

УДК: 669.017:669.14.018.295:620.193.004

Е. В. Парусов, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-4560-2043*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України***С. І. Губенко**, д.т.н., проф., с.н.с., ORCID 0000-0001-6626-3979*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури***О. В. Парусов**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9879-6179*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

ОСОБЛИВОСТІ ЗНОСУ ПАР ТЕРТЯ КАНАТ-БЛОК І КАНАТ-БАРАБАН ЗА УМОВ РОБОТИ ПІДЙОМНО-ТЯГОВИХ ПРИСТРОЇВ

Анотація. Досліджено особливості зносу пар тертя канат-блок та канат-барабан підйомно-тягових пристроїв, що працюють в умовах гарячого цеху металургійного заводу та гірничо-збагачувального комбінату. Показано, що причинами зносу елементів пар тертя канат-блок і канат-барабан є взаємодія в зонах їхнього контакту, що відбувається в поверхневих шарах під дією високих контактних напружень, тертя, циклічних навантажень, абразивних частинок, активних атмосферних та промислових середовищ. Встановлено, що ці дії призводять до незворотніх процесів накопичення напружень та пластичних зсувів, які мають періодичний і неоднорідний характер. Проаналізовані структурні зміни поблизу робочих поверхонь сталюого кранового блоку та чавунного барабану в процесі експлуатації, показані особливості механізмів утворення та відшарування частинок зносу при їх взаємодії з канатом. Показано, що міцність підйомного або тягового каната визначається ступенем зношування дротів, насамперед тих, що контактують з блоком та барабаном. Проаналізовані структурні зміни в поверхневих шарах дротів та механізми утворення частинок зносу, що підтверджують неоднорідний характер зношування дротів у пасмах канату. На зношеній поверхні дротів спостерігали також ділянки абразивного зносу, де під дією твердих сторонніх частинок забруднень з гострими кутами, що потрапляють між дротами, проходив підріз поверхні дротів. Показано, що присутність неметалевих включень призводить до утворення частинок зносу та втомних тріщин. Встановлено, що зношування пар тертя канат-блок і канат-барабан підйомно-тягових пристроїв має втомно-корозійний характер, а основним механізмом утворення частинок зносу є розвиток пластичних зсувів в поверхневих шарах пар тертя та їхнє відділення шляхом пластичного відшарування та абразивного і корозійного руйнування. Форма частинок зносу залежить від типу матеріалу та умов їхнього утворення. Запропоновано вживати заходи стосовно конструкційних підходів до пар тертя з урахуванням умов їхньої роботи, щоб знизити контактні напруження та підвищити їх зносостійкість, надійність і довговічність.

Ключові слова: підйомно-тягові пристрої, знос, пари тертя, блок, барабан, канатний дріт, частинки зносу.

Посилання для цитування: Парусов Е. В., Губенко С. І., Парусов О. В. Особливості зносу пар тертя канат-блок і канат-барабан за умов роботи підйомно-тягових пристроїв. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 441-454. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-441-454.

Актуальність проблеми. Надійність та довговічність підйомних та тягових канатів кранів, екскаваторів та інших підйомно-тягових пристроїв залежать не тільки від технологічного процесу виготовлення дроту (гарячого деформування литої заготовки для отримання прокату та подальшого його багаторазового волочіння), хімічного складу, мікроструктури та механічних властивостей сталі, а й від геометрії профілю струмка блоку та барабану, а також від умов взаємодії пар тертя канат-блок та канат-барабан [1, 2]. Причинами передчасного зносу елементів пар тертя канат-блок, канат-барабан є неправильний вибір конструкції каната, типу та напрямків звивання, неправильна нав'язка на барабан або блок, неправильний вибір співвідношення діаметру каната та радіусами профілей струмка блоку або канавок барабану, а також рівня допущених навантажень, надмірні динамічні навантаження на елементи пари, наявність абразивного зносу та корозії. Для підвищення довговічності і надійності пар тертя, що розглядаються, важливе значення має взаємне розташування їх елементів, що виключає можливість спадання каната, його випадання, зміщення за встановлені габарити і перетирання. Практично всі перелічені причини, що впливають на надійність та довговічність пар тертя канат-блок і канат-барабан, пов'язані з проблемою локальної деформації матеріалу в місцях контакту каната з блоком або барабаном, тобто у струмках блоків та канавок барабанів.

Умови роботи зазначених пар тертя визначаються величиною та циклічністю діючих навантажень, температурою та ступенем агресивності навколишнього середовища, виду та якості поверхні струмка тощо. Тому, розглядаючи особливості зношування канатного дроту, слід враховувати трибологічну взаємодію в зонах контакту пар тертя канат-блок, канат-барабан, що відбувається в їх поверхневих шарах під дією високих контактних напружень, циклічних навантажень і температур, абразивних частинок, активних атмосферних та промислових середовищ.

