

УДК 669.162.213

<https://doi.org/10.34185/tpm.5.2019.01>

Білодіденко С. В., Гануш В. І., Ібрагимов М. С.

Деградація металу кожуху доменної печі під впливом експлуатації

Belodedenko S., Hanush V., Ibrahimov M.

Degradation of the metal of blast furnace jacket under the influence of exploitation

Доменне виробництво відрізняє від інших металургійних переділів, як збільшена аварійність, так і важкість їхніх наслідків. Також воно чутливе до позапланових зупинок. Сучасні тенденції регламентують збільшення кампанії доменної печі (ДП) понад 25 років з рівнем готовності не меншим 95%. Для перевірки таких можливостей проведено комплексні дослідження службових властивостей сталі кожуху доменної печі після її 14-річної кампанії. З трьох різних зон кожуху були вирізані зразки для випробувань. Отримано моделі циклічного зміцнення сталі 09Г2С. За результатами циклічних випробувань розроблено деформаційні моделі опору втомі, які є достатніми для прогнозування ресурсу кожуху ДП. Отримано лінійний зв'язок між показниками розпорощення твердості і в'язкості руйнування сталі 09Г2С. Найбільше пошкодження метал кожуху отримав в фурменій зоні, найменше – в охолоджуваній зоні шахти. Незважаючи на незадовільний стан оболонки ДП і самого кожуху, його метал залишає достатню деформаційну здатність та циклічну міцність. 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.

Ключові слова: доменна піч, кожух, пошкодження, опір втомі, в'язкість руйнування.

Blast production differs from other metallurgical process in terms of increased accident rate and severity of their consequences. It is also sensitive to unplanned stops. Current trends regulate the increase of the blast furnace (BF) campaign for over 25 years with a readiness level of at least 95%. In order to test such opportunities, a comprehensive study of the service properties of the blast furnace steel jacket has been conducted following its 14-year campaign. Test specimens were cut from three different areas of the jacket. Models of cyclic hardening of steel 09G2S were obtained. According to the results of cyclic tests, deformation models of fatigue resistance have been developed, which are sufficient to predict the life of the BF jacket. A linear relationship between the hardness fracture and the fracture toughness of 09G2S steel was obtained. The jacket metal was the most damaged in the trench zone, the least in the shaft cooling zone. Despite the unsatisfactory condition of the BF shell and the jacket, its metal leaves sufficient deformation capacity and cyclic strength. Even without the use of a proactive maintenance strategy BF, the metal of the jacket is far from completely losing its bearing capacity after long-term use. A proactive strategy, accompanied by monitoring the state of the BF shell, reduces the probability of operating modes in which the metal loses its load capacity.

Keywords: blast furnace, jacket, damage, fatigue resistance, fracture toughness.

Вступ. 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]. Найбільш небезпечним в металургійному комплексі, де 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 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 внаслідок потрапляння туди води або конденсату пари з системи охолодження. Подібні аварії, які зупинили кампанію печі внаслідок її руйнування, відбулися в 1993 році на Дніпровському металургійному комбі-

наті (м. Кам'янське, Україна), а також в 2001 році на металургійному заводі фірми «Корус» в Порт Талботі (Великобританія). Незважаючи на ланцюжок порушень технологічних виробничих інструкцій, внаслідок яких трапилися аварії, їхня ініціація і посилення втрат були обумовлені частковим руйнуванням елементів несучих конструкцій [4 - 6]. Наприклад, піч в Порт Талботі функціонувала довгий час зі зламаними болтами групового з'єднання шахти з копровим колонами [4, 5]. Великі збитки приносять і менш резонансні аварії, які пов'язані з розкриттям кожухів і розгерметизацією печі [6]. Тому питання збереження службових властивостей елементів кожухів є актуальними.

Стінка доменної печі (ДП) являє складну багатопланову конструкцію. Її стан визначає термін кампанії всієї ДП. Стан кожуху найбільш повно передає інформацію про стан оболонки, оскільки є останньої 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 деформівність 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, зокрема, сталь 09Г2С. 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 з рівнем готовності ДП не меншим 95%. Така задача витікає з вимог до ДП у відповідності зі стандартами «Індустрія 4.0» [7, 8]. Тому метою дійсних досліджень було отримання моделей службових властивостей сталі кожуху ДП, які були б придатними до діагностування технічного стану металу кожуху та для прогнозування його ресурсу. Означена мета досягалась шляхом комплексного дослідження механічних властивостей сталі кожуху по завершенню кампанії ДП. До задач досліджень входило виявлення зон кожуху з найбільшим пошкодженням і визначення ступеню деградації металу.

Сучасний стан проблеми. Проблема подовження строку експлуатації виникла на стику 20 і 21 сторіччя та 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» [9]. 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 [10].

Сталь 09Г2С (аналоги – 13Мн6, 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 влас-

твостями до 09Г2С). Вона виразилась в зменшенні параметрів діаграми статичного деформування після циклічного наробітку [11, 12]. Взагалі, для металів кожуху ДП встановлено, що деформаційне старіння суттєво зменшує в'язкість руйнування.

Аналогічні результати були отримано при роботі 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 [13, 14]. Продемонстровано можливість діагностування технічного стану конструкцій зі сталі 09Г2С фізичними способами.

Стосовно безпосередньо кожухів ДП відзначено, що довготривала дія високих температур зменшує критичний КІН сталі 09Г2С K_{IC} до 23...47 МПа $\sqrt{м}$, а відносне звуження до 30...40% [15, 16]. Така ситуація є наслідком теплового окрихчення, до якого схильні і інші сталі для кожухів ДП [17]. Внаслідок схильності сталі 09Г2С до теплового окрихчення, вона не була рекомендована до виготовлення великогабаритних охолоджуючих модулів, з яких складається оболонка ДП тонкостінного типу [18].

В той же час, багато дослідників рекомендують сталь 09Г2С для створення високонадійних конструкцій, що працюють під високим внутрішнім тиском [19]. Цьому сприяє високі в'язкість руйнування і пластичність, які при статичному навантаженні сягають величин $K_{IC} = 140...170$ МПа $\sqrt{м}$, а відносне звуження – 65% [19, 20].

