

Використання штучних нейронних мереж для вирішення трибологічних задач

В. М. Уваров, член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор

С. А. Беспалов*, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, bespalov@nas.gov.ua

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

*Технічний центр НАН України, Київ

Проведені склерометричні дослідження сталі 40X після гартування від 860, 1050 °C та високого відпуску показали, що з підвищенням температури гартування збільшується середнє значення мікротвердості. На подряпинах виявлено два типи максимумів її значень. До першого типу (T_1) належать найближчі один до одного, середня відстань між якими практично не змінюється залежно від температури гартування. До другого (T_2) – максимуми з більшим періодом, який збільшується та чіткіше виявляється при зростанні температури гартування. Відзначено, що фактором, який визначає циклічність зміни мікротвердості з періодом T_1 , є межі зерен та пакетів мартенситу, а з періодом T_2 – зростаюча при підвищенні температури гартування нерівномірність розподілу вуглецю. Досліджено вплив температурних умов гартування на зносостійкість сталі 40X після покращення. Виявлено, що у порівнянні із стандартною термічною обробкою, гартування від 1050 °C та високий відпуск підвищує її трибологічні характеристики, а також знижує інтенсивність зношування контртіла. Показано, що в покращених зразках, загартованих від 860 °C, руйнування контактуючих поверхонь відбувається за механізмами відколювання та гладкого розшиаровування з пластичною деформацією. Підвищення температури гартування до 1050 °C з високим відпуском змінює характер деструкції поверхні контактної взаємодії. На ній з'являються ділянки, мікроструктура яких під час тертя у порівнянні з оточуючим об'ємом чинить значно більший опір руйнуванню. Проаналізовано структурно-геометричні параметри, що характеризують шорсткість та несучу спроможність поверхні контактної взаємодії. Виявлено, що підвищення температури гартування до 1050 °C сприяє зниженню її шорсткості та збільшенню опорної кривої поверхні, яка характеризує її несучу здатність. Показана можливість застосування штучних нейронних мереж для прогнозування трибологічних властивостей конструкційних сталей.

Ключові слова: конструкційна сталь, температура гартування, зносостійкість, поверхня контактної взаємодії, моделювання, штучні нейронні мережі.

Починаючи з другої половини ХХ століття надійність, економічність та екологічність машин, приладів, апаратів, транспортних засобів, технологічного обладнання тощо почали визначатися переважно не характеристиками міцності, а триботехнічними показниками вузлів та деталей, що працюють в умовах контактної взаємодії [1 – 4].

Структура, зношування, руйнування

Керування процесами тертя, раціональне конструювання рухомих спряжень, оптимізація умов їхньої експлуатації, а також раціональний вибір матеріалів за критеріями зносостійкості можуть суттєво подовжити термін експлуатації, підвищити ефективність використання машин, знизити шкідливу дію продуктів зношування на екологічний стан довкілля при незначному збільшенні їхньої вартості. В зв'язку з цим виняткове значення набувають роботи в галузі триботехнічного матеріалознавства, які можуть поглибити існуючі та віднайти нові способи зниження втрат при терті та зношуванні шляхом підвищення зносостійкості деталей машин та механізмів [5 – 7].

Слід зазначити, що процес проведення трибологічних досліджень в більшості випадків потребує випробування значної кількості зразків, використання дорогого експериментального обладнання, а також складної інтерпретації результатів. Тому для прогнозування працездатності матеріалів, що працюють за умов тертя, та керування структурно-фазовим станом контактних поверхонь, який би забезпечував необхідний рівень фізико-механічних властивостей, необхідно поєднання результатів експериментів з використанням комп'ютерного моделювання.

Одним з найбільш перспективних інструментів для моделювання прикладних задач матеріалознавства є штучні нейронні мережі (ШНМ) [8 – 10]. Вони дозволяють здійснювати моделювання складних процесів оскільки мають універсальні апроксимуючі властивості, придатні до вирішення задач прогнозування [11]. Тому метою даної роботи було поєднати підходи нейромережевого моделювання та моніторинг результатів експериментальних досліджень для прогнозування зносостійкості конструкційних сталей в залежності від режимів термічної обробки.

Досліджували середньовуглецеву низьколеговану конструкційну сталь 40X (0,41 % C, 0,45 % Mn, 0,33 % Si, 0,98 % Cr, 0,054 % Ni, 0,03 % S, 0,03 % P). Відомо, що залежно від режиму термічної обробки змінюється кінетика мартенситного перетворення, що впливає на морфологію будови мартенситу та відповідно на характер розподілу та розміри карбідних фаз. Це, своєю чергою, змінює механічні властивості сталей [12, 13]. Тому гартування проводили в маслі від температур 860 та 1050 °C з високим відпуском при 600 °C.