Відомо, що втрата міцності тягових канатів відбувається за рахунок механічного стирання та зниження в'язких властивостей дроту. У разі стирання величина втрати міцності становить ~ 30 %, зниження в'язкості дроту ~ 25 %, спільна втрата міцності дротів каната у місці його обриву ~ 30 %, а без урахування міцності дроту – понад 60 % [3]. Специфічними умовами роботи підйомних та тягових канатів є: навантаження з великими амплітудами коливань та великим коефіцієнтом динамічності; високий рівень корозійного впливу навколишнього середовища; контакт із абразивним середовищем; не завжди витримане співвідношення діаметрів

опорних поверхонь до діаметру каната [4]. Очевидно, зношування канатів відбувається не тільки в результаті взаємодії пар тертя канат-блок і канат-барабан, але також внаслідок роботи безлічі пар тертя дротів між сусідніми пасмами (ланками) каната та в межах кожного пасма. Таким чином, реалізується складна система взаємодії пар тертя, які працюють в умовах високих циклічних навантажень і дії абразивних частинок, що викликають накопичення напружень, появу часток зносу та втомних тріщин, а також взаємодії з агресивними компонентами навколишнього середовища, що призводить до виникнення корозійних пошкоджень. Для розроблення ефективних методів та засобів забезпечення високого рівня надійності та довговічності канатів підйомно-тягових пристроїв необхідна повнота уявлень про вплив різних факторів на структурні та фазові перетворення в сталі під час експлуатації в умовах роботи складної системи пар тертя.

Мета роботи – вивчення особливостей процесу зношування канатного дроту з урахуванням взаємодії в парах тертя канат-блок та канат-барабан.

Матеріали і методи досліджень. Досліджували зношені кранові блок та барабан, які пропрацювали в умовах металургійного підприємства одинаковий термін (2 роки), хімічний склад матеріалів наведено у табл. 1. При проведенні досліджень використано дроти $\varnothing 2,20$ мм зовнішнього шару кранового канату $\varnothing 32,0$ мм після експлуатації в гарячому цеху металургійного заводу (склад № 3) та канатів екскаваторів типу ЕКГ та ЕШ $\varnothing 39,0$ мм (склад № 4) [5], що працювали в умовах гірничо-збагачувального підприємства. Зразки дроту відбиралися від канатів у вихідному стані та після експлуатації протягом 3–12 місяців.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджених матеріалів.

№ за/п	Матеріал, виріб	Вміст хімічних елементів, % ваг.							
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1	35Л, блок	0,32	0,34	0,31	0,011	0,008	0,10	0,08	0,10
2	СЧ, барабан	3,80	0,95	1,60	0,021	0,022	0,20	0,30	-
3	70, канатний дріт	0,69	0,84	0,32	0,014	0,012	0,10	0,10	0,10
4	С72D, канатний дріт	0,73	0,68	0,22	0,012	0,009	0,04	0,03	0,07

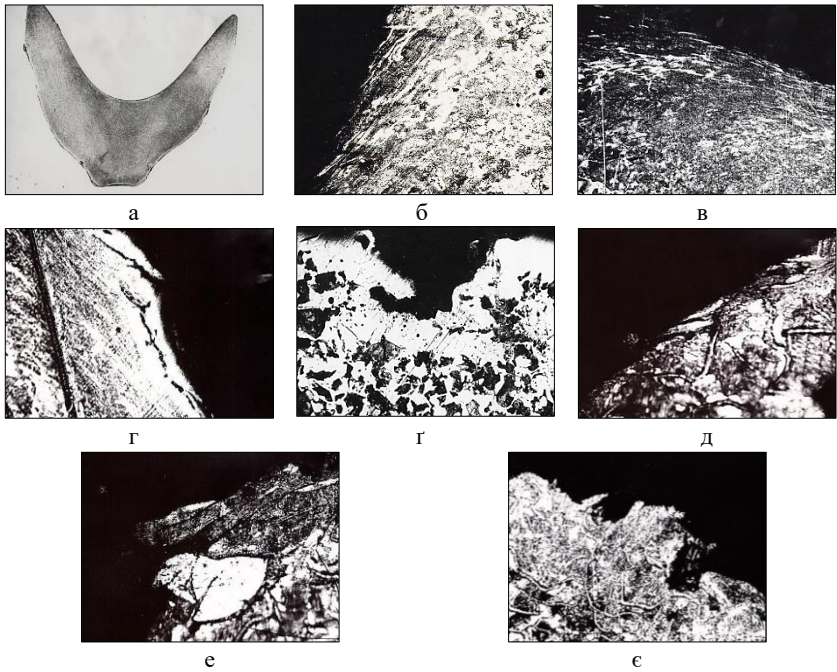
При проведенні досліджень застосовували методи: металографічний («Neophot-31»), растровий електронно-мікроскопічний («JSM-35»), рентгеноструктурний («ДРОН-2.0», «ДРОН-УМ1»). Дослідження зношених блоку та барабану, а також холоднотформованого дроту до і після експлуатації сталевих канатів здійснювалося із застосуванням рентгеноструктурного методу за допомогою дифрактометрів «ДРОН-2.0», «ДРОН-УМ1». Зйомка профілів рентгенівських інтерференцій (110) і (211) фериту проводилася в автоматичному режимі керуємим пристроєм дифрактометру «Іскра-1256». В якості еталону використовувався

спресований зразок відпаленого карбонільного заліза. Для проведення аналізу зразки дроту в кількості 5 одиниць та довжиною 15 мм щільно укладалися один до одного, заливалися спеціальною пастою і потім піддавалися шліфуванню, травленню й поліровці. Для визначення параметрів тонкої структури фериту (d_{hkl}) і напружень другого роду ($\Delta a/a$) використовувався метод апроксимації [6]. Щільність дислокацій (ρ_L) визначалася за допомогою співвідношень двох видів: 1) $\rho_L = 0,8 \cdot ctg^2 \theta \cdot \beta^2 \div b^2$ (де θ – кут відбиття Вульфа-Брегга, град.; b – вектор Бюргерса дислокацій; β – фізичне збільшення інтерференцій, рад.); 2) $\rho_L = 8 (\Delta a/a)^2 \div b^2$.

