, Сміта, Байхельта-Франкена, Накагави, Фама, Кристера і його послідовників, можна зробити наступні висновки (крім тих, що вже наведені в розділі 1.2).

Насамперед, варто відзначити, що розвиток моделей ТОіР відображає тенденцію переходу від нормативно-превентивних і коригувальних стратегій використання устаткування до стратегії його використання до перед відмовного стану і стратегії обслуговування по фактичному технічному стану. Саме цим пояснюється поява моделей, у яких розглядається три – чотири фази технічного стану. Введення проміжних фаз між працездатним і непрацездатним (справним і несправним) станами відповідає фактичному функціонуванню об'єкта в

ушкодженому стані. Аналогічно цьому в науці відбувся перехід від класичної механіки, де розглядаються два стани твердого тіла – ціле і зруйноване, до неklasичної механіки, що оперує, переважно, з тілом в ушкодженому стані. Теоретичний базис для опису деградаційних процесів, що приводять до ушкодженого стану, найбільше адекватно представлений у механіці руйнування. У її додатках оцінюється живучість елементів технічної системи, знання параметрів якої становить квінтесенцію DT-моделей.

Поява DT-моделей знаменує тенденцію проникнення в економіко-статистичні моделі ймовірісно-фізичних методів. При їх посередництві ощадливо одержувати функцію розподілу часу розвитку дефекту $h(t)$, яке стосовно тріщини називається періодом живучості. Для відповідальних і дорогих елементів конструкцій представницьку вибірку для одержання функції $h(t)$, крім як шляхом випробувань їх модельних фрагментів, неможливо одержати у виробничих умовах. Можна сказати, що апріорні моделі, у силу своєї економічності і ефективності, змінюють апостеріорні.

Один зі шляхів зниження витрат на ТОіР пов'язаний зі збільшенням міжремонтного періоду (експлуатаційного циклу) за рахунок використання резерву у вигляді періоду розвитку несправності або дефекту до критичного значення. Власно, тенденція введення декількох фаз технічного стану в експлуатаційні моделі спрямована на скорочення ремонтних витрат і підвищення готовності устаткування. Така ідея втілена в моделях, які можна назвати моделями відкладеного ремонту. До них відносяться описані вище моделі резервного часу і моделі затримки часу (DT-моделі). Принципова різниця між ними, на погляд авторів, полягає в тому, що в моделях резервного часу використовується функція надійності, одержувана апостеріорно математико-статистичними методами з урахуванням періоду роботи об'єкта в ушкодженому стані. В DT-моделях використовується функція розподілу живучості (зворотна функції надійності на інтервалі розвитку дефекту), одержувана ймовірісно-фізичними методами. Моделі, що враховують проміжні фази технічного стану,

зажадали розвитку методів їх контролю. У результаті цього актуалізувалися методи технічного діагностування.

У результаті дослідження DT-моделей був знайдений універсальний критерій для знаходження оптимального міжінспекційного інтервалу, який дорівнює половині середнього періоду живучості $\delta_{opt} = 0,5 \cdot h_0$. Фактично за допомогою цього критерію встановлюється не оптимальний (він залежить лише від одного фактору), а гарантований час експлуатації, при якому дефект не розів'ється до критичного. Після інспекції потрібно встановити новий строк експлуатації або для колишнього, або для відновленого елемента. Критерій $0,5 \cdot h_0$ збігається з нормативними керівництвами по обслуговуванню агрегатів літаків [55]. Для особливо відповідальних об'єктів вводять запас довговічності n_N , і тоді дата контролю визначиться як $\delta = \frac{(2/3) \cdot h_0}{n_N}$ [56].

Можливість контролю над розвитком дефектів обумовлена інтенсивним розвитком засобів технічної діагностики. У таких обставинах стає актуальним відхід від строго періодичної стратегії інспекцій, властивої чисто економіко-статистичним моделям, до послідовної, зі зменшуваними інтервалами, стратегії інспекцій, характерної для «гібридних» моделей з діагностуванням окремих видів відмов (DT-моделі, алгоритми Фама). У моделях на основі ймовірнісно-фізичних методів опису деградаційних процесів поняття регулярного міжінспекційного інтервалу відсутнє. Є тільки інтервал до наступної перевірки, який встановлюється на основі прогнозу залишкового ресурсу. Власно, це і становить відмінну рису стратегій обслуговування по технічному стану, коли відсутній строгий графік інспекцій і запланований, постійний обсяг відновлювальних заходів.

Цілі інспекційних контролів, у цілому, збігаються із завданнями технічної діагностики – це: пошук дефектів, контроль технічного стану і його прогнозування. Проте, багато фахівців бачать основне завдання інспекцій у виявленні дефектів. Але і завдання прогнозування досить важливе, оскільки дозволяє позбуватися від самих інспекцій. Дійсно, якщо відомий гарантований

період штатного функціонування, то інспекції на цьому проміжку експлуатації зайві. Це дає скорочення витрат на ТОіР при збереженні необхідного рівня надійності. Така ситуація досяжна при достовірному прогнозі, коли заплановані терміни служби T_{0m} близькі до фактичних T_0 (при $T_{0m}/T_0 \rightarrow 1$ настає повний виробіток ресурсу). Також вона досяжна при досить точному прогнозуванні імовірного діапазону довговічностей, коли їх середньоквадратичне відхилення $S_{N(lgn)}$ наближається до природно можливого мінімуму S_a . При $S_{N(lgn)} \rightarrow S_a$ зростає гарантований термін служби і знижуються допуски, що випереджують, що також дає скорочення витрат на ТОіР. Таким чином, якісне і ефективне рішення третього завдання технічної діагностики знімає необхідність рішення перших двох.

Однак, для достовірного прогнозу технічного стану потрібна наявність ресурсних моделей, що містять діагностичні параметри всієї технічної системи. У деяких галузях техніки (авіація, енергетика) їх одержують на етапі відпрацювання. Для устаткування промислових виробництв наявність такого етапу життєвого циклу не характерно. Тому тут діагностичні моделі, як правило, одержують у процесі експлуатації, апостеріорно. Але для елементів механічних систем з високим ризиком експлуатації знайти функцію розподілу наробітку на відмову або функцію розподілу живучості $h(t)$ (часу розвитку дефекту) апостеріорно не представляється можливим через рідкість відмов.

У той же час апіорні моделі надійності для окремих класів елементів механічних систем (опорні вузли, зубчасті передачі і т.п.) широко відомі. Вони придатні для діагностування простих технічних систем, де дотримується принцип «слабкої ланки». Більшість технічних систем є складними: вони створюються з резервуванням, мають статично невизначені конструкції, їх елементи зазнають впливу комплексу деградаційних процесів. Тому діагностичні алгоритми повинні передбачати процедуру поелементного об'єднання, найчастіше різнорідних даних, у показники надійності системи. Наприклад, в алгоритмах Фама

об'єднання проводиться на етапі мінімізації імовірнісної функції витрат, у якій утримуються рівняння декількох деградаційних процесів $y(t)$.

Перевагою ймовірнісно-вартісних гібридних моделей є можливість за їх допомогою оптимізувати показники режиму ТОіР. Критеріями оптимізації в переважній більшості виступають:

- 1) мінімізація загального часу простоїв за експлуатаційний цикл;
- 2) мінімізація витрат на ТОіР за експлуатаційний цикл;
- 3) максимізація функції готовності технічної системи ;

Поява в даних моделях «фізичної» складової у вигляді функцій розподілу $h(t)$ або кінетичних форм деградаційних процесів $y(t)$ ускладнює рішення завдання знаходження оптимального інтервалу між інспекціями. Бажано, щоб крім екстремуму цільової функції, у точці оптимуму були мінімальними допуски, що випереджують, Δ_y та Δ_t , а імовірність безвідмовної роботи була максимальною. Практично, це недосяжне і при призначенні режимів техобслуговування необхідно шукати компроміс між чотирма показниками. Якщо до цих показників додати ступінь виробітку ресурсу, який повинен збільшуватися при переході до стратегії обслуговування по технічному стану, то вибір параметрів режиму ТОіР перетворюється в завдання винахідницького рівня, оскільки між показниками є технічне протиріччя. Ефект від повноти виробітку ресурсу недостатньо оцінений, у першу чергу, економістами, тому він не часто фігурує серед переваг обслуговування по технічному стану. В основному при цьому враховують автоматизацію пошуку несправності і безрозбірний контроль технічного стану.

Недолік гібридних моделей пов'язаний з детермінованим трактуванням деградаційних процесів $y(t)$, при якому не враховується розсіювання їх інтенсивності. Ймовірнісно-фізичні моделі це враховують, хоча в них не беруться до уваги вартісні показники. Але завдяки цьому вдається обґрунтовано знайти зв'язок між допусками, що випереджують і імовірністю безвідмовної роботи.

В економіко-статистичних моделях допускаються відмови з наступним коригувальним ремонтом. Важливо, щоб їх наслідки (збитки від простоїв, вартість відновлення, упущена вигода) не були істотними. Тому сучасні економіко-статистичні моделі враховують показники ризику, яким здійснюють своєрідне «ранжирування» відмов. Дана тенденція збігається з тенденцією переходу від забезпечення абсолютної надійності до забезпечення безпеки відповідно до концепції прийнятного ризику [13, 27, 57]. Введення в моделі витрат на ТОіР складових від питомих збитків (ризиків) сприяє збільшенню диспропорцій між компонентами моделей, коли одна з них стає домінуючою. В результаті зростаюча ділянка на графіку функції питомих витрат $c(\delta)$ стає більш крутою, а оптимальна величина δ_{opt} зміщується вліво. Подібну поведінку функції $c(\delta)$ було передбачено при розгляді ймовірнісно-вартісних моделей. Якщо додатково до цього, взяти до уваги необхідність ідентифікації діагностичних моделей, то виходить так, що від періодичного контролю технічного стану слід переходити до суцільного моніторингу діагностичних параметрів. Однак, це відноситься тільки до об'єктів особливого ризику. Наявний поріг природньої точності оцінки діагностичного параметра стримує впровадження стратегії його суцільного моніторингу.

Поряд із введенням кількісної оцінки ризику в моделі витрат, з'являються моделі, що містять безрозмірну характеристику ризику. Актуальність контролю цього показника виразилася в розробці концепції RBI – технічному обслуговуванні, орієнтованому на підтримку заданого рівня безпеки. У такій ситуації математико-статистичні моделі, збагачені ймовірнісно-фізичними методами опису деградаційних процесів, більш ефективні для оптимізації режиму обслуговування. Особливо це яскраво проявляється для стратегій обслуговування по стану, ніж в умовах використання нормативно-превентивних стратегій.

Підводячи підсумок сказаному, можна сформулювати вимоги до моделей для призначення параметрів режиму контролю технічного стану. Насамперед, слід зазначити, що елементи технічних систем мають неоднакову значимість із погляду наслідків відмови. Тому вони не можуть обслуговуватися по однакових

стратегіях, і отже, не можуть використовуватися ідентичні моделі ТОіР для всього устаткування єдиного виробничого комплексу. Підтвердженням цього виводу може бути наступна ситуація. Нормативна база ТОіР українських виробництв застаріла, вона сприяє надмірній витраті засобів. Це не влаштовує менеджмент, який шукає всілякі шляхи скорочення витрат в області обслуговування устаткування. Під час відсутності централізованих рекомендацій щодо експлуатаційних стратегій і реорганізації державного нагляду за промислово небезпечними об'єктами, на підприємствах стихійно складається змішана стратегія ТОіР, що поєднує систему планово-запобіжних ремонтів, обслуговування за потреби і за технічним станом [58, 59].

У висновку варто відзначити, що математико-статистичні методи не орієнтовані на прогнозування часу перебування системи у відповідній фазі технічного стану. Ця інформація для них здобувається апостеріорно. Використовувана в економіко-статистичних моделях величина часу експлуатації T_0 не є технічним ресурсом. Це призначений, у більшості випадків, строк експлуатації, що має зміст не усередненого значення (яким є ресурс або довговічність), а максимальної величини, якої може досягати час наробітку на відмову. У ймовірнісно-фізичних моделях обґрунтовується технічний ресурс, і тим самим, з'являється орієнтир для обчислення ступеня його вичерпання, як діагностичної ознаки.

2.6.2 Концепція прийняттого ризику при оцінці технічного стану

Канонічне визначення ризику являє собою добуток частоти аварій f на збиток від них S (інтенсивність втрат): $i = f \cdot S$. На цій підставі ризик вимірюється через втрати в одиницю часу. Використовуючи байєсовське трактування ймовірності як міру надійності одержуваного результату, ризик можна представити як: $i = Q \cdot S$, де Q – ймовірність відмови (аварії). Тобто, ризик є

питомим показником, через який визначається абсолютний (загальний) збиток I за час експлуатації t : $I = i \cdot t$.

У ризик-аналізі прийнято розділяти його матеріальну і частотну складову, використовуючи поняття оперативної характеристики ризику:

$$\rho = \frac{Q}{P} = \frac{Q}{(1-Q)}, \quad (2.23)$$

де P – імовірність безвідмовної роботи протягом строку експлуатації.

Тоді безпека експлуатації буде:

$$R = 1 - \rho. \quad (2.24)$$

Таким чином, у даному аспекті безпека представляє стан устаткування, при якому ризики його експлуатації не перевищують прийнятних (припустимих) рівнів [21].

З наведених виражень випливає, що детерміновані розрахунки, які використовуються для оцінки міцності, коли імовірність $P = 0,5$, для оцінки безпеки марні, оскільки її не забезпечують: $\rho = 1$ і $R = 0$. При реально забезпечуваних рівнях надійності, де імовірність руйнування не перевищує $Q < 0,05$, рівень безпеки R , практично, стає таким, що дорівнює ймовірності безвідмовної роботи.

Маючи рівень збитку від відмови всієї технічної системи S_{Σ} , позначивши значущість від відмови i -го елемента під впливом k -го деградаційного процесу, як критичність або значущість $u_{ik} = S_{ik}/S_{\Sigma}$, одержуємо узагальнений ризик системи:

$$i_{\Sigma} = S_{\Sigma} \cdot \sum Q_{ik} \cdot u_{ik}. \quad (2.25)$$

Таким чином, порівнювати ризики в межах одного об'єкту можна по безрозмірному вираженню, що перебуває під знаком суми, який можна називати безрозмірним ризиком:

$$\rho_{\Sigma} = \sum \rho_{ik} = \sum Q_{ik} \cdot u_{ik}. \quad (2.26)$$

На цій підставі ризик можна трактувати, як добуток ймовірності відмови на його значущість, що підтверджує вираження (2.24).

У теорії технічного обслуговування аналогом ризику виступає інтенсивність експлуатаційних витрат (питомі витрати) c на технічне обслуговування і ремонт, вимірювана в тих же одиницях. Фактично, ризик – це позапланова частина витрат на ТОіР, віднесена до гарантованого часу експлуатації. Але ризик враховує не тільки витрати на відновлення C_p , але і втрати виробництва, у тому числі, і соціального характеру. У теорії технічного обслуговування цьому також є аналог – коефіцієнт упущеної вигоди [22]. Постійність ризику свідчить про лінійний характер росту витрат на ТОіР і втрат у часі.

Ризик, будучи мірою інтенсивності збитку, може бути діагностичним параметром, що визначає момент відновлення або період експлуатації. Це видно по його зв'язку із кривою відмов $z - t$ (рис. 2.10), яка являє собою монотонну функцію зі зростаючою інтенсивністю [22]. Якщо величина $i = \text{const}$, процес експлуатації є сталим. Різке збільшення нахилу функції збитків або втрат $I - t$, коли $i_2 > i_1$ (рис. 2.10), свідчить про необхідність ремонтних впливів.

Критерій граничного стану за концепцією прийнятного ризику формалізується у вигляді:

$$\rho_j < [\rho] \quad \text{або} \quad R_j > [R] \quad (2.27)$$

коли поточні рівні ризику або безпеки ρ_j і R_j рівняються із граничними значеннями $[\rho]$ і $[R]$.

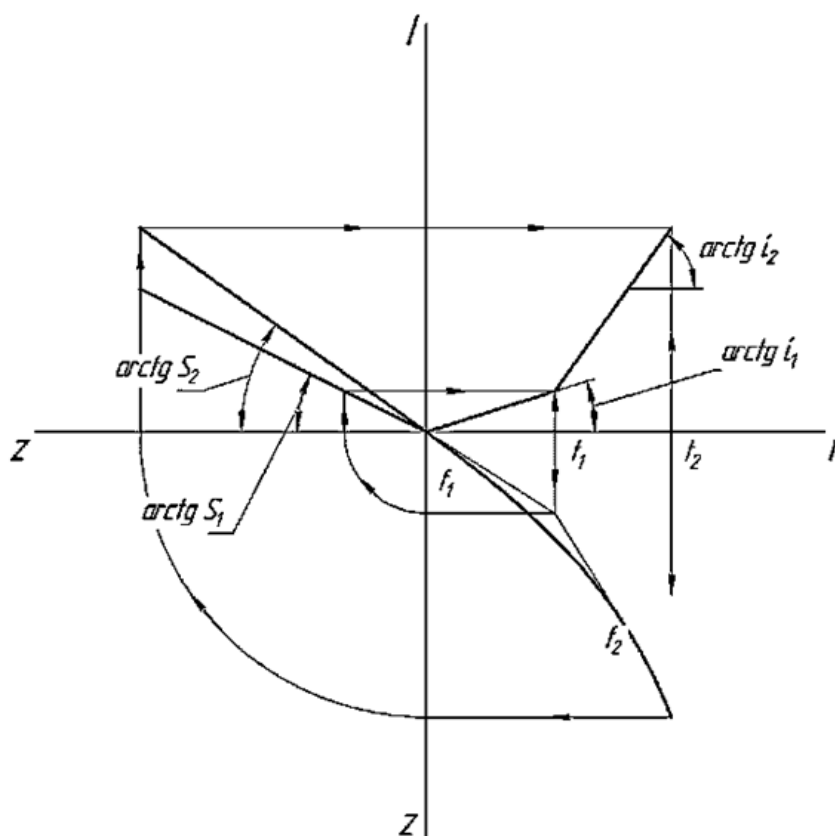


Рисунок 2.10 – Схема формування кінетики абсолютного збитку I у процесі експлуатації (I квадрант) на підставі кривої відмов z за час експлуатації t (II квадрант)

2.6.3 Індекс безпеки – комплексний показник технічного стану

У багатьох моделях для вибору параметрів режиму ТОіР використовується функція надійності $P(t)$, що представляє собою зміну ймовірності безвідмовної роботи за час експлуатації. Незважаючи на універсальність цього показника, він має ряд недоліків (частково про них зазначено на початку цієї частини). По-перше, це мала чутливість величини P до наробітку. По-друге, якщо вдається підібрати форму закону $P(t)$, що задовільно реагує на наробіток, то в передвідмовній області вона занижує ймовірність безвідмовної роботи P у порівнянні з реальною функцією розподілу довговічності окремого елемента механічної системи.

Щоб уникнути зазначених протиріч, виходячи з ресурсного трактування ймовірності безвідмовної роботи, застосовується індекс безпеки, що представляє логарифм гарантованого запасу довговічності для безпеки R :

$$\beta_R = \lg n_{NR} = \lg \frac{T_Q}{t_R} = \lg T_Q - \lg t_R, \quad (2.28)$$

де T_Q – мінімальне значення ресурсу, одержуване по функції розподілу довговічності для ймовірності відмови $Q=1-R$; t_R – максимальне значення наробітку, визначене по функції розподілу наробітку для ймовірності $R \geq 0,5$.

У термінах технічної діагностики стосовно до ймовірнісно-фізичних методів цей показник буде виглядати так (рис. 2.11):

$$\beta_R = Y_Q - Y_R = \beta_{R0} - \lg t_R. \quad (2.29)$$

У результаті використання індексу безпеки кінетична модель деградаційного процесу типу вичерпання ресурсу (спадаюча функція) розділяється на дві ділянки. На початковій ділянці експлуатації технічний стан контролюється за графіком індексу безпеки, що є в подвійних логарифмічних координатах прямою лінією з нахилом під 45 градусів. Вона виходить із точки $\lg T_Q = \beta_{R0}$ і попадає в точку із цією ж довговічністю при $\beta_R = 0$. Таким чином, положення функції деградаційного процесу (функції безпеки в цьому випадку) однозначно визначається по одній крапці і вона (функція) має оптимальну чутливість. Контролюючи наробіток t найнебезпечнішого місця, яке зазнає дії найбільш інтенсивного процесу, що ушкоджує (принцип слабкої ланки), при наближенні $\beta_R \rightarrow 0$, а $t_y \rightarrow T_q$ доцільно призначати інспектування об'єкта і контроль технічного стану (check, рис. 2.11). При $\beta_R > 0$ об'єкт перебуває в працездатному стані (G, рис. 2.11). При $\beta_R < 0$ технічний стан контролюється вже не індексом

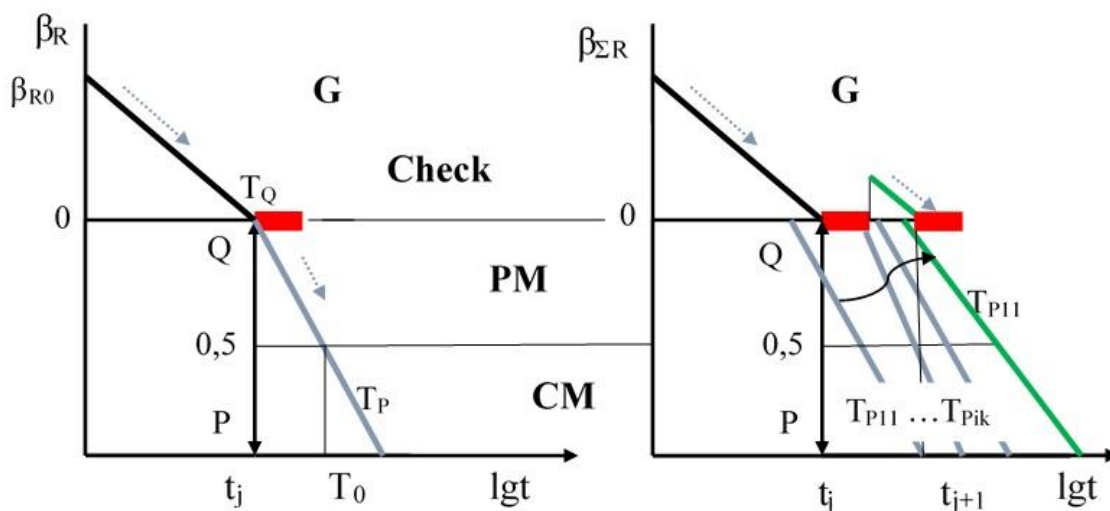


Рисунок 2.11 – Схема моделі деградаційного процесу на основі індексу безпеки для «слабкої ланки» (а) і для складної технічної системи (б)

безпеки, а функцією надійності $P(t)$, оскільки в цій області вона чутлива до наробітку. При $P > 0,5$ об'єкт попадає в зону профілактичних замін (ремонтів) (PM, рис. 2.11). При подальшій експлуатації, коли імовірність безвідмовної роботи падає до $P < 0,5$, а ризик зростає до $\rho \rightarrow 1$, об'єкт перебуває в зоні аварійних відмов (CM, рис. 2.11).

Використання для контролю технічного стану безпосередньо ризику як діагностичного параметра, може бути некомфортним. Це пов'язане з деякими особливостями.

1. Ризик ρ , у силу його зв'язку з імовірністю безвідмовної роботи, малочутливий до змін технічного стану системи на досить тривалому інтервалі експлуатації.
2. Складно об'єктивно встановити гранично припустимий рівень ризику.
3. Достовірність його оцінки залежить від достовірності оцінки ініціюючої відмови. Зазвичай вона проводиться за допомогою математико-статистичних методів, точність яких достатня для прогнозування економічних втрат. Для контролю технічного стану необхідно застосовувати імовірнісно-фізичні методи.

Зв'язок між безрозмірним показником ризику і індексом безпеки може бути встановлений у такий спосіб. В області високих ймовірностей (де саме і

використовується індекс безпеки) експонентна функція надійності може бути виражена через пошкодження у вигляді відносної довговічності d як:

$$R = \exp(-d) \approx 1 - d. \quad (2.30)$$

Звідки випливає, що поточне пошкодження елемента механічної системи i від деградаційного процесу k буде $d_{ik} = Q_t$. Тобто, накопичене пошкодження цілком характеризує ризик експлуатації i ступінь втрати працездатності. Тоді можливо визначати ризик системи як:

$$\rho_{\Sigma} = \sum (d_{ik} \cdot u_{ik}). \quad (2.31)$$

Оскільки пошкодження d_{ik} змінюється з часом наробітку, то подібно йому змінюється і величина ρ_{Σ} . Враховуючи, що гарантований запас довговічності обернено пропорційний гарантованому пошкодженню $n_{NR} = d_R^{-1}$ а індекс безпеки – його логарифм, маємо:

$$\beta_R = -\lg d_R \quad \text{або} \quad d_R = 10^{-\beta_R}. \quad (2.32)$$

Використовуючи (2.31), остаточно одержуємо:

$$\beta_{\Sigma R} = \lg \left(\sum u_{ik} \cdot 10^{-\beta_{ikR}} \right)^{-1}, \quad (2.33)$$

де β_{ikR} – індекс безпеки i -го елемента для k -го процесу, що ушкоджує, отриманий по функціях розподілу ресурсу i наробітку для ймовірності R .

Використання методу індексу безпеки дозволяє вирішити проблему знаходження компромісу між чотирма параметрами режиму інспектування, кожний з яких має оптимальне значення. До них відносяться допуски, що

випереджають, Δ_y і Δ_t , імовірність відмови q (або безвідмовність p) і питома вартість ТОіР – c . У даному алгоритмі задається прийнятний рівень ризику $[\rho]$, а потім по (2.24) визначається необхідна безпека R , для якої знаходять поточні значення $\beta_{\Sigma Rj}$. Тим самим виключається один з 4-х критеріальних факторів оптимізації, що полегшує рішення завдання. Тоді при ймовірності безвідмовної роботи $P \geq R$ процес вичерпання ресурсу моделюється індексом безпеки $\beta_{\Sigma R}(t)$, а при $P < R$ процес представляється функцією розподілу ресурсу T_{Pik} (рис. 2.11, б). Попереджувачий допуск Δ_t у даній методології приймає зміст залишкового ресурсу:

$$t_{rem} = \Delta_t = (n_N - 1) \cdot t_R = (10^{\beta_R} - 1) \cdot t_R. \quad (2.34)$$

Комплексний характер такого діагностичного параметра як індекс безпеки проявляється через його властивість об'єднання приватних показників елементів і процесів, що ушкоджують в узагальнений показник $\beta_{\Sigma R}$. Не слід спрощувати його розуміння до рівня «середньої температури по лікарні». Для складних конструкцій більшу частину часу експлуатації не ясно, який з деградаційних процесів і в якому місці є домінуючим, лідируючим у нанесенні пошкоджень. Така інформація очевидна для простих технічних систем. Під час контролю технічного стану складних технічних систем, крім іншого, виявляється слабка ланка, будь то елемент системи або процес, що ушкоджує, і проводиться відновлення властивостей опору. Це відображається зсувом функції розподілу довговічностей T_{P11} убік тривалих термінів служби, а максимальний індекс безпеки отримує нове значення $\beta_{\Sigma Rj}$, яке визначає новий гарантований ресурс і дату наступного контролю (рис. 2.11, б).

2.7 Висновки

1. У підсумку дослідження DT-моделей був знайдений універсальний критерій для знаходження оптимального межінспекційного інтервалу, який дорівнює половині середнього періоду живучості $\delta_{opt} = 0,5 \cdot h_0$. Фактично, за допомогою цього критерія встановлюється не оптимальний (він залежить лише від одного фактору) а гарантований час експлуатації, при якому дефект не розів'ється до критичного. Після інспекції потрібно встановлювати новий строк експлуатації або для колишнього, або для відновленого елемента.

Можливість контролю за розвитком дефектів обумовлена інтенсивним розвитком засобів технічної діагностики. В таких обставинах стає актуальним відхід від строго періодичної стратегії інспекцій, властивої чисто економіко-статистичним моделям, до послідовної, з інтервалами, що зменшуються, стратегії інспекцій, характерною для «гібридних» моделей з діагностуванням окремих видів відмов (DT-моделі, алгоритми Фама). У моделях на основі ймовірнісно-фізичних методів опису деградаційних процесів поняття регулярного межінспекційного інтервалу відсутня. Є тільки інтервал до наступної перевірки, який встановлюється на основі прогнозу залишкового ресурсу. Власне, це і складає відмінну рису стратегій обслуговування за технічним станом, коли відсутній строгий графік інспекцій і запланований, постійний обсяг відновлювальних заходів.

Перш за все, варто відзначити, що розвиток моделей ТОіР відображає тенденцію переходу від нормативно-превентивних і коригуючих стратегій використання обладнання до стратегії його використання до перед відмовного стану і стратегії обслуговування за фактичним технічним станом. Саме цим пояснюється поява моделей, в яких розглядається три – чотири фази технічного стану. Введення проміжних фаз між працездатним і непрацездатним (справним і несправним) станами відповідає фактичному функціонуванню об'єкта в пошкодженному стані. Поява DT-моделей знаменує тенденцію проникнення в економіко-статистичні моделі ймовірнісно-фізичних методів. При їх допомозі

можливо отримувати функцію розподілу часу розвитку дефекту $h(t)$, яке стосовно до тріщини називається періодом живучості. Для відповідальних і дорогих елементів конструкцій представницьку вибірку для отримання функції $h(t)$ неможливо отримати в виробничих умовах, крім як шляхом випробувань їх модельних фрагментів в лабораторії. Можна сказати, що апіорні моделі, в силу своєї економічності і ефективності, змінюють апостеріорні.

2. 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. Такий висновок підтверджує пропозицію, що висунута в розділі 1, про позитивний вплив інспекцій на збільшення терміну експлуатації кожухів ДП.

3. На підставі аналізу, як математико-статистичних оптимізаційних моделей, так і моделей ймовірнісно-фізичного типу встановлено, що при зростанні відносної вартості післяаварійного (коригуючого) ремонту (показник c_r) оптимальний період між відновлювальними заходами (попереджувальний ремонт, інспекція) зменшується. Це може призвести до ситуації, коли відпаде доцільність оптимізації. Тому для систем з великим ризиком (такими, як конструкції ДП) доцільно використовувати стратегію експлуатації за контролем безпеки.

4. Розглянута можливість використання ризику у якості діагностичного параметру. Така ситуація є наслідком зв'язку ризику з питомими витратами на експлуатацію. Тому ризику як діагностичній ознаці притаманні ті ж самі недоліки, які властиві ймовірнісно-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 передвідмовного стану [33, 60–65].