Трибологічні випробування проводили на машині 2070 СМТ-1 в режимі сухого тертя ковзання по сталі 45 з твердістю 50 – 52 HRC протягом 10 год з щогодинним вимірюванням втрати маси. Навантаження при цьому складало 300 Н, а лінійна швидкість ковзання – 0,5 м/с. Дослідження поверхні тертя вивчали за допомогою растрової електронної мікроскопії, а також стереометричного профілометра зі скануючою голівкою з кроком 1 – 2 мкм. Для вимірювання твердості використовували метод Брінелля, а мікротвердості – метод дряпання на приладі ПМТ-3 за методикою, яка описана в [14]. Навантаження при цьому складало 20 г, а крок вимірювання 2 – 4 мкм.

Гартування від 1050 °C у порівнянні із гартуванням від 860 °C зменшує твердість за Брінеллем сталі 40X після високого відпуску від 2636 до 2499 МПа. Водночас проведення склерометричних досліджень показало,

Структура, зношування, руйнування

що середнє значення мікротвердості ($H_{\text{ср}}$) відпущених зразків з підвищенням температури гартування від 860 до 1050 °С збільшується в 1,26 рази з $2,3 \cdot 10^3$ до $2,9 \cdot 10^3$ Н/мм² відповідно при зростанні інтервалу розкиду значень з $(1,5 \dots 3,5) \cdot 10^3$ до $(1,7 \dots 5,2) \cdot 10^3$ Н/мм² (рис. 1).

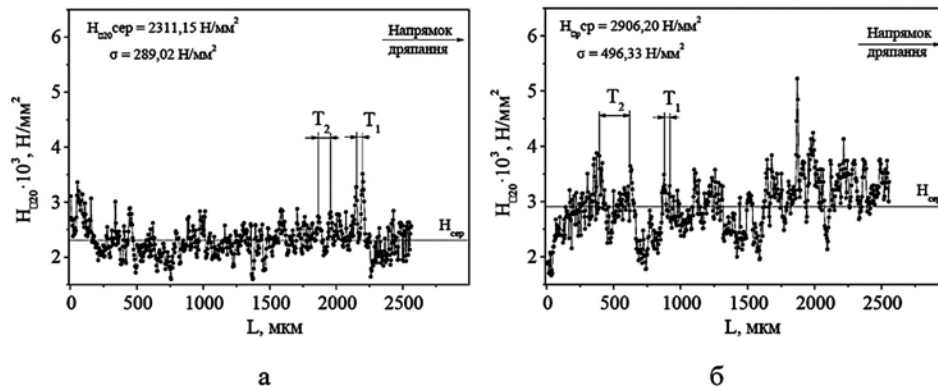


Рис. 1. Зміна мікротвердості ($H_{\mu 20}$) при склерометричних дослідженнях з навантаженням 20 г вздовж подряпини (L) на шліфах сталі 40X після гартування від 860 (а), 1050 °С (б) та високого відпуску при 600 °С. T_1 , T_2 – відповідно менший та більший періоди зміни мікротвердості.

Крім того, аналіз наведених результатів свідчить про наявність вздовж подряпини двох типів максимумів мікротвердості. До першого відносяться найближчі один до одного, середня відстань T_1 між якими практично не змінюється залежно від температури гартування і знаходиться в межах 46,8...55,5 μ m. До другого – максимуми з більшим періодом T_2 , який збільшується з 122,1...147,6 μ m до 240,0...250,0 μ m та чіткіше виявляється при зростанні температури гартування.

В роботах [15, 16] було показано, що фактором, який визначає циклічність зміни мікротвердості T_1 для зразків після гартування від 860 °С є межі зерен, а від 1050 °С – межі зерен та пакетів мартенситу. Водночас виявлене підвищення та зміна характеру циклічності значень мікротвердості з періодом T_2 , збільшення розкиду її значень при зростанні температури гартування, пов'язане із зростанням нерівномірності розподілу вуглецю та утворенням в сталі 40X мікрооб'ємів, що чергуються, які за хімічним складом відповідають високовуглецевій або низьковуглецевій сталі [16]. Це супроводжується появою великих кристалів голчастого мартенситу з мікродвійниками всередині, в результаті відпуску яких відбувається виділення на мікродвійникових межах крупних карбідів з утворенням мікрооб'ємів з підвищеною міцністю та стійкістю до розвитку процесів пластичної деформації при терті [17].

Оцінка зносостійкості показує (табл. 1), що підвищення температури гартування до 1050 °С, не зважаючи на зниження твердості, зменшує на 19 % інтенсивність зношування як зразків досліджуваної сталі, так і на 29 % контртіла, що вказує на покращення трибологічних властивостей пари тертя в цілому.

Структура, зношування, руйнування

Таблиця 1

Вплив температури гартування на масову інтенсивність зношування I_m відпущених зразків сталі 40X та контртіла

Температура гартування $t, ^\circ\text{C}$	$I_m \cdot 10^{-8}$		$I_m / I_{m\text{баз}}^*, \%$	
	зразок	контртіло	зразок	контртіло
860	3,719	1,604	100	100
1050	3,012	1,139	81	71

*Примітка: за $I_{m\text{баз}}$ прийнято інтенсивність зношування маси зразка, загартованого від 860 $^\circ\text{C}$, та його контртіла

Електронно-мікроскопічні дослідження показали, що після трибологічних випробувань на поверхні тертя відпущених після гартування від 860 $^\circ\text{C}$ зразків сталі 40X спостерігаються зони пластичної деформації і руйнування, спрямовані в напрямку, протилежному до переміщення зразка (рис. 2 а). Переважаючими механізмами деструкції поверхні контактної взаємодії є розшаровування та відколювання з ознаками пластичної деформації.