Результати досліджень та їх обговорення. Для нормальної роботи каната велике значення має правильно заданий профіль струмка блоку. При вузькому струмку канат защемляється в його нижній частині, при підвищеному розмірі струмка канат розплющується. В обох випадках спостерігається передчасний вихід каната з ладу. Щоб уникнути затискання, радіус профілю струмка приймається трохи більше за радіус перерізу каната. Макроструктурний аналіз зношеного блоку виявив зміни його профілю в процесі експлуатації в результаті зношування, що проходив нерівномірно (рис. 1, а). Під час зношування утворився шар деформованого металу (рис. 1, б).

На бічних ділянках робочої поверхні проходило зминання зерен ферито-перлітної структури сталі у напрямку до її нижньої радіусної частини кривої (рис. 1, в), причому ступінь деформації та глибина зони деформованих зерен по обидва боки не однакова внаслідок нерівномірності зношування блоку. У зоні інтенсивного зносу ступінь деформації зерен перебував у межах 70–90 %, у зонах менш інтенсивного зносу – не більше 20–60 %. У зоні пластичних зсувів внаслідок високих контактних напружень виникли мікротріщини і частинки зносу у вигляді лусочок і пластин (рис. 1, г), які в процесі взаємодії з канатом відокремлювалися в результаті в'язкого відшарування [7, 8]. Рентгеноструктурний аналіз показав, що поблизу поверхні тертя параметри тонкої структури сталі свідчать про значні напруження, що відповідає сильно деформованому стану (табл. 2). На поверхні тертя виявлено безліч осередків корозійного руйнування (рис. 1, г).

В механізмах підйому вантажопідйомних машин використовуються циліндричні барабани з канавками, що мають правий та лівий напрямок навантаження. Канати, що намотуються на барабан, укладаються в канавках, утворюючи витки, які розташовуються на певній відстані один від одного. Застосування барабанів з канавками забезпечує правильне укладання каната, але також при раціональній формі профілю канавки, дозволяє істотно знизити контактні напруження між канатом і барабаном за рахунок збільшення площі контакту й зменшення питомого тиску каната на напрямний блок, і отже, збільшити термін експлуатації каната.



а-г – крановий блок; д-є – крановий барабан; б-є – $\times 100$.

Рисунок 1 – Макроструктура та мікроструктура зношених кранового блоку та кранового барабану.

Профіль канавки барабану складається з гребенів і западин, що чергуються. Досліджували структурні зміни, що пройшли під час експлуатації поблизу поверхні гребенів, западин та бічних поверхонь. Уздовж усієї робочої поверхні спостерігали зону пластичних зрушень (рис. 1, д), глибина якої була меншою, ніж у блоці – 15–40 мкм (при однаковому терміні експлуатації). Очевидно, крім різних умов напружено-деформованого стану в кранових блоці та барабані, у останньому велике значення мають властивості сірого чавуну, в структурі якого графіт відіграє роль внутрішнього мастила. Характер структурних змін однаковий в зонах гребенів, западин (канавок), на бічних стінках; у поперечному перерізі по ширині барабану та у його поздовжньому перерізі.

За всією робочою поверхнею барабану спостерігали втомні мікротріщини і частинки зносу (рис. 1, е) у вигляді пластин і лусочок. Відділення частинок від поверхні проходило за границями структурних складових чавуну: графіт-ферит, графіт-перліт, ферит-перліт, де переважно виникали втомні мікротріщини. В складній багатофазній структурі сірого чавуну накопичення дислокацій у поверхневих шарах в процесі

експлуатації відбувається, в першу чергу, на границях структурних складових, де велику роль відіграють міжфазні напруження. Рентгеноструктурний аналіз показав, що поблизу поверхні тертя параметри тонкої структури сталі свідчать про значні напруження, що відповідає деформованому стану, як і у випадку кранового блоку (табл. 2). Однак на відміну від нього, у випадку барабану показники напруженого стану свідчать про менший рівень напружень та щільності дислокацій, що, очевидно, пов'язано з роллю графітних включень, які дещо гасять мікронапруження.

Утворення частинок зносу пов'язане з процесами тертя під час взаємодії з канатом. Поступово в процесі експлуатації відбувається накопичення напружень та відділення частинок зносу шляхом відшаровування [7, 8]. Спостерігали також інший механізм руйнування барабану, що пов'язаний з появою на робочій поверхні ямок корозійного походження (рис. 1, є), від яких легко відшаровуються і оксиди, які утворилися, і прилеглі ділянки металу у вигляді частинок зносу, причому останні злегка зминаються. Таким чином, механізми зносу робочих поверхонь кранових блоків і барабанів мають багато спільного, що пов'язано з формуванням ідентичних частинок зносу, а також з характером їхнього відшарування та утворення корозійних пошкоджень.