5. Запропоновано методу ідентифікації моделей деградаційних процесів з метою збільшення безпеки. Ідентифікацією можна вважати процедуру мінімізації систематичної помилки, яка дає зниження ступеня невизначеності деградаційного процесу. В ідеалі – це перехід від стохастичного процесу до детермінованого. Глибину ідентифікації запропоновано оцінювати за допомогою уточнюючої функції. Наведені її форми для лінійного деградаційного процесу. Ідентифікація тільки початкового параметра лінійного процесу дозволяє значно (на 25...50%, залежно від рівня надійності) збільшити інтервал відновлення.

РОЗДІЛ 3

РОЗСЛІДУВАННЯ ДЕГРАДАЦІЇ МЕТАЛУ КОЖУХУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ МАЛОГО ОБ'ЄМУ ПІД ВПЛИВОМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

3.1 Постановка і задача досліджень

Стінка ДП являє складну багат шарову конструкцію. Її стан визначає термін кампанії всієї ДП. Стан кожуху найбільш повно передає інформацію про стан оболонки, оскільки є останньою перешкодою перед розгерметизацією ДП. До того ж кожух в значній мірі відповідає за правильне положення пристроїв колошникової будови та з'єднувальних вузлів багаточисельних трубопроводів, що підведені до ДП. Тому, з одного боку, кожух повинен забезпечувати міцність проти механічних і теплових факторів, а з іншого, необхідна достатня його деформованість для збереження герметичності з'єднань. Звідси витікає, що товщина кожуху не повинна перевищувати розмір 30...60 мм.

При інтенсифікації доменного процесу і збільшенні навантажень на кожух для його виготовлення почали застосовувати низьколеговані сталі. Вони добре зарекомендували себе на практиці при відносно коротких термінах експлуатації (до 10...15 років). Але не має повної впевненості про можливість експлуатації металу кожуху на протязі 25...40 років.

Проблема подовження строку експлуатації виникла на початку ХХІ сторіччя і зустрічається в багатьох галузях техніки. Це надало поштовх до активізації досліджень деградації матеріалів під дією експлуатаційних чинників. Такі дослідження проводяться для матеріалів, з яких виробляють енергетичне обладнання, трубопроводи, об'єкти транспортної інфраструктури.

В металургійному виробництві подовження терміну експлуатації основного технологічного обладнання розглядають в екологічному аспекті. Це є вагома складова створення, так званої, «зеленої металургії» (green steel), яка базується на скороченні ресурсів, які споживаються у виробництві. В її концепції напряду вказано, «повторне використання старого обладнання скорочує потребу у нових

ресурсах» [11]. Характерно, що подібні погляди виходять від виробників обладнання, які, на перший погляд, зацікавлені у зростанні попиту на нього.

Продовження гарантійного ресурсу відбувається після аналізу ризиків і усунення слабких місць існуючої механічної системи. Капітальний ремонт з модернізацією дає можливість отримати, фактично, нове обладнання без перепланування розташування суміжних машин і агрегатів [12].

Сталь 09Г2С (аналоги – 13Mn6, А 516-55) широко використовується для виготовлення несучих конструкцій, в тому числі і для кожухів доменних печей. Вона знаходиться в полі уваги багатьох дослідників. Відомі деякі застереження відносно довготривалої експлуатації означеної сталі. Так, на підставі багатостадійного експерименту відмічена циклічна деградація сталі 09Г2 (близька за властивостями до 09Г2С). Вона виразилась в зменшенні параметрів діаграми статичного деформування після циклічного наробітку [66, 67]. Взагалі, для металів кожуху ДП встановлено, що деформаційне старіння суттєво зменшує в'язкість руйнування [68].

Аналогічні результати були отримано при розробці способів діагностування пошкоджень сталі 09Г2С під час експлуатації. Встановлено, що після малоциклового наробітку статичні межі міцності і плинності помітно зменшуються тільки, якщо пошкодження складає більше 50%. При зростанні пошкодженості змінюється закон розподілення швидкості розповсюдження в металі ультразвукових хвиль, а також збільшується вільна поверхнева енергія зразків сталі 09Г2С [69, 70]. Продемонстровано можливість діагностування технічного стану конструкцій зі сталі 09Г2С фізичними способами.

Сталь 09Г2С широко використовується для виготовлення конструкцій металургійних агрегатів. Тому вплив високих температур на цю сталь ретельно вивчався у роботі [71]. Стосовно безпосередньо кожухів ДП відзначено, що довготривала дія високих температур зменшує критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) сталі 09Г2С K_{Ic} до $23...47 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$, а відносне звуження до $30...40\%$ [72, 73]. Така ситуація є наслідком теплового окрихчення, до якого схильні і інші сталі для кожухів ДП [74]. Внаслідок схильності сталі

09Г2С до теплового окрихчення, вона не була рекомендована до виготовлення великогабаритних охолоджуючих модулів, з яких складається оболонка ДП тонкостінного типу [75].

В той же час, багато дослідників рекомендують сталь 09Г2С для створення високонадійних конструкцій, що працюють під високим внутрішнім тиском [76]. Цьому сприяє високі в'язкість руйнування і пластичність, які при статичному навантаженні сягають величин $K_{Ic} = 140 \dots 170 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$, а відносне звуження – 65% [76, 77].

Для розвіяння наведених суперечностей відносно сталі 09Г2С проведені комплексні дослідження деградації її властивостей після довготривалої експлуатації в кожусі ДП. Окрім того, дослідження деградації мали на меті з'ясування можливості застосування сталі 09Г2С при подовженні безперервної експлуатації кожуху понад 25 років. Передумовами для подовження термінів служби кожуху є думки фахівців про фізичний ресурс кожуху в 50...60 років [67], а також фактичні строки служби деяких ДП до 44 років [13, 30]. Прогнозування надійності і безпеки на такий термін потребує нових підходів, які потребують якісно нових характеристик службових властивостей. Тому комплексні дослідження опору сталі 09Г2С впливу експлуатаційних процесів є актуальними.

3.2 Характеристика об'єкта досліджень

Досліджено кожух ДП об'ємом 1033 м^3 , виконаний з листів товщиною 30 мм сталі 09Г2С ДП експлуатувалась на протязі 14 років, після чого було прийнято рішення про припинення кампанії. При цьому, обстеження оболонки ДП показало, що вона знаходиться в незадовільному стані внаслідок жорстких умов експлуатації і обслуговування. До 50...75% поверхні кожуху шахти ДП деформовано (вигин, bulging), 30% холодильників вийшли з ладу, залишкова товщина футеровки склала 30...40% (рис. 3.1, рис. 3.2).

За 14 років безперервної експлуатації, внаслідок руйнування вогнетривкої футеровки, по шахті печі стався значний знос елементів кожуха печі. Крім того, в неохолоджуваній зоні печі стався повний сход вогнетривкої кладки, а в охолоджувальній зоні печі – з 6-ти рядів проектних холодильників, до зупинки ДП-3 на капітальний ремонт II-го розряду, в робочому стані фактично перебувало тільки 2 ряди холодильників – 1-й і 2-й ряди холодильників знизу від мораторного кільця [78].

Обстежувані конструкції кожуху експлуатуються в важких умовах, пов'язаних:



Рисунок 3.1 – Схема розгортки холодильників ДП
(зеленим показано непрацюючі).



Рисунок 3.2 – Зона вигину кожуху

- з наявністю постійно працюючого важкого обладнання, яке є джерелом динамічних навантажень (засипний апарат);
- агресивністю повітряного середовища, внаслідок умов виробництва і некоректної роботи системи газо- і пиловидалення, в результаті чого, продукти згоряння в значній кількості осідають усередині цеху;
- в умовах місцевого постійного замочування конструкцій атмосферними водами, крізь течії в крівлі, а також некоректної роботи системи охолодження (зовнішній полив водою);
- постійного перепаду температур внаслідок умов виробництва.

За результатами обстеження, проведеного спеціалізованою організацією, металоконструкції шахти признано непридатними до нормальної експлуатації.

За майже 14-річну кампанію ДП було вироблено 7,4 млн. тон чавуну. Спостерігалось поступове нарощування середньо місячного виробництва (пунктир, рис. 3.3). Але в цілому помісячне виробництво не було ритмічним, а носило циклічний характер (рис. 3.3). Середньорічне виробництво склало 545,4 тис. тон, а середньомісячне – 45,4 тис. тон. Коефіцієнт варіації виробництва склав 10%. За цими показниками можливо обґрунтовувати режим наробітку. Зо-

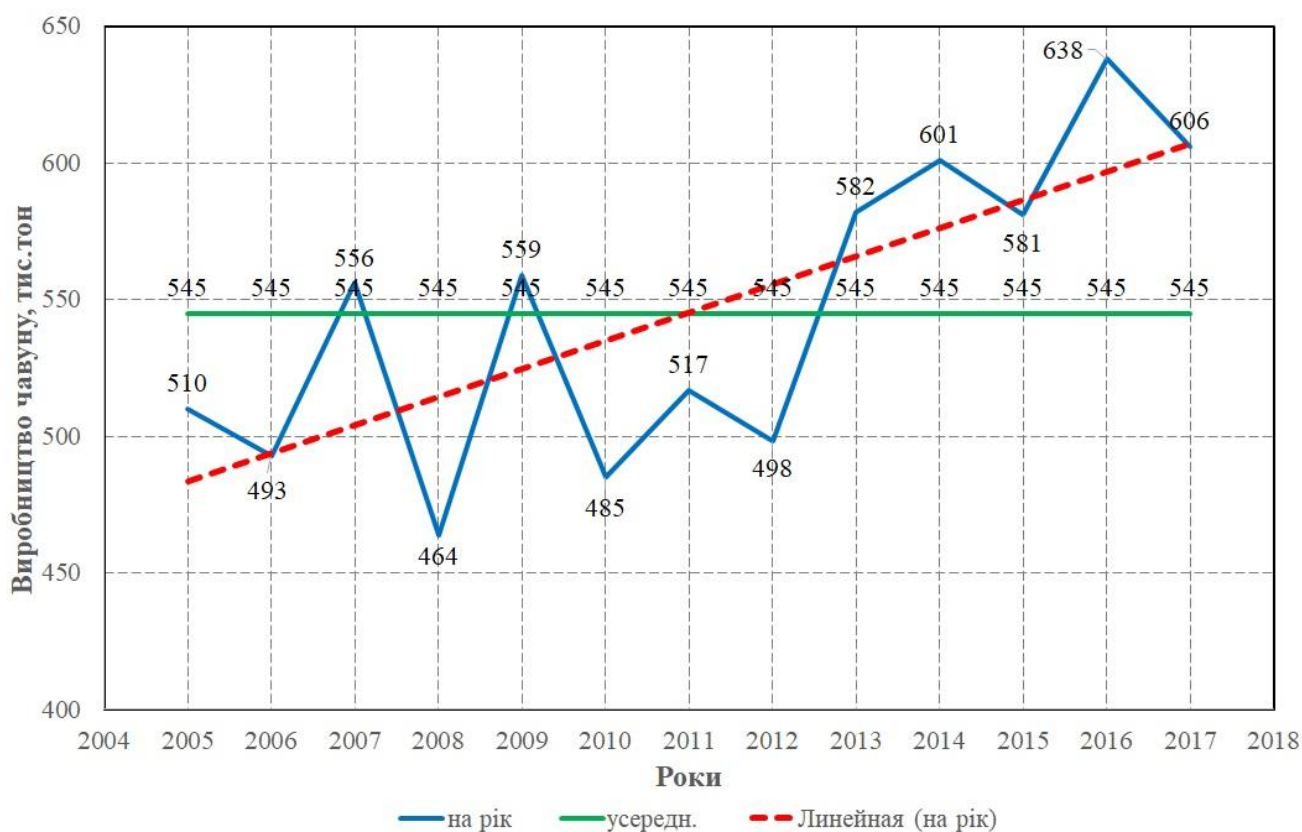


Рисунок 3.3 – Річне виробництво чавуну в ДП об'ємом 1033 м^3 на протязі її 14-річної кампанії.

крема, при середній масі чавуну, що випускається за раз, в 225 тон середня частота випусків складе біля 200 на місяць. Це дає верхню оцінку частоти циклів навантаження (не всі випуски чавуну супроводжуються падінням тиску в ДП). Кількість тихих ходів також впливає на частоту циклозмін. Але їх місячна кількість (від 2 до 5) несуттєва у порівнянні з верхньою оцінкою.

Слід звернути увагу, що на протязі всього періоду експлуатації ДП при обслуговуванні металоконструкцій не застосовувались засоби технічної діагностики. Тому досить важко реконструювати історію експлуатації стінки ДП. Але можна констатувати, що її умови були досить жорсткими.

3.3 Зразки для досліджень

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, рис. 3.4). За умов нормальної роботи системи охолодження температура кожуху по зонах на 10...30°С більша температури оточуючого середовища. При відмові (частковій відмові) холодильників температура кожуху підвищується на декілька сотень градусів. Вигини, випинання, викривлення ділянок кожуху свідчать про їх перегрів до температур 300...600°С.

Хімічний склад металу суттєво не відрізняється поміж зонами (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Відсотковий склад елементів в зразках металу.

Зона	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Mo
1, 2	0,11	1,50	0,58	0,0100	0,016	0,06	0,08	0,07	0,041	0,008
3	0,11	1,51	0,64	0,0045	0,025	0,07	0,02	0,02	0,003	0,001

Статичні випробування на розтягування зразків після експлуатації кожуху показали ідентичність деформаційних властивостей (відносне звуження ψ , відносне подовження δ) та більш високі показники міцності (межа міцності σ_B , межа плинності σ_T , межа пружності σ_e) у зразків з фурменної зони (табл. 3.2). Це може свідчити про більш жорсткі умови експлуатації, які призводять до окрихчення металу. Різниця в умовах експлуатації відобразилась на товщині листів металу: в фурменній зоні їх товщина приблизно на 2 мм є меншою, ніж в зоні шахти. Зразки з 3 зони мали більшу кількість окалини, яку важко вилучити. За рекомендаціями [79] це свідчить про нетривалий перегрів кожуху фурменної зони до температур 700...900°С.

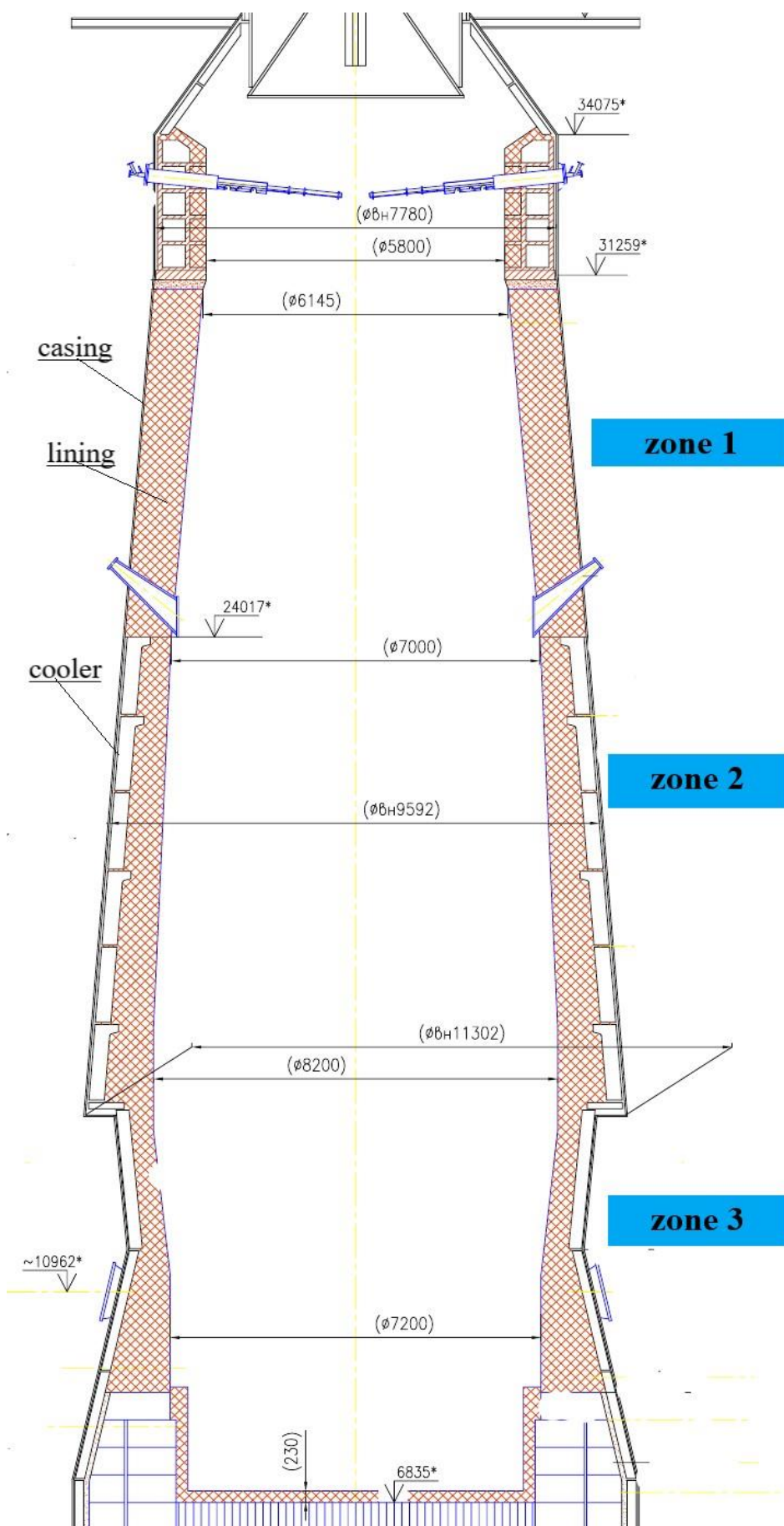
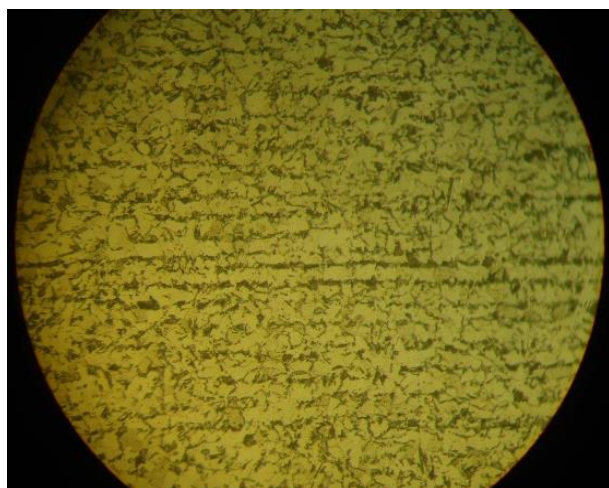


Рисунок 3.4 – Профіль ДП і схема розташування досліджуваних зон кожуху.

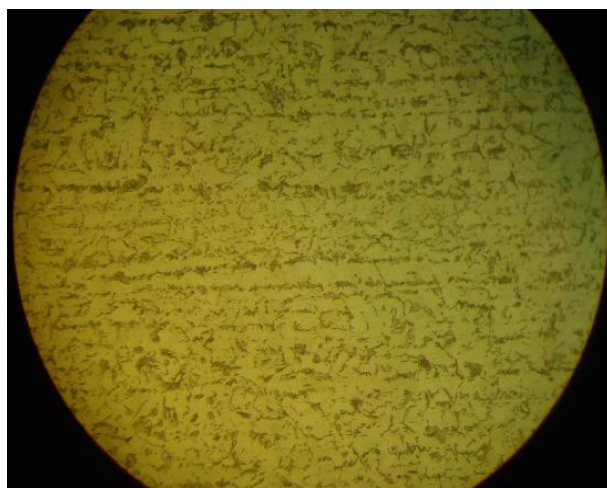
Таблиця 3.2 – Механічні властивості металу кожуху (сталь 09Г2С)
після експлуатації.

Зона	σ_B , МПа	σ_T , МПа	σ_e , МПа	δ	ψ	σ_T/σ_e
1, 2	530	417	300	0,27	0,64	1,4
3	540	427	305	0,27	0,64	1,4

Металографічні дослідження зразків не виявили різниці в місці їх розташування в зоні кожуху (рис. 3.5). Мікроструктура ферито-перлітного типу із зерном 9 балу шкали 1 ГОСТ 5639-82 має смугастість, що відповідає 2 балу шкали 3А ГОСТ 5640-68.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Мікроструктура зразків сталі 09Г2С з фурменної 3 зони (а),
а також шахтної 2 зони (б).

3.4 Методика досліджень при циклічному навантаженні

Зразки для механічних випробувань мали натурну (тобто поверхня не оброблялась) товщину 30 мм, ширину 12 мм. Вони деформувались по схемі 3-точкового згину в площині найбільшої жорсткості при відстані між крайніми опорами 110 мм (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Закріплення зразка при випробуваннях.

Зразки кожуху випробувались на універсальній машині, яка обладнана гідропульсатором. Попередньо було проведено повторно-статичні випробування з реєстрацією кривих деформування. Вони мали на меті отримання моделі циклічного зміцнення матеріалу, зв'язку напруження із деформацією при стабілізованій формі $\sigma - \epsilon$ кривої.

Після цього кожен зразок випробувано при стаціонарному максимальному напруженні циклу σ з асиметрією $R_\sigma = 0,1 \dots 0,16$. Частота навантаження становила 10...15 Гц. Навантаження припинялось автоматично при досягненні прогину зразка 1...2 мм. Прогин є наслідком процесів однобічного накопичення деформацій (ratcheting) та розкриття тріщини (тріщин). Довжина крайової тріщини при цьому складала $l_N = 2 \dots 5$ мм (рис. 3.7), що можна вважати критерієм граничного стану. В результаті цієї стадії випробувань отримано криві втоми $\sigma - N$ та $\epsilon - N$ (рис. 3.7). Довговічність N при цьому відповідає появі розвиненої тріщини. Вона має певну швидкість зростання, яка, як правило, знаходиться в верхній частині діаграми Періса.

Подальші випробування продовжувались при зменшених (приблизно у 2 рази) навантаженні і частоті. Вони зупинялись при досягненні тріщиною критичної довжини l_c . При цьому отримано ділянки діаграми Періса $v - \Delta K$ та критичний коефіцієнт інтенсивності напружень при циклічному режимі ΔK_{fc}

(рис. 3.7). Фактично, відбувались програмні випробування, оскільки здійснено 2-3 рівня навантаження. Довжина тріщини вимірювалась без зупинки випробувань і зняття зразка фотографічним методом з накладенням на зображення мірної сітки (рис. 3.8).

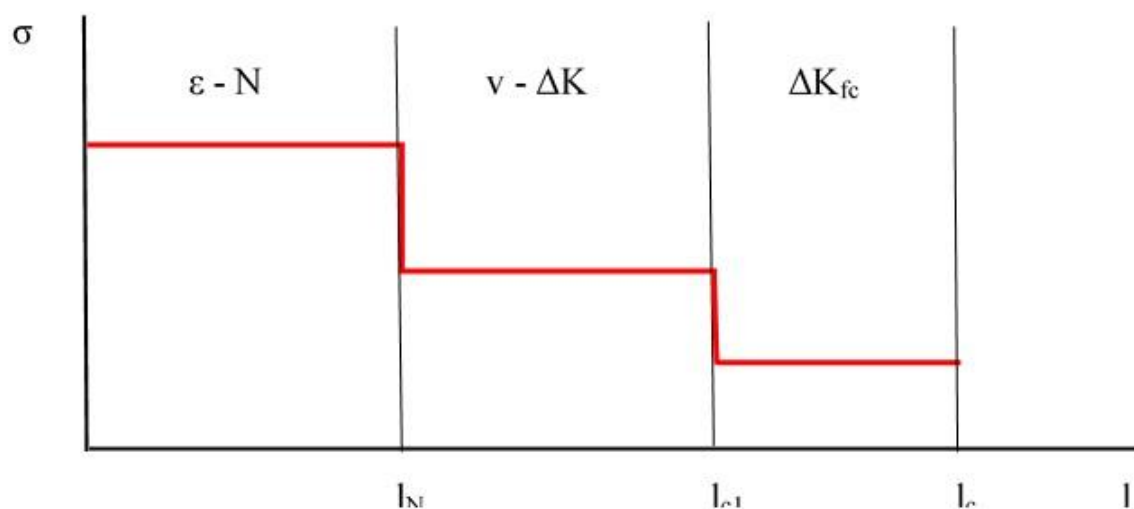


Рисунок 3.7 – Схема навантаження зразків при циклічних випробуваннях.

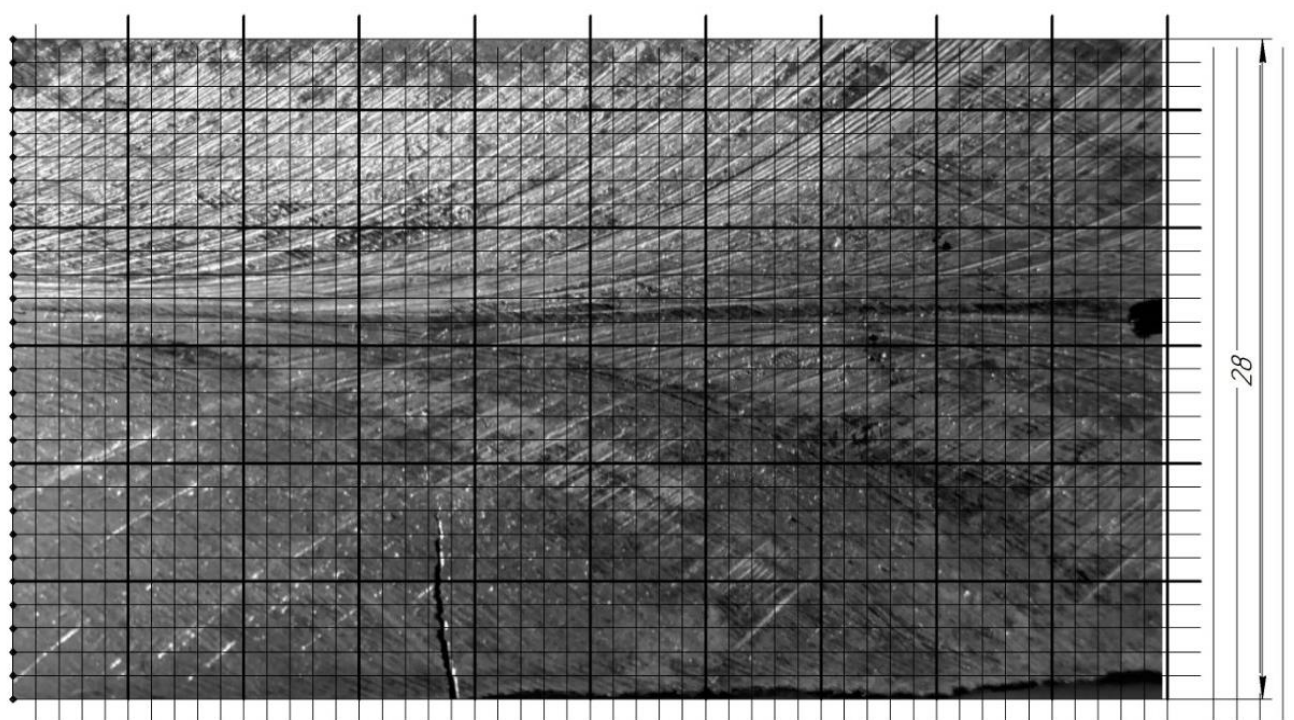


Рисунок 3.8 – Фото надтріснутого зразка з мірною сіткою

3.5 Методика обробки результатів повторно-статичних випробувань і модель зміцнення

При випробуваннях одночасно реєструються зусилля F , яке розвиває машина, і прогин зразка w . Перебудова такої первісної діаграми у канонічну криву деформування «напруження σ – деформація ε » доволі кропітка задача. Це обумовлено тим, що при неоднорідному деформованому стані у вигляді згину, з появою пластичних деформацій змінюються формули для визначення напруження σ від зусилля F [80, 81]. В загальному випадку необхідно будувати діаграму «згинальний момент – кут повороту поперечного перетину при згині зразка». Оскільки в даних випробуваннях реєструвались початкові ділянки кривих деформування, методику обробки можна спростити.

Якщо не враховувати ефекти зминання металу зразка під опорами, а також його сповзання з них, зв'язок між деформацією і прогином є наступним [82]:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot h \cdot w}{L^2}. \quad (3.1)$$

Тут висота зразка (товщина) становить $h = 30$ мм, ширина зразка $b = 12$ мм, а прольот між опорами $L = 110$ мм. Напруження визначається за звичайною залежністю в пружній постановці:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}. \quad (3.2)$$

Метал кожуху при повторному деформуванні за межею пружності зміцнюється. Це виражається в збільшенні первісних значень σ_{e0} і σ_{T0} до σ_{ec} і σ_{Tc} відповідно (рис. 3.9, а). Ступінь зміцнення може характеризуватися відношенням $\alpha_e = \sigma_{ec} / \sigma_{e0}$ або $\alpha_T = \sigma_{Tc} / \sigma_{T0}$. Зі збільшенням зміцнення зменшується пластична деформація ε_{pc} і незначно збільшується пружна

деформація $\varepsilon_{ec} = \sigma_{ec} / E$. Модуль пружності E залишається незмінним і прийнятий 200000 МПа. Загальна деформація $\varepsilon_c = \varepsilon_{ec} + \varepsilon_{pc}$ зменшується з числом циклів навантаження N і через 10...1000 повторів стабілізується (рис. 3.9, б). Після появи тріщини (N_c , рис. 3.9, б), деформація зразка може зростати за рахунок ослаблення його перетину.

Ступінь зміцнення α_e збільшується зі збільшенням максимального напруження σ_{max} , і зменшується при збільшенні початкової межі пружності σ_e . Вона може слугувати у якості діагностичного параметра матеріалу, який свідчить про його пошкодженість. 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 отриманих напружень в зонах кожуху.

Повторно – статичні випробування при триточковому згині підтвердили більш високі показники міцності металу фурменої зони (3 зона, табл. 3.3, рис. 3.10). Таке явище варто розглядати як різні фази зміцнення одного матеріалу. Більш інтенсивне окислення металу фурменої зони супроводжується підвищеними напруженнями теплового походження.