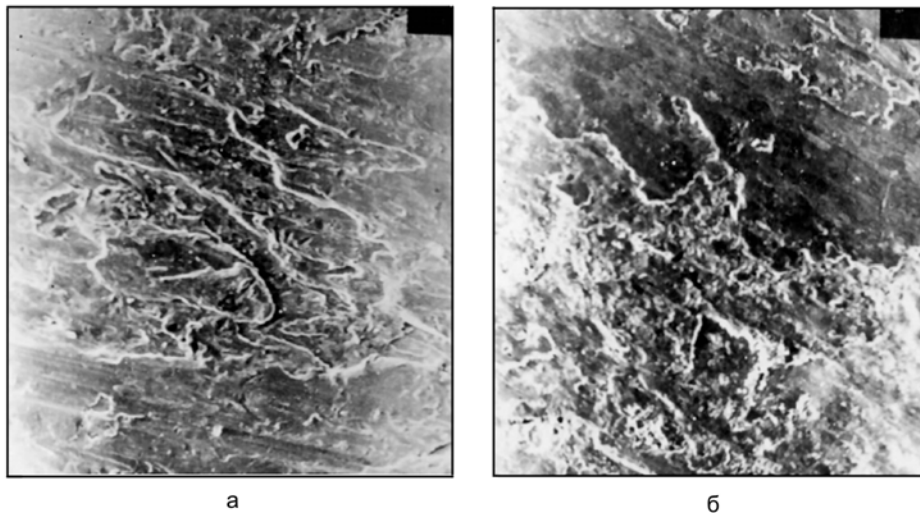


Рис. 2. Поверхня тертя відпущених зразків сталі 40X після гартування від температури 860 (а) і 1050 $^\circ\text{C}$ (б) та відпуску при 600 $^\circ\text{C}$. РЕМ, $\times 50$.

Гартування від 1050 $^\circ\text{C}$ з відпуском приводить до зменшення частки гладкого розшаровування та зміни характеру поверхні тертя, яка має неоднорідний вигляд, що, очевидно, визначається особливостями процесів руйнування в окремих ділянках структури (рис. 2 б).

Більша частина площі тертя руйнується, переважно, за механізмами гладкого розшаровування та відколювання з ознаками пластичної деформації, що протікає в приповерхневих шарах, які, очевидно, насичені рівномірно розподіленими карбідами різних розмірів. Під час контактної взаємодії великі карбідні включення викришуються та можуть спричинити мікроруйнування поверхні контакту. Менші при пластичній деформації розчиняються в оточуючій матриці. Описана ситуація аналогічна до

Структура, зношування, руйнування

руйнування контактної поверхні сталі 40X гартування від 860 °C та високого відпуску.

Крім того, близько 15 % поверхні тертя складають ділянки, руйнування яких також має в'язкий характер, але із значно більшим опором деструкції. Це можна пояснити наявністю більших за розмірами та більш скупчених карбідів, що мають міцніший зв'язок з матрицею. Все це разом із склерометричними дослідженнями (рис. 1 б) вказує на гетерогенність за механічними характеристиками контактної поверхні сталі 40X після гартування від 1050 °C та високого відпуску, що спричинює зростання її зносостійкості.

Аналіз структурно-геометричних параметрів поверхні тертя, що характеризують її шорсткість, показали, що підвищення температури гартування до 1050 °C сприяє зниженню майже у двічі порівняно із зразками, загартованими від 860 °C, функціональних параметрів поверхні (S_{bi} , S_{vi}) з 1,2017, та 0,1215 до 0,5166 та 0,068628 відповідно, кривизни вершин (S_{sc}) з 0,041156 до 0,01879 $1/\mu\text{m}$ та середньоквадратичного нахилу нерівностей поверхні (S_{dq}) з 0,24774 до 0,12739 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$, а також зростанню несучої частки виступів (Sr_1) з 10,527 до 16,729 % та несучої частки западин (Sr_2) з 88,337 до 92,829 %. Тобто зростання температури гартування збільшує довжину опорної кривої поверхні сталі 40X під час тертя, яка характеризує «несучу здатність» поверхні.

Отримані результати корелюють з даними електронно-мікроскопічних досліджень (рис. 2), а також підтверджують дослідження низки авторів [18, 19], в яких стверджується, що збільшення довжини опорних кривих поверхонь тертя та зниження параметрів шорсткості свідчать про формування в поверхневому шарі структур, які забезпечують підвищення опору зношуванню. Отже мікроструктура сталі 40X, отримана після гартування від 1050 °C, сприяє формуванню на поверхні контакту під час тертя більш оптимального рельєфу.