Таблиця 2 – Параметри тонкої структури кранових блоку і барабану.

№ за/п	d_{hkl} , см	$\Delta a/a$	ρ_L , см ⁻²
1	$3,21 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{11}$
2	$2,01 \cdot 10^{-5}$	вихід.	$3,4 \cdot 10^8$
3	$3,06 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^9$
4	$2,14 \cdot 10^{-5}$	вихід.	$2,6 \cdot 10^8$

Примітка. d_{hkl} – величина блоків мозаїки, $\Delta a/a$ – мікровикривлення решітки, ρ_L – щільність дислокацій, вихід. – вихідне значення, № 1, 3 – поблизу робочої поверхні, № 2, 4 – центральна частина, № 1, 2 – блок, № 3, 4 – барабан.

При роботі підйомного або тягового каната і його взаємодії з блоком або барабаном відбувається його складне переміщення в прямому та зворотному напрямках, коли елемент каната спочатку висувається у пряму гілку, а потім повертається у вихідне положення за рахунок поперечної та поздовжньої жорсткості та попереднього закручування каната за рахунок сил тертя [1–3]. В результаті усунення мають різні знаки, а при прямому та зворотному русі напрямки сил тертя також змінює знак. Для нормальної роботи каната необхідно враховувати складний характер напружень, що виникають при набіганні каната на блок, які мають гвинтову компоненту. Наявність моменту, що крутить, в канаті призводить до того, що будучи перекинутим через блок, він відхиляється від симетричного положення, що впливає на зивання каната і умови його роботи. Під дією сил тертя в канаті

внаслідок згинальних і контактних напружень відбуваються незворотні процеси, накопичення яких призводить до залишкових зрушень. Зношування каната і другого елемента пари тертя (блоку, барабану) має періодичний характер і відбувається нерівномірно.

Міцність підйомного або тягового каната визначається ступенем зношування дротів, насамперед тих, що контактують з блоком або барабаном. Пошкодження поверхневих дротів є, в основному, наслідком дії змінних напружень, що виникають при обгинанні блоків. Тому зменшення цих напружень, наприклад, за рахунок підвищення площі контакту може підвищити міцність каната.

На рис. 2 наведено перерізи зношеного канатного дроту з поверхневими дефектами у вигляді втомних тріщин та частинок зносу, які утворили складні агрегати проміж сусідніми дротами.

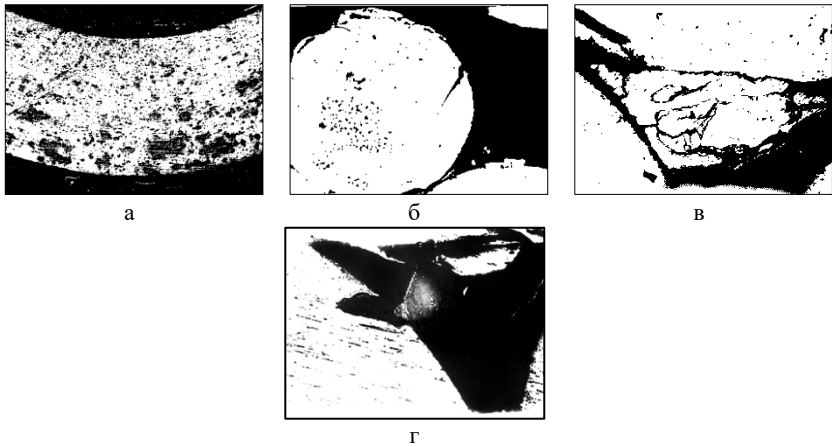
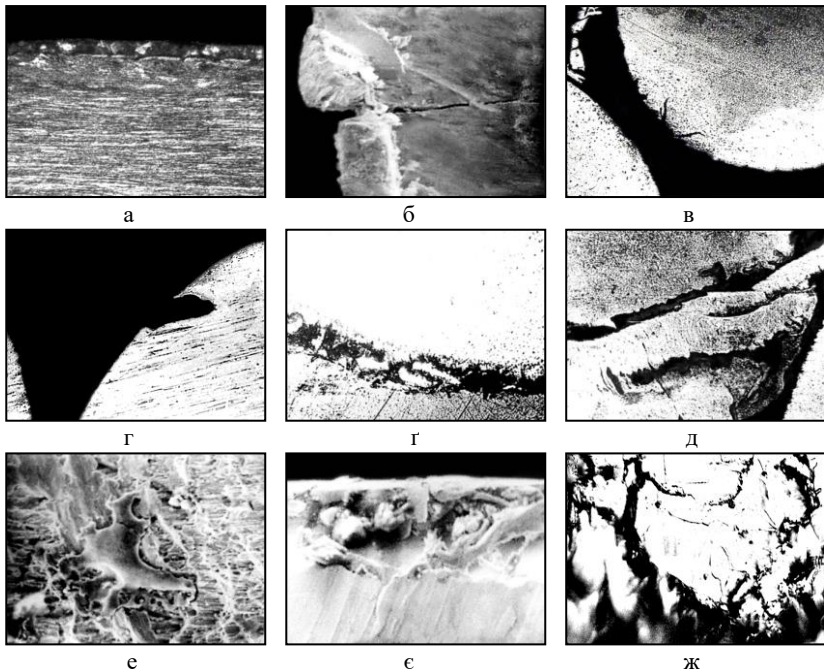


Рисунок 2 – Поздовжній (а) та поперечний перерізи (б-г) зношених канатних дротів ($\times 50$).