Мета і завдання досліджень. Для розв'язання наведених суперечностей відносно сталі 09Г2С заплановано 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 [21], а також фактичні строки служби деяких ДП до 44 років [22, 23]. Прогнозування надійності і безпеки на такий термін потребує нових підходів, які потребують якісно нових характеристик службових властивостей. Тому комплексні дослідження опору сталі 09Г2С дії і впливу експлуатаційних процесів є актуальними.

Характеристика об'єкта досліджень. Досліджено кожух ДП об'ємом 1033 м³, 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 жорст-

ких умов експлуатації і обслуговування. До 75 - 50% поверхні кожуху шахти ДП деформовано (вигин, bulging), 30% холодильників вийшли з ладу, залишкова товщина футеровки склала 30-40%.

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 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 [24]. За результатами обстеження, проведеного спеціалізованою організацією, металокопії шахти призначено непридатними до нормальної експлуатації.

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

Відбір металу для досліджень. Зразки для досліджень було вирізано з трьох ділянок демонтованого кожуху. З неохолоджуваної ділянки шах-

ти кожуху (1 зона, висота 24,9 м), з охолоджуваної ділянки шахти кожуху (2 зона, висота 20 м), з фурменної ділянки кожуху (3 зона). За умов нормальної роботи системи охолодження температура кожуху по зонах на $10^0 - 30^0$ С більша температури оточуючого середовища. При відмові (частковій відмові) холодильників температура кожуху підвищується на декілька сотень градусів. Вигини, випинання, викривлення ділянок кожуху свідчать про їхній перегрів до температур $300^0 - 600^0$ С.

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.1). Це може свідчити про більш жорсткі умови експлуатації, які призводять до окрихнення 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 [22, 25] це свідчить про нетривалий перегрів кожуху фурменної зони до температур 700-900°C.

Таблиця 1 - 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

Хімічний склад металу і його структура суттєво не відрізняється поміж зонами. Мікроструктура ферито-перлітного типу із зерном 9 балу шкали 1 має смугастість, що відповідає 2 балу шкали 3А.

Методика досліджень при циклічному навантаженні. Зразки для механічних випробувань мали натурну товщину (тобто поверхня не оброблялась) 30 мм, ширину 12 мм. Вони деформувались по схемі 3-точкового згину в площині найбільшої жорсткості при відстані між крайніми опорами 110 мм. Схема деформування при триточковому згині широко застосовується в дослідженнях механічних властивостей. Серед переваг цієї схеми – простота виготовлення зразків і їхнього 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.

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 $R_\sigma=0,1-0,16$. 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 2-5 мм, що можна вважати критерієм граничного стану. В результаті цієї стадії випробувань отримано криві втоми. 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} . 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.

Повторно-статичні випробування і модель зміцнення. При випробуваннях водночас реєструються зусилля F, яке розвиває машина, і прогин зразка w. В подальшому така первісна діаграма перебудовувалася в канонічну криву деформу-

вання «напруження σ – деформація ϵ » за допомогою відомих залежностей [26 - 28].

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. 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 $\epsilon_{ec} = \sigma_{ec} / E$. Модуль пружності E залишається незмінним і прийнятий 200000 МПа. Загальна деформація $\epsilon_c = \epsilon_{ec} + \epsilon_{pc}$ зменшується з числом циклів навантаження N і через 10...1000 повторів стабілізується. Після появи тріщини, 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 фурменної зони (3 зона, табл. 2, рис. 1). Таке явище варто розглядати як різні фази зміцнення одного матеріалу. Більш інтенсивне окислення металу фурменної зони супроводжується підвищеними напруженнями теплового походження.

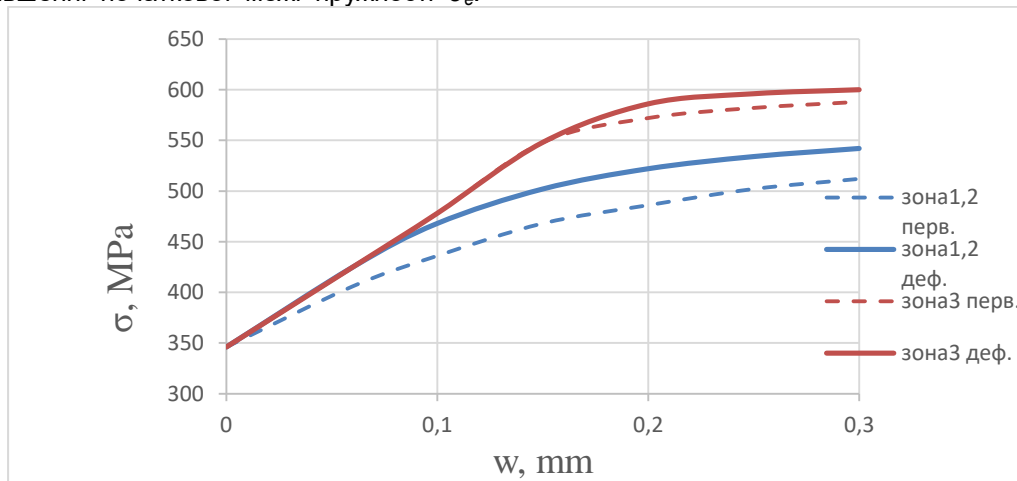


Рисунок 1 - Характер циклічного зміцнення при згині зразків кожуха, вирізаних з його різних зон, для первісного (пунктир) і деформованого (суцільні) станів

Таблиця 2 - Показники циклічного зміцнення сталі 09Г2С для зон кожуху ДП

Зона	σ_{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

Ступеня циклічного зміцнення α_e сталі 09Г2С отримано експериментально, а модель оброблена на підставі повного факторного експерименту 2^2 . Вона побудована для відносних значень

$$\bar{\sigma}_{max} = \sigma_{max} / \sigma_{e0}, \quad \bar{\sigma}_{e0} = \sigma_{e0} / \sigma_{e00} :$$

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

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 $\sigma_{T0} / \sigma_{e0} = 1,4$, 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 властивос-

тями матеріалу встановити максимальні напруження, які він потерпав.