Вирішення матеріалознавчих задач крім проведення аналізу фазового складу, мікроструктури, механічних властивостей тощо вимагає врахування впливу зовнішніх чинників, які під час експлуатації змінюють внутрішню будову та напружений стан поверхонь контакту. Це впливає на перебіг трибологічних явищ в приповерхневих шарах матеріалу, які можна регулювати, зокрема, формуванням певної морфології карбідної фази, що сприятиме підвищенню зносостійкості рухомих спряжень [16, 17, 20]. Тому для цілеспрямованого регулювання фазового складу та мікроструктури досліджуваної сталі з метою покращення її трибологічних властивостей в роботі поєднали отримані експериментальні результати з комп'ютерним моделюванням.

Як відомо, використання регресійних моделей є одним з можливих способів моделювання. Вирішення поставлених в роботі задач вимагає врахування багатьох властивостей матеріалів, але характер проведеного експерименту та одержана відносно невелика вибірка експериментальних даних вказують, що можна було б використати лінійний поліном. Але при цьому точність моделювання буде низькою.

Структура, зношування, руйнування

Тому як альтернативний підхід в даному випадку запропоновано моделювання з використанням інтелектуальних систем на основі ШНМ, які характеризуються гнучкістю, а їх функціонування включає емпіричні навички, що ґрунтуються на передбаченні. Виходячи з переваг ШНМ перед традиційними обчисленнями, існуючі на сьогодні мережі навчаються та можуть робити помилки. Така нейронна мережа навчається за представленими вхідними та вихідними даними, які називаються навчальною множиною. Слід зазначити, що для кожної вхідної множини необхідно мати певні експериментальні дані. При досягненні створеного мережею певного рівня ефективності та бажаної статистичної точності, процес навчання завершується.

Як зазначено вище властивості описаних поверхневих шарів можна контролювати значеннями температури гартування ($t_{\text{гарт.}}$) мікротвердості контактуючих поверхонь тертя (H_{μ}), що визначені за допомогою методів склерометрії, відстанню між максимумами її значень (T_2) та середньою їхньою протяжністю ($L_{\text{сер}}$), середнім розміром карбідів ($D_{\text{ксер}}$). Вказані параметри досліджуваних зразків, що наведені в табл. 2, були використані для створення навчальних множин.

Таблиця 2

Лінійні характеристики поверхневих мікроб'ємів мікроструктури сталі 40Х після гартування та високого відпуску з підвищеною мікротвердістю

$t_{\text{гарт.}}$, °С	$L_{\text{сер}}$, мкм	T_2 , мкм	H_{μ} , Н/мм ²			$D_{\text{ксер}}$, мкм	Масова Інтенсивність зношування, $I_m \cdot 10^{-8}$
			макс.	сер.	мін.		
860	9,95	122,0	2800,0	2311,2	2000,0	0,050	3,719
1050	25,39	240,0	4000,0	2906,2	2000,0	0,052	3,012

В даному випадку навчання проводилось на основі мережі прямого поширення, що володіє функцією відтворення вхідних параметрів у вихідні з використанням неітераційних підходів. Це дало можливість створити більш ефективну парадигму навчання, яку можна використовувати у прикладному матеріалознавстві. При цьому задіяно новий метод моделювання, який побудовано на системі аналогій між просторовим представленням об'єкта досліджень та моделлю мережі, як функціоналу на множині табличних функцій (ФМТФ) [21].

Вона забезпечує мінімальні витрати часу, високу точність навчання, можливість екстраполяції на малих навчальних вибірках. При такому підході подача сигналу з входу на вихід обчислюється як зважена сума сигналів. Тому сигнал на виході i -того нейронного елемента визначається через сигнали його входів за формулою:

$$x_i = F \left(\sum_{j=1}^{n+nx} x_j \cdot W_j(i) \right), \quad (1)$$

Структура, зношення, руйнування

де $x_1 \dots x_n$ – вихідні сигнали нейронів; $x_1 \dots x_{n+nx}$ – вхідні сигнали; W – вагові коефіцієнти синоптичних зв'язків; F – передатна функція.

У створенні мережі під час моделювання певному об'єкту у відповідність ставилось гіпертіло, що розглядалось як геометричне місце точок у просторі. При цьому одна з координат відповідала кожній ознаці об'єкта моделювання. Наступним етапом проводили декомпозицію об'єкта дослідження при встановленні системи аналогій між елементами декомпозиції гіпертіла та аргументними функціями моделі ШНМ. Це означає, що процес навчання здійснювали при декомпозиції гіпертіла об'єкта дослідження, який відповідав алгоритму моделювання за певними елементами навчальної вибірки створеної композиції.