Ступеня циклічного зміцнення α_e сталі 09Г2С отримано експериментально, а модель оброблена на підставі повного факторного експерименту 22. Вона побудована для відносних значень $\bar{\sigma}_{max} = \sigma_{max} / \sigma_{e0}$, $\bar{\sigma}_{e0} = \sigma_{e0} / \sigma_{e00}$:

$$\alpha_e = -0,69 + 1,67 \cdot \bar{\sigma}_{max} + 0,71 \cdot \bar{\sigma}_{e0} - 0,79 \cdot \bar{\sigma}_{max} \cdot \bar{\sigma}_{e0}. \quad (3.3)$$

Тут через σ_{e00} позначена первісна межа пружності при розтягуванні недеформованого металу. За сертифікатом первісна межа плинності становить $\sigma_{T0} = 340$ МПа. Приймав незмінним відношення, отримане при згині

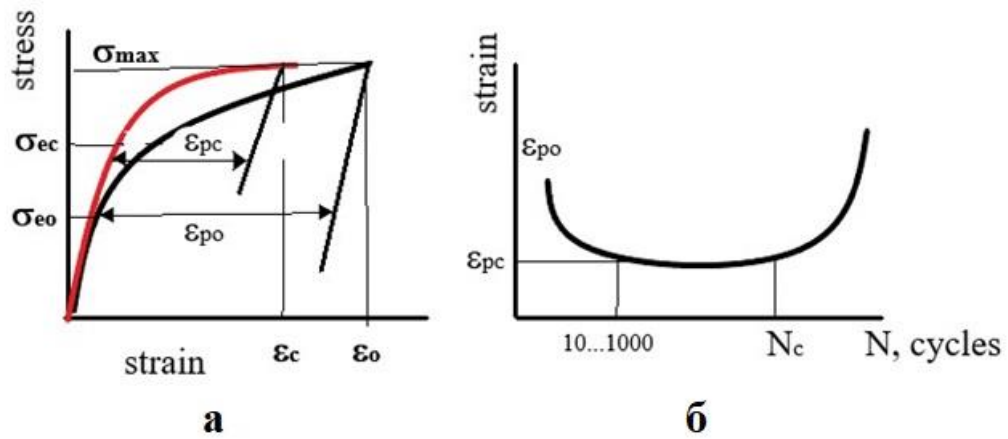


Рисунок 3.9 – Схема діаграм циклічного деформування (stress-strain) (а) та стабілізації зміцнення (б).

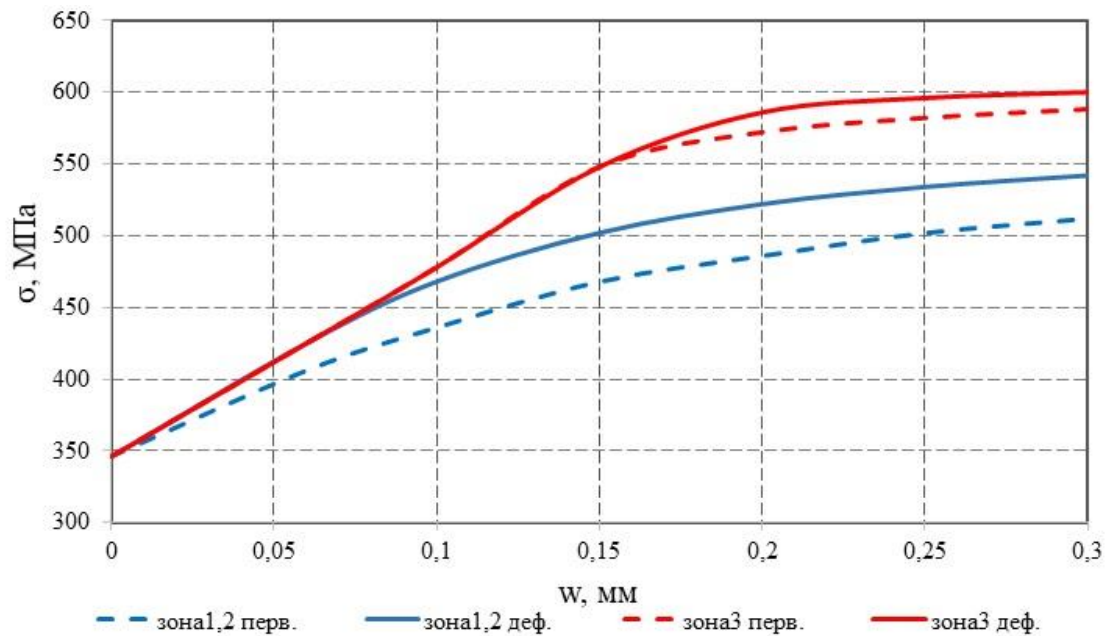


Рисунок 3.10 – Характер циклічного зміцнення при згині зразків кожуха, вирізаних з його різних зон, для первісного (пунктир) і деформованого (суцільні) станів.

Таблиця 3.3 – Показники циклічного зміцнення сталі 09Г2С для зон кожуху ДП.

Зона	$\sigma_{\max}$, МПа	σ_{e0} , МПа	σ_{ec} , МПа	σ_{T0} , МПа	σ_{Tc} , МПа	α_e	α_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

$\sigma_{T0}/\sigma_{e0} = 1,4$, беремо $\sigma_{e00} = 300$ МПа. В такій постановці фактор $\bar{\sigma}_{e0}$ можна трактувати як проміжне значення ступеню зміцнення перед стаціонарним режимом деформування. Це дає змогу за фактичними властивостями матеріалу встановити максимальні напруження, які він потерпав.

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. 3.3), 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.

Явище стабілізації форми кривої деформування після відносно незначної кількості циклів дає змогу при м'якому режимі випробувань ($\sigma = \text{const}$) визначати деформаційну модель втоми $N(\varepsilon)$. Нехтування чинником внутрішньої нестаціонарності металу можливо при руйнуванні з розвитком тріщини. Саме такі умови розглядаються в цих дослідженнях.

Враховуючи зв'язок межі пружності зі ступенем зміцнення $\sigma_{ec}(\alpha_e)$, повну деформацію на етапі стабілізації можна представити через модуль зміцнення E_p як:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{ec}(\alpha_e)}{E} + \varepsilon_p = \frac{\sigma_{ec}(\alpha_e)}{E} + \sigma_p \cdot E_p = \frac{\sigma_{ec}(\alpha_e)}{E} + (\sigma - \sigma_{ec}(\alpha_e)) \cdot E_p. \quad (3.4)$$

За результатами випробувань можна приймати модуль зміцнення $E_p = 10^{-6}$ МПа (рис. 3.11). Модуль зміцнення E_p на цій діаграмі є тангенсом кута нахилу лінії тренду. Діаграми деформування до максимального напруження циклу по осі ординат, а також до початку процесу стабілізації по осі абсцис, реєструвались для кожного зразка. Це саме дає можливість отримати моделі втоми в силовій $N(\sigma)$ і деформаційній $N(\varepsilon)$ трактовках.

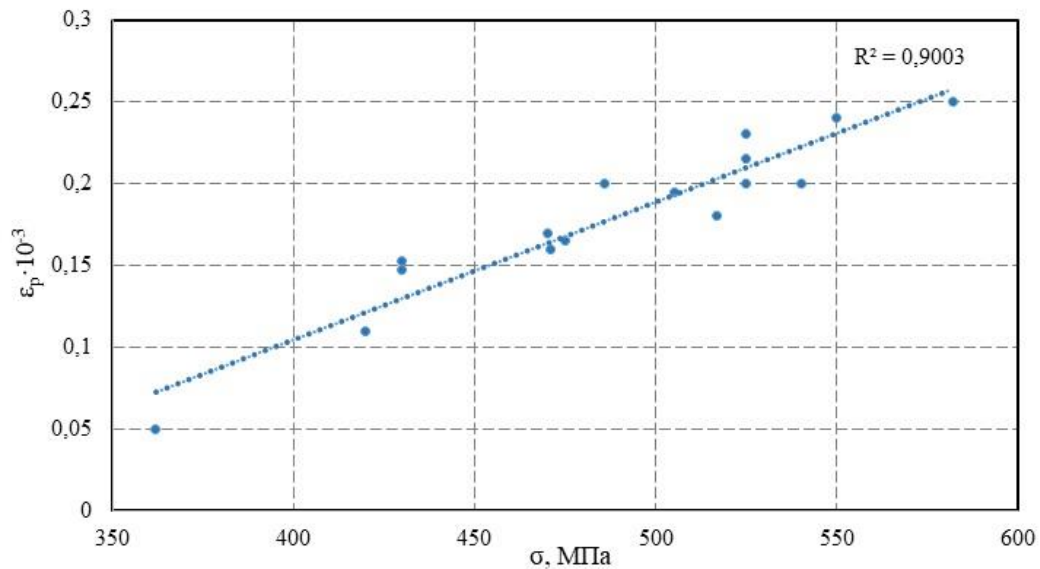


Рисунок 3.11 – Взаємозв’язок між напруженням та сталим рівнем пластичної деформації при циклічному згині зразків сталі 09Г2С.

3.6 Моделі втоми

3.6.1 Характеристика тріщиноутворення і руйнування

Даний аналіз має на меті отримання якісних ознак для діагностування технічного стану металу кожуху ДП. Тріщини утворюються на розтягнутій зоні зразків в декількох місцях, демонструючи багато джерельність пошкодженості (рис. 3.12, а). Така ситуація характерна для високих рівнів напружень, коли тріщини не встигають об’єднатися в єдину магістральну.

Тріщина виникає як поверхнева на півколова і згодом трансформується в крайову. На такому етапі її розвитку фіксувалась довговічність N , яка використовувалась для побудови моделі втоми. Подальше зростання тріщини супроводжується випрямленням її фронту. Досягнення тріщиною критичного розміру, який відповідає критичному КІН при циклюванні K_{Ifc} , визначалось по зміні механізму руйнування. В свою чергу, це віддзеркалювалось на зламі зразків межею між тонковолокнистою і крупнозернистою структурою (рис. 3.12, б).

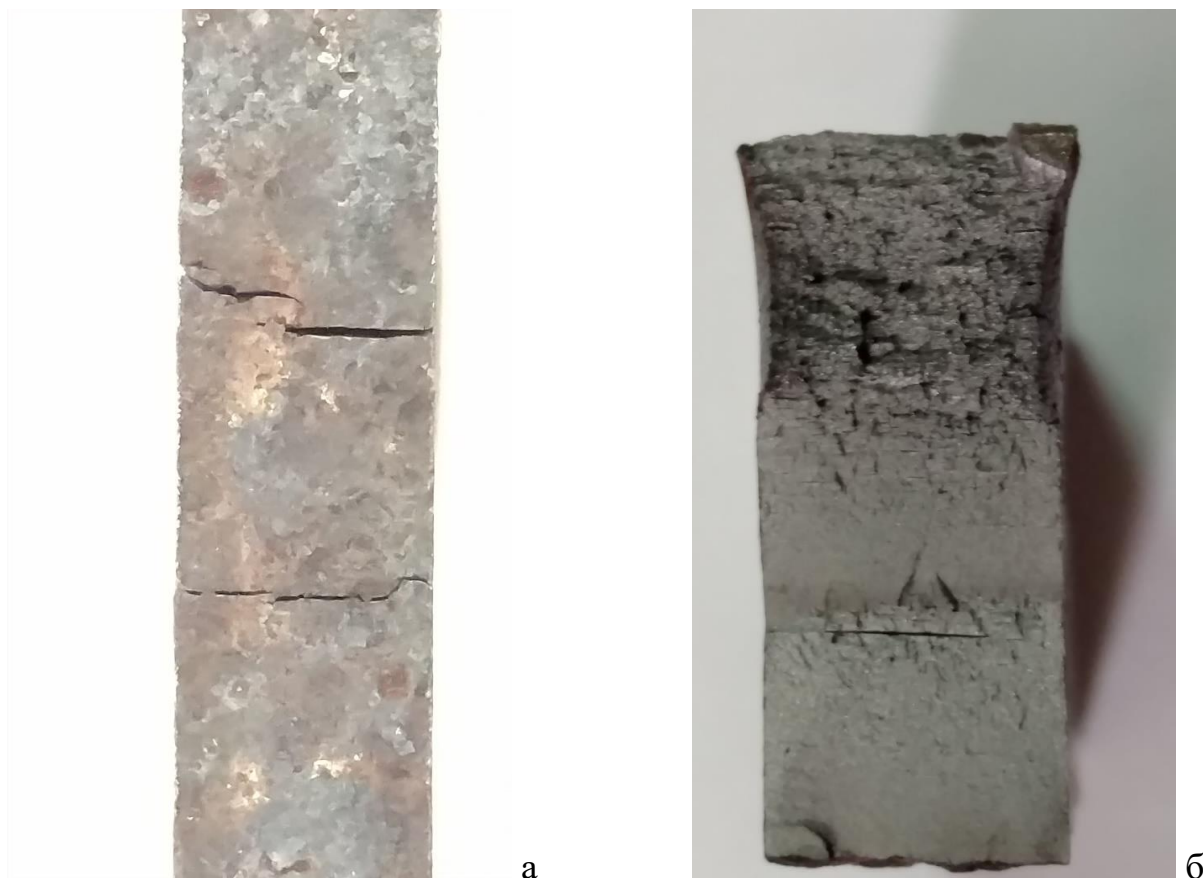


Рисунок 3.12 – Робоча поверхня зразка (а) і його злам (б).

На боковій грані зразка критичний розмір тріщини характеризується зміною траєкторії (рис. 3.13). Тріщина починає більш інтенсивніше розвиватися не в довжину, а в напрямку розкриття. Після досягнення критичного стану тріщини крихкого руйнування зразка і розділення його на дві частини не відбувається. Таке, зазвичай, характерно для термооброблених сталей, з яких виготовляють деталі машин. В даній ситуації зразки корпусної сталі 09Г2С починали руйнуватися в'язко з меншою швидкістю, ніж при крихкому руйнуванні. При згині зразка розвиток деформацій обмежений кутом повороту перетинів 90° . Достатній запас пластичності, що лишається в сталі 09Г2С після експлуатації, не дає матеріалу перейти в фазу крихкого руйнування. Зразок гнеться, оскільки залишковий перетин втрачає сталість. Для повного руйнування зразка необхідно «вирощувати» тріщину при малих напруженнях. Тоді в малому залишковому перетині утворяться умови для квазікрихкого руйнування.

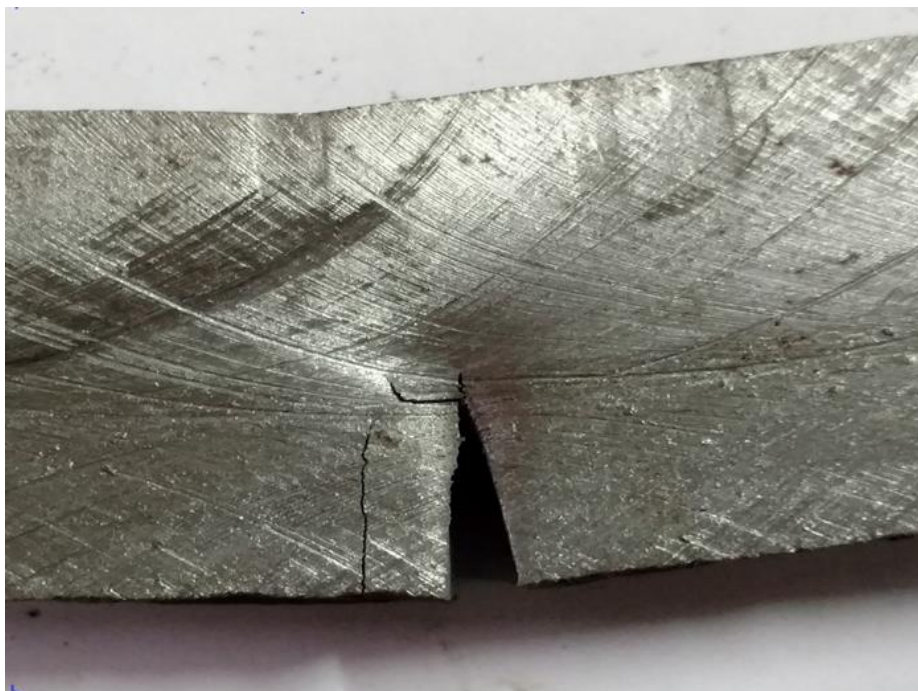


Рисунок 3.13 – Зміна траєкторії тріщини при досягненні критичного КІН.

3.6.2 Результати циклічних випробувань

Суттєвої різниці довговічності до появи тріщини між зразками, що вирізані були з різних зон кожуху ДП, не виявлено (рис. 3.14). Це дає підставу побудувати єдину криву втоми для всіх випробуваних зразків (рис. 3.15). Рівняння нахиленої ділянки кривої втоми має широко вживану ступеневу форму:

$$\sigma_{\max}^m \cdot N = \text{const} = B_1, \quad (3.5)$$

де $m = 10,1$ – показник нахилу кривої втоми; $B_1 = 103,22$ – константа рівняння.

Застосовувати рівняння (3.5) для розрахунків кожуху ДП треба дещо обережно. Адже воно отримано за умов певного градієнту напружень. Цей чинник дуже впливовий, якщо використовуються силові критерії втоми [82]. Наприклад, раніше авторами було отримано результати випробувань сталі 09Г2С на розтягування при від нульовому (пульсуючому) циклі. При їх порівнянні з

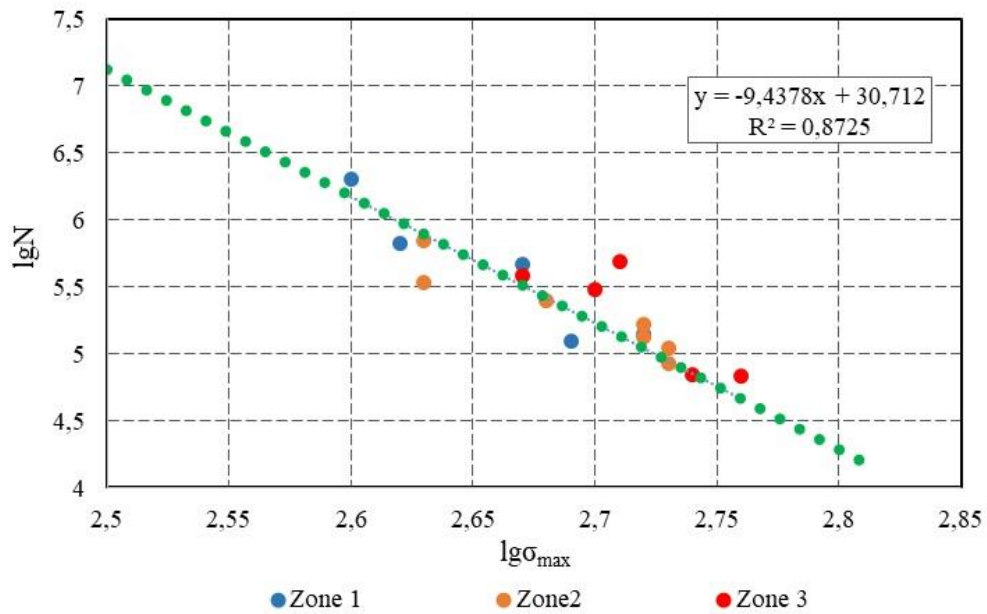


Рисунок 3.14. Результати втомних випробувань зразків сталі 09Г2С на триточковий згин для різних зон кожуха

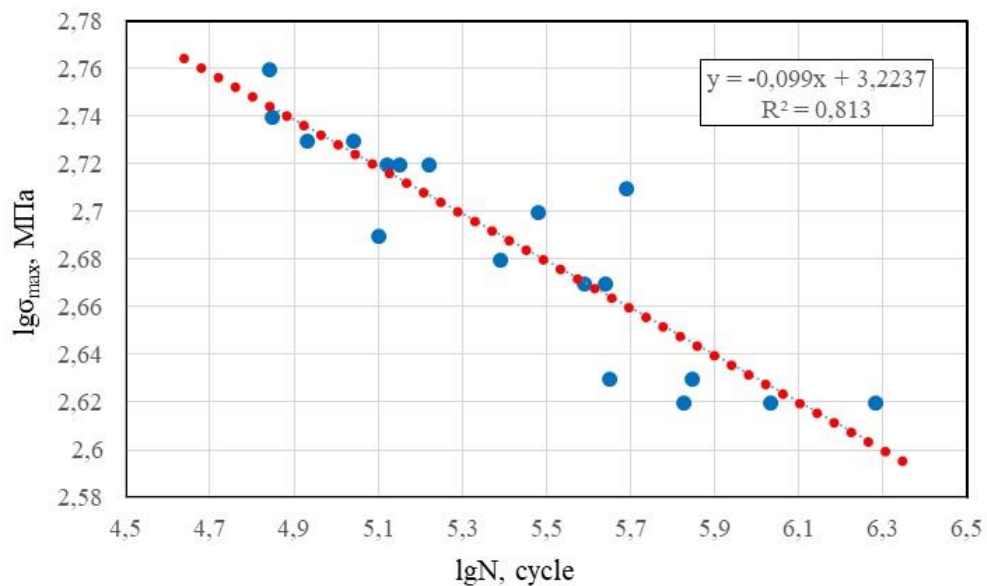


Рисунок 3.15. Нахилена ділянка єдиної (узагальненої) кривої втоми та результати випробувань на триточковий згин зразків сталі 09Г2С для трьох ділянок кожуху ДП

наявними результатами випробувань на згин видно, що останні майже на порядок мають більшу довговічність (рис. 3.16). Границі витривалості при цьому збільшуються на 30...50%. Тому модель (3.5) буде коректним застосовувати тільки для зон випинання, де домінують деформації згину. Вважається, що депла-

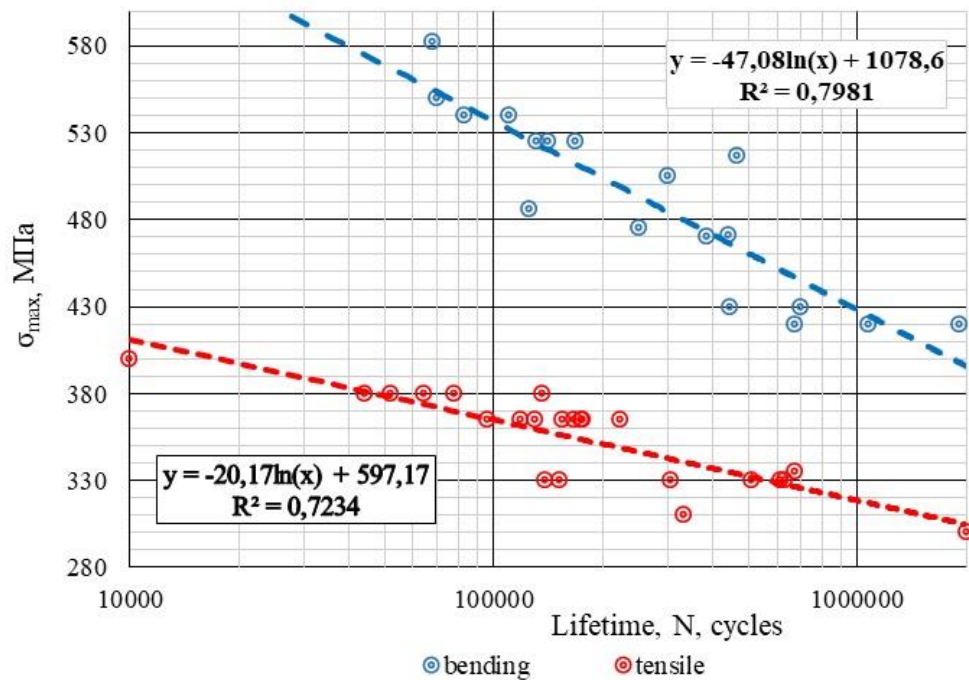


Рисунок 3.16. Результати втомних випробувань сталі 09Г2С на розтягання (tensile) та згин (bending) при від нульових циклах

нація кожуху передуює приблизно половині випадків тріщиноутворення [68]. Для решти зон кожуху пошкодження контролюється, головним чином, напруженнями розтягування в кільцевому і висотному напрямках.

Як відомо, критерієм руйнування, який не залежить від градієнту напружень, є істинна непружна деформація за цикл. В багатьох випадках деформаційні критерії є інваріантними, як до асиметрії циклу, так і до складного напруженого стану [83]. Тому представляє інтерес для розрахунків довговічності кожуху ДП до появи тріщини застосувати деформаційні критерії. Такі спроби для кожухів доменних агрегатів мали місце раніше [84, 85]. Але в цих розрахунках враховуються тільки деформації, що призводять до малоциклових пошкоджень. В результаті розрахунків гранична кількість циклів становить $(3...6) \cdot 10^4$ за нормативний термін експлуатації 15...20 років. 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 (Basquin–Manson–Coffin) у вигляді [86]:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{4N^{0,6}} \ln \frac{1}{1-\psi} + \frac{\sigma_{aR}}{E} \left(\frac{N_G}{N} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (3.6)$$

де ψ – коефіцієнт відносного звуження; σ_{aR} – границя витривалості на базі N_G циклів; E – модуль пружності сталі; ε_a – амплітудна деформація циклу; m – показник нахилу кривої багатоциклової втоми з рівнянням ступеневого типу (3.5).

Цю модель можна представити в більш компактному вигляді:

$$\varepsilon_a = A \cdot N^{-0,6} + B \cdot \left(\frac{N_G}{N} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (3.7)$$

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: $A = 0,25$; $B = 0,0008$; $N_G = 2 \cdot 10^6$; $m = 10$.

Складові циклу деформацій – максимальні $\varepsilon_{\max}$ і мінімальні $\varepsilon_{\min}$ значення, визначаються по залежності (3.4), отриманій для стадії сталого деформування. Тоді амплітудна деформація складе: $\varepsilon_a = 0,5 \cdot (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})$.

За визначеними, таким способом, амплітудами деформацій побудована в напівлогарифмічних координатах експериментальна крива втоми може бути апроксимована ступеневим рівнянням (рис. 3.17):

$$\varepsilon_a = \frac{21,2}{(\lg N)^{1,73}} 10^{-3}. \quad (3.8)$$

Тіснота зв'язку між змінними цього регресивного характеризується коефіцієнтом кореляції, який на рис. 3.17 позначений, як $R^2 = 0,86$. Для рівняння

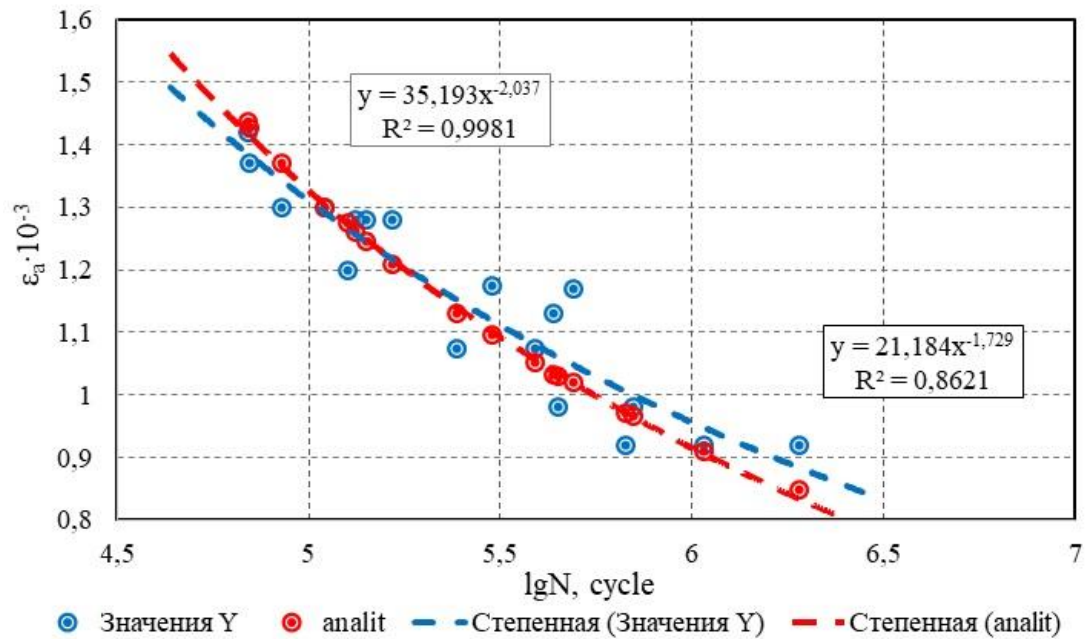


Рисунок 3.17. Результати втомних випробувань для деформаційних критеріїв (значення Y), експериментальна крива втоми (ступенева, значення Y), а також аналітична крива втоми (analit)

регресії, отриманому за цими ж даними в силовій постановці, коефіцієнт кореляції є меншим і складає $R^2 = 0,81$ (рис. 3.15). З цих міркувань варто надати перевагу деформаційній моделі. Це також свідчить про зменшення розпорошення довговічності при використанні деформаційних критеріїв, що підтверджує можливість за рахунок цього підвищити рівень прогнозованої безпеки [86].

Графік аналітичної моделі (3.6), який побудований в тих самих напівлогарифмічних координатах, показує, що вона також може бути представлена аналогічною ступеневою залежністю (analit, рис. 3.17):

$$\varepsilon_a = \frac{35,2}{(\lg N)^2} 10^{-3}. \quad (3.9)$$

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

$$\varepsilon_a = \frac{E_0}{(\lg N)^2}. \quad (3.10)$$

Отже, за результатами випробувань отримано параметр моделі втоми $E = 35,2$, який має розмірність деформації. Як було сказано вище, універсальність деформаційних моделей зберігається для істинних або приведених деформацій, які коректно визначені з методичної точки зору. Наприклад, в роботі [87, с.105] наведені $(\varepsilon - N)$ -криві для згину, крутіння і розтягання. Їх розташування по довговічності різняться на порядок.

В даних випробуваннях не врахована не пружність сталі при напруженнях, менших за $\sigma = 310$ МПа. Тому для фактичного складного напруженого стану металу кожуху ДП прогнозування ресурсу за отриманою моделлю може бути дещо оптимістичним. Для подолання цього побоювання запропоновано знизити параметр $E = 35,2$ до допустимого значення $[E_0]$. Величину такого зниження можна встановити за коефіцієнтом впливу градієнту напружень α' , який являє собою відношення границь витривалості при неоднорідному і однорідному напружених станах [19]. Враховуючи результати, представлені на рис.17, можна приймати $\alpha' = 2$. Тоді допустимий параметр $[E_0] = E_0 / \alpha' = 17,6$. Деформаційні моделі (3.9) – (3.10) для практичних розрахунків кожуху ДП трансформуються наступним чином:

$$\varepsilon_a = \frac{[E_0]}{(\lg N)^2} = \frac{17,6}{(\lg N)^2} \cdot 10^{-3}. \quad (3.11)$$

Отриманих детермінованих деформаційних моделей недостатньо для прогнозування надійності, ризику та безпеки кожухів. Необхідно мати рівняння розпорошення довговічностей. Такі властивості матеріалів, зазвичай, характеризують через середньоквадратичне відхилення (СКВ) логарифму

довговічності $S_{\lg N}$. Його значення запропоновано шукати через лінійне рівняння [86]:

$$S_{\lg N} = A_{c(d)} + k_{Lc(d)} \cdot (\lg N - \lg N_A), \quad (3.12)$$

де $A_{c(d)}$ – параметр рівняння, відповідно, для силових (індекс c) і деформаційних (індекс d) моделей, який дорівнює СКВ $S_{\lg N}$ на рівні $\lg N_A$; $k_{Lc(d)}$ – параметр рівняння, відповідно, для силових (індекс c) і деформаційних (індекс d) моделей, який характеризує кут нахилу його графіка.