Якщо ступінь зміцнення після експлуатації кожуху прийняти по відношенню меж плинності металу фурменної зони до металу з шахти ДП – $\alpha_e = 427 / 417 = 1,02$ (табл. 2), відносні максимальні напруження в 3 зоні становлять $\bar{\sigma}_{max} = 1,136$. Або $\sigma_{max} = 340$ МПа. З тих же міркувань максимальні на-

пруження 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 в томи $N(\epsilon)$. 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:

$$\epsilon = \frac{\sigma_{ec}(\alpha_e)}{E} + \epsilon_p = \frac{\sigma_{ec}(\alpha_e)}{E} + \sigma_p E_p = \frac{\sigma_{ec}(\alpha_e)}{E} + (\sigma - \sigma_{ec}(\alpha_e)) E_p. \quad (2)$$

За результатами випробувань можна приймати модуль зміцнення $E_p=10^6$ МПа (рис. 2).

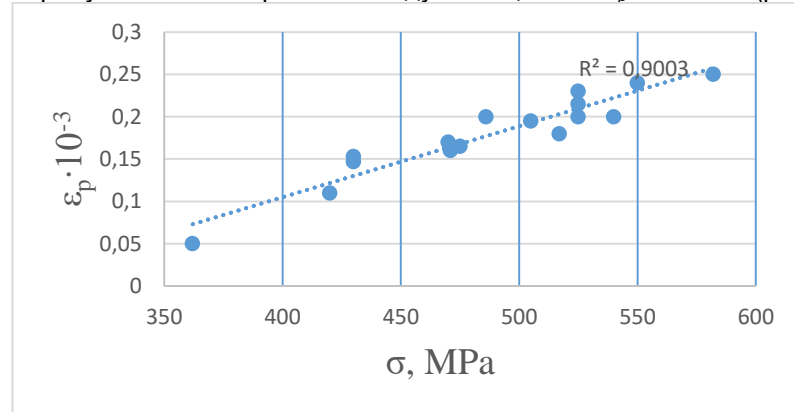


Рисунок 2 - Взаємозв'язок між напруженням та сталим рівнем пластичної деформації при циклічному згині зразків сталі 09Г2С

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 в томи в силовій $N(\sigma)$ і деформаційній $N(\epsilon)$ трактовках.

Моделі в томи. Тріщини утворюються на розтягнутій зоні зразків в декількох місцях, демонструючи багатоджерельність пошкодження. Така ситуація характерна для високих рівнів напружень, коли тріщини не встигають об'єднатися в єдину магістральну. Тріщина виникає як поверхнева напівкругова і згодом трансформується в крайову. На такому етапі її розвитку фіксувалась довговічність N , яка використовувалась для побудови моделі в томи. Подальше зростання тріщини супроводжується випрямленням її фронту. Досягнення тріщиною критичного розміру, який відповідає критичному КІН при циклюванні K_{Ic} , визначалось по зміні механізму руйнування. В свою чергу, це віддзеркалювалось на зламі зразків межею між тонковолокнистою і крупнозернистою структурою.

На боковій грані зразка критичний розмір тріщини характеризується зміною траєкторії (рис. 3). Тріщина починає більш інтенсивно 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.



Рисунок 3 - Зміна траєкторії тріщини при досягненні критичного КІН

Результати циклічних випробувань. Суттєвої різниці довговічності до появи тріщини між зразками, що вирізані були з різних зон кожуху ДП, не виявлено. Це дає підставу побудувати єдину криву в томи для всіх випробуваних зразків (рис. 4). Рівняння нахиленої ділянки кривої в томи має широко вживану ступеневу форму:

$$\sigma_{\max}^m \cdot N = \text{const} = B_1, \quad (3)$$

де $m=10,1$ – показник нахилу кривої в томи, $B_1=10^{3,22}$ – константа рівняння.

Застосовувати рівняння (3) для розрахунків кожуху ДП треба дещо обережно. Адже воно отримано за умов певного градієнту напружень. Цей чинник дуже впливовий, якщо використовуються силові критерії в томи [29]. Границі витривалості

при циклічному згині збільшуються на 30-50% відносно випробувань на розтягування. Тому модель (3) буде коректним застосовувати тільки для зон випинання, де домінують деформації згину. Для

решти зон кожуху пошкодження контролюється, головним чином, напруженнями розтягування в кільцевому і висотному напрямках.

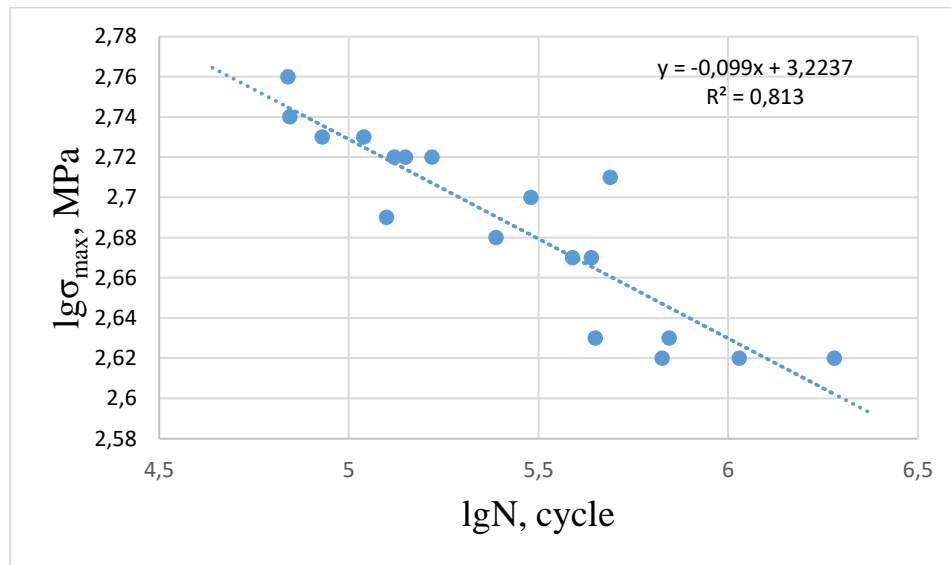


Рисунок 4 - Нахилена ділянка єдиної (узагальненої) кривої втоми та результати випробувань на трітточковий згин зразків сталі 09Г2С для трьох ділянок кожуху ДП

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 [29]. Тому представляє інтерес для розрахунків довговічності кожуху ДП до появи тріщини застосувати деформаційні критерії. Такі спроби для кожухів доменних агрегатів мали місце раніше [30, 31]. 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 [32]:

$$\varepsilon_a = AN^{-0,6} + B \left(\frac{N_G}{N} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

де A і B – параметри рівняння,
 N_G – довговічність, на якій визначено параметр B ,
 m – показник нахилу кривої багатоциклової втоми з рівнянням ступеневого типу (3),
 ε_a – амплітудна деформація циклу.