Канатний дріт в початковому стані має характерну волокнисту структуру з витягнутими перлітними зернами (рис. 3, а). Конструкція канату складається з 6 зовнішніх пасм і сердечника. Зовнішні пасма містять 14 дротів діаметром 2,20 мм, при цьому безпосереднього з атмосферою контактує не менше 9 дротів. Під час експлуатації кожен дріт підйомного або тягового каната знаходиться у складно-напруженому стані від діючих навантажень і тертя один об одного при взаємодії зі струмком блоку і барабаном. Складно-напружений стан призводить до накопичення напружень за перерізом дроту при циклічних навантаженнях, що супроводжується збільшенням кількості дефектів кристалічної будови і розвитком втомного руйнування (рис. 3, б). Контактний тиск, що виникає під час тертя, призводить до утворення тріщин і частинок зносу (рис. 3, в–

г). Останні зазвичай формуються при високому тиску, а їхня поява пов'язана з формуванням в поверхневих шарах втомних тріщин і відколом цих частинок при навантаженнях [4, 7].

Поблизу поверхні дроту виявлені частинки зносу різної форми, що свідчать про різний механізм зношування і підтверджують факт неоднорідного зношування дротів у пасмах канату. Найбільш поширені частинки зносу є лусочками або пластинами різної товщини (див. рис. 3, г). Вони характерні для нормальних умов зношування [7, 8]. Їхня поява пов'язана з локальною пластичною деформацією в поверхневих шарах дроту. Відповідно до теорії зносу [8], при терті максимальна щільність дислокацій виникає безпосередньо не на поверхні, а на деякій глибині, де і з'являються протяжні мікротріщини, що ростуть до критичного розміру в результаті пластичної течії сталі.



а – $\times 500$; б, в – $\times 50$; г, д – $\times 120$; г – $\times 100$; д, е – $\times 400$; е, ж – $\times 800$.

Рисунок 3 – Мікроструктура канатного дроту після експлуатації.

При цьому в зоні між тріщинами та поверхнею дроту локалізується пластична течія сталі та утворюються частинки зносу у вигляді лусочок, які відшаровуються. Утворення лусочок зносу відбувається шляхом в'язкого відшарування металу при злитті цих мікротріщин і супроводжується

пластичними зсувами сталі поблизу поверхні дроту. Слід зазначити, що поряд з окремими лусочками (частинами зносу) поблизу поверхні дроту виникли досить протяжні розшарування (див. рис. 3, д), причому в цих розшаруваннях наявні ділянки з продуктами корозії сталі.

Іноді з'являються частинки зносу у вигляді петель, спіралей, аналогічною формою стружки при різанні (рис. 3, е). Такі частинки передують пошкодженню і виявляються, головним чином, на поверхні стирання зовнішніх дротів канатного пасма безпосередньо перед руйнуванням. Частинки зносу потрапляють у простір між дротами та взаємодіють (див. рис. 2, в), у потрібних стиках вони сильно змінюються, здійснюючи складний рух (пластичні повороти), де виникають конгломерати частинок зносу. Спостерігали також ділянки абразивного зношування, де під дією твердих сторонніх частинок забруднень з гострими кутами, що потрапляють між дротами, відбувся підріз поверхні дротів (див. рис. 2, г). Такі підрізи під дією контактних напружень поширюються уздовж напрямку течії металу і перетворюються у частинки зносу. Присутність неметалевих включень призводить до розшарування міжфазних границь включення-матриця, що обумовлює утворення частинок зносу у вигляді пластинок (рис. 3, є), петель або спіралей [9]. Поряд з неметалевими включеннями утворюються втомні тріщини (рис. 3, ж).

Дослідження напруженого стану дроту до і після експлуатації показало, що вихідний дріт має високий рівень внутрішніх напружень, що виражається величинами блоків мозаїки (d_{hkl}) та щільністю дислокацій (табл. 3). В зонах інтенсивного зносу щільність дислокацій і мікрвикривлень решітки фериту ($\Delta a/a$) зростають у порівнянні з вихідним станом, що свідчить про накопичення значних напружень під час експлуатації канату.

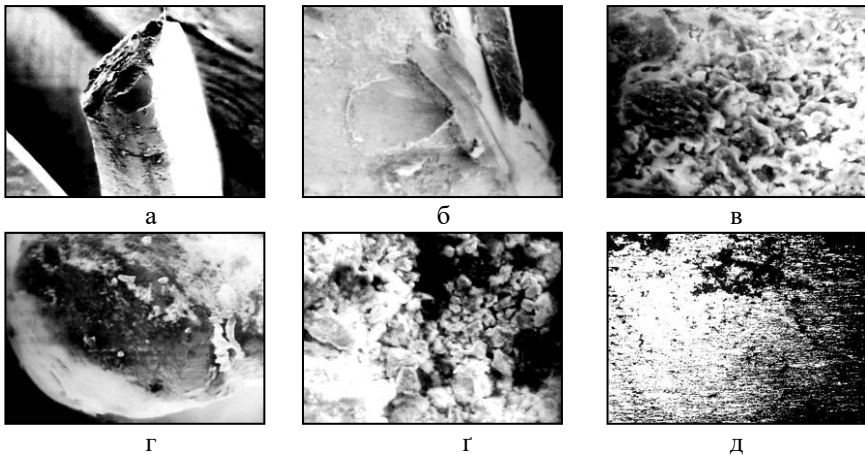
Таблиця 3 – Параметри тонкої структури канатного дроту.