За основу при використанні ШНМ покладено гіпотезу, яка встановлює зв'язок між повними та частковими коефіцієнтами векторів навчальної множини. Ця закономірність відтворюється з певною точністю, коли відтворення всіх можливих елементів матриці реалізацій забезпечується набором повних коефіцієнтів [21]. На рис. 3 наведено принципову схему архітектури сконструйованої мережі. Сформована нейронна мережа для моделювання в $(i-1)$ -й та в i -тій точці подряпини здійснює передбачення трьох параметрів (мікротвердості, відстані між

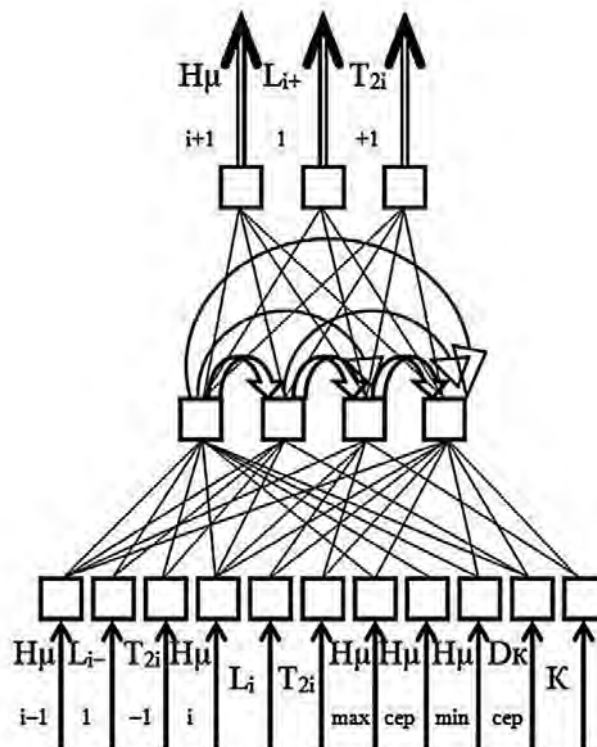


Рис. 3. Принципова схема штучної нейронної мережі, побудованої на моделі функціоналу на множині табличних функцій. $H\mu_i$ – середнє значення мікротвердості i -того екстремуму з максимальним її значенням; L_i – протяжність i -того екстремуму з максимальним значенням мікротвердості; T_{2i} – відстань i -м та $(i-1)$ -м екстремумами з максимальним значенням мікротвердості; $H\mu_{max}$ – максимальне значення мікротвердості; $H\mu_{сер}$ – середнє значення мікротвердості; $H\mu_{min}$ – мінімальне значення мікротвердості; $D_{к,сер}$ – середній діаметр карбідів; K – характер зв'язку карбідів з оточуючою матрицею.

Структура, зношення, руйнування

максимальними її значеннями, протяжності подряпини з максимальними значеннями мікротвердості) в $(i + 1)$ -й точці подряпини.



Рис. 4. Моделювання інтерполяційних точок процесу.

Оскільки при моделюванні використовували порівняно невелику вибірку експериментальних даних, прогнозування динаміки зміни їхніх властивостей було би некоректним. Для уникнення цього недоліку було розширено вхідну базу даних експерименту структурно-геометричними параметрами поверхні.

При проведенні аналізу сертифікованих за нормами ISO 13565 функціональних параметрів поверхні (S_{bi} , S_{vi}) та параметрів її несучої здатності (Sr_1 , Sr_2) [22, 23] для моделювання та навчання ШНМ було створено масив даних і робочі файли. Перелічені параметри через відповідні розрахунки трансформували у гібридні параметри, що дозволяють оцінити пошарову розгортку поверхні на основі аналізу середньоквадратичної кривизни вершин (S_{sc}) та середньоквадратичного нахилу нерівностей поверхні (S_{dq}) [24].

За допомогою проведеного експерименту було доведено спроможність нейронної мережі, побудованої на основі функціоналу на множині табличних функцій (ФМТФ) з модифікованими функціями активації нейронів

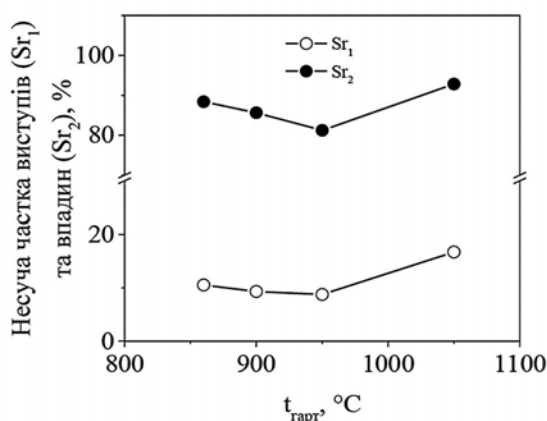


Рис. 5. Моделювання та прогноз функціональних параметрів несучої спроможності виступів (Sr_1) та впадин (Sr_2) поверхні сталі 40X з залежності від температури гартування.

З метою тестування системи застосовували два варіанти роботи нейронних мереж. З навчальної вибірки, яка складалася з 14-ти векторів, було вилучено 1-ий, 4-ий та 12-ий вектори. Останні були використані лише для контролю. Таким чином, даний варіант може здійснювати моделювання лише інтерполяційних точок. При цьому середньоквадратична похибка моделювання знаходилась в межах 1,30...1,55 % (рис. 4).

Крім того, сертифіковані параметри (Sr_1 , Sr_2), що характеризують функцію несучої спроможності поверхні, були використані для прогнозування поведінки сталі 40X при різних температурних умовах термічної обробки (рис. 5).