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 ε_{max} і мінімальні ε_{min} значення, визначаються по залежності (4), отриманій для стадії сталого деформування. Тоді амплітудна деформація складе: $\varepsilon_a = 0,5(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})$.

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

$$\varepsilon_a = \frac{21,2}{(\lg N)^{1,73}} 10^{-3} \quad (5)$$

Тіснота зв'язку між змінними цього регресивного характеризується коефіцієнтом кореляції, який на рис. 6 позначений, як $R^2=0,86$. Для рівняння регресії, отриманому за цими ж даними в силівій постановці, коефіцієнт кореляції є меншим і складає $R^2=0,81$ (рис. 4). 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 [32].

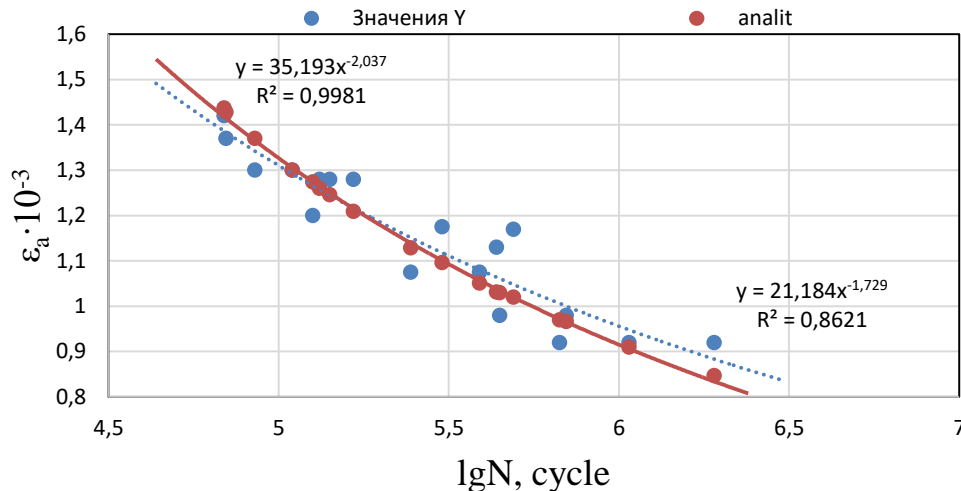


Рисунок 5 - Результати втомних випробувань для деформаційних критеріїв (значення Y), експериментальна крива втоми (пунктир), а також аналітична крива втоми (analit, суцільна)

Графік аналітичної моделі (5), який побудований в тих самих напівлогарифмічних координатах, показує, що вона також може бути представлена аналогічно ступеневою залежністю (analit, рис. 5):

$$\epsilon_a = \frac{35,2}{(\lg N)^2} 10^{-3}. \quad (6)$$

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:

$$\epsilon_a = \frac{E_0}{(\lg N)^2}. \quad (7)$$

Отже, за результатами випробувань отримано параметр моделі втоми $E_0=35,2$, 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 [33, с. 105] наведені $(\epsilon - N)$ -криві для згину, крутіння і розтягання. Їх розташування по довговічності різняться на порядок.

В даних випробуваннях не врахована непружність 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 побочування запропоновано знизити параметр $E_0 = 35,2$ 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 [29]. Враховуючи результати, представлені на рис.17, можна приймати $\alpha=2$. То-

ді допустимий параметр $[E_0] = E_0/\alpha = 17,6$. Деформаційні моделі (6) - (7) для практичних розрахунків кожуху ДП трансформуються наступним чином:

$$\epsilon_a = \frac{[E_0]}{(\lg N)^2} = \frac{17,6}{(\lg N)^2} 10^{-3}. \quad (8)$$

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 [32]:

$$S_{\lg N} = A_{c(d)} + k_{Lc(d)} (\lg N - \lg N_A), \quad (9)$$

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 $\lg N_f = \lg N_A = 5,14$ спостерігається СКВ $S_{\lg N} = A_c = 0,273$. 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 $S_{\lg N} = 0,35$, яке спостерігається на рівні $\lg N_f = 7$. Для деформаційних критеріїв параметр рівняння визначається за допомогою залежності [32]:

$$k_{Ld} = k_{Lc} + 0,25 A_c. \quad (10)$$

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

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

Циклічна в'язкість руйнування. 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 $L=4h$. При цьому КІН визначається через громіздкі формули коректувальної функції [34 - 36]. Після аналізу формул за допомогою програми Excel в області практичних випадків була знайдена адаптована залежність:

$$K_I = 0,368\sigma \cdot \exp(3,33a_r)\sqrt{h}, \quad (12)$$

де $a_r=a/h$ – відносний розмір тріщини довжиною a .

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} .

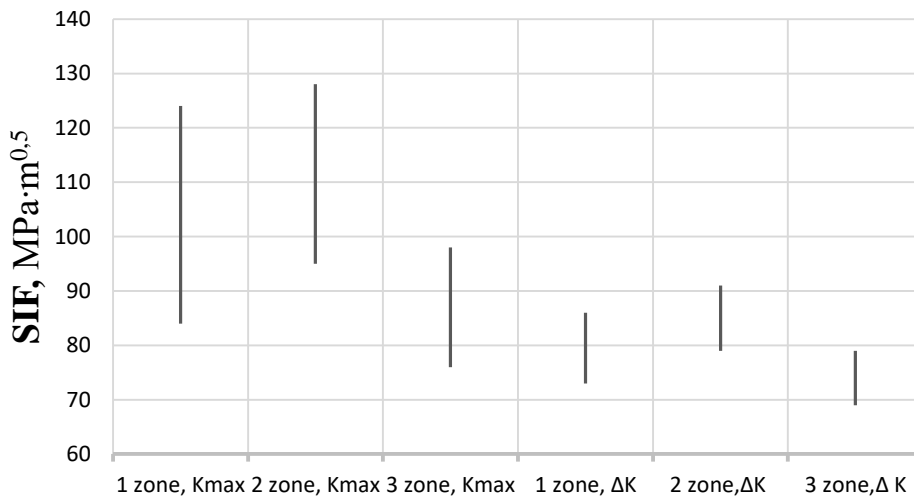


Рисунок 6 - Діапазони критичних значень КІН (SIF) при циклічному навантаженні для зон кожуху доменної печі (для максимальних значень K_{max} та для розмахів напружень ΔK)