№ за/п	Інтерференція	β , мрад	d_{hkl} , см	$\Delta a/a$	ρ^{\perp} , см ⁻²
1	(110)	3,56	1,42·10 ⁻⁵	1,64·10 ⁻³	1,19·10 ¹¹
	(211)	7,21			
2	(110)	4,76	2,24·10 ⁻⁵	2,87·10 ⁻³	7,63·10 ¹¹
	(211)	9,74			
Примітка. № 1, 2 – дріт до і після експлуатації відповідно, β – фізичне збільшення інтерференцій, d_{hkl} – величина блоків мозаїки, $\Delta a/a$ – мікрвикривлення решітки фериту, ρ^{\perp} – щільність дислокацій.					

На рис. 4, а наведено загальний вигляд зруйнованого дроту, на поверхні тертя виявляються ділянки з відшарованими частинками (рис. 4, б). Поверхня зламу дроту (рис. 4, в) має неоднорідну будову. Це ділянки в'язкого інтеркристалітного і транскристалітного руйнування, а також зони

квасікрихкого руйнування. На поверхні дроту зустрічаються зони корозійного пошкодження (рис. 4, г), при цьому корозія проникає на досить велику глибину (рис. 4, г, д). Пошкоджені корозією ділянки є потенційними місцями утворення частинок зносу.

Механізми зносу кранових блоків і барабанів, а також канатного дроту мають багато спільного, що пов'язано з їхньою взаємодією в умовах низькошвидкісного тертя, що має багатоцикловий характер і супроводжується пластичними зсувами в поверхневих шарах пар тертя і формуванням ідентичних частинок зносу та їхнім відділенням шляхом відшарування та абразивного й корозійного руйнування. Ці закономірності зносу дещо відмінні від умов високошвидкісного тертя, наприклад, у парі тертя залізничне колесо-рейка [10–14], де, поряд із розвитком пластичних зрушень у поверхневих шарах колеса та рейки, відбувається розігрів цих ділянок, що супроводжується розвитком фазових перетворень в сталях в умовах динамічних впливів, особливо при різкому гальмуванні рухомого складу.



а – $\times 70$; б, г – $\times 350$; в, д – $\times 1500$, е – $\times 100$.

Рисунок 4 – Поверхня зносу (а, б), зламу (в) і ділянки корозійного руйнування (г–д) канатного дроту.

Для підвищення надійності та довговічності підйомних та тягових канатів необхідно забезпечити умови зниження питомих контактних їх тисків на блоки та барабани, а, отже, мінімізації контактних напружень у парах тертя канат-блок, канат-барабан підйомно-тягових пристроїв, що є основною причиною механічного стирання дротів (обриву) та робочих поверхонь блоку та барабану. Необхідно також обмеження значень питомих контактних тисків і контактних напружень допустимими величинами в залежності від конструкції каната (границя міцності

сталевому дроту при розтягуванні, запас міцності каната, відношення діаметрів опорних поверхонь до діаметра каната та ін.), що може помітно збільшити надійність підйомних тягових канатів та рівень використання їхніх міцнісних ресурсів. Це досягається не лише обґрунтованим визначенням матеріалів пар тертя, але також розробкою раціональних профілів струмків блоків та барабанів підйомно-тягових пристроїв для відповідного діаметра каната. Крім того, ефективним може бути застосування зміцнюючих обробок робочих поверхонь блоків та барабанів, зокрема, шляхом лазерної і плазмової обробки або обробки ТВЧ [15-17].

Висновки

Причинами передчасного зносу елементів пар тертя канат-блок, канат-барабан є взаємодія в зонах їхнього контакту, що відбувається в поверхневих шарах під дією високих контактних напружень, тертя, циклічних навантажень, абразивних частинок, активних атмосферних та промислових середовищ. Ці дії призводять до розвитку незворотніх процесів накопичення напружень та пластичних зсувів, що мають періодичний та неоднорідний характер. Основним механізмом утворення частинок зносу є розвиток пластичних зсувів в поверхневих шарах пар тертя та їхнє відділення шляхом пластичного відшарування та корозійного руйнування. Необхідно вживати заходи стосовно конструкційних підходів до зазначених пар тертя згідно до умов їхньої роботи, з метою зниження контактних напружень та підвищення зносостійкості, надійності та довговічності.