На підставі втомних випробувань встановлено, що при середньому рівні довговічності $\lg N_i = \lg N_A = 5,14$ спостерігається СКВ $S_{\lg N_i} = A_c = 0,273$. Таке значення отримано для вибірки, яка складена з результатів випробувань зразків всіх трьох зон кожуху ДП. Параметр $k_{Lc} = 0,04$ вираховано на підставі прийняття максимального значення $S_{\lg N_i} = 0,35$, яке спостерігається на рівні $\lg N_i = 7$. Для деформаційних критеріїв параметр рівняння визначається за допомогою залежності [86]:

$$k_{Ld} = k_{Lc} + 0,25 \cdot A_c. \quad (3.13)$$

З урахуванням цього числова форма рівняння розпорошення довговічностей металу кожуху ДП для деформаційних критеріїв має вигляд:

$$S_{\lg N} = 0,15 + 0,11 \cdot (\lg N - 5,14). \quad (3.14)$$

3.7 В'язкість руйнування

3.7.1 Визначення КІН

Схема деформування при триточковому згині (3-point bending) широко застосовується в дослідженнях механічних властивостей. Серед переваг цієї схеми – простота виготовлення зразків і їх закріплення в випробувальній машині. Це важливо в випадку досліджень властивостей металу натурних конструкцій. Зручно, що на таких зразках водночас можна отримувати, як характеристики опору втомі, так і опору руйнуванню при зростанні тріщини. Конструкція зразка досить ретельно досліджена і існують декілька рішень для визначення в ньому КІН. Майже всі вони розраховані на те, що висота зразка h пов'язана з відстанню між крайніми опорами (прольот) L співвідношенням $L = 4 \cdot h$.

В стандарті на визначення характеристик тріщиностійкості наведена наступна формула [88]:

$$K_I = \frac{6P\sqrt{a}}{bh} \left(1,93 - 3,07a_r + 14,53a_r^2 - 25,11a_r^3 + 25,8a_r^4 \right) = \frac{6P\sqrt{a}}{bh} y_1, \quad (3.15)$$

де $a_r = a/h$ – відносний розмір тріщини довжиною a ; b – товщина зразка; P – зусилля, що діє на зразок в його середині на відстані $2h$ від крайніх опор; y_1 – коректувальна функція, що залежить від відносного розміру тріщини або Y -тарування.

Отримані по цій формулі КІН мають розмірність $\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$.

Відомі також залежності, за якими КІН має розмірність $\text{Н} \cdot \text{мм}^{-1,5}$ [89, 90]:

$$K_I = \frac{PL}{bh\sqrt{h}} \left(2,9a_r^{0,5} - 4,6a_r^{1,5} + 21,8a_r^{2,5} - 37,6a_r^{3,5} + 38,7a_r^{4,5} \right) = \frac{PL}{bh\sqrt{h}} y_2, \quad (3.16)$$

$$K_I = \frac{PL}{4bh\sqrt{h}} \left(\frac{11,93\sqrt{a_r}}{(1-a_r)^{1,5}(1+7,99a_r)^{0,5}} \right) = \frac{PL}{4bh\sqrt{h}} y_3. \quad (3.17)$$

Звідси видно, що $y_3/y_2 = 4$. Співставлення функцій y_1 і y_2 наведено на рис. 3.18. Для подальшого використання обрано залежність (3.16), оскільки за формулою (3.15) КІН виявляються дещо більшими. З урахуванням установочних розмірів і номінальних напружень в зразку σ КІН визначається як:

$$K_I = \frac{\sigma \cdot y_3}{6} \sqrt{h} \quad \text{або} \quad K_I = \frac{2 \cdot \sigma \cdot y_2}{3} \sqrt{h}. \quad (3.18)$$

З рис. 3.18 видно, функції $y_{1(2)}$ можуть мати більш спрощений вигляд. Зокрема, формула (3.16) в області практичних випадків може бути виражена, як:

$$K_I = 0,368 \cdot \sigma \cdot \exp(3,33 \cdot a_r) \cdot \sqrt{h}. \quad (3.19)$$

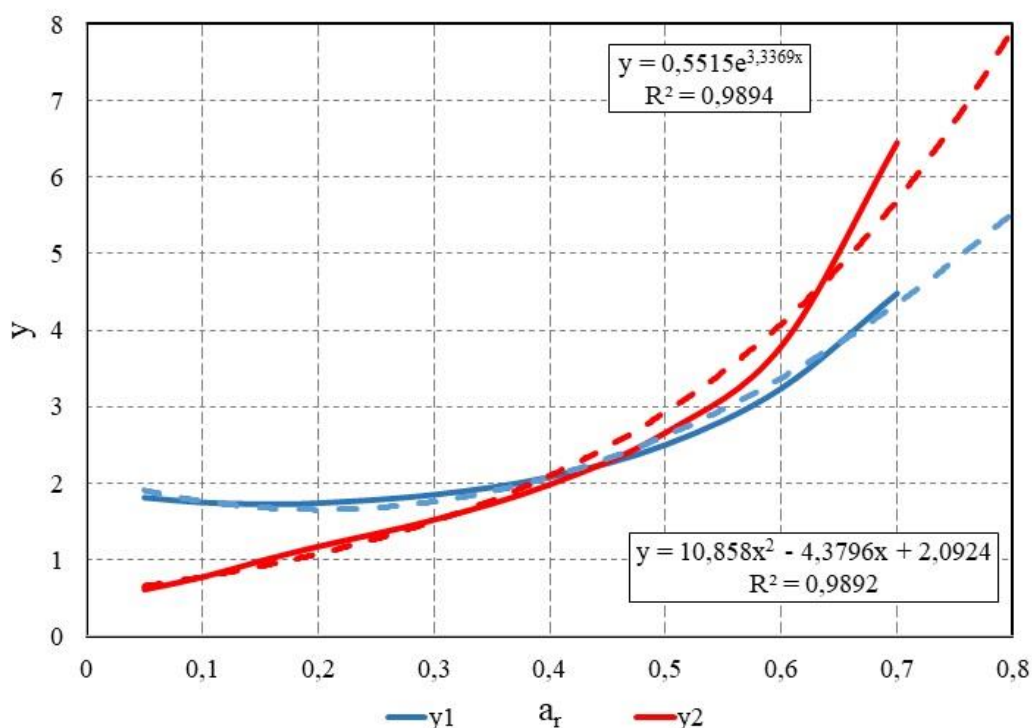


Рисунок 3.18 – Графіки коректувальних функцій (суцільні – аналітичні залежності (3.15) і (3.16), пунктир – апроксимації рівнянь на зображенні)

3.7.2 Результати випробувань

Випробування при циклічному навантаженні для кожного зразка проведено при 2-3 рівнях згинального моменту. Спочатку на 1 рівні «виросла» тріщина і визначалось значення критичного КІН K_{fc1} . Після цього навантаження зменшувалось, тріщина зростала далі до переходу до в'язкої фази руйнування. При цьому визначалися вторинні K_{fc2} і іноді третинні K_{fc3} (рис. 3.7).

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 ΔK . Зростання асиметрії циклу зазвичай веде до зменшення критичного K_{fc} . Натомість спостерігається його зростання на 20...25% для максимальних КІН циклу K_{fcmax} (рис. 3.19). Такого зростання не відбувається для КІН, виражених для розмахів напружень ΔK . 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 ΔK_{fc} (табл. 3.4). Такий результат відповідає сталим уявленням про процес розвитку тріщини і міг би не заслуговувати на увагу. Але отримані кількісні співвідношення є важливими при покроковій (поетапній) оцінці ризику експлуатації.

Таблиця 3.4 – 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 ΔK_{fc} , МПа $\cdot \sqrt{м}$	Коефіцієнти варіації ΔK_{fc}	K_{max}^* МПа $\cdot \sqrt{м}$	ΔK^* 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

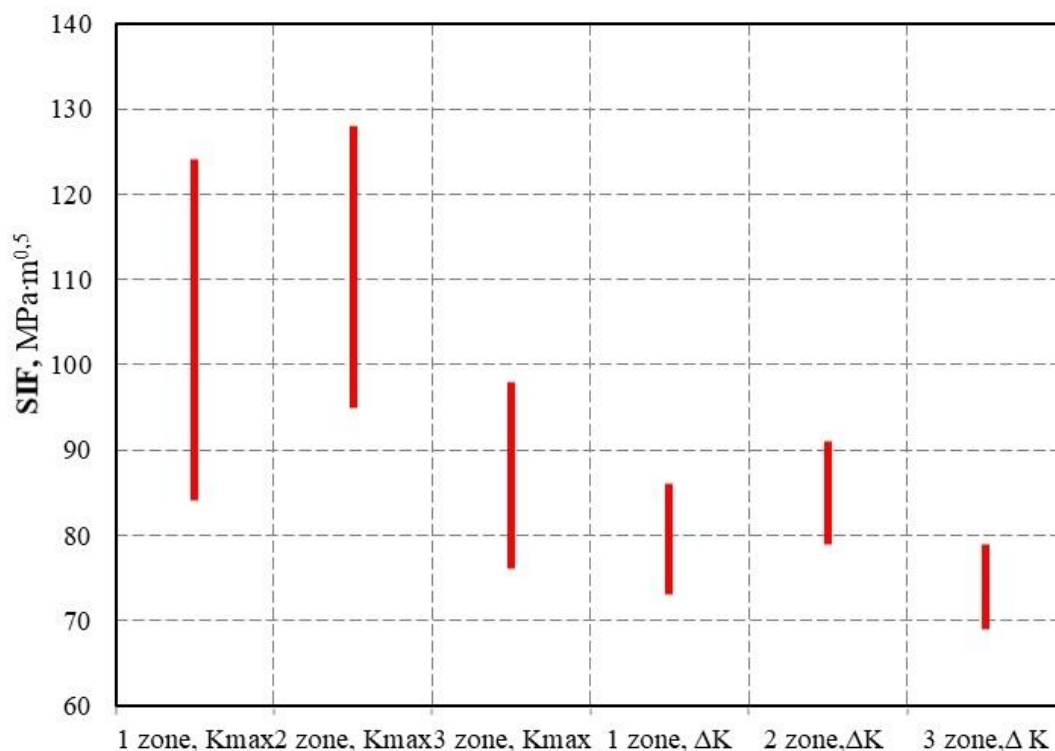


Рисунок 3.19. Діапазони критичних значень KIH (SIF)
при циклічному навантаженні для зон кожуху доменної печі
(для максимальних значень K_{max} та для розмахів напружень ΔK)

3.8 Дослідження твердості

Метод діагностування стану металів за параметрами твердості (LM-метод) в останні роки набуває широкого розповсюдження [91]. На відміну від більшості фізичних методів неруйнівного контролю, методів дефектоскопії, цей метод найближче пов'язаний з традиційними способами визначення механічних властивостей, які відбуваються шляхом руйнування зразків. В цьому випадку певній руйнації піддаються тільки незначні ділянки поверхні конструкції, які не впливають в подальшому на її властивості. При входженні індентора у напівпростір в охресті контакту виникають розтягуючі напруги, що створюють умови для зародження і розвитку радіальних, медіанних (осьових) і бічних тріщин. Умови навантаження матеріалу в зоні контакту з індентором, практично, є адекватними умовам стандартних випробувань на тріщиностійкість: в

приконтактних областях діють напруги розтягання, що забезпечують умови нормального відриву в осевих перетинах відбитка [92].

Ступінь пошкоджуваності матеріалу оцінюється не за абсолютними значеннями твердості, а за параметрами розсіювання її значень, як більш показними, ніж сама твердість. Розсіювання чи розпорошення показників твердості обумовлено неоднорідністю структури матеріалу, що характеризується наявністю зернистості, хімічних флуктуацій, сторонніх включень, пор і інших дефектів. Означені фактори слугують причинами зародження мікротріщин. Отже, розпорошення твердості пов'язане зі зміною характеристик в'язкості руйнування. Це забезпечує підвищення інформативності і точності оцінки деградації матеріалу даним методом.

3.8.1 Метода вимірювань твердості

Дослідження твердості проводили на зразках, які попередньо були випробувані на триточковий згин. Вимірювалась твердість зразків з різних зон кожуху. Для вимірювань твердості був використаний портативний ультразвуковий твердомір NOVOTEST ТУ-ДЗ та перетворювач У1. Вимірювання здійснюється контактено-резонансним методом за допомогою алмазного індентора. Він залишає малопомітний відбиток малого розміру. Перед початком вимірювань усі зразки були відшліфовані. Потім їхня поверхня була поділена на ділянки розміром 10×10 мм. Кількість ділянок в залежності від розміру зразка складала від 36 до 42. Для високої точності вимірювань та зручності зразки були затиснуті у токарний патрон (рис.3. 20 та рис. 3.21).

Визначення характеристик твердості за Брінелем відбувалось у відповідність вимогами ГОСТ 2979-75 на різних ділянках поверхні зразків. У кожній ділянці було проведено не менше 15-ти вимірів твердості по шкалі Брінеля (рис. 3.22 та рис. 3.23).



Рисунок 3.20. Підготовка зразків для вимірювань твердості.



Рисунок 3.21. Вимірювання твердості зразків.

3.8.2 Результати дослідження твердості

В ЛМ-методі розпорошення запропоновано контролювати, так званим, коефіцієнтом гомогенності Вейбула, який розраховують за формулою Гумбеля:

$$m = 0,4343 \cdot d_n \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.20)$$

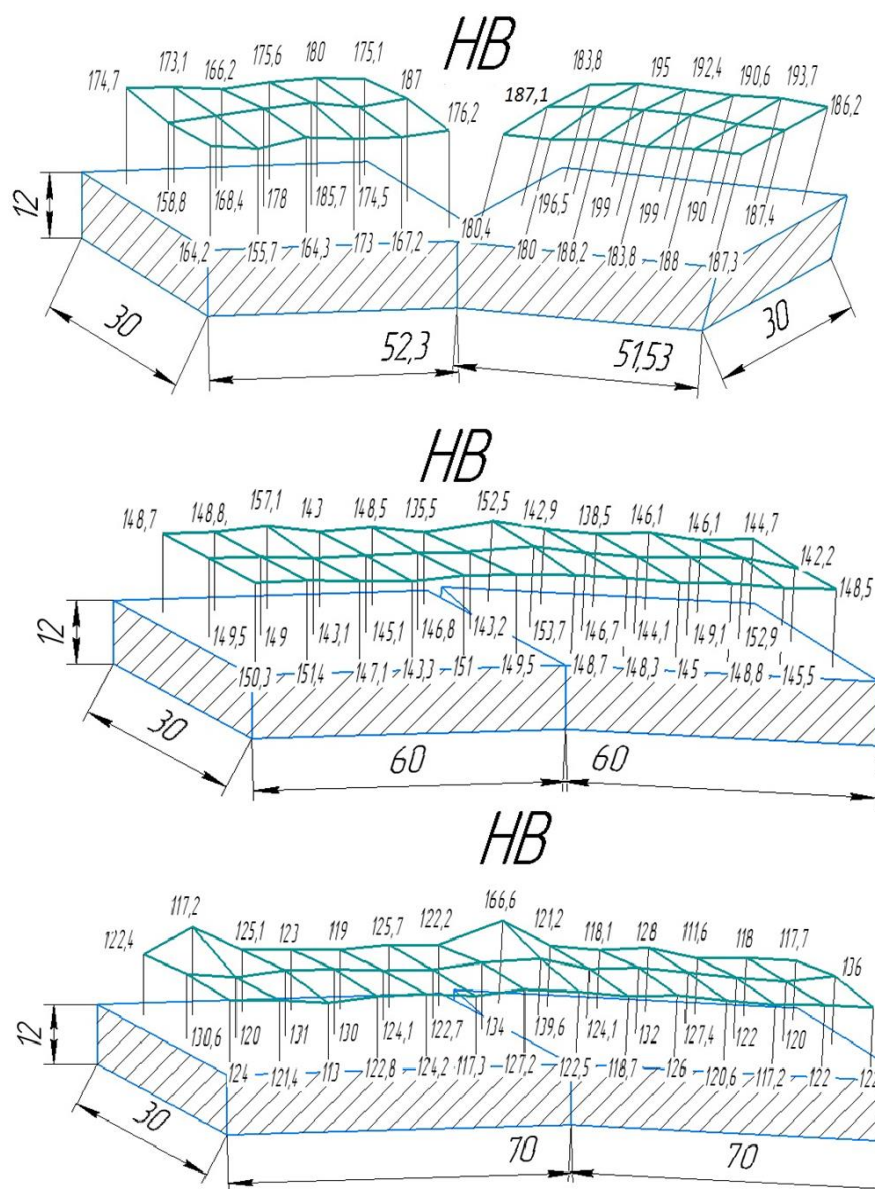


Рисунок 3.22. Діаграми розподілу твердості по зразках 1 (верхнє зображення), 2 (середнє) і 3 (нижнє) зони кожуха

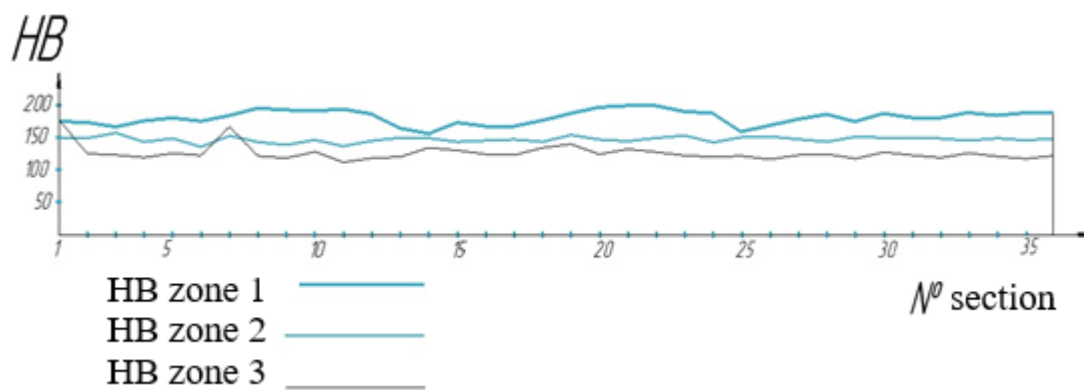


Рисунок 3.23. Порівняльна діаграма розподілу твердості між зонами кожуху (№ зразка відповідає зоні кожуху).

де d_n – коефіцієнт, що залежить від числа вимірювань; n – кількість вимірювань, H_i – значення твердості по i -му вимірюванню, $\overline{\lg H}$ – середній логарифм твердості за результатами вимірювань.

При кількості вимірювань n понад 15 коефіцієнт $d_n \rightarrow 1$. При однаковій кількості вимірювань цим коефіцієнтом можна знехтувати.

Тоді коефіцієнт гомогенності з урахуванням середньоквадратичного відхилення логарифма твердості $S_{\lg H}$ буде:

$$m = \frac{0,4343}{S_{\lg H_{HB}}} = \frac{0,4343}{0,4343 \cdot v_{HB}} = \frac{1}{v_{HB}}. \quad (3.21)$$

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. 3.5). В даному випадку коефіцієнт варіації v_{HB} підраховано за середніми показниками твердості на ділянках 10×10 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.

Таблиця 3.5 – 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

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.

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.

Недолік LM-методи полягає в неможливості визначення граничної величини v_{HB} . Тому неможливо визначити залишковий ресурс конструкції. Для подолання цього недоліка автори методи пропонують знайти кореляцію між показником розпорошення твердості і показниками в'язкості руйнування [92].

Із співставлення результатів дослідження твердості і в'язкості руйнування сталі 09Г2С видно, що вказана кореляція має лінійний характер (рис. 3.24). Якщо представити експериментально знайдені показники в'язкості руйнування як поточні значення процесу старіння або пошкодження матеріалу, то їх поведінка може бути формалізована рівнянням:

$$K_{fc}^d = K_{fc} - r_{HBS} \cdot v_{HB}. \quad (3.22)$$

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

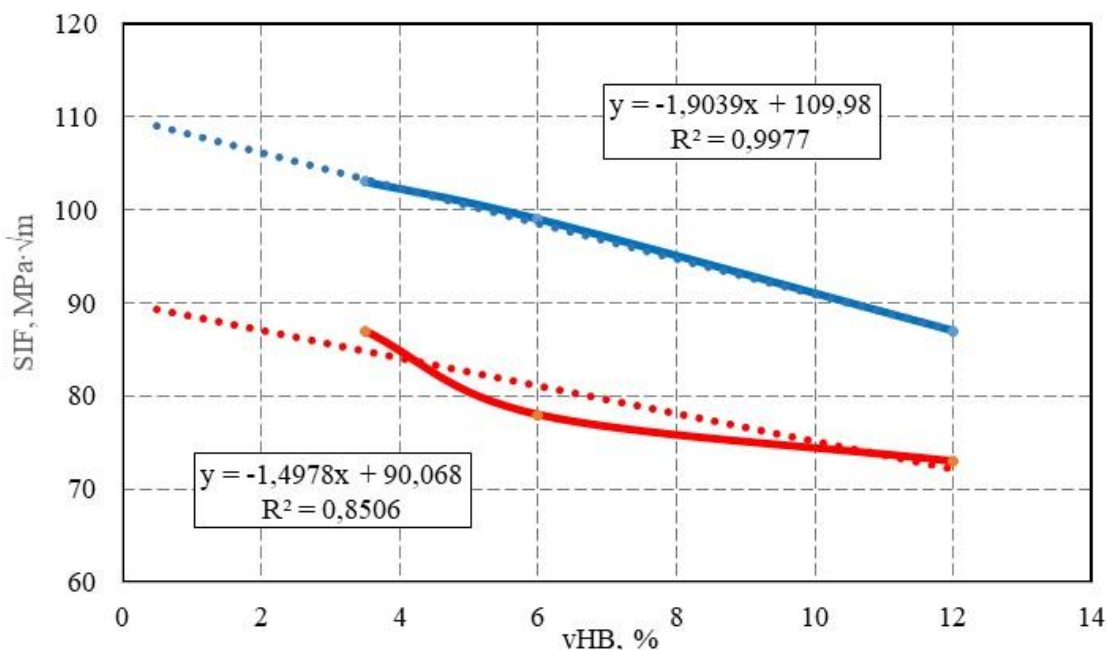


Рисунок 3.24 – Взаємозв’язок між критичним циклічним КІН (SIF), вираженим через максимальні напруження $K_{fcm\max}$ (верхня крива) і розмахи напружень ΔK_{fc} (нижня крива), і коефіцієнтом варіації твердості.

діагностичний параметр. Такий спосіб діагностування технічного стану кожуху ДП є відомим. При цьому з кожуху відбирають мікроразки для випробувань шляхом руйнування [74]. Така операція не завжди можлива. Тому доцільно проводити діагностування неруйнівними способами, таким як дослідження твердості. Отримана модель (3.22) дає таку можливість.

На підставі цієї моделі можна вважати значення $K_{fcm\max} = 110 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ за первісне. Під впливом експлуатаційного процесу цей показник зменшується на 7...25% (в залежності від зони кожуху). Таке падіння не є критичним, оскільки при порівняльній оцінці живучості кожухів з різних металів для сталі 09Г2С були закладені саме такі властивості [75]. 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.

3.9 Результати комплексного дослідження деградації металу кожуху ДП

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.

Такий висновок не є аномальним, хоча і суперечить сталій думці про інтенсивну втрату властивостей сталі 09Г2С під впливом експлуатаційного наробітку; про схильність сталі до теплового окрихчення. Щодо зберігання деформаційної здатності сталі 09Г2С після напрацювання свідчать випробування цієї сталі на циклічне розтягання, які проведені авторами (рис. 3.25). З порівняння довжини зразків видно, що в квазістатичній області при довговічності $N \rightarrow 10^4$ циклів відносне подовження сягає 50...75%. Це в 2...3 рази більше, ніж при статичному навантаженні.

Висока деформаційна здатність є ознакою високої в'язкості руйнування і ознакою відсутності окрихчення. Можна вважати, що довготривале циклічне напрацювання не призводить до деградації сталі 09Г2С. До цього можуть призвести екстремальні умови експлуатації. Але вони не завжди супроводжують роботу конструкцій доменного виробництва. Наприклад, експлуатація сталі 09Г2С в ребрах жорсткості чаш шлаковозів при температурах до 600 °С не призвела до теплового окрихчення [93].

Порівняно невелике падіння циклічної в'язкості руйнування після експлуатації не є неочікуваним. Більш чуттєво і однозначно реагує на наробіток пороговий КІН [94]. Циклічна тріщиностійкість сталі незначно змінюється навіть за умов її експлуатації в паропровідних трубах. В цьому випадку більш інформативним діагностичним параметром виступає статична тріщиностійкість при повзучості [95].



Рисунок 3.25. Зразки сталі 09Г2С, що вирізані з візків локомотива після його 30-річної експлуатації: зразок до випробувань (угорі), після втомних випробувань на розтягування в багатоцикловій області (у середині), після повторно-статичних випробувань в квазістатичній області (знизу)

Випробування твердості металу кожухів за допомогою портативних твердомірів передбачено рекомендаціями по діагностуванню технічного стану ДП [79]. Падіння первісної твердості на 15% свідчить про нетривалий перегрів кожуху понад 900°C , а падіння твердості на 30% є наслідком довготривалої дії температури понад 900°C . Після виявлення таких ознак пошкодження метал вважається обмежено придатним, або зовсім непридатним до подальшої експлуатації. Тому контроль, власне, величини твердості не має прогностичних властивостей. На відміну від цього способу, LM-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 (3.22) змінюються при наробітку на десятки відсотків від первісного значення (рис. 3.26). Тому вони і використані для діагностування.

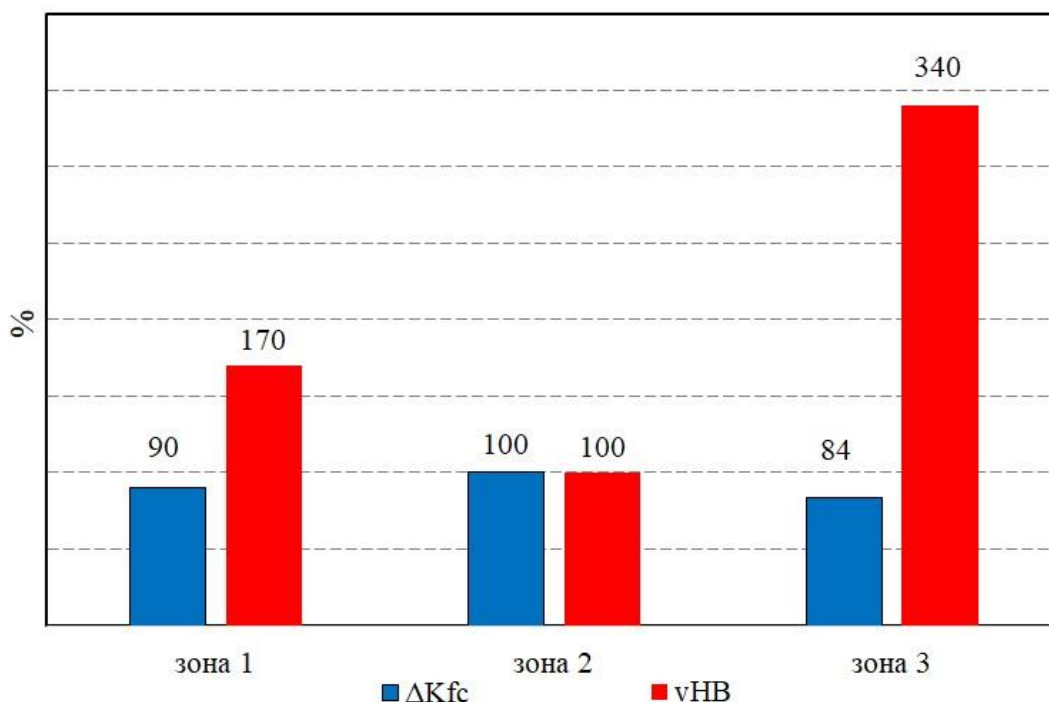


Рисунок 3.26 – Показники пошкодженості зон кожуху ДП
у вигляді відносних величин ΔK_{fc} і v_{HB}

Показники розпорошення твердості сталі 09Г2С при наробітку змінюються на сотні відсотків (тобто, в рази) (рис. 3.26). Це є сильною діагностичною ознакою. Тому вимірювання твердості є перспективним способом оцінки технічного стану металевих конструкцій доменного комплексу.

3.10 Висновки

1. Розроблено та впроваджено методу побудови деформаційних моделей втоми за результатами випробувань в «м'якому» режимі з контролем напружень. Така можливість отримана завдяки переходу металу в фазу стабілізації при циклічному навантаженні. Отримано необхідні для цього моделі циклічного зміцнення сталі 09Г2С.

2. Знайдена доволі проста апроксимація деформаційної моделі втоми Басквіна-Менсона-Коффіна, де є невідомим один параметр. Це дає змогу

визначати положення кривої втоми в напівлогарифмічних координатах по випробуванню тільки на одному рівні навантаження. Знайдена числова форма рівняння розпорошення довговічностей металу кожуху ДП для деформаційних критеріїв. У сукупності обидві залежності утворюють моделі опору втоми, які є достатніми для прогнозування ресурсу кожуху ДП.

3. Отримано лінійний зв'язок між показниками розпорошення твердості і в'язкості руйнування сталі 09Г2С після її довготривалої експлуатації в кожусі ДП. Означена модель є підставою для діагностування технічного стану металу кожуху ДП в процесі експлуатації неруйнівними методами.

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.

5. 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.