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. 6). Такого зростання не відбувається для КІН, виражених для розмахів напружень ΔK . Це свідчить про зменшення впливу чинника аси-

метрії 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). Такий результат відповідає сталим уявленням про процес розвитку тріщин і міг би не заслуговувати на увагу. Але отримані кількісні співвідношення є важливими при покроковій (поетапній) оцінці ризику експлуатації.

Таблиця 3 - Критичні КІН для зон кожуху, а також КІН K^* для $v=10^7$ м/цикл

Зона розташування зразків	Середні значення $K_{fcmax}^{0,5}$ МПа·м ^{0,5}	Коефіцієнти варіації K_{fcmax}	Середні значення $\Delta K_{fc}^{0,5}$ МПа·м ^{0,5}	Коефіцієнти варіації ΔK_{fc}	K_{max} МПа·м ^{0,5}	ΔK^* МПа·м ^{0,5}
1 зона	99	0,190	78	0,060	60	42
2 зона	103	0,116	87	0,049	86	60
3 зона	87	0,087	73	0,057	70	50

Дослідження твердості. Метод діагностування стану металів за параметрами твердості (LM – метод) в останні роки набуває широкого розповсюдження [37]. На відміну від більшості фізичних методів неруйнівного контролю, методів дефекто-

скопії, цей метод найближче пов'язаний з традиційними способами визначення механічних властивостей, які відбуваються шляхом руйнування зразків. Ступінь пошкоджуваності матеріалу оцінюється не за абсолютними значеннями твердос-

ті, а за параметрами розсіювання її значень, як більш показними, ніж сама твердість [38]. 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.

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-Д3 та перетворювач У1. Вимірювання здійснюється контактним-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 (sections) розміром 10x10 мм. Кількість ділянок в залежності від розміру зразка складала від 36 до 42. У кожній ділянці було проведено не менше 15-ти вимірів твердості по шкалі Брінеля.

В LM – методі розпорошення твердості запропоновано характеризувати, так звані, коефіцієнтом гомогенності Вейбула, який розраховують за

формулою Гумбеля [38]. З урахуванням середньоквадратичного відхилення логарифма твердості S_{lgHB} коефіцієнт гомогенності буде:

$$m = \frac{0,4343}{S_{lgHB}} = \frac{0,4343}{0,4343 \cdot v_{HB}} = \frac{1}{v_{HB}}. \quad (13)$$

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. 4). В даному випадку коефіцієнт варіації v_{HB} підраховано за середніми показниками твердості на ділянках 10x10 і характеризує розсіяння твердості на площі усього зразка. У останньому стовбці цієї таблиці приведено відносний коефіцієнт варіації, де за базу (за знаменник) взято величину $v_{HB}=0,035$ для 2 зони як найменшої.

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

Таблиця 4 - 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

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 зоні. Найбільше пошкодження, а саме в 3,4 рази відносно 2 охолодженої зони, спостерігається для 3 фурменної 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 [38].

Із співставлення результатів дослідження твердості і в'язкості руйнування сталі 09Г2С видно, що вказана кореляція має лінійний характер (рис. 7). Якщо представити експериментально знайдені показники в'язкості руйнування як поточні значення процесу старіння або пошкодження матеріалу, то їх поведінка може бути формалізована рівнянням:

$$K_{fc}^d = K_{fc} - r_{HBS} v_{HB}. \quad (14)$$

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 $K_{fc} = K_{fcmax} = 110 \text{ МПа}\sqrt{m}$, а коефіцієнт пропорційності $r_{HBS} = 1,9 \text{ (МПа}\sqrt{m})/\%$.

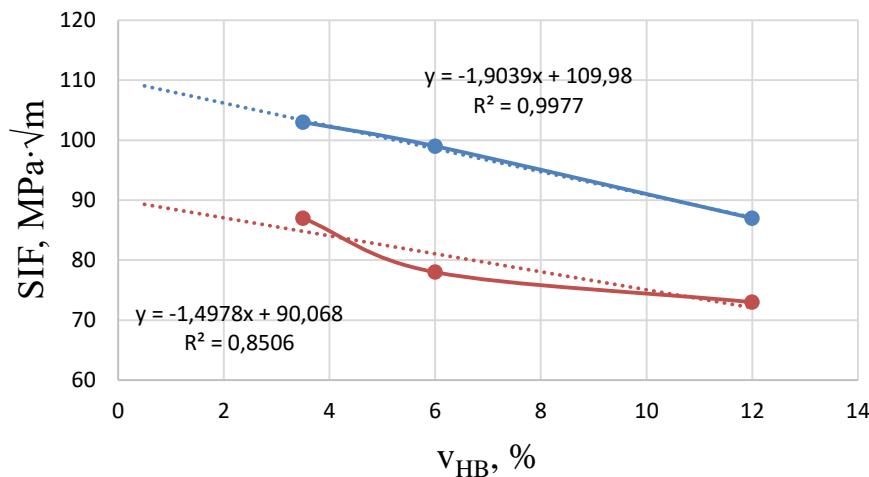


Рисунок 7 - Взаємозв'язок між критичним циклічним KIH (SIF), вираженим через максимальні напруження K_{Icmax} (верхня крива) і розмахи напружень ΔK_{Ic} (нижня крива), і коефіцієнтом варіації твердості

Виявлену зміну критичних KIH можна вважати наслідком впливу експлуатаційного пошкодження. Тобто, критична в'язкість руйнування сталі 09Г2С реагує на експлуатаційний наробіток кожуху ДП і може слугувати за діагностичний параметр. Такий спосіб діагностування технічного стану кожуху ДП є відомим. При ньому з кожуху відбирають мікроразки для випробувань шляхом руйнування [17]. Така операція не завжди можлива. Тому доцільно проводити діагностування неруйнівними способами, таким як дослідження твердості. Отримана модель (14) дає таку можливість.