Перелік посилань

1. Вайнсон А. А. Подъемно-транспортные машины. Москва : Машиностроение, 1989. 536 с.
2. Иванченко Ф. К., Бондарев В. С., Колесник Н. П., Барабанов В. Я. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. Киев : Вища школа, 1978. 576 с.
3. Старостин Е. И. Работа экскаваторных канатов на карьерах Кузбасса. Стальные канаты. Киев : Техника, 1960. Т. 3. С. 88–93.
4. Таран Ю. Н., Есаулов В. П., Губенко С. И., Сладковский А. В. Исследование износа канатной проволоки. *Сталь*. 1991. № 8. С. 60–62.
5. Svetlana I. Gubenko, Eduard V. Parusov, Alexander B. Sychkov, Oleg V. Parusov, Igor N. Chuyko. Study of the Reasons of Ropes Wire Wear During Operation. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2020. Vol. 55. Iss. 2. P. 429–435.
6. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Москва : МИСиС, 1994. 328 с.
7. Марченко Е. А. О природе износа поверхностей металлов при трении. Москва : Наука, 1979. 118с.
8. Suh N. P. The Delamination Theory of Wear. *Wear*. 1973. Vol. 23. No. 1. P. 111–124.
9. Губенко С. И., Парусов Э. В., Парусов О. В., Чуйко И. Н. Особенности влияния неметаллических включений на механические свойства и малоцикловую

- долговечность стальных канатов при эксплуатации в агрессивных средах. *Металл и литее Украины*. 2018. № 9–10 (304–305). С. 31–37.
10. Gubenko S. I. Features of Wear of Railway Wheels Tread. *MTM Machines, Technologies, Materials*. 2019. Vol. XIII. Iss. 7. P. 324–327.
 11. Taran Y., Yessaulov V., Sladkovsky A., Kozlovsky A., Gubenko S. Wear Reduction On Working Surface of Railway Wheels. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*. 1970. Vol. 23. No. 1. P. 45–52.
 12. Бабаченко А. И., Кононенко А. А., Подольский Р. В., Шпак Е. А. Оценка склонности к образованию дефектов термического происхождения опытных сталей для железнодорожных колес // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 2 (251–252). С. 17–21.
 13. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Рослик О. В., Майстренко К. М., Подольський Р. В. Розробка сталей для металопродукції залізничного призначення: монографія. Дніпро: Домінанта-принт, 2020. 298 с.
 14. Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Розроблення хімічного складу сталі та режиму термічної обробки залізничних коліс для експлуатації в легких умовах гальмування за високих навантажень на вісь. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. № 1(96). – С. 9–16. DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240422.9.837.
 15. Губенко С. И., Никульченко И. А. О проблеме подреза гребней железнодорожных колес при эксплуатации. *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра* : збірка праць XV Всеукраїнської науково-практичної конференції. Київ : НТУУ «КПІ», 2017. С. 365–383.
 16. Bogdanov A. F., Gubenko S. I., Zhukov D. A., Ivanov I. A. Surface Layer and Performance Properties of Solid Wheel Rim. *Transport and engineering. Railway Transport, Scientific Proceedings of Riga Technical University*. 2008. No. 30. P. 56–61.
 17. Gubenko S. I., Ivanov I. A., Kononov D. P., Urushev S. V. Improving the Properties of Wheeled Steel During Thermal Repair. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Machine Science, Mechanization, Automatization and Robotics*, 2020. Vol. 971. No. 5.

References

1. Vainson A. A. *Pod'yemno-transportnye mashiny* [Hoisting and transport machines]. Moscow : Mashinostroenie, 1989. 536 p. (in Russian).
2. Ivanchenko F. K., Bondarev V. S., Kolesnik N. P., Barabanov V. Ia. *Raschety gruzopod'yemnykh i transportiruiushchikh mashin* [Calculations of lifting and transporting machines]. Kyiv : Vishcha shkola, 1978. 576 p. (in Russian).
3. Starostin E. I. *Rabota ekskavatornykh kanatov na kar'yerakh Kuzbassa. Stal'nyie kanaty* [The work of excavator ropes in the quarries of Kuzbass. Steel ropes]. Kyiv : Tekhnika, 1960. Vol. 3. P. 88–93 (in Russian).
4. Taran Yu. N., Esaulov V. P., Gubenko S. I., Sladkovsky A. V. *Issledovanie iznosa kanatnoi provoloki* [Investigation of rope wire wear]. Steel. 1991. No. 8. P. 60–62 (in Russian).
5. Svetlana I. Gubenko, Eduard V. Parusov, Alexander B. Sychkov, Oleg V. Parusov, Igor N. Chuyko. Study of the Reasons of Ropes Wire Wear During Operation. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2020. Vol. 55. Iss. 2. P. 429–435 (in English).