Структура, зношування, руйнування

Коректність проведеного моделювання підтверджується розрахунками зміни параметрів (Sr_1 , Sr_2) для покращеної сталі 40X, загартованої від температур 860, 900, 950 та 1050 °С та їхньою кореляцією з результатами роботи [25]. Аналізуючи динаміку зміни цих параметрів можна зробити висновок, що із підвищенням температури гартування до 950 °С збільшується шорсткість поверхні контакту. Гартування від 1050 °С призводить до зменшення параметрів шорсткості. Описані зміни шорсткості корелюють з результатами досліджень зносостійкості сталі 40X, отримані авторами праці [25].

Таким чином спрогнозовано зміну фізико-механічних властивостей (H_m , L , T_2) поверхні контакту сталі 40X та пов'язану з нею динаміку зміни опору зношуванню в залежності від температури гартування.

За результатами моделювання сертифікованих структурно-геометричних параметрів поверхні залежно від її шорсткості проведено аналіз несучої спроможності поверхні контакту зразків сталі 40X під час тертя та показано можливість застосування нейронного мережевого моделювання не тільки для наближення багатовимірних залежностей до розпізнавання, а й для вирішення більш складних задач прогнозування послідовностей функціональних властивостей поверхні конструкційних сталей.

Література

1. Когаев В.П. Прочность и износостойкость деталей машин / Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. – М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.
2. Джост П. Мировые достижения в области трибологии / Джост П. // Трение и износ. – 1986. – Т.7, № 4. – С. 593-603.
3. Проников А.С. Параметрическая надежность машин / Проников А.С. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
4. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин) / Гаркунов Д.Н. – М.: Издательство МСХА, 2002. – 632 с.
5. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов / А.В.Чичинадзе, Э.Д.Браун, Н.А.Буше и др. / Под общ. ред. А.В.Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
6. Баходур С. Экономическое значение износа материалов в современном обществе / Баходур С. // Проблемы трения и смазки. – 1978 – №2 – С. 1-4.
7. Джост П. Будущее трибологии / Джост П. // Трение и износ. – 1991. – Т.12, № 3. – С. 10-15.
8. Дурягіна З. Використання штучних нейронних мереж для прогнозування властивостей поверхні конструкційних матеріалів / Дурягіна З., Ткаченко П. // Машинознавство. – 2002. – № 2 (56). – С. 29-31.
9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / Хайкин С. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.
10. Аксенов С.В. Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) / Аксенов С.В., Новосельцев В.Б. Под общ. ред. В.Б. Новосельцева. – Томск: Издательство НТЛ, 2006. – 128 с.
11. Пронин С.В. Применение искусственных нейронных систем для моделирования транспортных систем / С. В. Пронин // Автомобильный транспорт: сб. науч. трудов. – Х., 2006. – Вып.18. – С. 123 – 125.

Структура, зношування, руйнування

12. Влияние скорости закалки на структуру и количественные параметры мартенситного превращения в литой конструкционной среднелегированной стали / Козлов Э.В., Попова Н.А., Тихонькова О.В., Климашин С.И., Целлермаер В.В., Громов В.Е. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2005. – Т. 2, № 1. – С.118-123.
13. Иванов Ю.Ф. Изотермический отпуск закаленной среднеуглеродистой малолегированной стали. Кинетика образования частиц цементита при температуре 200 °С / Иванов Ю.Ф., Козлов Э.В. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2006. – Т. 3, № 3. – С. 61-68.
14. ГОСТ 21318-82. Изменение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 24 с.
15. Волосевич П.Ю. Склерометрия и ее возможности в комплексном выявлении особенностей распределения элементов структуры, их механических характеристик и размерных параметров / Волосевич П.Ю., Беспалов С.А. // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2004. – Т. 26, № 3. – С. 343-359.
16. Волосевич П.Ю. Микротвердость поверхностей и ее связь с температурой закалки и распределением углерода в сталях 40X и 40XHM / Волосевич П.Ю., Беспалов С.А. // *Металлофизика и новейшие технологии* – 2006. – Т. 28, № 12. – С. 1629-1638.
17. Волосевич П.Ю. Структурообразование и износостойкость стали 40X / Волосевич П.Ю., Беспалов С.А. // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2004. – Т. 26, № 5. – С. 691-701.
18. Повышение износостойкости и рельеф поверхности трения ферритно-перлитной стали, наноструктурированной мегапластической деформацией / Яковлева С.П., Махарова С.Н., Винокуров Г.Г., Мордовской П.Г., Стручков Н.Ф. // *Фундаментальные исследования. Раздел «Технические науки»*. – 2013. – № 10 (15) – С. 3451-3455.
19. Морозова Н.А. Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин виброударным пластическим упрочнением: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / Морозова Наталья Александровна; Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск, 2005. – 24 с.
20. Матвеев В.В. Наплавка гребней вагонных колес после отжига поверхности катания на вагоноремонтных заводах Украины // *Автоматическая сварка*. – 2005. – №6. – С. 42-48.
21. Ткаченко Р.О. Неітераційне навчання штучних нейронних мереж прямого поширення / Ткаченко Р.О. // *Технічні вісті*. – 1991. – № 1(8), 2(9). – С. 41-42.
22. Surface roughness – Part 1: Surface and its parameters, ISO 4287/1, 1984.
23. Rules and procedures for the measurement of surface parameters. ISO 4288, 1985.
24. Lonardo P.M. Progress in 3D Surface Microtopography Characterization / Lonardo P.M., Trumpld H., Chiffre L. // *Analisis of the CIRP*. – 1996. – V. 45/2. – P. 11 – 23.
25. Мухамедов А.А. Прочность и износостойкость в зависимости от величины