На підставі цієї моделі можна вважати значення $K_{Icmax}=110 MPa\sqrt{m}$ 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 [18]. 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.

Обговорення результатів 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 міцнісні властивості.

Такий висновок не є аномальним, хоча і суперечить сталій думці про інтенсивну втрату властивостей сталі 09Г2С під впливом експлуатаційного наробітку та про схильність сталі до теплового окрихчення. Щодо зберігання деформаційної здатності сталі 09Г2С після напрацювання свідчать

випробування цієї сталі на циклічне розтягання, які проведені авторами. З порівняння довжини зразків видно, що в квазістатичній області при довговічності $N \rightarrow 10^4$ циклів відносно 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 шлакозовів при температурах до 600°C не призвела до теплового окрихчення [39].

Порівняно невелике падіння циклічної в'язкості руйнування після експлуатації не є неочікуваним. Більш чуттєво і однозначно реагує на наробіток пороговий KIH [40]. 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 [41].

Випробування твердості металу кожухів за допомогою портативних твердомірів передбачено рекомендаціями по діагностуванню технічного стану ДП [25]. Падіння первісної твердості на 15% свідчить про нетривалий перегрів кожуху понад 900° С, а падіння твердості на 30% є наслідком довготривалої дії температури понад 900° С. 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.

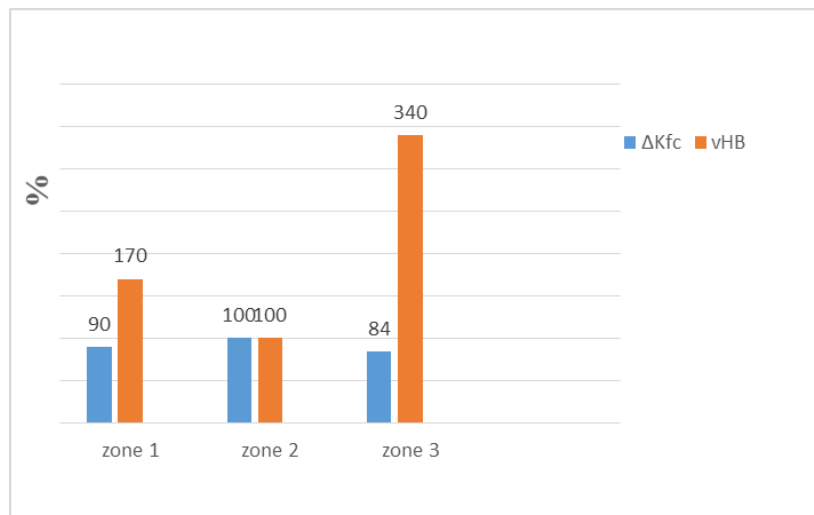


Рисунок 8 - Показники пошкодженості зон кожуху ДП у вигляді відносних величин ΔK_{fc} і v_{HB} .

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 змінюються при наробітку на десятки відсотків від первісного значення (рис. 8). Тому вони придатні для діагностування. Показники розпорошення твердості сталі 09Г2С при наробітку змінюються на сотні відсотків (тобто, в рази) (рис. 8). Це є сильною діагностичною ознакою. Отже, вимірювання твердості є перспективним способом оцінки технічного стану металевих конструкцій доменного комплексу.

Висновки.

1. Розроблено та впроваджено методу побудови деформаційних моделей втомі 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. На її підставі визначено, що максимальні еквівалентні напруження в фурменій зоні становили 340 МПа, а в шахтній зоні - 300 МПа.

2. Знайдена доволі проста апроксимація деформаційної моделі втомі Басквіна-Менсона-Коффіна, де є невідомим один параметр. Це дає змогу визначати положення кривої втомі 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 втомі, 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 властивостей складає 16%. При цьому розпорошення твердості збільшується в 3,4 рази. Показники статичної міцності фурменної 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. 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 спостерігаються 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.

Бібліографічний опис.