6. Gorelik S. S., Skakov Yu. A., Rastorguev L. N. *Rentgenostrukturnyi i electronnoopticheskii analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow : MISiS, 1994. 328 p. (in Russian).
7. Marchenko E. A. *O pripode iznosa poverhnosti metallov pri rtenii* [On the nature of the wear of metal surfaces in friction]. Moscow : Nauka, 1979. 118 p. (in Russian).
8. Suh N. P. The Delamination Theory of Wear. *Wear*. 1973. Vol. 23. No. 1. P. 111–124 (in English).
9. Gubenko S. I., Parusov E. V., Parusov O. V., Chuiko I. N. *Osobennosti vliyaniia nemetallicheskih vklyuchenii na mekhanicheskie svoistva i malotsiklovuyu dolgovechnost' stal'nykh kanatov pri ekspluatatsii v agresivnykh sredakh* [Features of the influence of non-metallic inclusions on the mechanical properties and low-cycle durability of steel ropes during operation in aggressive environments]. *Metal and casting of Ukraine*. 2018. No. 9–10 (304–305). P. 31–37 (in Russian).
10. Gubenko S. I. Features of Wear of Railway Wheels Tread. *MTM Machines, Technologies, Materials*. 2019. Vol. XIII. Iss. 7. P. 324–327 (in English).
11. Taran Y., Yessaulov V., Sladkovsky A., Kozlovsky A., Gubenko S. *Wear Reduction On Working Surface of Railway Wheels_ WIT Transactions on Modelling and Simulation*. 1970. Vol. 23. No. 1. P. 45–52 (in English).
12. Babachenko A. I., Kononenko A. A., Podolskyi R. V., Shpak E. A. *Ocenka sklonnosti k obrazovaniju defektov termicheskogo proishozhdenija opytnyh stalej dlja zheleznodorozhnykh koles* [Evaluation of the tendency to form defects of thermal origin in experimental steels for railway wheels]. *Bulletin of the Dnipro State Academy of Construction and Architecture*. 2019. № 2 (251-252). P. 17–21 (in Russian).
13. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Roslik O. V., Majstrenko K. M., Podolskyi R. V. *Rozrobka stalej dlja metaloprodukcii zaliznichnogo prizmachennja* [Development of steels for railway metal products]: monografija. Dnipro : Dominanta-print, 2020. 298 p. (in Ukrainian).
14. Babachenko O. I., Kononenko G. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A. *Rozroblemnja himichnogo skladu stali ta rezhimu termichnoi obrobki zaliznichnih kolis dlja ekspluatacij v legkih umovah gal'muvannja za visokih navantazhen' na vis'* [Development of the chemical composition of steel and the mode of heat treatment of railway wheels for operation in light braking conditions with high axle loads]. *Metallurgy and heat treatment of metals*. 2022. № 1 (96). P. 9–16. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.240422.9.837 (in Ukrainian).
15. Gubenko S. I., Nikulchenko I. A. *O probleme podreza grebnei zheleznodorozhnykh koles pri ekspluatatsii* [On the problem of undercutting railroad wheel flanges during operation]. *Special Metallurgy: Yesterday, Today, Tomorrow : selection of workshops of the XV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference*. Kiev : NTUU "KPI", 2017. P. 365–383 (in Russian).
16. Bogdanov A. F., Gubenko S. I., Zhukov D. A., Ivanov I. A. *Surface Layer and Performance Properties of Solid Wheel Rim*. *Transport and engineering. Railway Transport, Scientific Proceedings of Riga Technical University*. 2008. No. 30. P. 56–61 (in English).
17. Gubenko S. I., Ivanov I. A., Kononov D. P., Urushev S. V. *Improving the Properties of Wheeled Steel During Thermal Repair_IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Machine Science, Mechanization, Automatization and Robotics*, 2020. Vol. 971. No. 5 (in English).

E. V. Parusov, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4560-2043
Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

S. I. Gubenko, D. Sc. (Tech.), Professor, Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6626-3979
Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine
Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture

O. V. Parusov, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9879-6179
Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

FEATURES OF WEAR OF FRICTION COUPLES OF ROPE-BLOCK AND ROPE-DRUM UNDER THE WORKING CONDITIONS OF LIFTING AND TRACTION DEVICES

Summary. The features of wear of rope-block and rope-drum friction pairs of lifting and traction devices operating in the conditions of a hot manufactory of the metallurgical plant and also the mining and beneficiation plant were studied. It is shown that the causes of wear of the elements of the rope-block and rope-drum friction pairs are the interaction in their contact zones, which occurs in the surface layers under the influence of high contact stresses, friction, cyclic loads, abrasive particles, active atmospheric and industrial environments. It was found that these actions lead to irreversible processes of accumulation of stresses and plastic shifts, which have a periodic and heterogeneous character. It is shown that the strength of the lifting or traction rope is determined by the degree of wear of the wires, primarily those in contact with the block and the drum. The structural changes in the surface layers of the wires and the mechanisms of the formation of wear particles were analyzed, which confirm the heterogeneous nature of the wear of the wires in the strands of the rope. Areas of abrasive wear were also observed on the worn surface of the wires, where under the action of solid foreign particles of contamination with sharp corners falling between the wires, the surface of the wires was undercut. It is shown that the presence of non-metallic inclusions leads to the formation of wear particles and fatigue cracks. It was established that the wear of friction pairs of rope-block and rope-drum of hoisting and traction devices has a fatigue-corrosive nature, and the main mechanism of the formation of wear particles is the development of plastic shifts in the surface layers of friction pairs and their separation by plastic exfoliation and abrasive and corrosive destruction. The shape of the wear particles depends on the type of material and the conditions of their formation. It is proposed to take measures regarding structural approaches to friction pairs, taking into account their working conditions, in order to reduce contact stresses and increase their wear resistance, reliability and durability.

Key words: lifting and traction devices, wear, friction pairs, block, drum, cable wire, wear particles.

For citation: Parusov E. V., Gubenko S. I., Parusov O. V. Osoblyvosti znosu par tercia kanat-blok i kanat-baraban za umov roboty pidiomno-tiahovykh prystroiv [Features of wear of friction couples of rope-block and rope-drum under the working conditions of lifting and traction devices]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 441-454. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-441-454.

*Стаття надійшла до редакції збірника 08.10.2022 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*