References

1. Kogaiev V.P. Drozdov Yu.N. *Prochnost i isnosostoičnost' detalei mashin* (The strength and wear resistance of machine parts), Moscow: Visshaia shkola, 1991, 319 p. [in Russian].

Структура, зношування, руйнування

2. Dzhost P. *Mirovye dostizhenija v oblasti tribologii. Trenie i iznos* (World achievements in the tribology. Friction and wear), 1986. Vol. 7, No 4, pp. 593-603 [in Russian].
3. Pronikov A.S. *Parametricheskaja nadezhnost mashin* (Machine parametric reliability), Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.Je. Baumana, 2002, 560 p. in Russian].
4. Garkunov D.N. *Tribotehnika* (konstruirovaniye, izgotovleniye i jekspluatatsiya mashin) (Tribotechnics (design, manufacture and operation of the machine)), Moscow: Izdatelstvo MSHA, 2002, 632 p. [in Russian].
5. Chichinadze A.V., D.Braun Je., Bushe N.A. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka): Uchebnik dlja tehnikeskikh vuzov* (Fundamentals of Tribology (friction, wear, lubrication): Textbook for technical universities), Moscow: Mashinostroeniye, 2001, 664 p. [in Russian].
6. Bahodur S., *Problemy treniya i smazki*, 1978, No 2, pp. 1-4 [in Russian].
7. Dzhost P., *Trenie i iznos*, 1991, Vol.12, No 3, pp. 10-15. [in Russian].
8. Durjagina Z., Tkachenko P., *Mashinoznavstvo*, 2002, No 2 (56), pp. 29-31 [in Ukrainian].
9. Hajkin S. *Nejronnye seti: polnyj kurs* (Neural networks: full course), Moscow: Ltd «I.D. Viljams», 2006, 1104 p. [in Russian].
10. Aksenov S.V., Novosel'tsev V.B. *Organizaciya i ispol'zovanie nejronnykh setei (metody i tehnologii)* (Organization and neural networks using (methods and technologies)), Tomsk: Izdatelstvo HTJI, 2006, 128 p. [in Russian].
11. Pronin S.V., *Avtomobilnyj transport: sb. nauch. trudov*, Kharkov, 2006, No 18, pp. 123-125 [in Russian].
12. Kozlov E.V., Popova N.A., Tihonkova O.V., Klimashin S.I., Cellermaer V.V., Gromov V.E., *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2005, Vol.2, No 1, pp.118-123 [in Russian].
13. Ivanov Yu.F., Kozlov E.V., *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2006. Vol. 3, No 3, pp. 61-68 [in Russian].
14. GOST 21318-82. *Izmeneniye mikrotverdsti carapaniem almaznymi nakonechnikami* (Microhardness changing by scratching with diamond tips), Moscow: Izd-vo standartov, 1983, 24 p. [in Russian].
15. Volosevich P.Yu., Bespalov S.A., *Metallofizika i novejschie tehnologii*, 2004. Vol. 26, No 3. pp. 343-359. [in Russian].
16. Volosevich P.Yu., Bespalov S.A., *Metallofizika i novejschie tehnologii*, 2006, Vol. 28, No 12, pp. 1629-1638 [in Russian].
17. Volosevich P.Yu., Bespalov S.A., *Metallofizika i novejschie tehnologii*, 2004, Vol. 26, No 5, pp 691-701 [in Russian].
18. Yakovleva S.P., Maharova S.N., Vinokurov G.G., Mordovskoi P.G., Struchkov N.F. *Fundamentalnye issledovaniya. Razdel «Tehnicheskie nauki»*, 2013, Vol. 10 (15), pp. 3451-3455, [in Russian].
19. Morozova N.A. (2005) *Povysheniye iznosostojkosti cilindricheskikh poverhnostej detalej mashin vibroudarnym plasticheskim uprochneniem* [Improving the wear resistance of cylindrical surfaces of machine parts by vibroshock plastic hardening] *Candidate's thesis*. Novosibirsk: Siberian State University of Railway Engineering [in Russian].
20. Matveev V.V., *Avtomaticheskaja svarka*, 2005, No 6, pp. 42-48 [in Russian].
21. Tkachenko R.O., *Tehnichni visti*, 1991, No 1(8), 2(9). pp. 41-42 [in Ukrainian].
22. Surface roughness – Part 1: Surface and its parameters, ISO 4287/1, 1984 [in English].
23. Rules and procedures for the measurement of surface parameters. ISO 4288, 1985 [in English].
24. Lonardo P.M., Trumpld H., Chiffre L. Progress in 3D Surface Microtopography Characterization. *Analisis of the CIRP*. 1996, V. 45/2. pp.11-23 [in English].