1. Северцев М.А., Дедков В.К. Системный анализ и моделирование безопасности. - М.: Высш. шк., 2006. - 462 с.
2. Аверин Г.В., Москалец В.М. Анализ состояния и безопасности объектов повышенной опасности металлургической отрасли // Вісник донецького ун-ту. 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. - Вып. 16. - 2008. - С. 398 - 413.
4. The explosion of No. 5 Blast Furnace, Corus UK Ltd, Port Talbot: Report. (2008) Published by the Health and safety executive, 61. Available online: <https://www.hse.gov.uk/pubns/web34.pdf>
5. J. Hodges and S. Curry. "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. Curran Associates, Inc. (2013). 593 - 599.
6. Belodedenko, S.V., Bilichenko, G.N., 2015. "Quantitative risk-analysis methods and mechanical systems safety". *Metallurgical and mining industry* 12, 272-279.
7. van Laar R., Engel E. Modern blast furnace design // Millennium steel.- 2016.- P. 35 - 40.
8. Identifying Sustainability, Reliability for Iron and Steelmaking// DaNews.-2018. - №177. - P. 30 - 33.
9. Paolone R. From liquid metal to rolling: ideas and solutions to increase efficiency and minimize waste // DaNews. - 2019. - №181. - P. 4-12.
10. Della Mora D. Drive for sustainable steelmaking is forming a green wave // DaNews. - 2019. - №181. - P. 94 - 97.
11. 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.
12. Емельянов И. Г., Миронов В. И., Кузнецов А. В. Альтернативная оценка долговечности для элементов вагона-цистерны// Транспорт Урала. - 2009. - №2. - С. 56 - 60.
13. Щипачев А. М., Наумкин Е. А., Кузеев И. Р. Изменение закона распределения скорости ультразвуковых волн при циклическом нагружении стали 09Г2С в малоцикловой области// Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - 2012. - №16 (5 (50)). - С. 89 - 92.
14. Наумкин Е. А., Кузеев И. Р., Прохоров А. Е. Оценка степени поврежденности стали 09Г2С в условиях малоцикловой усталости с учетом параметров поверхностной энергии. /Сборник научных статей. «Мировое сообщество: проблемы и пути решения» - Уфа; Изд-во УГНТУ, 2005. - № 17. - С. 66 -75.
15. 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.
16. Трещинообразование в кожухах доменных печей//В. К. Востров, Е. М. Баско, В. М. Горицкий, Г. П. Кандаков // Строительная механика и расчет сооружений. - 1987. - №9. - С. 16 - 19.
17. Kandakov G. P., Goritsky, G. R. et al., 2007. "Improving the reliability and resource of blast furnace casings based on the assessment and prediction of the metal condition". *Industrial and civil construction*, 4, 6 - 9.
18. Chechenev, V.A., 2011. "Large-size cooled blast furnace shaft modules". Dnepropetrovsk, 280 (in Russian).
19. 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.
20. Еремин К. И., Ницета С. А. Оценка остаточного ресурса строительных металлоконструкций по результатам натурных испытаний // Заводская лаборатория. - 1997. - №3. - С. 39-54.
21. Любин А.Е. Проблемы обеспечения надежности кожухов доменных печей и воздухонагревателей // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. -2013. - Вип. 11. - С. 12 - 24.
22. РД 11-288-99. Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей. - М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 2006.
23. 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.
24. Ibragimov M. S., Shlemko Y. I., Pelykh I. V., 2018. "Some peculiarities of the blast furnace overhaul under mixed maintenance." *Metallurgical and Mining Industry* 7, 219 - 223. (in Russian). Available online: <https://nmetau.edu.ua/ua/mdiv/i2043/p2441>.
25. Любин А. Е. Кожухи доменных печей и воздухонагревателей. Действительная работа и промышленная безопасность. - К.: Сталь. - 2011. - 268 с.
26. Маклинток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. - М.: Мир. - 1970. - 443 с.
27. Надаи А. Пластичность. - М. - Л.: ОНТИ НКТИ СССР. - 1936. - 280 с.
28. Добровольский В. И., Пряхин В. В. К методике определения упругопластических деформаций при чистом изгибе// Завод. лаб. - 1985. - №8. - С. 79 - 81.
29. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия/ В. Т. Трощенко, Г. В. Цыбанев, Б. А. Грязнов, Ю. С. Налимов.- Киев: ИПП НАН Ураины. - 2009. - 664 с.
30. К расчету кожуха доменной печи на малоцикловую усталость / А. П. Махов, А. П. Лобцов, В. А. Сергеев, А. И. Бобинов // Изв. Вузов. Черная металлургия. - 1980. - №6. - С. 133 - 136.
31. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении/ Отв. ред. Н. А. Махутов, А. Н. Романов. - М.: Наука. - 1983. - 273 с.

32. Белодеденко С. В., Угрюмов Д. Ю. Эффективность прогнозирования ресурса элементов прокатного оборудования и деформационные критерии усталости //Металлург. и горноруд. пром-сть - 2003. - №5. - С. 86-90.
33. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность. - М.: Машиностроение. - 1985. - 224 с.
34. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов. - 1985. – 61 с.
35. Панько І. М. Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиностійкості матеріалів і елементів конструкцій. – Львів: НАН України, ФМІ. - 2000. - 280 с.
36. 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. - 2018, Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia. - P. 161 - 162.
37. Фененко О. А. Влияние деградационных процессов на механические характеристики конструкционных материалов элементов планера летательного аппарата// Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. - 2015. – Вип. 4(45). – С. 116 - 119.
38. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Швец В. П. Метод оценки вязкости разрушения материала по рассеянию характеристик твёрдости //Проблемы прочности. - 2007. – №6. – С. 5 - 12.
39. Исследование прочности лито-сварного соединения. А. В. Лоза, Д. А. Рассохин, В. В. Чигарев, В. В. Шишкин// Наука та виробництво: міжвуз. тем. зб. наук. пр. Вип.18.- ДВНЗ «ПДТУ». - Маріуполь, ПДТУ. – 2018.- с. 59 – 64.
40. 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 допов. міжнар. наук.-техн. конф. – Київ: ІПМ НАН України, 2013. - С. 184 - 185.
41. Гринь Е. А., Перевезенцева В. Т., Саркисян В. А. Трещиностойкость паропроводных центробежно-литых труб из стали 15X1M1Ф //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2019. - №85(4). – С. 42 - 49.

References.