6. Незважаючи на незадовільний стан оболонки ДП і самого кожуху, його метал залишає достатню деформаційну здатність та циклічну міцність. Такий висновок підтверджується подальшим розрахунком залишкового ресурсу. Загальновідомий висновок про схильність сталі 09Г2С до теплового окрихчення отримано, головним чином, під час цілеспрямованих лабораторних досліджень. В них метал оброблявся теплом в такій кількості, яка безумовно призводила до окрихчення. Такі умови не можна гарантувати при перегріві ділянок кожуху.

За результатами наведених досліджень можна зробити висновок, що навіть без застосування проактивної стратегії обслуговування ДП, метал кожуху далеко

не цілком втрачає свою несучу спроможність після довготривалої експлуатації. Проактивна стратегія, яка супроводжується моніторингом стану оболонки ДП, знижує імовірність появи режимів роботи, при яких метал втрачає несучу здатність.

7. Знайдена компактна форма для визначення КІН крайової тріщини за умов випробування при триточковому циклічному згині.

8. Основні результати опубліковано у роботі [96].

РОЗДІЛ 4

ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ КОЖУХІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Раніше було розроблено алгоритми пошуку розподілу довговічностей, які призначені для подальшого використання при визначенні комплексного діагностичного показника – ресурсного індексу безпеки [54]. Їх було застосовано для оцінки технічного стану механічних систем, як промислового обладнання, так і транспортних машин [97, 98]. Для кожухів ДП було побудовано алгоритм пошуку розподілу числа циклів зростання тріщини до критичних розмірів (період живучості) при нестационарному режимі [99, 100]. Завдяки цьому з'явилась можливість отримувати функції розподілу живучості після того, як тріщини або дефекти в кожусі будуть виявлені. Але прогнозувати надійність та безпеку до появи тріщини можливості не було. Тому розробка такого алгоритму, гармонізованого із вже розробленими, є актуальною задачею.

4.1 Моделі для оцінки несучої спроможності кожуху ДП (огляд методик)

Для обґрунтування несучої здатності кожуха ДП прийнята модель, яка традиційно використовується для металоконструкцій: перевіряється можливість руйнування від однократного навантаження шляхом порівняння еквівалентних (за відповідною гіпотезою міцності) напружень з розрахунковим опором для конкретної марки стали. Діючі напруження обчислюються при максимальних параметрах доменного процесу. Враховуються також позаштатні ситуації, такі як обрив шихти після її підвисяння, підрив настилу. Це призводить, відповідно, до коливань кожуху і коефіцієнту динамічності в межах від 2 до 3, а також до локального 2...4 кратного перевищення напруження [101]. Подібний статичний підхід для кожухів металургійних агрегатів є умовним, оскільки втрата їх працездатності пов'язана і з іншими процесами.

Реально матеріал кожуху, перебуваючи в складному напруженому стані, піддається циклічним деформаціям. До цього призводять технологічні потреби: зміни режимів плавки, випуски чавуну, якщо вони супроводжуються падінням тиску і т.п. Відбуваються коливання величини внутрішнього тиску і температури. Внесок температури в напружений стан кожуху більш вагомий, тому циклічність також пов'язана зі зміною стану футеровки і системи охолодження. У матеріалі кожуху спостерігаються втомні явища, що призводять до появи і розвитку тріщин. Вважається, що кожух працює в області малоциклової втоми [101, 102]. Це справедливо, якщо відштовхуватися від середньодобової частоти циклозмін напружень, що дорівнює 5...6 цикл./добу, яка обумовлює необхідну довговічність в $2 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^4$ циклів за кампанію печі в 12...30 років. Критерії малоциклової втоми дозволяють встановити довговічність кожуху до появи тріщини величиною 1...2 мм. Для кожуху ДП середнього об'єму зі сталі Вст.3сп в місцях концентрації напружень (з їх коефіцієнтом 2,5...3,5) при стаціонарних напруженнях на рівні розрахункових опорів, що змінюються з досить високою асиметрією циклу (її коефіцієнт 0,82), довговічність склала $8 \cdot 10^4$ циклів. При порівняно ритмічному виробничому процесі, що створює частоту навантажень $f = 2$ цикл./добу, це становить 12 років [102]. Такий же результат (при інших параметрах навантаження) отримано для кожуху ДП об'ємом 2700 м^3 [101]. Інтенсифікація доменного процесу в сучасних умовах супроводжується, як правило, зростанням частоти циклозмін і розмахів напружень, в результаті чого необхідна довговічність, прогнозована за цими критеріями, може бути не забезпечена.

З кінця XX століття для розрахункової оцінки несучої здатності кожухів ДП почали використовувати моделі тріщиностійкості. Вони дозволяють застрахувати кожух від крихкого руйнування при наявності в ньому дефектів. Найбільш обґрунтована модель руйнування на основі енергетичних критеріїв [103]. Вона враховує жорсткість напружено-деформованого стану і придатна для будь-яких марок сталей. Однак, в ній розглядається випадок однократного навантаження,

залишаючи відкритим питання про спектр діючих навантажень, що не дає можливості оцінити надійність. Крім цього, висновок про працездатність кожуху здійснюється при порівнянні діючої температури і критичної температури в'язко-крихкого переходу, що не цілком звичайно для конструкцій, які піддаються циклічному навантаженню. Розрахунки живучості кожухів в детермінованому аспекті показали, що цей період, щонайменше, займає 30% від довговічності до появи тріщини [101].

Використання широко поширених моделей лінійної механіки руйнування для визначення критичних розмірів тріщин [31, 101] придатні в основному для кожухів, виготовлених зі сталі Вст.Зсп. Кожуха з сталей інших марок, які є високо тріщиностійкими, мають потребу у моделях нелінійної механіки руйнування, оскільки при цьому перед вершиною тріщини утворюється пластична зона значних розмірів.

Перші розрахунки надійності кожухів виконані у міцностній постановці на момент початку експлуатації у роботі [101]. Вид функції надійності (її зміна при експлуатації) для кожухів ДП не досліджено.

Для оцінки поточного стану кожуху розроблений метод мікропроб, при якому встановлюється ступінь деградації матеріалу [31] при цьому прогнозування технічного стану власне конструкції неможливо.

4.2 Алгоритм прогнозування функції розподілу довговічностей до появи тріщини в металі кожуху доменної печі

Алгоритм базується на трьох загальних принципах.

1. Функція розподілу довговічностей (ФРД) підкорюється логнормальному закону:

$$\lg N_p = \overline{\lg N} \pm u_p \cdot S_{\lg N}, \quad (4.1)$$

де u_p – квантиль нормального розподілення для ймовірності P ; $S_{lg N}$ – середньо-квадратичне відхилення (СКВ) логарифму довговічності; $\overline{lg l}$ – медіанний логарифм довговічності при нестационарному режимі навантаження,

2. Величина $S_{lg N}$ розраховується в залежності від СКВ зовнішнього $S_{y lg N}$ і внутрішнього $S_{a lg N}$ факторів: $S_{lg N} = \sqrt{S_{y lg N}^2 + S_{a lg N}^2}$. Складова СКВ від внутрішнього фактору $S_{a lg N}$ визначається по базовій моделі опору втомі у вигляді рівняння розпорошення довговічностей (3.14).

3. Довговічність N визначається для блока з типовою послідовністю напружень кожуху доменної печі: $N = (\sum c_i / N_i)^{-1}$. Такий блок складається із трьох рівнів i , які мають відносну тривалість c_i . Форма блоку залежить від параметрів перевантажувального рівня $c_{ol} = 0,1 \dots 0,4$. Тоді відносна тривалість основних рівнів буде $c_1 = c_2 = 0,5 \cdot (1 - c_{ol})$. Такий блок було використано для прогнозування розвитку тріщин (живучості) в кожуху шахти ДП [99, 100]. Напруження рівнів блоку визначено, як $\sigma_1 = 100$ МПа, $\sigma_2 = 140$ МПа, $\sigma_{ol1} = \sigma_{ol2} = 300$ МПа (шахта печі, 1 і 2 зона), $\sigma_{ol3} = 340$ МПа (зона фурм, 3 зона). За цими напруженнями визначалися по (3.4) амплітуди деформацій ε_{ai} . Для них вже за рівнянням $\varepsilon_{ai} - N$ -кривої (3.11) встановлювалася довговічність при стаціонарному навантаженні N_i . Для розрахунку кожуху ДП використано доволі просте рівняння:

$$lg N_i = \sqrt{\frac{[E_0]}{\varepsilon_{ai}}}. \quad (4.2)$$

Варто звернути увагу на особливості трактування ключового параметра блоку c_{ol} . Зазвичай, він розраховується як відношення кількості циклів n_{ol} дії напруження σ_{ol} до загальної кількості циклів наробітку n_Σ : $c_{ol} = n_{ol} / n_\Sigma$. В

такому випадку цей параметр набуває відносної тривалості дії напруження рівня σ_{ol} . Він може бути також виражений через відносний час дії, як $c_{olt} = t_{ol}/t_{\Sigma}$. Але для складних великогабаритних об'єктів (Complex Large Structures) запропоновано трактовку параметра c_{ol} у вигляді долі небезпечних місць z_{ol} , де діє напруження σ_{ol} , в загальному обсязі несучих елементів z_{Σ} . Стосовно кожухів ДП в якості z_{ol} використовується кількість непрацюючих холодильників. Тоді $c_{olz} = z_{ol}/z_{\Sigma}$, де у знаменнику знаходиться загальна кількість холодильників [91, 92]. Завдяки такій трактовці можна планувати не тільки періодичність, а ще й обсяг відновлювальних заходів. Традиційна трактовка c_{ol} як відносної тривалості зберігається на рівні розгляду надійності конкретного елемента кожуху. В загальному випадку $c_{ol} = c_{olt} + c_{olz}$.

Особливості алгоритму, що розробляється, пов'язані із застосуванням деформаційних критеріїв втоми.

Трирівневий блок, детерміновано заданий як $\sigma_i - c_i$, набуває статистичних властивостей шляхом призначення рівням напружень σ_i варіації v_{σ} . При розрахунках кожуху як єдиного цілого коефіцієнт варіації v_{σ} залежить від двох складових. Перша складова $v_H = 0,0005 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)$ враховує варіацію напружень основних рівнів по висоті шахти [100]. При по елементному розрахунку кожуху ця складова не враховується, а напруження основних рівнів різняться для кожного елемента. Для фурменної зони (3 зона), яку можна трактувати як окремий елемент, $v_H = 0$. Для розрахунку кожуху за властивостями 1 і 2 зони отримуємо $v_H = 0,12$.

Друга складова v_{ol} враховує варіативність форми блоку. Рекомендовано її призначати $v_{ol} = 0,1$ [100]. Тоді маємо:

$$v_{\sigma} = \sqrt{v_H^2 + v_{ol}^2}. \quad (4.3)$$

Варіативність блоку навантаження, що задається в деформаціях, є дещо більшою, ніж при задаванні блоку в напруженнях [86]. Враховуючи рівень

пружно-пластичних деформацій, що відповідають напруженням σ_{01} , можна розрахувати коефіцієнт варіації деформацій як:

$$v_{\varepsilon} = 1,1 \cdot v_{\sigma}. \quad (4.4)$$

Така залежність витікає з представлення рівняння кривої деформування (3.4) у вигляді:

$$\varepsilon_a = 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_{\max}}{E} + \frac{\sigma_{\max}}{5E} - \frac{310}{5E} \right). \quad (4.5)$$

Звідси зв'язок між СКВ амплітуди деформацій і максимальним напруженням здійснюється через $S_{\varepsilon} = S_{\sigma} \cdot \sqrt{2}$. Це дає можливість використання залежності (4.4). Тоді для 1 і 2 зон отримуємо $v_{\varepsilon} = 0,163$ та $v_{\varepsilon} = 0,11$ для 3 зони.

Зазвичай, імовірнісному розрахунку передують детермінований розрахунок довговічності (табл. 4.1, табл. 4.2). Для цього використана відома формула лінійного складання пошкоджень:

$$\bar{N} = \left(\sum \frac{c_i}{N_i} \right)^{-1}. \quad (4.6)$$

Далі для отриманої за цією формулою довговічності при нестационарному навантаженні $\bar{N}$ знаходимо еквівалентний рівень амплітуди деформації:

$$\varepsilon_{ae} = [E_0] / (\lg \bar{N})^2. \quad (4.7)$$

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

Таблиця 4.1 – Первісні дані до розрахунку кожуху ДП

Рівень блоку i	$\sigma_{\max}$, МПа	$\varepsilon_{ai} \cdot 10^3$	$\lg N_i$	N_i
1	100	0,25	8,39	$2,5 \cdot 10^8$
2	140	0,35	7,09	$1,2 \cdot 10^7$
ol 1, ol 2	300	0,75	4,84	$7,0 \cdot 10^4$
ol 3	340	0,85	4,55	$3,4 \cdot 10^4$

Таблиця 4.2 – Результати детермінованого розрахунку довговічності кожуху ДП

Зона кожуху	Число циклів	c_{ol}			
		0,1	0,2	0,3	0,4
1, 2 (шахта)	$\lg \bar{N}$	5,83	5,54	5,36	5,24
	$\bar{N}$	$6,8 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$
3 (фурми)	$\lg \bar{N}$	5,54	5,25	5,07	4,95
	$\bar{N}$	$3,5 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$0,9 \cdot 10^5$

$$S_{y \lg N} = \frac{S_{\varepsilon}}{m} = \frac{\varepsilon_{ae} \cdot v_{\varepsilon}}{m}. \quad (4.8)$$

Показник нахилу кривої втоми в точці з координатами ε_{ae} , $\lg N$ визначається як похідна рівняння (рис. 4.1):

$$m = \left. \frac{d\varepsilon}{d \lg N} \right|_{\varepsilon_{ae}}. \quad (4.9)$$

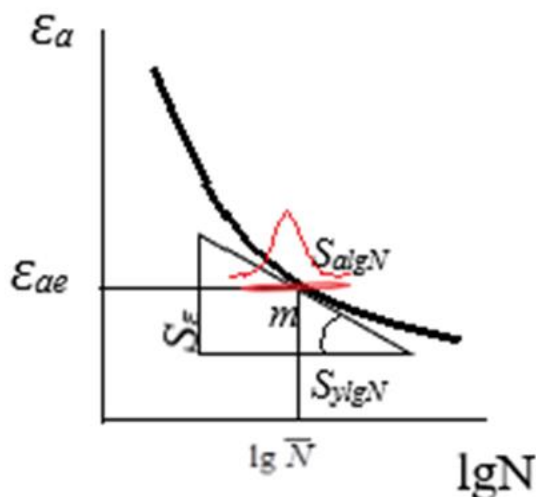


Рисунок 4.1 – До розрахунку СКВ довговічності при нестационарному навантаженні для деформаційної кривої втоми у напівлогарифмічних координатах

Зважаючи на форму рівняння (4.7), отримуємо:

$$m = \frac{2 \cdot \varepsilon_{ae}}{(\lg \bar{N})^3}. \quad (4.10)$$

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

$$S_{y \lg N} = \frac{1}{2} \cdot v_\varepsilon \div (\lg \bar{N})^3. \quad (4.11)$$

Медіанний логарифм довговічності $\overline{\lg N}$ в формулі (4.11) розраховується в залежності від СКВ довговічності при нестационарному навантаженні як:

$$\overline{\lg N} = \lg \bar{N} - 1,15 \cdot S_{\lg N}^2. \quad (4.12)$$

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 [100] 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 $S_{y \lg N_f}$:

$$S_{\lg N_f} = \sqrt{(v_f / 2,3)^2 + S_{\lg N}^2}. \quad (4.13)$$

Такий спосіб дає можливість користуватися при діагностуванні тільки середнім значенням частоти f . З урахуванням розсіювання наробітку відповідно (4.12) змінюється медіанний логарифм довговічності $\overline{\lg N_f}$. Це значення разом зі значенням $S_{\lg N_f}$ утворює ФРД $\lg N_{P(f)}$ в формі (4.1) з урахуванням варіації наробітку. Календарний середній $\bar{T}_{(f)}$ та гарантований $T_{P(f)}$ строки служби вираховуються за уніфікованими формулами:

$$\bar{T}_{(f)} = \frac{10^{\overline{\lg N_{(f)}}}}{f} \quad \text{або} \quad T_{P(f)} = \frac{10^{\lg N_{P(f)}}}{f}. \quad (4.14)$$

Результати розрахунків кожуху шахти (1 і 2 зони) як єдиної структури та фурменної зони (зона 3) як окремого елемента наведено в табл. 4.3. Гарантовані строки служби визначені для рівня безпеки $P = 98\%$.

Алгоритм пошуку ФРД за силовими моделями втоми $N(\sigma)$ дається для умов 1-ої і 2-ої зон кожуху при $c_{01} = 0,1$ (№1, табл. 4.3). Беручи до уваги показник нахилу кривої втоми $m = 10$ (рис. 3.15), залишив отриману варіацію напружень $v_\sigma = 0,163$, вираховуємо $S_{y \lg N} = 0,435 \cdot m \cdot v_\sigma = 0,7$. З моделі розсіювання довговічності для силових критеріїв (3.12) вираховуємо $S_{a \lg N} = 0,27 + 0,04 \cdot (\lg \bar{N} - 5,14) = 0,3$ для $\lg \bar{N} = 5,83$ (табл. 4.2). З порівняльного

аналізу (табл. 4.4) витікає, що гарантована довговічність T_{98} , яка отримана за силовими моделями, в 6,2 рази є меншою, аніж така ж довговічність для деформаційних моделей $N(\varepsilon)$.

Таблиця 4.3 – Строки служби кожуху ДП.

№ п/п	Зона	c_{ol}	$\varepsilon_{ae} \cdot 10^3$	$m \cdot 10^3$	$S_{y \lg N}$	$S_{a \lg N}$	$S_{\lg N}$	$\overline{\lg N}$	$\lg N_{98}$	T_{98} , років
1	1, 2	0,1	0,52	0,18	0,48	0,23	0,53	5,50	4,45	15,0
2	3		0,57	0,21	0,30	0,19	0,36	5,39	4,67	25,7
3	1, 2	0,2	0,57	0,21	0,49	0,19	0,53	5,22	4,17	8,1
4	3		0,64	0,24	0,29	0,16	0,33	5,12	4,46	16,0
5	1, 2	0,3	0,61	0,23	0,43	0,17	0,47	5,11	4,17	8,0
6	3		0,69	0,27	0,28	0,14	0,31	4,96	4,34	12,0
7	1, 2	0,4	0,64	0,24	0,43	0,16	0,46	5,00	4,08	6,5
8	3		0,72	0,29	0,27	0,13	0,30	4,85	4,25	9,7

Продовження табл. 4.3

№ п/п	Зона	$S_{\lg N_f}$	$\overline{\lg N_f}$	$\lg N_{98f}$	$\bar{T}_{(f)}$, років	T_{98f} , років
1	1, 2	0,55	5,48	4,38	165,6	13,2
2	3	0,39	5,36	4,58	125,6	20,9
3	1, 2	0,55	5,19	4,09	85,0	6,8
4	3	0,37	5,10	4,36	69,0	12,6
5	1, 2	0,50	5,08	4,08	65,9	6,6
6	3	0,35	4,93	4,23	46,7	9,4
7	1, 2	0,49	4,97	3,99	51,2	5,4
8	3	0,34	4,82	4,14	36,2	7,5

Така ситуація є наслідком менш крутого нахилу $N(\sigma)$ -кривої відносно нахилу $N(\varepsilon)$ -кривої. Це дає більшу чутливість довговічності к варіації напружень, аніж к варіації деформацій. В результаті цього збільшується складова СКВ від зовнішнього чинника $S_{y \lg N}$. Та ж причина дає зростання складової СКВ від внутрішнього чинника $S_{a \lg N}$. За рахунок більш широкої варіації прогнозної довговічності для силових моделей відбувається зменшення гарантованого строку служби, а так, і зменшення безпеки.

Таблиця 4.4 – Параметри прогнозування розсіяння строків служби.

Модель втоми	$S_{y \lg N}$	$S_{a \lg N}$	$S_{\lg N}$	$\overline{\lg N}$	$\lg N_{98}$	T_{98} , років
$N(\sigma)$	0,70	0,30	0,76	5,16	3,64	2,4
$N(\varepsilon)$	0,48	0,23	0,53	5,50	4,45	15,0

4.3 Результати прогнозування ресурсу кожуху ДП

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_{σ} 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_{σ} і c_{ol} . Для шахтної зони кожуху за цей рахунок гарантований ресурс може бути збільшеним з 5,4 років до 15 років і вище.

Наведені в табл. 4.3 розрахунки гарантованого ресурсу T_{98} можна розглядати як міжремонтний період для конструкцій, що не обслуговуються. При правильно поставленій системі технічного обслуговування ресурс може бути значно підвищеним. Це ілюструється впливом чинника перевантажувального рівня c_{ol} . Природньо, що його збільшення веде до зменшення ресурсу, як гарантованого, так і середнього (рис. 4.2). При зростанні c_{ol} від 0,1 до 0,4 строки служби зменшуються майже в 5 разів. При цьому інтенсивність падіння ресурсів зменшується для великих значень c_{ol} . На графіку функції гарантованих ресурсів $\lg N_{98}(c_{ol})$ навіть спостерігається «плато». Воно є наслідком різної інтенсивності падіння середнього ресурсу та зростання СКВ ресурсу при його збільшенні.

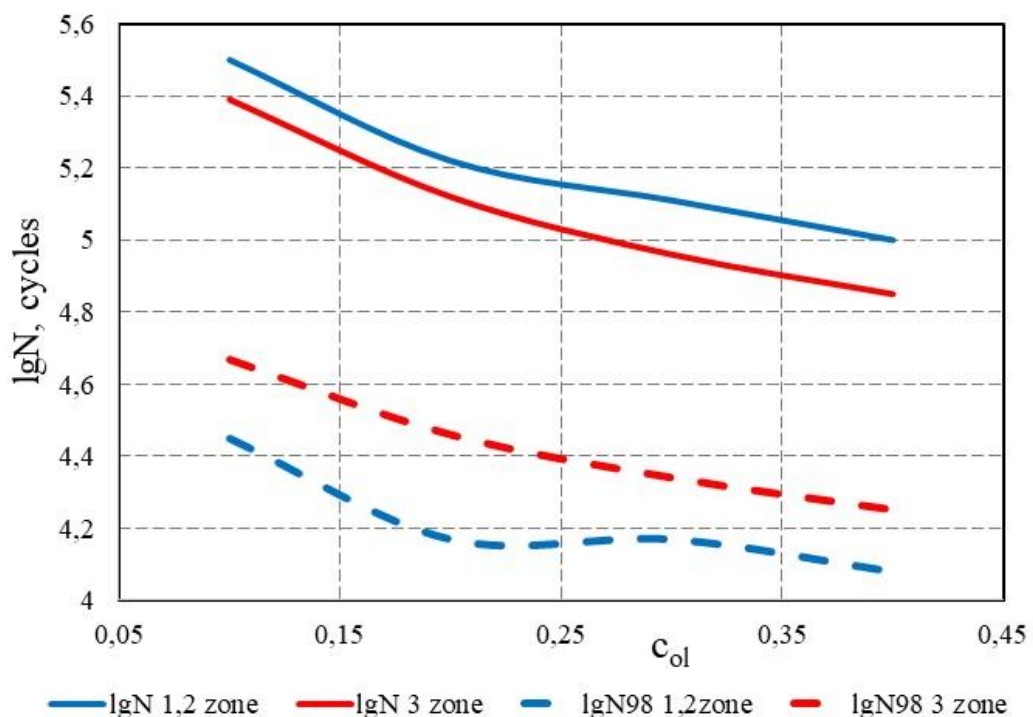


Рисунок 4.2 – Залежності медіанного логарифму довговічності ($\lg N$, суцільні криві) та логарифму довговічності при безвідмовності 98% ($\lg N_{98}$, пунктир) для кожуху шахти ДП (1, 2 зона) і для фурменної зони (3 зона)

Іще 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, ніж строки $\bar{T}_{(f)}$ (рис. 4.3 і рис. 4.4). На відміну від гарантованих ресурсів, середній ресурс кожуху в шахтній зоні на 20...25% є більшим, ніж в фурменій зоні. Це свідчить про впливовість 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

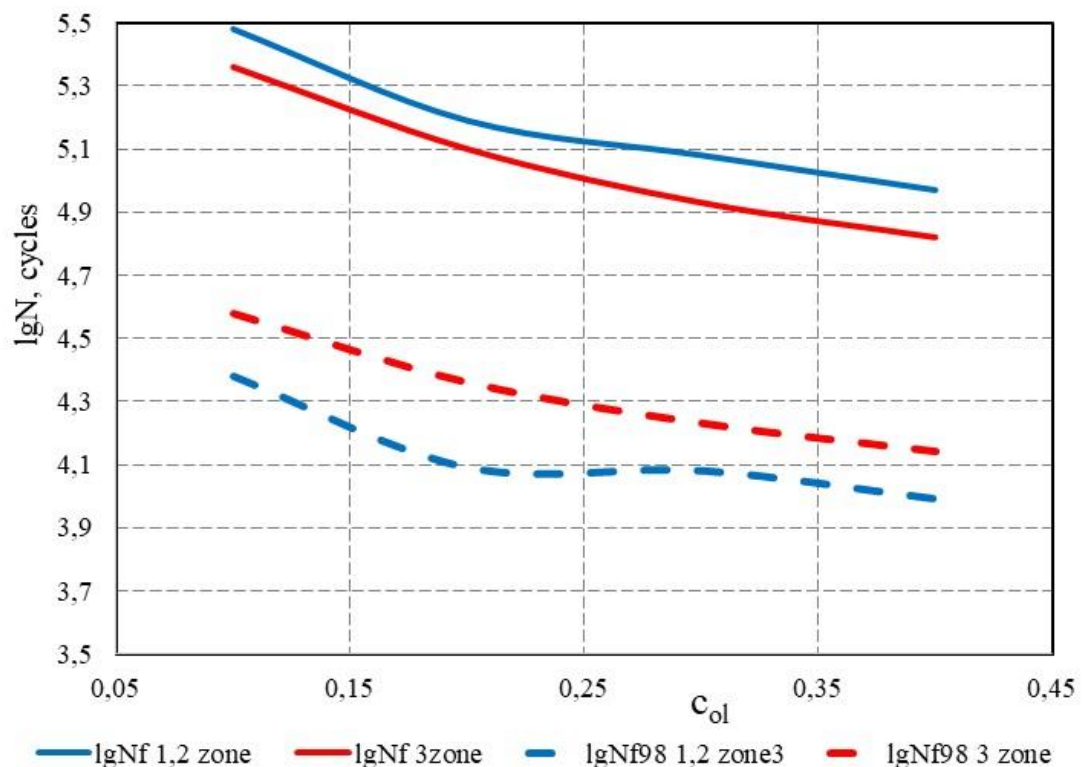


Рисунок 4.3 – Залежності медіанного логарифму довговічності ($\lg N_f$, суцільні криві) та логарифму довговічності при безвідмовності 98% ($\lg N_{98f}$, пунктир) для кожуху шахти ДП (1, 2 зона) і для фурменої зони (3 зона) з урахуванням варіації наробітку (частоти навантаження).

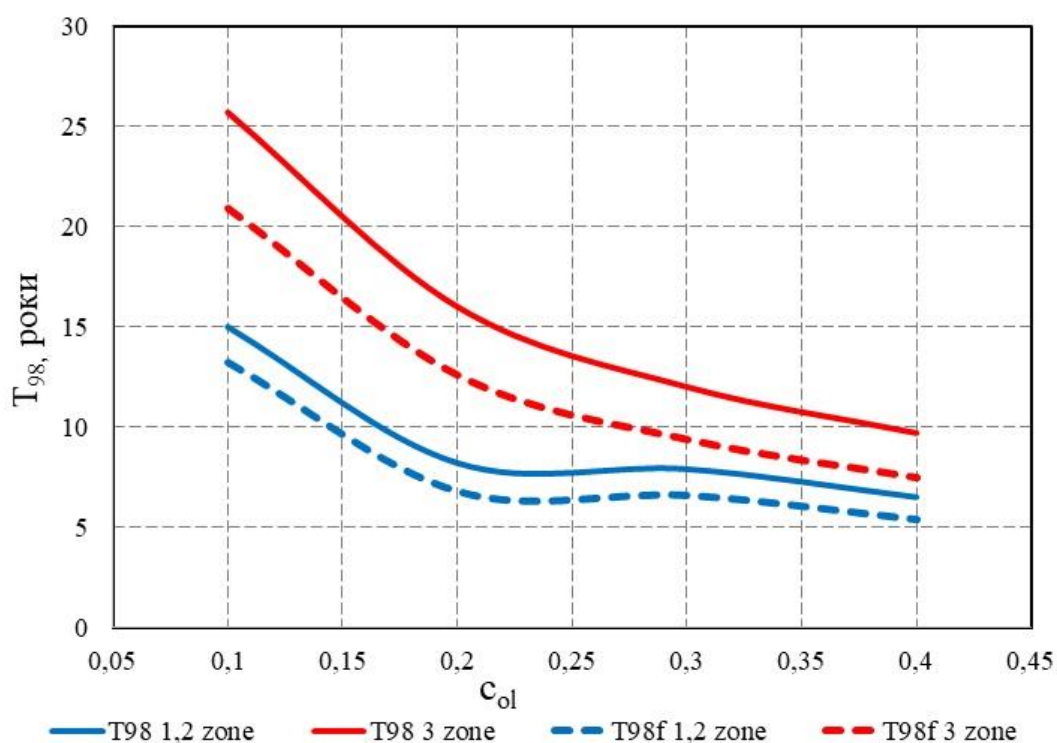


Рисунок 4.4 – Гарантовані ресурси зон кожуху ДП без урахування варіації наробітку (суцільні) і з урахуванням варіації наробітку (пунктир)

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.

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 в табл. 4.3., можна бачити, що майже завжди метал витримає 25-річну кампанію ДП. Окрім того, нетреба нехтувати періодом розвитку тріщини від поверхневої до наскрізної, коли відбувається розгерметизація ДП. Адже наведені в цьому дослідженні ресурси дійсні до появи тріщини.

Аналіз періоду живучості для кожуху зі сталі 09Г2С за умов навантаження таким же, як і в цих розрахунках, трирівневим блоком був проведений за умов поперечної поверхневої тріщини в роботах [100]. Показано, що гарантовані на 98% періоди живучості складають 6,5 місяців ($c_{ol} = 0,3$) і 10 місяців ($c_{ol} = 0,2$). Це є на порядок меншим, аніж розраховані для таких самих блоків навантаження

періоди до появи тріщини. На цій підставі можна рекомендувати обирати інтервал між інспектуванням кожуху за залежністю:

$$\delta = 1,1 \cdot T_{98}. \quad (4.15)$$

З цієї залежності витікає невелика доцільність регулярних візуальних оглядів кожуху. Деякі керівні документи рекомендують це робити двічі на місяць [79]. В цьому аспекті варто організувати моніторинг діагностичних параметрів, які впливають на параметр навантаження c_{01} .