25. Muhamedov A.A., Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 1968, No 7, pp. 31-34 [in Russian].

В. Н. Уваров, С. А. Беспалов

Использование искусственных нейронных сетей для решения трибологических задач

Резюме

Проведенные склерометрические исследования стали 40X после закалки от 860, 1050 °С и высокого отпуска показали, что с повышением температуры закалки увеличивается среднее значение микротвердости. На царапинах выявлено два типа максимумов ее значений. К первому типу (T_1) относятся ближайшие друг к другу, среднее расстояние между которыми практически не меняется в зависимости от температуры закалки. Ко второму (T_2) – максимумы с большим периодом, который увеличивается и четче проявляется с ростом температуры закалки. Отмечено, что фактором, определяющим цикличность изменения микротвердости с периодом T_1 , являются границы зерен и пакетов мартенсита, а с периодом T_2 – растущая при повышении температуры закалки неравномерность распределения углерода. Исследовано влияние температурных условий закалки на износостойкость стали 40X после улучшения. Выявлено, что по сравнению со стандартной термической обработкой, закалка от 1050 °С и высокий отпуск повышает ее трибологические характеристики, а также снижает интенсивность износа контртела. Изучен характер разрушения контактных поверхностей. Показано, что в улучшенных образцах, закаленных от 860 °С, оно происходит по механизмам откалывания и гладкого расслаивания с пластической деформацией. Рост температуры закалки до 1050 °С с высоким отпуском меняет характер деструкции поверхности контактного взаимодействия. На ней появляются участки, микроструктура которых при трении по сравнению с окружающим объемом оказывает значительно большее сопротивление разрушению. Проанализированы структурно-геометрические параметры, характеризующие шероховатость и несущую способность поверхности контактного взаимодействия. Выявлено, что повышение температуры закалки до 1050 °С способствует снижению ее шероховатости и увеличению опорной кривой поверхности, характеризующей ее несущую способность. Рассматривается возможность применения искусственных нейронных сетей для прогнозирования трибологических свойств конструкционных сталей. По результатам моделирования структурно-геометрических параметров поверхности проведен анализ несущей способности поверхности контакта образцов стали 40X в зависимости от температуры закалки.

Ключевые слова: конструкционная сталь, температура закалки, износостойкость, поверхность контактного взаимодействия, моделирование, искусственные нейронные сети.

V. M. Uvarov, S. A. Bepalov

Artificial neural networks using for solving of the tribological problems

Summary

The sclerometric studies of steel 40X after quenching from 860, 1050 °С and high tempering showed the average microhardness increases with an increasing quenching

Структура, зношування, руйнування

temperature. On the scratches two types of microhardness maximum value are revealed. The first one (T_1) are closest to each other. The average distance between them does not change practically depending on the temperature of quenching. The second (T_2) are the maximums with a longer period, which increases and more clearly manifests itself with increasing quenching temperature. It is noted, that the determining factor of the microhardness cyclical changes with a T_1 period are the grains and martensite packets boundaries, and with T_2 period are the uneven carbon distribution, which increases with increasing quenching temperature. The influence of hardening temperature on the wear resistance of 40X steel after improvement is investigated. It was revealed that quenching from 1050 °C and high tempering increase its tribological characteristics, as well as reduce the wear rate of the counterbody compared with standard heat treatment. The nature of the destruction of contact surfaces is studied. It has been shown, that in improved samples hardened from 860 °C, it occurs according to the cleaving and smooth delamination mechanisms with plastic deformation. The nature destruction of the contact interaction surface is changes with the temperature quenching increasing to 1050 °C and with high tempering. The microstructure's areas with greater then surrounding volume fracture resistance during friction are identified. The structural-geometric parameters characterizing the roughness and bearing capacity of the contact interaction surface are analyzed. The temperature quenching increasing to 1050 °C reduce its roughness and increase the surface reference curve, which characterizing its bearing capacity. The possibility of using artificial neural networks to predict the tribological properties of structural steels are considered. Based on the results of modeling the structural and geometric parameters of the surface an analysis is made of the bearing capacity of the contact surface of 40X steel samples depending on the hardening temperature.

Keywords: structural steel, hardening temperature, wear resistance, contact interaction surface, modeling, artificial neural networks.

Шановні колеги!

Триває передплата на науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів» на 2020 р.
Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.
Вартість одного номера журналу – 50 грн., передплата на рік – 200 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2018 рр. – 10 грн.

Розрахунковий рахунок для передплатників, спонсорів і рекламодавців:

банк ДКСУ в м. Києві, р/р 31257293112215, код банку 820172

Отримувач – ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,

з посиланням на журнал "ММ".

Копію документа передплати та відомості про передплатника

просимо надсилати до редакції,

вказавши номер і дату платіжного документа.