1. Severtsev M. A., Dedkov V. K. System analysis and modeling of safety. - M.: Higher school, 2006. – 462 p.
2. Averin G. V., Moskalets V. M. Analysis of the state and safety of high-risk facilities in the metallurgical industry //News of Donetsk University. Ser. A: Natural sciences. - 2008. – Issue. 1. - P. 324 - 333.
3. Mozhareno N. M., Tuboltsev L. G., Golubykh G. N. Industrial safety parameters for blast furnaces //Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. - Issue 16. - 2008. - P. 398 - 413.
4. The explosion of No. 5 Blast Furnace, Corus UK Ltd, Port Talbot: Report. (2008) Published by the Health and safety executive, 61. Available online: <https://www.hse.gov.uk/pubns/web34.pdf>
5. J. Hodges and S. Curry. "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. Curran Associates, Inc. (2013). 593 - 599.
6. Belodedenko, S. V., Bilichenko, G. N., 2015. "Quantitative risk-analysis methods and mechanical systems safety". Metallurgical and mining industry. №12, P. 272 - 279.
7. van Laar R., Engel E. Modern blast furnace design // Millennium steel.- 2016.– P. 35 - 40.
8. Identifying Sustainability, Reliability for Iron and Steelmaking// DaNews.-2018. - №177. - P. 30-33.
9. Paolone R. From liquid metal to rolling: ideas and solutions to increase efficiency and minimize waste //DaNews. - 2019. - №181. - P. 4-12.
10. Della Mora D. Drive for sustainable steelmaking is forming a green wave // DaNews. - 2019. - №181. - P. 94 - 97.
11. Emelyanov I. G., Mironov V. I., Kuznetsov A. V. Estimation of durability of a structure lying on supports // Problems of mechanical engineering and machine reliability. - 2010. - №1. - P. 101 - 107.
12. Emelyanov I. G., Mironov V. I., Kuznetsov A. V. An alternative estimate of durability for elements of a tank car // Transport of the Urals. - 2009. - №2. - P. 56 - 60.
13. Shchupachev A. M., Naumkin E. A., Kuzeev I. R. Change in the law of the distribution of ultrasonic wave velocity under cyclic loading of 09G2S steel in a low-cycle region // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University, - 2012. - №16 (5 (50)). - P. 89 - 92.
14. Naumkin E. A., Kuzeev I. R., Prokhorov A. E. Assessment of the degree of damage to 09G2S steel under low-cycle fatigue conditions taking into account surface energy parameters. //Collection of scientific articles. "The world community: problems and solutions" - Ufa; Publishing House of Ural State Technical University, 2005. - №17. - P. 66 - 75.
15. Grudev I. D., Vostrov V. K., Galybin A. N. Crack formation in the jackets of blast furnaces and air heaters from local overheating // Structural Mechanics and Structural Analysis. - 1982. - №1. - P. 13 - 18.
16. Crack formation in blast furnace jackets // V. K. Vostrov, E. M. Basko, V. M. Goritsky, G. P. Kandakov // Structural mechanics and calculation of structures. - 1987. - №9. - P. 16 - 19.
17. Kandakov G. P., Goritsky G. R. et al. "Improving the reliability and resource of blast furnace casings based on the assessment and prediction of the metal condition". Industrial and civil construction. - 2007. №4, P. 6 – 9.
18. Chechenev V. A., 2011. "Large-size cooled blast furnace shaft modules". Dnepropetrovsk, 280 (in Russian).
19. Rizvanov R. G., Bikinin A. I., Yamilev M. Z. Experimental studies of structurally similar samples for cyclic endurance // Machines, Units and Processes of the Oil and Gas Industry. - 2018. - № 3. - P. 70-75.
20. Eremin K. I., Poverty S. A. Estimation of the residual resource of building metal structures based on the results of field tests // Factory Laboratory. - 1997. -№ 3. - P. 39 - 54.

21. Lyubin A. E. Problems of ensuring the reliability of jackets for blast furnaces and air heaters // Proceedings of the Ukrainian Institute of Steel Structures named V. M. Shimanovsky. 2013. - Issue 11. - P. 12 - 24.
22. RD 11-288-99. Methodology for determining the technical condition of blast furnace casings and air heaters. -M. : TSNIIPSK named Melnikova, 2006.
23. 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.
24. Ibragimov M. S., Shlemko Y. I., Pelykh I. V. "Some peculiarities of the blast furnace overhaul under mixed maintenance." Metallurgical and Mining Industry, 2018. №7, P. 219 - 223. (in Russian). Available online: <https://nmetau.edu.ua/ua/mdiv/i2043/p2441>.
25. Lyubin A. E. Housings of blast furnaces and air heaters. Actual work and industrial safety. - K. : Steel. - 2011. - 268 p.
26. Macklinton F., Argon A. Deformation and fracture of materials. - M. : World. - 1970. - 443 p.
27. Nadai A. Plasticity. - M.- L. : ONTI NKTI USSR. - 1936. - 280 p.
28. Dobrovolsky V. I., Pryakhin V. V. On the methodology for determining elastoplastic deformations under pure bending // Zavod. lab. - 1985. - №8. - P. 79 - 81.
29. Fatigue of metals. Influence of surface state and contact interaction / V. T. Troshchenko, G. V. Tsybanev, B. A. Gryaznov, Yu. S. Nalimov. - Kiev: IPP NAS of Ukraine. - 2009. - 664 p.
30. To the calculation of the jacket of a blast furnace for low-cycle fatigue / A. P. Makhov, A. P. Lobtsov, V. A. Sergeev, A. I. Bobinov // Izvestia of Universities. Ferrous metallurgy. - 1980. - №6. - P. 133 - 136.
31. Structural strength under low-cycle loading //Otv. ed. N. A. Makhutov, A. N. Romanov. - M.: Science. - 1983. - 273 p.
32. Belodedenko S. V., Ugrumov D. Yu. Efficiency of predicting the resource of elements of rolling equipment and deformation criteria for fatigue // Metallurgical and mining industry. - 2003. - №5. - P. 86-90.
33. Kogaev V. P., Makhutov N. A., Gusenkov A. P. Calculations of machine parts for strength and durability. - M.: Mechanical Engineering. - 1985. - 224 p.
34. GOST 25.506-85. Methods of mechanical testing of metals. Determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading. - M.: Publishing house of standards. - 1985. - 61 p.
35. Panko I. M. Theoretical Foundations of Engineering Methods for Assessment of Material and Material Design and Element Design. - Lviv: NAS of Ukraine, FMI. - 2000. - 280 p.
36. 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. - 2018, Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia. - P.161-162.
37. Fenenko O. A. Influence of degradation processes on the mechanical characteristics of structural materials of glider elements of an aircraft //Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Force. - 2015. - Issue 4 (45). - P. 116-119.
38. Lebedev A. A., Muzyka N. R., Shvets V. P. A method for estimating the fracture toughness of a material by scattering hardness characteristics //Problems of durability. - 2007. - №6. - P. 5 - 12.
39. Investigation of the strength of the cast-welded joint. A. V. Loza, D. A. Rassokhin, V. V. Chigarev, V. V. Shishkin //Science and production: inter-university thematic collection of scientific papers - Issue №18.- DVTU "PDTU" . - Mariupol, PDTU. - 2018 - P. 59 - 64.
40. Nikiforchin G. M., Student O. Z. Influence of operational factors on high-temperature hydrogen degradation of steels of tubular structural elements //Fatigue and thermo-automation of materials and structural elements: abstracts. international. of sciences-tech. Conf. - Kiev: IPM NAS of Ukraine, 2013. - P. 184 - 185.
41. Grin E. A., Perevezentseva V. T., Sarkisyan V. A. Crack resistance of steam-centrifugally cast pipes made of 15X1M1F steel //Factory laboratory. Diagnosis of materials. - 2019. - 85 (4). - P. 42 - 49.

Стаття постуила: 23.08.2019