4.4 Об'єднання показників надійності елементів крупних конструкцій (пoeлементний розрахунок безпеки кожуху ДП)

Одним із алгоритмів об'єднання є метода ресурсного індексу безпеки β_p (RSI-method). Його особливість полягає в тому, що спочатку обирається потрібний рівень надійності P , після чого знаходиться відповідна йому довговічність T_p . Традиційно для довговічності використовується логарифмічна шкала. Тому первісний (на початку експлуатації) індекс безпеки є $\beta_{0p} = \lg T_p$. RSI-method націлений на об'єднання індивідуальних індексів безпеки β_{pik} елементів або деградаційних процесів складної системи в загальний RSI $\beta_{p\Sigma}$.

Майже всі правила об'єднання показників надійності послідовних силових систем досить чутливо реагують на збільшення кількості елементів $i+k$. Як результат, загальна надійність системи надмірно зменшується у порівнянні з показниками надійності елементів [104]. Протилежна картина спостерігається для систем з паралельно працюючими елементами. Крупні конструкції складаються з великої кількості несучих елементів, які дублюють одне одного. Відбувається своєрідне резервування, що дає статичну невизначеність конструкції. Але водночас як силова система вона має ознаки послідовної структури. Важко

розробити її структурну схему, придатну для прогнозування надійності та безпеки. Тому крупну складну конструкцію розглядають як монооб'єкт E , на який діє процес D що пошкоджує (рис. 4.5, а). Варіація параметрів такого процесу v_D досить широка. Це призводить до зменшення гарантованого ресурсу T_P , а так і безпеки β_P . В цьому аспекті є перспективним розгляд монооб'єкту E як сукупність елементів E_i . На них діють процеси D_i , варіація параметрів яких $v_{Di} \ll v_D$ (рис. 4.5, б). Як наслідок, гарантовані ресурси елементів T_{Pi} прогножуються більшими, аніж загальний ресурс T_P . Тому індивідуальні $\beta_{Pi} > \beta_{P\Sigma}$.

Але подальше об'єднання індивідуальних показників надійності знов повертає до ситуації, коли надійність системи буде занадто зменшена відносно її елементів. Саме для запобігання такої ситуації і був розроблений RSI-method. Хоча в первісному варіанті він виступав альтернативою правилу множення надійностей, але подальші дослідження показали, що регулятор моделі у вигляді критичності u_{ik} дає змогу розповсюдити метод на системи будь-якої конфігурації. До того ж для систем з великою кількістю елементів розроблена модель $\beta_{P\Sigma LND}$, яка є модернізацією моделі $\beta_{P\Sigma} = \beta_{P\Sigma EXP}$ [104].

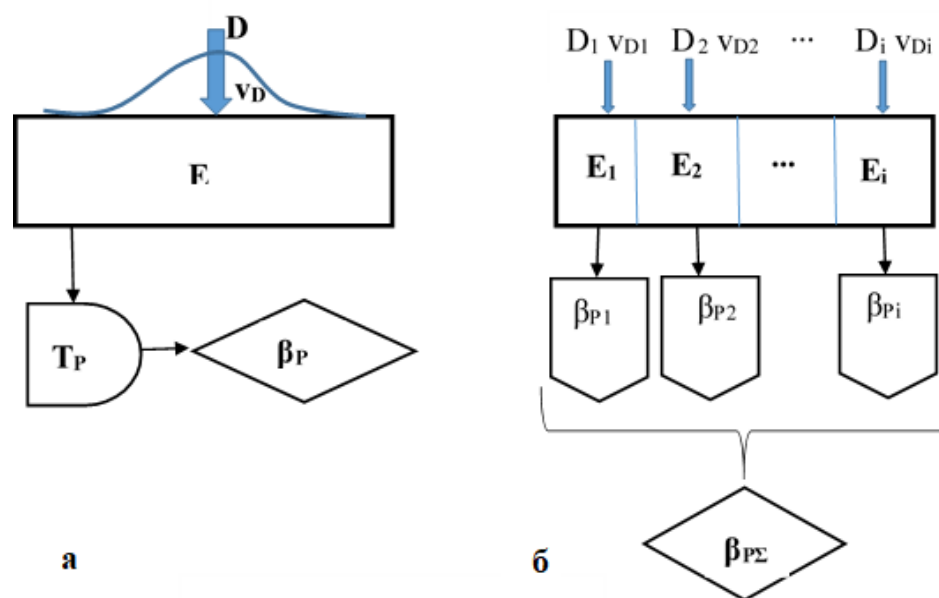


Рисунок 4.5 – Схеми алгоритмів визначення індексів безпеки крупної конструкції.

Проблематичність використання RSI-методи на практиці полягає в неоднозначності поділу монооб'єкту E на елементи E_i . Ситуація обтяжується мультифокальністю (багатьма джерелами руйнувань) пошкоджень крупних конструкцій. На погляд авторів, вказаний поділ раціонально здійснювати за принципом мінімального розміру елемента, що підлягає ремонту. Також заслуговує на увагу підхід, при якому кількість елементів E_i дорівнює кількості джерел (точок) руйнувань.

Розрахунок гарантованого ресурсу кожуху шахти ДП (зони 1, 2) як монооб'єкту, фактично, приведено в табл. 4.3 (непарні № строк). При цьому у якості варіації деградаційного процесу v_D виступає варіація рівня деформації v_ε . Задачею розділу є порівняння результатів прогнозування гарантованого ресурсу, як за наведеною моделлю, так і за моделями RSI.

Кожух шахти може бути розділений на елементи відповідно кількості холодильників ДП. Критичність їх відмови однакова і дорівнює одиниці. Щоб порівняти обидва підходи, необхідно трактувати параметр перевантажувального рівня ресурсним чином як $c_{olt} = n_{ol}/n_\Sigma$. Такий рівень може діяти тільки на ділянці кожуху, де не працює холодильник. Кількість зіпсованих холодильників z_{ol} . За таких передумов моделі RSI трансформуються наступним чином:

$$\beta_{P\Sigma} = \lg\left(\frac{10^{\beta_{ik}}}{z_{ol}}\right); \quad \beta_{P\Sigma LND} = \lg\left(\frac{10^{2\beta_{ik}}}{z_{ol}}\right). \quad (4.16)$$

Якщо відомим є параметр c_{olz} , то $z_{ol} = c_{olz} \cdot z_\Sigma$. Користуватися моделлю $\beta_{P\Sigma LND}$ у запропонованому вигляді можливо при дотриманні певної техніки розрахунку. Більш зручно застосовувати формулу взаємозалежності:

$$\beta_{P\Sigma LND} = \beta_{P\Sigma} + 1. \quad (4.17)$$

При визначенні індивідуальних RSI β_{ik} за алгоритмом пошуку ФРД для деформаційної моделі опору приймалось $v_H = 0$, а $c_{olt} = 0,1$. Тоді для поелементного розрахунку $c_{ol} = 0,1 + (z_{ol}/z_\Sigma)$. З результатів розрахунків первісного індексу безпеки (рис. 4.6) можна зробити такі висновки.

Прогнозована гарантована довговічність або первісний RSI β_{0Pi} для окремого елемента крупної конструкції є більшими, аніж такі, що розраховані для всієї конструкції $\beta_{0Pi\Sigma}$. Це відбувається за рахунок зменшення варіативності навантаження елемента v_{Di} у порівнянні зі всією конструкцією v_D . Але коли кількість пошкоджених елементів зростає (понад 15% холодильників – в наявній ситуації) величина $\beta_{r\Sigma EXP}$ різко зменшується (β_{EXP} , рис. 4.6). Гарантована довговічність при поелементному розрахунку стає меншою, аніж при монооб'єктному (LNF_Σ , рис. 4.6). Це є наслідком ефекту об'єднання елементів з експонентною функцією надійності. Цей ефект нівелюється, якщо надійність елементів змінюється за законом Ліндлі (β_{LND} , рис. 4.6).

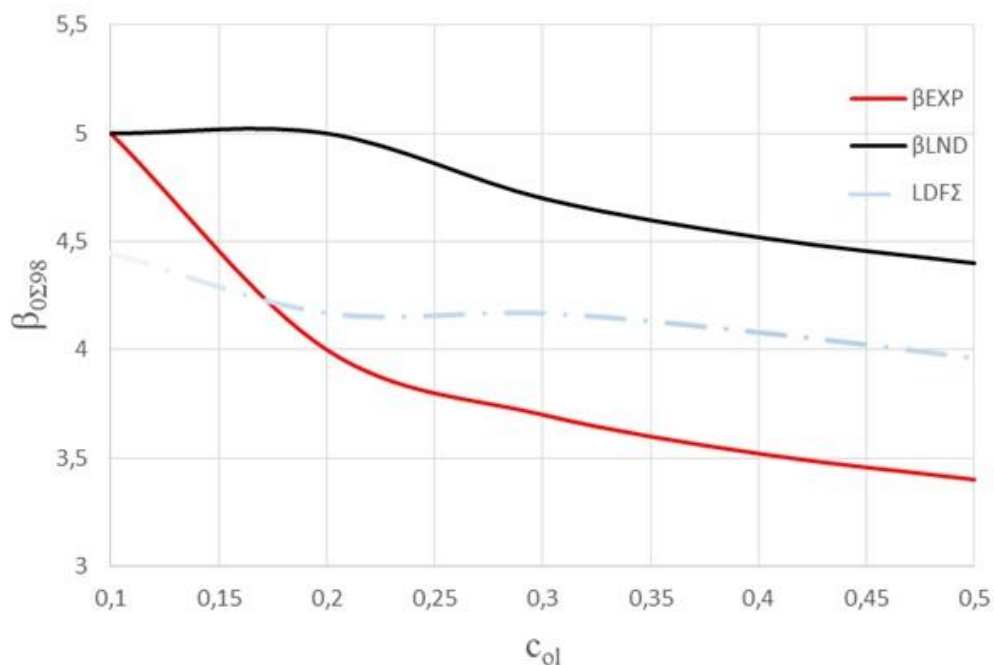


Рисунок 4.6 – Залежності початкового RSI кожуху шахти ДП від параметру блока навантаження c_{ol} які отримані поелементним розрахунком за формулами (4.16)

(β_{EXP}), (β_{LND}) та розрахунком по ФРД кожуху як монооб'єкту (LNF_Σ)

Можна рекомендувати визначати верхній рівень гарантованої довговічності системи елементів за моделлю $\beta_{P\Sigma LND}$ (4.17), а нижній рівень – за моделлю $\beta_{P\Sigma EXP}$ (4.16). Або брати RSI як середній рівень, тобто: $\beta_{P\Sigma} = \beta_{P\Sigma EXP} + 0,5$.

Значення критичності елемента u_i може суттєво впливати на рівень індексу безпеки системи $\beta_{P\Sigma}$. В силових послідовних системах критичність елементів $u_{is} \rightarrow 1$. Для дубльованих елементів $u_{ip} < 1$, тобто $u_{ip} \ll u_{is}$. За рахунок цього індекс безпеки послідовних систем буде значно меншим, чим резервованих систем. Таким чином, RSI-метода інваріантна до систем різної конфігурації.

Модель $\beta_{P\Sigma LND}$, яка є рекомендованою для верхньої оцінки надійності систем з великою кількістю елементів, в ризик-аналізі має за аналог криву несприйняття ризику Фармера. Утворюється ситуація, коли об'єкт не сприймає ризик на очікуваному рівні, демонструючи більш оптимістичний сценарій.

4.5 Висновки

1. В роботі зроблена спроба вирішити проблему багато джерельного пошкодження великих конструкцій шляхом придання параметру блока навантаження c_i змісту розмірної (площі, об'єму, маси) долі конструкції c_{olz} , яка потрапила під дію понад розрахункового напруження (перевантаження). Така процедура є можливою на підставі того, що параметр блоку c_{olz} , нарівні з параметром блоку c_{olt} , визначає рівень значимості відмови u_i , який присутній в методі ресурсного індексу безпеки RSI.

2. Прогнозування довговічності кожуху в шахтній зоні за силовими критеріями призводить до зменшення середнього строку служби в 2,2 рази у порівнянні з прогнозуванням за деформаційними критеріями. Для гарантованих строків служби таке відношення збільшується до 6,2 разів на користь деформаційних моделей. Отже, деформаційні моделі зменшують консерватизм при прогнозуванні ресурсу і сприяють збільшенню безпеки експлуатації.

3. Розроблено алгоритм прогнозування функції розподілу довговічностей до появи тріщини в металі кожуху ДП. В ньому вперше винайдено рішення для СКВ довговічності при нестационарному навантаженні для деформаційної кривої втоми у напівлогарифмічних координатах.

4. Умови експлуатації металу кожуху в фурменій зоні є жорсткішими, аніж в зоні шахти. Тому в цій зоні є більшим пошкодження металу. Це 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. Така ситуація 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.

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'єкту 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) інтервалу.

7. В наявному аналізі режим навантаження елементів кожуха ДП було прийнято на підставі отриманої для сталі 09Г2С моделі циклічного зміцнення. По фактичним службовим властивостям сталі, що відпрацювала у кожусі ДП повну кампанію, були з'ясовані максимальні рівні напружень, що виникали під час експлуатації (340 МПа – зона фурм, 300 МПа – зона шахти). Ці значення напружень використано у якості перевантажувальних рівнів розрахункових блоків. Значення напружень основних рівнів обрано за рекомендаціями [99, 100] у 2,5 рази меншими, що становить 120 МПа. Напруження такого рівня, зазвичай, виникають в період задування ДП, а у подальшому відбувається їх стабілізація на рівні меншому ніж 100 МПа [105, 106]. Тому фактичний режим навантаження є менш пошкоджуючим. В такому випадку є підстави вважати, що фактичний строк служби кожухів має бути більшим від прогнозованого.

8. 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.

9. Основні результати розділу наведено у роботах [96, 107]

РОЗДІЛ 5

РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ДІАГНОСТУВАННЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ОБСЛУГОВУВАННЮ ОБЛАДНАННЯ ДОМЕННОГО КОМПЛЕКСУ

5.1 Змішана стратегія експлуатації для механічного обладнання доменного цеху

Стратегія використання технологічного обладнання промислового виробництва диктує використовувати стратегію технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) механічних систем. У сукупності зазначені стратегії утворюють стратегію експлуатації обладнання. Відомі три стратегії використання обладнання: до нормативного ресурсу, до перед відмовного стану, до відмови. Для кожної з них є краща стратегія ТОіР [108].

Оскільки машини, механізми та конструкції доменного комплексу мають різну значимість за наслідками відмови, відносяться до різних амортизаційних груп, маючи неоднакову вартість, цілком обґрунтовано, що до механічного обладнання необхідний диференційований підхід в аспекті його експлуатаційних стратегій. В результаті утворюється змішана її форма. Традиційно застосовувана в металургії система планово-попереджувальних ремонтів (ППР), відповідна до твердого використання обладнання за нормативом економічно не вигідна в сучасних умовах виробництва. На противагу їй система обслуговування за технічним станом дозволяє скоротити витрати на ТОіР, підвищити коефіцієнт готовності обладнання та збільшити ступінь його вироблення, доводячи до перед відмовного стану. Якщо перші два ефекти очевидні на підприємстві, то останній менш помітний механослужбою. Він має більш глобальний характер і менеджмент підприємства, як правило, не пов'язує зростання або стабільність виробництва, а також економію капіталовкладень на оновлення обладнання з якістю обслуговування і ремонту. Більш того, фізичний знос устаткування став характерною рисою української металургії, але при цьому ніхто не ставить в

заслугу ремонтного господарства вміння підтримувати працездатність обладнання в подібних умовах.

Слідуючи цілям, поставленим перед механослужбою, її практикуючі представники логічно прийшли до змішаних експлуатаційних стратегій у використанні і ТОіР устаткування. Оскільки така тенденція проявилася на тлі скорочення обсягів виробництва і засобів, що виділяються на ТОіР, то поява багатоскладної, змішаної експлуатаційної стратегії виглядає вимушено – стихійно [58]. Як би там не було, але система ТОіР буде оптимальною, якщо вона забезпечує мінімізацію витрат на своє функціонування [58, 109]. При цьому важливо, щоб ці витрати враховували збитки від аварій, які не часто трапляються, але мають вагомий внесок. Тому мінімізація ризику для об'єктів типу ДП сприяє і зменшенню витрат на експлуатацію.

Даний розділ має на меті продемонструвати можливості і ефективність змішаних експлуатаційних стратегій в сучасних умовах виробництва чавуну, показати основні кроки для її впровадження.

Більше 10 років тому було розпочато роботу зі збору статистичних даних про безвідмовне фактичне напрацювання годин устаткування. Попередньо була проведена, так звана, процедура паспортизації обладнання, в результаті чого були встановлені критичні по відмовах і зосередження трудовитрат на ТОіР об'єкти (рис. 5.1). Були сформовані основні принципи проведення ППР та капітальних ремонтів (КР) – заміна обладнання з напрацювання годин або по його фактичному стану, що є основою для подальшого складання графіків обслуговування, ППР і КР.

При доступності проведення огляду обладнання визначається фактичне його стан, в іншому випадку планується заміна агрегатів, вузлів, деталей по їх напрацювання. Використовувана методика дозволяє мінімізувати простой доменних печей через відмову обладнання, збільшити міжремонтний термін його експлуатації.

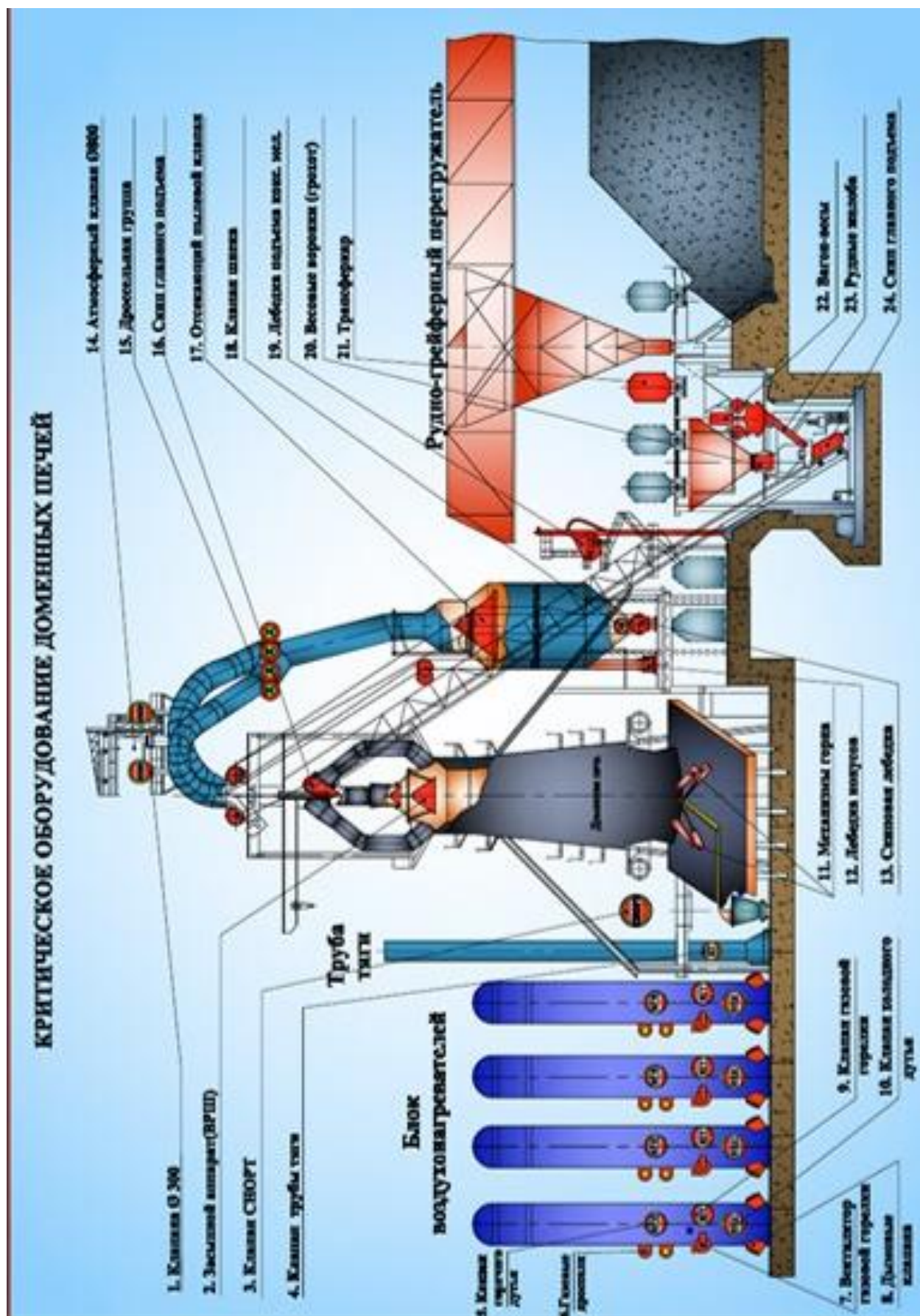


Рисунок 5.1 – Схема розгашування критичного обладнання доменного цеху ПрАТ «ДМЗ»

Рішення про терміни і обсяги ремонтів приймається за допомогою процедури категоризації обладнання, при якій, фактично, проводиться оцінка технічного стану. Це проводиться при поєднанні методів з арсеналу всіх відомих стратегій ТОiP. Беруться до уваги такі показники технічного стану.

Регламентна стратегія по терміну служби.

Вік обладнання щодо його нормативного терміну експлуатації. Оцінюється час роботи обладнання з моменту введення в експлуатацію або з моменту відновлення його первісного стану в результаті капітального ремонту.

Ступінь амортизації обладнання на поточний момент.

Регламентна стратегія по напрацюванню.

Об'єм виробництва. Оцінюється фактичний обсяг виробництва, досягнутий на обладнанні за період між КР в порівнянні з плановим показником відповідно до технічної документації.

Режим експлуатації обладнання та дотримання рекомендованих параметрів експлуатації. Оцінюється знос устаткування внаслідок більш інтенсивного режиму експлуатації та недотримання початкових параметрів експлуатації, встановлених в технічній документації (наприклад, внаслідок експлуатації при підвищеному тиску, на більш високій швидкості і т.п.) Чим частіше експлуатаційний персонал технологічних цехів порушує рекомендовані параметри, тим невизначено оцінку технічного стану.

Дотримання графіку ремонтів і технічного обслуговування обладнання. Оцінюється ефект, який чинить на обладнання практика «відкладених» ремонтних робіт і збільшення міжремонтних періодів. Під ремонтними роботами маються на увазі як роботи з технічного обслуговування (огляд, змащення і т.п.), так і більш масштабні роботи по ППР.

Стратегія ТОiP за технічним станом з контролем діагностичних параметрів.

Стан обладнання згідно з результатами оглядів, які здійснюються виробником обладнання. На основі звітів виробника за останні 5 років або з моменту останнього капітального ремонту оцінюється стан обладнання.

Стан обладнання згідно з результатами оглядів (діагностики), що здійснюються механослужбою.

Стратегія ТОіР за технічним станом з контролем показників надійності.

Частота відмов обладнання. Оцінюється та спостерігається за останній рік частота відмов обладнання.

Надійність обладнання та його стійкість до поломок. Оцінюється надійність обладнання, обумовлена його проектними властивостями.

Стратегія ТОіР за технічним станом з контролем показників безпеки.

Наслідки відмови обладнання (скорочення номенклатури продукції, що випускається, її якості, зниження продуктивності технологічної лінії або її повна зупинка). Оцінюються наслідки поломки обладнання, включаючи вплив поломки на допоміжне обладнання. Враховуються такі чинники, як ступінь впливу на всю виробничу лінію, можливість випуску продукції в меншому обсязі або в іншій якості.

Вплив відмови обладнання на безпеку праці та\або стан навколишнього середовища.

Вплив аварійної відмови обладнання на витрати, пов'язані з виникненням додаткового обсягу робіт. Оцінюються витрати на ремонт обладнання, що відмовило в порівнянні з альтернативними витратами, пов'язаними з проведенням планово-попереджувального ремонту. Різниця у витратах між ремонтом щодо відмови і планово-попереджувальним ремонтом формується за рахунок вартості запчастин (внаслідок їх позапланової закупівлі), втрат у виробництві, залучення додаткових ресурсів ремонтного персоналу [110].

Можливість заміни обладнання, наявність альтернатив. Оцінюється наявність резервного або аналогічного обладнання, здатного замінити дане обладнання і підтримати виробництво в разі його відмови.

Середня тривалість ремонту (час простою) в результаті аварійної відмови. Оцінюється час простою обладнання, пов'язаного з виконанням ремонтних робіт, включаючи час на зупинку і запуск виробництва і власне час ремонту.

Вплив аварійної відмови на потужність виробничої лінії. Оцінюється скорочення виробничої потужності всієї лінії внаслідок поломки ключової функціональної деталі обладнання.

Зберігання готової продукції та незавершеного виробництва і управління оборотним капіталом. Оцінюється вплив відмови обладнання на зростання товарних запасів і незавершеного виробництва. Важливість даного чинника обумовлена обмеженою площею складських приміщень.

Складність виявлення першопричини відмови обладнання (помилкова симптоматика, помилки при визначенні пошкоджених деталей). Оцінюється ступінь складності як визначення причини поломки, так і самого ремонту. Оцінка відображає складність механізмів і систем самого обладнання. Також при оцінці враховується наявність інструкції по експлуатації, технічної документації, зразків і накопиченої бази знань про відмови даного виду обладнання.

Якість і довговічність запчастин і термін їх поставки. Оцінюються ризики, пов'язані з доступністю запчастин (на складах і на ринку), при цьому враховується термін їх служби і якість.

Залежність від зовнішніх джерел, знань, навичок і досвіду. Оцінюються ризики, пов'язані необхідністю залучення третіх осіб для виявлення причин відмови обладнання і його ремонту.

Складність визначення стану обладнання. Оцінюється можливість проаналізувати і оцінити стан обладнання.

Як приклади використання змішаних стратегій можна констатувати такі факти. Регламентна стратегія щодо терміну служби застосовується для:

- вагон-ваги в – поточний ремонт проводиться через кожні 2...3 тижні з ревізією основних вузлів і заміною зношених деталей;
- охолодження доменної печі (холодильні плити) – виконується згідно графіка очищення холодильних плит доменних печей від накипу і сміття;
- клапана гарячого дуття – заміна проводиться через 4...5 років експлуатації;
- засипної апарат (ЗА), розподільник шихти що обертається (РШО) – їх заміна проводиться 1 раз в 2...2,4 роки;

Невід’ємною частиною успішної експлуатації обладнання завантаження ДП є своєчасне проведення його оглядів і дотримання технологічного режиму роботи. На заключній частині періоду експлуатації ЗА і РШО можливий перехід до обслуговування за технічним станом. Тому їх стійкість на ДП №3 ПрАТ «ДМЗ» в 2015 році складе 3,0 року.

Регламентна стратегія з напрацювання застосовується, наприклад, для механізмів гармати для закриття чавунної льотки: редуктор повороту – 900...1100 випусків, механізм витискання – 1100...1300 випусків чавуну.

За фактичним технічним станом обслуговуються відсічні клапани газового пальника (заміна проводиться без зупинки печі), машина для розкриття чавунної льотки.

Як показники роботи механослужби в доменному виробництві традиційно використовують відносну кількість часу простою і часу тихих ходів ДП. Їх мінімізація відповідає максимізації коефіцієнта готовності. Для металургійних агрегатів, що працюють принципово в безперервному режимі, річний коефіцієнт готовності повинен бути досить близький до 100%. Тому використовують показники ефективності ТОіР, які більш інформативні. Їх мінімізація відповідає скороченню питомих витрат на ТОіР, що свідчить про оптимальність вибраних експлуатаційних стратегій.

З наведених показників роботи доменних цехів (ДЦ) (табл. 5.1) видно, що при змішаній системі ТОіР (ПрАТ «ДМЗ») показники простоїв і тихих ходів майже в 3 рази нижче, ніж в середньому по Україні (без аномального 2014 року) і відповідають світовій практиці. Ефективність розробленої системи ТОіР також видно з динаміки зміни показників (табл. 5.2): від моменту її впровадження та освоєння, відносний час простоїв і тихих ходів знизився більш, ніж в 2 рази.

Окремо по ДП ПрАТ «ДМЗ» відзначені наступні результати:

- ДП №2 (об’єм 700 м^3) – КР I-го розряду проведений в 2008 році, згідно з ТОіР. КР 2-го розряду необхідно проводити через 5...6 років. На підставі фактичного стану устаткування і агрегатів КР II-го розряду планується на 2018 рік (через 10 років).

- ДП №3 (об'єм 1033 м³) – КР I-го розряду проведений в 2004 році, згідно з ТОіР. КР 2-го розряду необхідно проводити через 7...8 років. На підставі фактичного стану устаткування і агрегатів КР II-го розряду планувався на 2017 рік (через 13 років). На справді його провели влітку 2018 року (дивись наступний параграф).

Таблиця 5.1 – Тривалість простоїв і тихих ходів доменних цехів України у 2014 р.

Параметри	ДМЗ	Єнакіївський МЗ	МК Азовсталь	МЗ Донецьксталь	МК ім. Ілліча	Алчевський МК	Арселор Миттал	ДМК	МК Запоріжсталь
Кількість печей/ працюючих	3/2	3/3	5/5	2/2	5/5	4/3	5/3	4/3	4/4
Простої, %	0,46	5,3	2,03	8,74	13,64	2,27	9,36	2,6	1,55
Тихий хід, %	0,17	2,06	3,24	0,47	20,4	0,58	0,07	1,8	0,89

Таблиця 5.2 – Показники роботи доменних цехів України за 2005-2014 роки.

Параметри	2005	2007	2009	2010	2012	2013	2014
Простої по ДЦ ПрАТ «ДМЗ», %	1,11	1,06	0,74	1,51	0,84	0,74	0,46
Простої по ДЦ України, %	2,69	3,34	3,15	2,65	2,4	2,1	5,19
Тихий хід ДЦ ПрАТ «ДМЗ», %	0,36	0,32	0,38	0,43	0,20	0,68	0,17
Тихий хід по ДЦ України, %	0,77	0,88	0,84	1,07	1,35	1,50	4,45

5.2 Деякі особливості капітального ремонту ДП при змішаній стратегії технічного обслуговування

Устаткування доменного комплексу кожного виробничого підприємства є в тій чи іншій мірі унікальним. Разом з тим, є типові його компонування, загальні принципи функціонування, що дає підставу для розробки загальних правил експлуатації і ТОіР. Зміст відновлювальних робіт та їх терміни регламентуються, як правило, системою ППР. Положення про ППР розробляються і затверджуються галузевими міністерствами і відомствами і є обов'язковими для виконання підприємствами галузі. Організація ремонтних робіт в доменних цехах регламентується Положенням, затвердженим в 1972 році [111].

За цей час в ремонтних службах підприємств чорної металургії відбулися кардинальні зміни. Зокрема, ремонтники відійшли від превентивно-нормативної стратегії ТОіР, до якої відноситься система ППР, в сторону стратегії обслуговування за технічним станом. Зупинка ДП на КР I, II і III розрядів визначається їх технічним станом. За даними статистики основною причиною зупинок ДП на КР I і II розрядів є знос футеровки горна, поду, заплічок, розпару, шахти і колошника [112]. Ці елементи стратегії обслуговування за технічним станом були закладені ще системою ППР. Сучасні версії ППР припускають можливість проведення відновлювальних заходів, властивим проактивним експлуатаційним стратегіям. Зокрема, передбачені процедури діагностування обладнання технічними засобами [113]. Отже, в металургії ніколи строго не дотримувалися системи ППР. Особливо цей висновок підкреслюють після аварійні ремонти, що відбуваються на тлі ППР. Тобто, спостерігається поєднання превентивної та коректуючо-реагуючих стратегій.

З метою зниження витрат на ТОіР застосовуються різні варіанти змішаних стратегій. Зокрема, в ДЦ ПрАТ «ДМЗ» розроблена і використовується змішана стратегія ТОіР, в якій, фактично, поєднуються елементи превентивної, проактивної стратегії та стратегії коректування. Для цього обладнання розділене на категорії, які відносять його до певної стратегії [59]. Планування ТОіР при

такому підході здійснюється не на рівні цеху (комплексу), а на рівні категорії. Тому капітальний ремонт ДП при працюючому ДЦ повинен відповідати певним умовам. Розгляду особливостей практичного проведення ремонтів ДП малого об'єму присвячується дана робота.

Для проведення КР I-го і II-го розрядів необхідне видування ДП, при якій робочий простір печі звільняється від шихтових матеріалів шляхом їх проплавки, газифікації та подальшого допалювання залишків коксу при подачі повітря через фурми, без завантаження нових порцій шихти для коригування температурно-теплового рівня у звільненому робочому просторі печі. Всі роботи по зупинкам ДП з частковою або повною їх видувкою узгоджуються з правилами безпеки [114].

З 20 червня по 30 липня 2018 року, в ДЦ підприємства ПрАТ «ДМЗ» на ДП №3 проводився 40-добовий КР II-го розряду. Раніше, підрядною організацією було проведено детальне технічне обстеження та оцінка технічного стану несучих конструкцій ДП №3.

Метою проведених обстежень було визначення дійсного технічного стану металоконструкцій колон горна, опорного кільця, колон шахти ДП №3, їх відповідність вимогам надійності і безпечної експлуатації, а також надання рекомендацій щодо їх подальшої експлуатації, включаючи робочу документацію на посилення (заміну) окремих конструкцій з урахуванням проведення капітального ремонту. В ході КР передбачалося провести заміну кожуха шахти ДП №3 з позначки +18,250 метрів до позначки +31,400 метрів, а також виконати демонтаж кільцевих майданчиків і виготовити нові майданчики з опертям на колони шахти печі.

Загальний аналіз дефектів і пошкоджень, а також оцінка результатів перевірочних розрахунків проведених спеціалізованою організацією, дозволили визначити дійсний технічний стан металоконструкцій колон горна, опорного кільця, колон шахти печі ДП №3 за несучою здатністю і експлуатаційними властивостями, які відносяться до категорії – непридатні для нормальної

експлуатації. На рис. 5.2 показано фактичний стан внутрішніх поверхонь охолоджувальної і неохолоджуваної зон шахти ДП-3.

Основними дефектами, які знижують довговічність металоконструкцій колон горна, опорного кільця і колон шахти печі є:

- постійне зволоження стану їх поверхні (замокання) через течі в системі водяного охолодження;
- повне руйнування антикорозійного покриття металоконструкцій, внаслідок тривалого впливу течі в системі водяного охолодження і агресивності робочого середовища;
- відсутність проведення комплексу належних заходів щодо захисту конструкцій в процесі експлуатації.



Рисунок 5.2 – Фактичний стан внутрішніх поверхонь охолоджувальної і неохолоджуваної зон шахти печі ДП-3

В процесі проведення КР II-го розряду, до проведення демонтажу кожуха шахти доменної печі був проведений наступний комплекс технічних заходів:

1. Зроблено посилення колон шахти печі, опорного стола над колоною шахти і копрових рам.
2. Зроблено посилення головних балок колошникового майданчика.
3. Виготовлено та встановлено тимчасові вертикальні зв'язки по колонах шахти печі.
4. Виконано тимчасове обпирання газопроводів доменної печі на колошниковий майданчик і копрові рами.
5. Виготовлено та встановлено тимчасові підвіски верху кожуха ДП на колони шахти печі.

В процесі проведення КР II-го розряду, після монтажу кожуха шахти доменної печі виконаний наступний комплекс заходів:

1. Проведена розв'язка колон шахти печі на позначці +24,500 м на кожух шахти.
2. Демонтовані тимчасові опори під газопровід ДП і видалені тимчасові підвіски кожуха печі.
3. Проведене очищення всіх металоконструкцій від пилу, сміття та іржі, а також відновлено антикорозійне покриття на всій площі металоконструкцій.

Останній КР (ремонт I-го розряду) на ДП №3 ПрАТ «ДМЗ» проводився в 2004 році. У процесі його проведення була частково замінена металоконструкція шахти печі вище мораторного кільця, з приведенням в проектне положення підняттям верхньої будови печі.

За 14 років безперервної експлуатації, внаслідок руйнування вогнетривкої футеровки, по шахті печі стався значний знос елементів кожуха печі з 10-го по 18-тий пояси. Крім того, в неохолоджуваній зоні печі стався повний сход вогнетривкої кладки, а в охолоджувальній зоні печі – з 6-ти рядів проектних холодильників, до зупинки ДП №3 на КР II-го розряду, в робочому стані фактично перебувало тільки 2 ряди холодильників – 1-й і 2-й ряди холодильників знизу від мораторного кільця.

Перед зупинкою ДП №3 на КР, не дивлячись на заходи, що вживаються, зокрема проведення врізання в шахту печі охолоджуваних елементів з габаритними розмірами 500×500 мм і здійснення зовнішнього охолодження кожуха печі шляхом постійного водяного зрошення, ДП мала значний знос по конструкції поясів (спучування і утворення тріщин довжиною до 3-х метрів).

Необхідно відзначити, що як наслідок виникнення такої нештатної ситуації на ДП №3 мали місце неодноразові технологічні простої.

У процесі КР II-го розряду була запланована заміна наступних конструктивних елементів по шахті ДП:

- повна заміна поясів 13-14-15-16-17-18 по 8 листів в кожному поясі (листова броня товщиною 30 мм);
- в поясі Г-12 заміна 4-х броньових листів;
- в поясі Г-14 заміна 1-го броньового листа.

Виготовлення елементів кожуха печі ДП №3, в результаті конкурсних процедур (тендера) виконувалося Краматорським заводом важкого верстатобудування. В процесі виготовлення даних металоконструкцій, проводилася контрольна збірка по поясах, з комісійним контролем розмірів елементів, які монтуються.

Перед зупинкою печі на капітальний ремонт, її металоконструкції були обстежені проектною організацією «ХарківГіпромез», та видані рекомендацій по їх реконструкції (посиленню).

Крім того, даною організацією була опрацьована система монтажу переобпирання додаткових металоконструкцій, яка використана для переобпирання верхньої будови печі, з метою отримання можливості повного демонтажу старих поясів, які є несучими металевими конструкціями газовідводів печі.

Підрядною організацією розроблено проект організації робіт, який передбачає складання замінних поясів шахти печі на окремому майданчику і їх подальше «укрупнення» в монтажні елементи (рис. 5.3), з повторним контролем розмірів монтованих поясів.

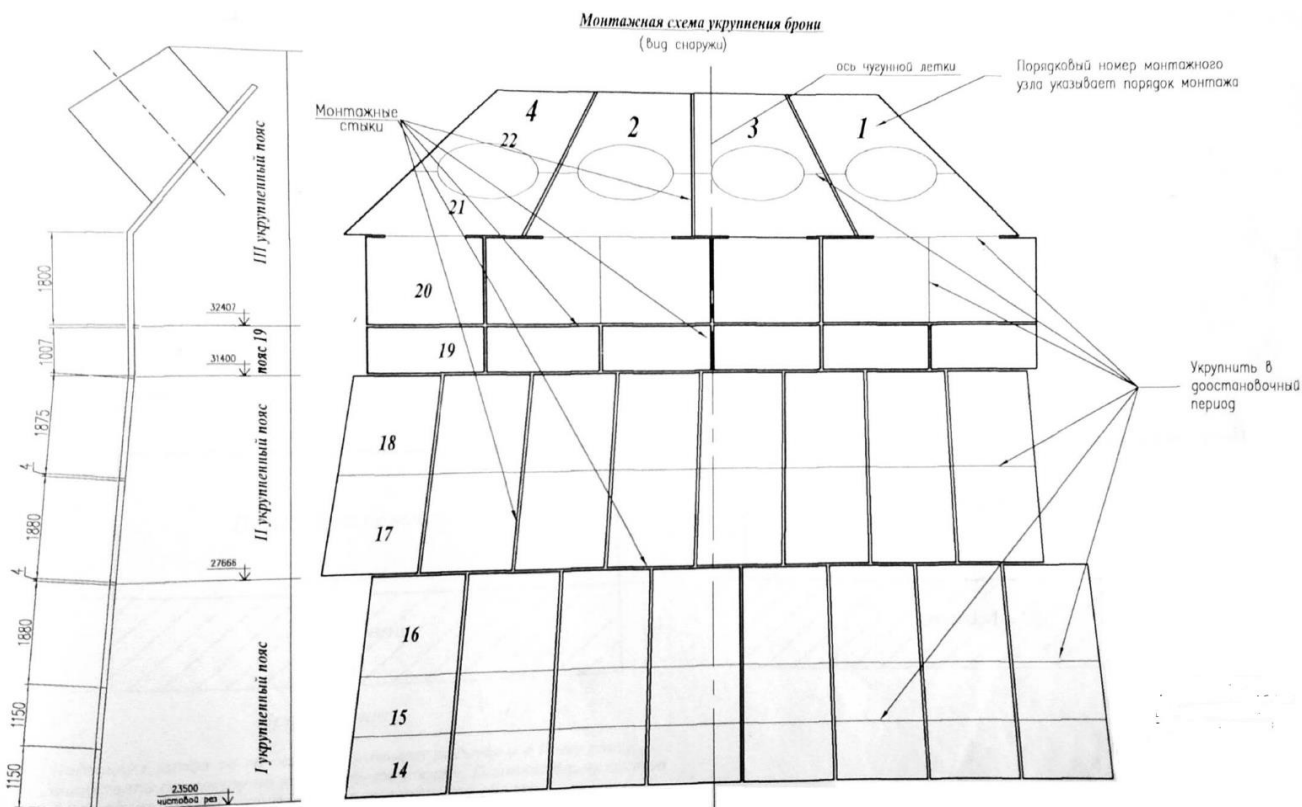


Рисунок 5.3 – Схема заміни елементів кожуха шахти печі ДП №3

Також в процесі проведення ремонту було зроблено посилення металоконструкцій печі, зокрема були встановлені додаткові зв'язки, стійки, ребра жорсткості і змонтована нова опорна система.

Вирізка елементів кожуху шахти печі проводилася повністю, з розривом шахти печі з 13-го по 18-й пояси. Демонтаж замінних елементів кожуху шахти печі проводився шляхом їх скидання всередину печі, з подальшим видаленням шматків металу скреперною лебідкою. При цьому, для монтажу нових поясів була додатково розроблена і встановлена система зовнішніх тельферів, а також спроектований, виготовлений і змонтований спеціальний виносний майданчик для передачі укрупнених листів кожуху печі.

Підйом елементів шахти кожуху проводився спеціально встановленим для цих цілей краном СКГ-40, при цьому монтаж даних елементів проводився послідовно, знизу, з 13-го поясу по 18-й пояс.

Найбільшу трудність викликало поєднання збережених елементів печі з новими металоконструкціями, які встановлювалися. Так по поясу №12, де

попередньо планувалася його 50% заміна (4 листа), в ЦРМО підприємства ПрАТ «ДМЗ» були змушені додатково виготовити ще 4 листа і провести повну заміну 12-го поясу.

Роботи по заміні металоконструкцій шахти печі проводилися підрядною організацією протягом 20 календарних діб та були закінчені в намічені терміни. Якість зварних швів змонтованих металоконструкцій проводилося методом ультразвукового контролю. Після закінчення ремонту шахти печі, були заново змонтовані 6 рядів водоохолоджуючих чавунних холодильників і заново проведена кладка формувальними вогнетривкими виробами – вогнетривкою цеглою неохолоджуваної зони печі.

ДП №3 корисним об'ємом 1033 м^3 була задута – запущена в експлуатацію в намічені проведенням КР терміни – 3 серпня 2018 року. У 3-ій декаді серпня 2018 року. ДП №3 по своїй виробничій потужності була повністю виведена на виплавку переробного чавуну. Відповідно, середньодобове виробництво чавуну на ДП №3 у вересні 2018 р склало 1993,4 т, питома витрата сухого коксу – $560,77 \text{ кг/т}$ чавуну, КПО печі – $0,518 \text{ м}^3/\text{т}$ добу.

5.3 Модель безпеки кожуха ДП на стадії зростання тріщини

ДП є об'єктом підвищеної небезпеки, в якому відмови елементів кожуху пов'язані зі значним подальшим збитком. Наприклад, ремонт кожуху ДП об'ємом 1386 м^3 ДМК після появи вертикальної тріщини від поду до фурменої зони привів до простою печі в 195,3 години і втрат чавуну в 10968 тон. Втрати в грошовому вираженні склали 395,4 тис. грн. (Без вартості ліквідації аварії, в цінах 2002 року) [13]. З огляду на це, оцінку технічного стану доречно проводити за допомогою контролю рівня безпеки [115]. При такій стратегії обслуговування в якості індикатора технічного стану використовується індекс безпеки β_R , що представляє собою логарифм гарантованого з рівнем безпеки R запасу

довговічності. Збереження безпеки при експлуатації здійснюється, як ремонтними впливами, так і періодичною переоцінкою залишкових ресурсів при ідентифікації моделей навантаження та властивостей матеріалу кожуху під час його контролю.

Індекс безпеки β_R визначається в ресурсній постановці шляхом порівняння функцій розподілу довговічності і напрацювання. Для їх пошуку була сформована типова послідовність навантажень (історія навантаження) кожуху шахти ДП, що представляє блок з трьох псевдовипадкових процесів, що мають однакову частоту f , але різні і взаємозалежні параметри циклу напружень (як кільцевих, так і меридіональних). Всі зазначені характеристики задаються в імовірнісному аспекті. Число циклів навантаження кожного процесу і визначається відносним об'ємом його дії $c_{i\lambda}$ (λ – рік експлуатації). Пошкодження в основному відбувається в зонах з несправними елементами охолодження, що характеризуються величиною $c_{3\lambda}$. Особливість її визначення полягає в тому, що вона враховує не тільки відносну тривалість роботи ДП з пошкодженими елементами охолодження $t_{3\lambda}$, а й відносну площу кожуха $z_{3\lambda}$, схильних до цього процесу.

Перевага типової послідовності навантажень в тому, що встановивши параметри напруженості кожуху в певному місці шахти в конкретні періоди роботи ДП та стану футеровки з холодильниками, можна реконструювати всю історію навантаження. Така історія для кожуху шахти ДП була розроблена в результаті значної кількості експериментальних і теоретичних досліджень напруженого стану кожуху [100].

У практиці обслуговування кожухів зустрічається ситуація, коли виявлена тріщина і слід визначити час її зростання до критичної величини. Для цього був розроблений алгоритм пошуку функції розподілу живучості, заснований на деформаційних умовах нелінійної механіки руйнування і на моделях накопичення пошкоджень [116].

Цей алгоритм був застосований при обґрунтуванні вибору стали для великогабаритних модулів [100]. Зібрана з подібних панелей ДП №11 ДМК

прослужила 20 років замість запланованих 12 років, що говорить про життєздатність проектних рішень. За час експлуатації було 3 планових ремонтів по заміні ділянок кожуху, проведених після 10 років роботи. На 16 році служби, після її обстеження технічною комісією, експлуатацію доменної печі продовжили, рекомендувавши обмежити циклічність впливу на метал кожуху шляхом виключення роботи на «тихому ході».

Маючи параметри функції розподілу живучості при наявності горизонтальних поверхневих тріщин початкової глибиною $l_0 = 10$ мм (це 25% від товщини кожуха шахти $\delta = 40$ мм) [100], нескладно отримати функцію безпеки $\beta(t)$ на цей період експлуатації. З визначення індексу безпеки, його зміна в часі буде виглядати таким чином:

$$\beta_R(t) = \beta_R^0 - \lg[t \cdot f \cdot (1 + v_f \cdot u_R)], \quad (5.1)$$

де t – час напрацювання кожуху в місцях; $f = 1512$ и ч л – кількість циклозмін напружень на місяць [113]; u_R – квантиль нормального розподілу для ймовірності R ; $v_f = 0,33$ – коефіцієнт варіації частоти циклозмін [100].

Індекс безпеки на момент появи тріщини β_R^0 визначається за функцією розподілу живучості, коли тріщина росте у глибину до критичної позначки l_c , яке залежить від марки стали (табл. 5.3). Величина l_c обчислюється з урахуванням максимальних напружень в період дії процесу $s_{3\lambda}$. Тоді:

$$\beta_R^0 = \overline{\lg n_0} - u_R \cdot S_{\lg n_0},$$

де n_0 і $S_{\lg n_0}$ – відповідно, середнє число циклів зростання тріщини і середньоквадратичне відхилення його логарифма.

В даному випадку функція $\beta_R(t)$ характеризує безпеку всього кожуху шахти в припущенні появи поверхневих тріщин в околиці отвору під кожною пошкодженою трубою охолодження. Крім цього, параметри історії навантаження мають широку варіацію, охоплюючи всі перетини шахти по висоті. Таким чином, величина $\beta_R(t)$ має сенс характеристики безпеки системи елементів. Після ідентифікації тріщини за її формою, розмірами і розташуванням слід більш конкретно встановити параметри процесу навантаження пошкодженого елемента кожуха. Завдяки цьому переоцінюється залишковий ресурс, індекс безпеки стає приватною характеристикою елемента системи, а ризик експлуатації кожуха визначається за принципом слабкої ланки.

Таблиця 5.3 – Показники технічного стану кожуху шахти ДП № 11 ДМК на стадії живучості у випадках виготовлення його з різних марок сталей

№	Марка сталі	$\overline{\lg n_0}$, цикл.	$S_{\lg n_0}$, цикл.	l_c/δ	β_{98}^0	t_{98}^0 , міс.
1	Вст.3сп	4,30	0,42	0,55	3,45	11,2
2	09Г2С	4,35	0,49	0,68	3,37	9,3
3	16Г2АФ	4,66	0,41	0,80	3,84	27,4

Напрацювання для рівня безпеки $R = 0,98$ в календарних місяцях буде відповідати рівності $\beta_{98}(t) = 0$ і являє собою період живучості:

$$t_{98}^0 = \frac{10^{\beta_{98}^0}}{f \cdot (1 + 2 \cdot v_f)}. \quad (5.2)$$

Дане рівняння встановлює взаємозв'язок між основними прогностичними характеристиками діагностування. Для його оцінки на ранніх стадіях експлуатації (до появи тріщини) використовується вказаний алгоритм, тільки замість функції розподілу живучості використовується функція розподілу довговічності.

5.4 Періодичність інспектування кожуха шахти ДП

Як видно, ключову роль в забезпеченні концепцій «відкладеного ремонту» грає функція розподілу живучості або розвитку дефекту. Дана концепція, фактично, використовується при ТОіР кожухів металургійних агрегатів. Кожухи піддаються періодичним інспекціям, що поєднує їх огляд, інструментальне діагностування та оперативне усунення дефектів. Ця операція досить трудомістка, оскільки крім значної площі поверхні, кожух доменної печі має важкодоступні для контролю місця. Огляди кожухів доменних печей рекомендовано проводити 2 рази на місяць [79]. Вони призначені для виявлення пошкоджень на ранній стадії і є елементами нормативно-превентивної стратегії ТОіР.

Для кожухів шахти ДП розроблений алгоритм на основі нелінійної механіки руйнування, що дозволяє отримати функцію розподілу живучості [10]. При цьому використовується логнормальний закон:

$$\lg T_P = \lg T_0 \pm u_P \cdot S_{\lg T_0}, \quad (5.3)$$

де T_P – шуканий період живучості для ймовірності не руйнування P ; $\lg T_0$ – медіанне значення логарифма часу живучості; $S_{\lg T_0}$ – середньоквадратичне відхилення логарифма періоду живучості; u_P – нормований квантиль нормального розподілу для ймовірності P .

Чисельні значення даного рівняння отримані для умов зростання поверхневої напівеліптичної тріщини глибиною 10 мм до критичного значення, що відповідає критичному значенню коефіцієнта інтенсивності напружень при циклічному навантаженні. Товщина кожуха 40 мм. Розрахунок проведено для типової історії навантаження кожуха шахти у вигляді трьох ступінчатого блоку [10]. Такий блок формується на підставі параметрів лише однієї ступені і розглянутий в попередньому розділі. В даному випадку ступінь з максимальними напруженнями $\sigma_{01} = 300$ МПа і відносною величиною дії c_{01} . Розглянуто три марки сталі, які

використовуються для виготовлення кожухів і два варіанти історій навантаження (табл. 5.4). Видно, що найбільша стійкість кожуху досягається для сталі з карбонітріним зміцненням 16Г2АФ. З ростом величини c_3 стійкість зменшується.

Таблиця 5.4 – Параметри функції живучості в місцях роботи

Марка сталі	$c_{ol} = 0,2$		$c_{ol} = 0,3$	
	lgT_0	S_{lgT_0}	lgT_0	S_{lgT_0}
В.ст.3 сп.	1.91	0.41	1.77	0.41
09Г2С	1.97	0.48	1.77	0.48
16Г2АФ	2.3	0.42	2.07	0.42

Оптимальний період між інспекціями по (2.15) буде:

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot 10^{lgT_0}. \quad (5.4)$$

У практичній діяльності по обслуговуванню кожухів персонал не завжди впевнений у тому, з якого матеріалу виготовлений елемент кожуху. Також незрозумілі рівні навантажень і динаміка їх зміни. У процесі діагностування ці відомості різними способами уточнюються і відбувається ідентифікація моделей. В даному випадку ідентифікація відбивається в кількості вибірок що об'єднуються і які мають зазначені в табл. 5.4 параметри. Об'єднана вибірка має параметри $lgT_{0\Sigma}$ і $S_{lgT_{0\Sigma}}$ (табл. 5.5).

Зазвичай, ідентифікація призводить до зменшення числа ремонтних операцій, що виражається в збільшенні періодів між заходами відновлення. В даному випадку ідентифікація відкинула більш сприятливі варіанти і величина δ знизилася з 25,4 міс. до 17,1 міс. Надалі ідентифікація призводить до очікуваного зростання δ до 29,4 міс.

Таблиця 5.5 – Зміна межінспекційного періоду при ідентифікації моделей

Крок ідентифікації	Глибина ідентифікації	Середнє значення медіан вибірок	$S_{\lg T_{0\Sigma}}$	$\lg T_{0\Sigma}$	δ , міс.
1	Незнайома марка і режим (6 вибірок)	1,97	0,475	1,71	25,4
2	Ясно, що марка не 16Г2АФ (4 вибірки)	1,86	0,45	1,62	21,0
3	Уточнений режим – $c_3 = 0,3$, но не відома марка сталі (2 вибірки)	1,77	0,45	1,54	17,4
4	Уточнена марка – сталь В.ст.3сп., але нез'ясований режим (2 вибірки)	1,84	0,42	1,64	21,6
5	Відомі марка сталі – В.ст.3сп і режим – $c_3 = 0,3$ (1 вибірка)	1,77	0,41	1,77	29,4

Пропонований термін огляду гарантує, що виявлена раніше поверхнева тріщина не перетвориться в наскрізну. На жаль, кожух містить і інші пошкодження – перегріви, випинання, зміщення, які потребують контролю і не дають можливості повністю оптимізувати режим ТОіР.

5.5 Особливості застосування оптимізаційних моделей для обслуговування доменного комплексу

Проблеми, що належать до сфери технічного обслуговування і ремонту устаткування промислових виробництв, завжди належали до числа пріоритетних. Особливо це відчувається в металургії, де частка витрат на ТОіР в загальних виробничих витратах вище, ніж в інших галузях. Прагнення зменшити дані

витрати призвело спочатку до впровадження в виробництво економіко-статистичних моделей, покликаних оптимізувати параметри режимів ТОіР в умовах превентивно-коректуючої і нормативної експлуатаційної стратегії. Коли оптимізаційні моделі вичерпали свої можливості, менеджмент підприємств став переходити до нової експлуатаційної стратегії у вигляді обслуговування обладнання по його фактичному технічному стану. Даний перехід супроводжується посиленням ролі ймовірно-фізичних методів замість математико-статистичних, що обумовлює необхідність наділення фахівців механічного профілю (які традиційно займаються вивченням природи деградаційних процесів) функціями організації і планування ТОіР. Питання періодичності інспекцій вельми важливі, оскільки їх правильний вибір дозволяє не тільки скоротити витрати на оцінку технічного стану, а й продовжити термін експлуатації при нормативно превентивних стратегіях. Тим самим знижується інтенсивність витрат на ТОіР, по якій оцінюється оптимальність прийнятих режимів. Ще більшої актуальності питання періодичності контролів набувають в умовах стратегії обслуговування за технічним станом. У такій ситуації зростає відповідальність операції контролю, так як за її результатами приймається рішення про вид, термін і обсяг наступної відновлювальної процедури. Збільшується і вартість окремого контролю, оскільки він виконується недешевими засобами технічного діагностування і зростає кількість діагностичних показників.

При характеризуванні переваг обслуговування за технічним станом мало хто звертає увагу на соціальний аспект цієї стратегії. Адже відомий негатив вітчизняної промисловості у вигляді переважного переважання матеріальних витрат в собівартості продукції відноситься і до системи ТОіР. В її витратах затрати за статтею «товарно-матеріальні цінності» можуть досягати 90%. В обслуговуванні за технічним станом ця частка витрат зменшується, а зростає частка оплати праці ремонтників, який стає більш кваліфікованим і привабливим.

З аналізу можливостей економіко-статистичних моделей можна зробити такі висновки. Апостеріорний характер отримання моделей дорого обходиться для

підприємств металургійної промисловості, якому не властивий етап відпрацювання конструкції. Подібні моделі не цілком відповідають іншим особливостям металургійного устаткування, серед яких його унікальність. Навіть типові, що випускаються серійно одиниці обладнання на виробництві під час ремонтів модернізуються і набувають індивідуальні відмінності. Отже, подібні моделі застосовні для обмеженого кола об'єктів металургійного виробництва.

Необхідність підвищення надійності і довговічності технічних об'єктів сприяла розвитку засобів діагностування, що призвело до появи гібридних (змішаних) моделей. Вони характеризуються: інструментальним контролем розвитку дефектів (несправностей, пошкоджень) певного типу; урахуванням питомих збитків від простоїв (фактично, урахуванням ризику, який «ранжує» відмови різного виду); декількома (більше 2-х) фазами технічного стану. Подібні моделі відкладеного ремонту поєднують математико-статистичні і імовірнісно-фізичні методи опису відмов.

У стратегіях типу «the fitness for service» застосовуються, переважно, імовірнісно-фізичні методи і моделі деградаційних процесів. Як і в гібридних моделях, тут також необхідно знайти зв'язок між попереджувальними допусками на діагностичний параметр, на напрацювання, безвідмовність $P(t)$ і питомими витратами на ТОіР. Проблема вирішується встановленням нормативної величини $P(t)$, для якої знаходять попереджувальні допуски, за якими визначається дата контролю. З розвитком моделей для обслуговування за технічним станом спостерігається відхід від строго періодичного графіка контролю, до послідовного графіку з інтервалами що зменшуються, а в подальшому – до планування дати наступного відновлюваного заходу.

Сучасне технологічне обладнання створюється з урахуванням можливості його обслуговування за технічним станом. Про це свідчить те, що в його склад включають значне число мехатронних вузлів. Тому можна відстежити характер роботи приводу, практично, кожного механізму. Інформації про функціонування об'єкта стає так багато, що обслуговуючий персонал ускладняється його сприймати. Спостерігається явище, що отримало термін «сингулярність

інформації», коли її обсяг безупинно нарастає, але через невикористання вона втрачає сенс. Однак, в умовах проактивних експлуатаційних стратегій інформація про роботу обладнання, нарівні з матеріальними ресурсами, стає реальним фактором виробництва, що забезпечує його ефективність. Зменшення інформації по діагностичних параметрах при дотриманні необхідного рівня безвідмовності веде до збільшення витрат на ТОіР. Одним з інструментів використання даної інформації є ідентифікація діагностичних моделей. В цьому аспекті проаналізовано поведінку уточнюючої функції, за допомогою якої можна приймати рішення про продовження терміну служби.

5.6 Висновки

1. Успішне функціонування системи ТОіР в доменному комплексі можливо при її організації на основі змішаних (комбінованих) експлуатаційних стратегій. Підготовка основних даних для розробки системи ТОіР – тривалий процес, який повинен вестися механослужбою, відповідальною за роботу обладнання підприємства. Наприклад, на ПрАТ «ДМЗ» така робота розпочалась на початку 2000 років. Для окремих діагностичних операцій можуть залучатися спеціалізовані підрозділи.

2. Зупинка доменної печі на капітальний ремонт регламентується не лише станом основних несучих конструкцій печі, але і технологічними можливостями процесу, а також організаційними факторами. Сучасна система робіт капітального ремонту проводиться на умовах поглибленого аутсорсингу. Залучення спеціалізованих субпідрядних організацій забезпечує високу якість і короткостроковість ремонту.

3. Поряд з оснащенням автоматизованими засобами контролю несучих конструкцій доменного комплексу, розробка і освоєння персоналом алгоритмів прогнозування їх технічного стану за результатами діагностування є необхідною умовою збільшення ресурсу і безпеки кожухів ДП.

4. Для прогнозування технічного стану розроблений метод індексу безпеки, який, завдяки своїй ресурсній трактовці, є універсальним, оскільки дозволяє оперувати з процесами, що пошкоджують, різної природи. Індекс безпеки стосовно кожухів шахти ДП отримує комплексний характер, що дозволяє безпосередньо оцінювати їх безпеку як для складних технічних систем.

5. Основні результати по розділу опубліковано у роботах [117–120].

ЗАГАЛЬНІ 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 ТОіР 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 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.

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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Северцев М.А., Дедков В.К. Системный анализ и моделирование безопасности. М. : Высш. школа, 2006. 462 с.
2. Аверин Г.В., Москалец В.М. Анализ состояния и безопасности объектов повышенной опасности металлургической отрасли. *Вісник ДонНТУ. Сер. А: Природничі науки*. 2008. Вип. 1. С. 324–333.
3. Можаренко Н.М., Тубольцев Л.Г., Голубых Г.Н. Параметры промышленной безопасности работы доменных печей. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2008. Вып. 16. С. 398–413.
4. Hodges J., Curry S. Blast furnace No. 5 incident, Corus, Port Talbot, 8th November, 2001. *22nd Institution of Chemical Engineers Symposium on Hazards 2011 (HAZARDS XXII) : Process Safety and Environmental Protection*. : Proceedings of a meeting held 11-14 April 2011, Liverpool, United Kingdom : Curran Associates, Inc. 2013. P. 593–599.
5. The explosion of No. 5 Blast Furnace, Corus UK Ltd, Port Talbot 8 November 2001. Published by the Health and safety executive, 2008. 61 p. URL.: <https://www.hse.gov.uk/pubns/web34.pdf> (дата звернення: 11.05.2016)
6. Стратегия системного управления промышленной безопасностью металлургических объектов / Л.Г. Тубольцев и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2006. Вып. 12. С. 331–343.
7. Черная металлургия в поисках рациональности и надежности. *DaNews (Новости Даниели)*. 2018. № 177. С. 30–33.
8. Van Laar R., Engel E. Modern blast furnace design. *Millennium steel*. 2016. P. 35–40.
9. Большаков В.И. Проблема повышения прочности и надежности кожухов доменных печей в работах ИЧМ. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2005. Вып. 11. С. 237–246.

10. Blast furnace campaign prolongation philosophies in Germany / M. Peters, P. Schmöle and other. *La Revue de Métallurgie*. 2007. Vol. 104, № 6. P. 277–286. URL.: <https://doi.org/10.1051/metal:2007116>
11. Паолоне Р. От жидкого металла до прокатки: идеи и решения для повышения эффективности и минимизации отходов. *DaNews (Новости Даниели)*. 2019. № 181. С. 4–12.
12. Делла Мора Д. Масштабная тенденция к повышению экологичности металлургии. *DaNews (Новости Даниели)*. 2019. № 181. С. 94–97.
13. Прогнозирование технического состояния кожухов доменных печей посредством контроля уровня безопасности. / С.В.Белодеденко, В.А.Чеченев и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 6. С.61–65.
14. Belodedenko S.V., Chechenev V.A. Safety protection of blast-furnace jackets when in operation. *Metallurgical and mining industry*. 2015. Vol. 11. P. 127–132.
15. Крылова А.Е., Извеков Ю.А. О подходе к оценке техногенной безопасности металлургического производства. *Успехи современного естествознания*. 2012. № 6. С. 32–33.
16. Бархоткин В.В., Извеков Ю.А., Миликаев С.Р. Обзор аварий на крановом оборудовании металлургических производств. *Международный журнал фундаментальных и прикладных исследований*. 2013. № 10. С.9–11.
17. Белодеденко С.В., Биличенко Г.Н. Методы количественного риск-анализа и безопасность механических систем. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 7. С. 2–10.
18. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта оборудования предприятий черной и цветной металлургии: Справочник. М. : ЭНАС, 2012. 92 с.
19. Dhillon, B.S. Maintenance engineering: a modern approach. Boca Raton, London, New York, Washington : CRC Press LLC, 2002. 222 p.
20. Dhillon B.S. Mining equipment reliability, maintainability and safety. London : Springer. 2008. 201 p.

21. Belodedenko S.V., Bilichenko G.N. Quantitative risk-analysis methods and mechanical systems safety. *Metallurgical and mining industry*. 2015. Vol. 12. P. 272–279.
22. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. М. : Радио и связь, 1988. 392 с.
23. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. М. :Транспорт, 1987. 272 с.
24. Ченцов Н.А. Организация, управление и автоматизация ремонтной службы. Донецк : Неру-пресс, 2007. 258 с.
25. Smith D.J. Reliability, Maintainability and Risk: Practical methods for engineers. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. 438 p.
26. Wang H., Pham H. Reliability and optimal maintenance. Springer : Verlag London Ltd, 2006. 352 p.
27. Handbook of Maintenance Management and Engineering // M.Ben-Daya, S.O. Duffuaa, A. Raouf, J.Knezevic, D. Ait-Kadi-editors. London : Springer, 2009. 741 p.
28. Engineering design handbook : Maintenance engineering techniques. AMC Pamphlet № 706-132. 1975. 553 p.
URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a021390.pdf>.
29. Maintenance Engineering Handbook / edited by R.K. Mobley, L.R. Higgins, D.F. Wikoff. New York : McGrawHill Book Company, 2008. 1244 p.
30. РД 11-288-99. Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей. М. : ЦНИИПСК им. Мельникова, 2006. 45 с. (Руководящие документы Госгортехнадзора России).
31. Повышение надежности и ресурса кожухов доменных печей на основе оценки и прогнозирования состояния металла / Г.П. Кандаков, В.М. Горицкий и др. *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. № 4. С. 6–9.

32. 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.
33. Белодеденко С.В., Ибрагимов М.С. Вопросы периодичности контролей технического состояния механических систем в металлургии : монография. Днепр : Лизунов Пресс, 2017. 79 с.
34. Белодеденко С.В., Ибрагимов М.С. Выбор интервалов между инспекциями при предупредительном обслуживании механического оборудования. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 3. С.93–102.
35. 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.
36. Li W., Pham H. A Condition-based inspection-Maintenance Model based on geometric Sequences for Systems With a degradation process and Random Shocks. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*. 2012. Vol. 1, Issue 1. P. 26–34.
37. Rezaei E., Imani D. M. A New Modeling of Maintenance Risk Based Inspection Interval Optimization with Fuzzy Failure Interaction for Two-Component Repairable System. *Indian Journal Of Natural Sciences*. 2015. Vol. 6, Issue 31. P. 9003–9017.
38. Risk-based inspection : API recommended practice 580. Washington, D.C. : American Petroleum Institute, 2002. 60 p.
39. Best practice for risk based inspection as part of plant integrity management / J.B. Wintle, B.W. Kenzie and other. Norwich : TWI and Royal & SunAlliance Engineering for the health and safety executive, 2001. 186 p.
40. Best practice for risk based inspection as a part of plant integrity management / J.B. Wintle, B.W. Kenzie, G.I. Amphlet, S. Smalley. Norwich : HSE books, 2001. 114 p.

41. American Society of Mechanical Engineers, Risk-Based Inspection - Development of Guidelines, Vol. 1, General Document, CRTD. Washington, DC : ASME Research Task Force on Risk-Based Inspection Guidelines, Vol. 20-1, 1991. 156 p.
42. Острейковский В.А. Теория надежности. М. : Высшая школа, 2003. 463 с.
43. Selvik J.T., Scarf P., Aven T. An extended methodology for risk based inspection planning. *Reliability Theory & Applications*. 2011. Vol. 2, Issue 1(20). P. 115–126.
44. Baker R.D. Inspection Policies for Reliability. *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability* / editors F. Ruggeri, R. Kenett. New York : John Wiley & Sons, Ltd. 2007. 1800 p.
45. Baker R.D. Risk aversion in maintenance. *Int. journal of Polish academy of sciences*. 2006. №2. P. 14–16.
46. Christer A.H., Waller W.M. Reducing Production Downtime Using Delay-Time Analysis. *Journal of the Operational Research Society*. 1984. Vol. 35. P. 499–512.
47. Christer A.H., Waller W.M. Delay Time Models of Industrial Inspection Maintenance Problems. *Journal of the Operational Research Society*. 1984. Vol. 35. P. 401–406.
48. Agunwamba J.C., Tarzomon T.T., Nwoji C.U. Application of Christer's inspection model for building maintenance. *Nigerian journal of technology*. 2012. Vol. 31, № 2. P. 98–108.
49. Wang W. Delay time modelling. *Complex system maintenance handbook*. London : Springer-Verlag, 2008. P. 345–370.
50. Pillay A., Wang J., Wall A. Optimal inspection period for fishing vessel equipment: a cost and downtime model using delay time analysis. *Marine technology*. 2001. Vol. 38, № 2. P. 122–129.
51. Jodejko-Pietruczuk A., Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S. Block inspection policy model with imperfect inspections for multi-unit systems. *Reliability Theory & Applications*. 2013. Vol. 8, Issue 3(30). P. 75–86.
52. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. Analysis of maintenance models parameters estimation for technical systems with delay time. *Eksploatacja i Niezawodność–Maintenance and reliability*. 2014. Vol. 16, № 2. P. 288–294.

53. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М. : Мир, 1972. 318 с.
54. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. М. : Логос, 2001. 208 с.
55. Богданов М.А., Кузьмин М.В. Применение концепции безопасного развития дефекта при определении периодичности осмотров деталей ГТД *Міцність матеріалів та елементів конструкцій* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. Київ : ІПП НАН України, 2013. С. 26–28.
56. Портер А.М., Лешин Д.П., Михайлов А.Л. Методология эксплуатации диска ротора компрессора ДТРД по техническому состоянию *Міцність матеріалів та елементів конструкцій* : Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. Київ : ІПП НАН України, 2013. С. 234–236.
57. Основы технічного обслуговування механічних систем за контролем безпеки / С. Білодіденко, Г. Біліченко та інш. *Вісник ТНТУ*. 2011. спецвипуск, Ч. 1. С.170–178.
58. Белодеденко С.В., Яцуба А.В. Диагностирование усталостных повреждений и прогнозирование остаточного ресурса технологического оборудования с соблюдением требуемой безопасности. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 1. С. 80–87.
59. Ибрагимов М. С. Смешанные стратегии эксплуатации для механического оборудования доменного комплекса. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 7. С.31–35.
60. Білодіденко С.В., Ібрагімов 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.
61. Risk indicators and diagnostic models for sudden failures/ S. Belodedenko, A. Grechany, M. Ibragimov. *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. 2017. Vol. 88. № 4. P. 111–118.

62. 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.
63. 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.
64. 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.
65. Планування періодичності контролю технічних систем на підставі моделей діагностичних параметрів у вигляді випадкового процесу / С.В. Білодіденко, В.І. Гануш та інші. *Вісник сертифікації залізничного транспорту*. 2018. Том. 50. № 4. С.21–26.
66. Емельянов И.Г., Миронов В.И., Кузнецов А.В. Оценка долговечности конструкции, лежащей на опорах. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2010. № 1. С. 101–107.
67. Емельянов И.Г., Миронов В.И., Кузнецов А.В. Альтернативная оценка долговечности для элементов вагона-цистерны. *Транспорт Урала*. 2009. № 2. С. 56–60.
68. Матвеюшкин С. А. Трещиностойкость кожухов шахты доменных печей : автореф. дисс. на соискан. науч. степени канд. техн. наук : 05.23.01. Магнитогорск : МГТУ, 2004. 24 с.
69. Щипачев А.М., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Изменение закона распределения скорости ультразвуковых волн при циклическом нагружении стали 09Г2С в малоцикловой области. *Вестник УГАТУ*. 2012. Вып. 50, № 16, т. 5. С.89–92.
70. Наумкин Е.А., Кузеев И.Р., Прохоров А.Е. Оценка степени поврежденности стали 09Г2С в условиях малоцикловой усталости с учетом параметров

- поверхностной энергии. *Сб. науч. статей. «Мировое сообщество: проблемы и пути решения»*. Уфа : УГНТУ, 2005. № 17. С.66–75.
71. Храмов В.В. Остаточный ресурс опорных конструкций кислородных конверторов по производству стали : автореф. дисс. на соискан. науч. степени канд. техн. наук : 05.23.01. Магнитогорск : МГТУ, 2001. 24 с.
 72. Грудев И.Д., Востров В.К., Галыбин А.Н. Трещинообразование в кожухах доменных печей и воздухонагревателей от локального перегрева. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1982. № 1. С. 13–18.
 73. Трещинообразование в кожухах доменных печей / В.К. Востров, Е.М. Баско и др. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1987. № 9. С. 16–19.
 74. Повышение надежности и ресурса кожухов доменных печей на основе оценки и прогнозирования состояния металла / Г.П.Кандаков, В.М. Горицкий и др. *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. № 4. С. 6–11.
 75. Чеченев В.А. Крупногабаритные охлаждаемые модули шахт доменных печей (конструкция, технология изготовления и монтажа, стойкость кожухов). Днепропетровск : Свидлер А.Л., 2011. 280 с.
 76. Ризванов Р.Г., Биккинин А.И., Ямилев М.З. Экспериментальные исследования конструктивно-подобных образцов на циклическую выносливость. *Машины, агрегаты и процессы нефтегазовой отрасли*. 2018. № 3. С. 70–75.
 77. Еремин К.И., Нищета С.А. Оценка остаточного ресурса строительных металлоконструкций по результатам натурных испытаний. *Заводская лаборатория*. 1997. № 3. С.39–54.
 78. 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.
 79. Любин А.Е. Кожухи доменных печей и воздухонагревателей. Действительная работа и промышленная безопасность. К. : Сталь, 2011. 268 с.

80. Маклинток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. М. : Мир, 1970. 443 с.
81. Надаи А. Пластичность. М.-Л. : ОНТИ НКТИ СССР, 1936. 280 с.
82. Добровольский В.И., Пряхин В.В. К методике определения упругопластических деформаций при чистом изгибе. *Заводская лаборатория*. 1985. № 8. С. 79–81.
83. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия / В.Т. Трощенко, Г.В. Цыбанев и др. Киев : ИПП НАН Украины, 2009. 664 с.
84. К расчету кожуха доменной печи на малоцикловую усталость / А.П. Махов, А.П. Лобцов и др. *Изв. Вузов. Черная металлургия*. 1980. № 6. С. 133–136.
85. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении / Отв. ред. Н.А. Махутов, А.Н. Романов. М. : Наука, 1983. 273 с.
86. Белодеденко С.В., Угрюмов Д.Ю. Эффективность прогнозирования ресурса элементов прокатного оборудования и деформационные критерии усталости. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003. № 5. С. 86–90.
87. Когаев В. П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность. М. : Машиностроение, 1985. 224 с.
88. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. [Чинний в Україні по 01.01.22]. М. : Изд-во стандартов, 1985. 61с.
89. Панько І.М. Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиностійкості матеріалів і елементів конструкцій. Львів : НАН України ФМІ, 2000. 280 с.
90. Dias R., Morgado T.L.M. Evaluation of Stress Intensity factors and J-Integral using a 3 Point Bend Specimen. *Proceedings of the 19th International colloquium on mechanical fatigue of metals : Book of abstracts Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia. Porto, 2018. P.161–162.*

91. Фененко О.А. Влияние деградационных процессов на механические характеристики конструкционных материалов элементов планера летательного аппарата. *Збірник наукових праць ХНУПС ім. І. Кожедуба*. 2015. Вип. 4, № 45. С. 116–119.
92. Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Швеи В.П. Метод оценки вязкости разрушения материала по рассеянию характеристик твердости. *Проблемы прочности*. 2007. № 6. С. 5–12.
93. Исследование прочности лито-сварного соединения / А.В. Лоза, Д.А. Рассохин и др. *Наука та виробництво: Збірник наукових праць ДВНЗ «ПДТУ»*. 2018. Вип. 18. С. 59–64.
94. Никифорчин Г.М., Студент О.З. Вплив експлуатаційних чинників на високотемпературну водневу деградацію сталей трубних елементів конструкцій. *Втома та термовтома матеріалів і елементів конструкцій* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. Київ : ІПМ НАН України, 2013. С. 184–185.
95. Гринь Е.А., Перевезенцева В.Т., Саркисян В.А. Трещиностойкость паропроводных центробежно-литых труб из стали 15Х1М1Ф. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Том 85, № 4. С. 42–49.
96. 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>
97. Belodedenko S., Ganush V. Models of technical safety and risk at the estimation and prediction of the condition of vehicles mechanical systems. *In Some actual issues of traffic and vehicle safety*. Monograph. Gliwice : Faculty of Transport Silesian University of Technology, 2013. P. 187–212.
98. Прогнозирование технического состояния кожухов доменных печей посредством контроля уровня безопасности. / С.В.Белодеденко, В.А.Чеченев и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 6. С.61–65.

99. Чеченев В.А., Белодеденко С.В., Цапко В.К. Типовая последовательность нагрузок кожуха шахты доменной печи. *Теория и практика металлургии*. 1999. № 6. С.11–12.
100. Чеченев В.А. Совершенствование конструкций элементов системы охлаждения шахт доменных печей. Днепропетровск : Системные технологии, 1998. 111 с.
101. Байшев Ю. П. Доменные печи и воздухонагреватели (конструкция, эксплуатационные воздействия, свойства материалов, расчеты). Екатеринбург : УрОРАН, 1996. 994 с.
102. К расчету кожуха доменной печи на малоцикловую усталость / А.П. Махов, А.П. Лобцов и др. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1980. № 6. С. 133–136.
103. Востров В.К. Трещиностойкость и долговечность кожухов доменных печей. *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. № 11. С. 7–9.
104. Білодіденко С.В, Гануш В.І., Чеченев В.А. Проблема об'єднання показників надійності елементів технічної системи. *Металургическая и горнорудная промышленность*. 2018. № 7. С. 5–10.
105. Experimental analysis of strain of blast furnaces shell during the start up to / P. Bigoš, J. Kul'ka and other. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 48. P. 24–29.
106. Comparison of local stress values obtained by two measuring methods on blast furnace shell / P. Bigoš, J. Kul'ka M and other. *Metallurgija*. 2015. Vol. 54. № 1. P. 101–104.
107. 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
108. Білодіденко С.В., Біліченко Г.М., Гануш В.І. Технічна діагностика металургійного устаткування : в 2-х ч. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2012. Ч. 1

- ; Теорія технічного обслуговування та діагностування механічних систем: Конспект лекцій. 81 с.
109. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. М. : Радио и связь, 1988. 392 с.
 110. Ченцов Н.А. Организация, управление и автоматизация ремонтной службы: Учебник. Донецк : Норд-Пресс-УНИТЕХ, 2007. 258 с.
 111. Положения о планово-предупредительных ремонтах механического оборудования предприятий черной металлургии. Тула : Приокское книжное издательство. 1973. 372 с.
 112. Научно–технические решения по обеспечению продолжительной безопасной работы доменных печей / В.И. Большаков, Н.Г. Иванча и др. *Сборник научных трудов по результатам программы НАН Украины «Ресурс», полученным в 2004–2006 гг.* Киев : Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, 2006. С. 440–444.
 113. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта оборудования предприятий черной и цветной металлургии: Справочник. М. : ЭНАС, 2012. 92 с.
 114. Промышленная безопасность доменных печей при задувке и выдувке / В.И. Большаков, Г.Н. Голубых и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* 2007. Вып. 14. С.290–309.
 115. Прогнозирование технического состояния и обеспечение безопасности при эксплуатации механических систем в металлургии /С.В. Белодеденко, В.И. Гануш и др. *Вибрации машин: измерение, снижение, защита.* 2011. № 1. С.15–22.
 116. Белодеденко С. В. Прогнозирование повреждения и живучести элементов конструкций с использованием моделей накопления повреждений. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2010. № 1. С.49–52.
 117. Пристрій для підвищення стійкості засипного апарата доменної печі : пат. на корисну модель № 124206 Україна : МПК C21B7/18 (2006.01). № u201710538 ; заявл. 31.10.2017 ; опубл. 26.03.2018 ; Бюл. № 8.

118. Спосіб прискореного введення доменної печі у експлуатацію після капітального ремонту та пристрій для його здійснення : пат. 82799 : МПК C21B5/00, C21B7/00 (2006.01). № а 200704032 ; заявл. 12.04.2007 ; опубл. 11.02.2008 ; Бюл. № 3.
119. Рудний бункер зберігання і вивантаження плавильних шихтових матеріалів в доменну піч : пат. на корисну модель № 133080 Україна : МПК F27B7/38. № u201809832 ; заявл. 02.10.2018 ; опубл. 25.03.2019 ; Бюл. № 6.
120. Рабер Л.М., Червинский А.Е., Ибрагимов М.С. Несущие конструкции металлургических агрегатов : монография. Днепро : ИМА-Пресс, 2016. 260 с.

**ПРОТОКОЛ ВИМІРЮВАНЬ ТВЕРДОСТІ ЗРАЗКА №1
ПО ДСТУ ISO 6506-1:2007 ВІД 25.12.2018**

Номер ділянки	Навантаження Р, Н	Тип приладу	Тип індентора	Середньо-квадратичне відхилення, R, МПа	Твердість по Брінелю НВ, МПа
1	2	3	4	5	6
1	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	174
2	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	16	158,8
3	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	16	164,2
4	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	173,1
5	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	11	168,4
6	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	155,7
7	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	166,2
8	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	178
9	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	15	164,3
10	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	175,6
11	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	185,7
12	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	11	173
13	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	180
14	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	174,5
15	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	167,2
16	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	175,1
17	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	15	187
18	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	176,2
19	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	183,8
20	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	187,1

1	2	3	4	5	6
21	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	180,4
22	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	195
23	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	196,5
24	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	9	180
25	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	7	192,4
26	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	199
27	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	9	188,2
28	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	7	190,6
29	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	8	199
30	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	183,8
31	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	193,7
32	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	190
33	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	188
34	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	186,2
35	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	187,4
36	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	187,3

Середні значення $HV=180,7$ $v=0,06$

Відповідальний за випробування



І. Грудницький

ДОДАТОК Б

ПРОТОКОЛ ВИМІРЮВАНЬ ТВЕРДОСТІ ЗРАЗКА №2
ПО ДСТУ ISO 6506-1:2007 ВІД 25.12.2018

Номер ділянки	Навантаження Р, Н	Тип приладу	Тип індентора	Середньо-квадратичне відхилення R, МПа	Твердість по Брінелю НВ, МПа
1	2	3	4	5	6
1	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	148,7
2	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	149,5
3	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	9	150,3
4	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	148,8
5	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	15	149
6	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	9	151,4
7	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	157,1
8	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	8	143,1
9	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	147,1
10	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	8	143
11	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	11	145,1
12	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	9	143,3
13	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	9	148,5
14	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	146,8
15	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	151
16	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	18	135,5
17	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	17	143,2
18	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	149,5
19	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	15	152,5
20	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	7	157,7
21	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	18	148,7

1	2	3	4	5	6
22	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	18	142,9
23	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	146,7
24	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	148,3
25	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	16	138,5
26	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	16	144,1
27	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	15	145
28	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	146,1
29	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	149,1
30	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	148,8
31	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	11	136,5
32	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	152,9
33	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	145,5
34	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	144,7
35	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	16	142,2
36	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	15	148,5

Середні значення $HV_{\text{ср}}=146,9$ $v=0,035$

Відповідальний за випробування



І. Грудницький

ДОДАТОК В

**ПРОТОКОЛ ВИМІРЮВАНЬ ТВЕРДОСТІ ЗРАЗКА №3
ПО ДСТУ ISO 6506-1:2007 ВІД 25.12.2018**

Номер ділянки	Навантаження Р, Н	Тип приладу	Тип індентора	Середньо-квадратичне відхилення R, МПа	Твердість по Брінелю НВ, Мпа
1	2	3	4	5	6
1	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	7	122,4
2	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	130,6
3	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	15	124
4	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	15	177,2
5	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	120
6	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	121,4
7	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	16	125,1
8	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	15	131
9	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	11	113,4
10	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	123
11	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	130
12	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	11	122,8
13	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	119
14	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	8	124,1
15	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	124,2
16	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	125,7
17	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	122,7
18	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	117,3
19	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	17	122,2
20	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	134

1	2	3	4	5	6
21	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	127,2
22	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	16	166,6
23	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	19	139,6
24	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	16	122,5
25	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	25	121,23
26	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	124,1
27	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	8	118,7
28	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	188,1
29	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	132
30	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	7	126
31	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	8	128
32	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	9	127,4
33	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	120,6
34	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	11	111,6
35	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	12	122
36	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	10	117,2
37	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	14	118
38	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	13	120
39	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	15	122
40	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	16	117,7
41	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	19	136
42	50	ТУ-ДЗ та У1	Алмазна піраміда	9	122,2

Середні показники $HV=127,5$ $v=0,12$

Відповідальний за випробування

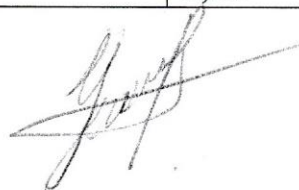


І. Грудницький

ДОДАТОК Г

ЗВЕДЕНИЙ ПРОТОКОЛ ВТОМНИХ ВИПРОБУВАНЬ №1 ВІД 26.03.2019**Об'єкт випробувань:** призматичні зразки сталі 09Г2С**Напрямок волокон:** поздовжній**Тип заготовки:** лист товщиною 30 мм, що пропрацював 14 років в якості кожуху доменної печі**Тип деформації:** триточковий згин**Частота циклічних напружень:** 10-15 Гц**Навколишнє середовище:** повітря, нормальна температура**База випробувань:** $2 \cdot 10^6$ циклів**Критерій припинення випробувань:** 1. до появи тріщини. 2. зростання тріщини до критичного розміру**Зразки:** перша цифра шифру позначає зону кожуху, звідки вирізано зразок висота 30 мм (номінал), товщина 12 мм, відстань між опорами 110 мм стан поверхні – фрезеровані бічні грані, необроблена робоча поверхня з наявністю окисної плівки, окалини**Випробувальна машина:** ЕУС 20, №990.55**Дата випробувань:** 01.10.2018 – 26.03.2019

№	Шифр зразка	Напруження циклу, МПа		Амплітудна деформація циклу $\epsilon_a \cdot 10^{-3}$	Пройдена кількість циклів
		максимальні	мінімальні		
1	1-1	525	55	1,26	141000
2	1-2	486	55	1,274	125000
3	1-3	475	79	1,03	440000
4	1-4	420	75	0,91	670000
5	1-5	362	68	0,847	2001000
6	2-1	525	55	1,26	131000
7	2-2	525	55	1,209	167000
8	2-3	471	55	1,129	250000
9	2-4	540	70	1,37	85000
10	2-4-2	540	70	1,3	110000
11	2-5	430	75	0,966	700000
12	2-5-2	430	75	1,03	440000
13	3-1	550	75	1,428	70000
14	3-2	505	75	1,096	302000
15	3-3	517	78	1,02	467000
16	3-4	470	70	1,051	386000
17	3-5	582	77	1,437	68000
18	3-6	420	75	0,91	1070000
19	3-7	420	75	0,91	1900000

Відповідальний за випробування

А.Є. Червінський

Затверджую

Голова правління ПрАТ

«Дніпровський металургійний завод»

Баш В.О.

22 лютого 2020 року



АКТ

промислового впровадження результатів дисертаційної роботи

М.С. Ібрагімова

Дійсний акт складено про те, що на протязі 2004 – 2014 років за безпосередньої участі М.С. Ібрагімова в доменному цеху здійснювалися роботи по категоризації механічного обладнання, що стало підставою для впровадження на підприємстві змішаної стратегії технічного обслуговування і ремонту. В результаті використання такої стратегії вдалося:

- зменшити кількість позапланових простоїв і тихих ходів доменних печей цеху на 35% у порівнянні з 2005 роком і на 22% у порівнянні з доменними цехами металургійних підприємств України,
- зменшити щорічні витрати на технічне обслуговування і ремонт обладнання доменного цеху на 17%.

Сукупний економічний ефект від впровадження змішаної стратегії ремонтів за час її дії склав 150 млн. гривень.

Підписи:

Головний механік

О.Г. Виливаний

Директор фінансовий

О.О. Марьянчук

Затверджую:
Голова правління ПрАТ
«Дніпровський металургійний завод»
Баш В.О.
22 лютого 2020 року



АКТ
про використання результатів дисертаційної роботи
М.С. Ібрагімова у виробництві

Дійсний акт складено про те, що в доменному цеху підприємства використовуються рекомендації щодо діагностування технічного стану і залишкового ресурсу кожуху доменної печі, які розроблені за участю М.С. Ібрагімова у 2019 році. Рекомендації є результатом виконання ним дисертаційної роботи в Національній металургійній академії України.

Підписи:

Головний механік

О.Г. Виливаний

Начальник доменного цеху

О.Ю. Андрієнко

Начальник ПКВ

А.В. Андрощук

Начальник ЦЗЛ

І.Е. Касянчук

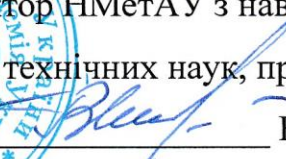
Начальник технічного відділу

С.М. Каракай



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор НМетАУ з навчальної роботи,
доктор технічних наук, професор

 В.П.Іващенко

АКТ

використання дисертаційної роботи Ібрагімова М.С.

**«Удосконалення обслуговування устаткування доменного цеху
шляхом діагностування його технічного стану»**

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри машин та агрегатів металургійного виробництва, професор, доктор технічних наук Білодіденко С.В. і начальник учбового відділу Пульпінський В.Б., склали чинний акт у тому, що основні результати та методи, які було використано при написанні дисертаційної роботи здобувача кафедри машин та агрегатів металургійного виробництва Ібрагімова Мехмана Саядулла огли «Удосконалення обслуговування устаткування доменного цеху шляхом діагностування його технічного стану» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.08 – «Машини для металургійного виробництва», використовуються при викладанні студентам спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування» дисциплін «Експлуатація та обслуговування машин», «Технічна діагностика металургійного устаткування», «Експлуатація металевих конструкцій», а також при написанні ними випускних кваліфікаційних робіт бакалавра та магістра.

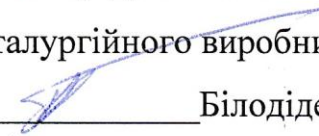
Начальник навчального відділу

НМетАУ

 Пульпінський В.Б.

« 04 » березня 2020 р.

Завідувач кафедри машин та агрегатів
металургійного виробництва

 Білодіденко С.В.

« 04 » 03 2020 р.