

СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНИЙ СИНТЕЗ ТА МАТЕМАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ЗНОШУВАННІ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

Мета роботи. Провести теоретико-аналітичні дослідження впливу низьких температур на процес зношування матеріалів та розробити алгоритм структурно-логічного синтезу з математичною оптимізацією фізико-механічних параметрів.

Методи дослідження. Для дослідження зносостійкості матеріалу деталей машин, що працюють в умовах низьких температур до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ застосовано методіку досліджень, що базується на комплексному опрацюванні даних на базі комплексного багатofакторного підходу [4–6]. Цей метод ґрунтується на структурно-логічному синтезі апріорної інформації, аналізу характеристик робочого органу, умов зношування та властивостей зовнішнього середовища, з подальшим урахуванням впливу структурно-фазового стану й фізико-механічних чинників матеріалів у конкретних умовах контактної взаємодії.

Отримані результати. Проведено теоретико-аналітичні дослідження та визначені основні чинники, що здатні впливати на механізм руйнації та величину зносу в конкретних умовах спрацювання. Розглянуто способи підвищення зносостійкості при зношуванні сталей в умовах низьких температур від $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Встановлено, що зниження температури зовнішнього середовища негативно впливає на фізико-механічні властивості матеріалу та викликає збільшення частки крихкого руйнування мікрооб'ємів матеріалу. Побудовані рівняння регресії щодо визначення впливу хімічного складу і температур термічної обробки на фізико-механічні властивості.

Наукова новизна. Запропоновано та відпрацьовано алгоритм структурно-логічного синтезу з математичною оптимізацією фізико-механічних параметрів. Графоаналітичний аналіз дозволив встановити, що зі збільшенням вмісту молібдену у сталі, за рахунок стримування росту зерен аустеніту при гартуванні та відпуску, що дозволяє підвищити температуру підігріву, відбувається подрібнення структури матриці матеріалу та стає можливим виникнення структури сорбіт + бейніт. Тож доведено, що у визначених інтервалах температур загартування і відпуску можливо інтенсивно впливати на структурно-фазовий стан сталей, що забезпечить найбільшу зносостійкість для конкретних умов абразивного зношування.

Практичне значення. На практиці отримані данні дозволяють застосовувати числові кількісні розрахунки для вибору технологічних способів підвищення зносостійкості (термічна обробка, нанесення захисних покриттів, та ін.) з урахуванням температурного впливу. Дозволяють отримати прогноз зносостійкості залежно від фізико-механічних властивостей деталей у достатньо широкому діапазоні параметрів.

Ключові слова: зносостійкість, температура, абразив, сталь, крихкість, твердість, структура.

Вступ

Апріорі свідчать, що працездатність робочих органів машин, які працюють в умовах абразивного зношування за наявності низьких температур до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, визначають крихке руйнування деталей і з пониженням температури величина зношування їх зростає. Здатність матеріалів до супротиву абразивному зношуванню в обумовлених умовах з високою хрупкістю характеризують такі властивості матеріалу, як твердість HRC і технологічна надійність, яка визначається сукупністю фізико-механічних характеристик, здебільшого зараховують: міцність при згині узг, ударну в'язкість, та ін. Крім того, треба розуміти, що варіювання температури зовнішнього середовища обумовлює постійну зміну їх числових кількісних показників, які є рефлексією структурно-фа-

зового стану матеріалу. Отже проблема створення алгоритму математичних описів прогнозу впливу фізико-механічних характеристик на зносостійкість сталей та сплавів з урахуванням температурних градієнтів є достатньо важливим завданням і конче актуальним науково-технічним завданням.

Стан проблеми

Підвищення інтенсивності зношування за однакових умов зовнішніх чинників трибосистеми відбувається за рахунок того, що при зменшенні температури експлуатації змінюється характер та механізм руйнування мікрооб'ємів поверхонь тертя матеріалу. В першу чергу, це пов'язано, зі зниженням загальної ентропії матеріалу, що практично спотворює саму можливість ди-

сипації енергетичних механо-активацій в момент контактної взаємодії в поверхневих шарах поверхні тертя. Відбувається перехід від високоенергетичного зсуву до низькоенергетичного відколу або відриву, що обумовлює крихке сколювання. Тобто пластичне відтиснення замінюється крихким руйнуванням, що вагомо зменшує енергію відділення мікрооб'єктів [2, 4, 6].

Розгляд механізму абразивного зношування як процесу має бути поділений на два основних етапи: впровадження абразивної частки в матеріал (міцнісні характеристики, в тому числі і твердість) і відносно її переміщення (властивості, що визначають опір пластичній деформації). Вид зношування визначають різні фактори (супутнє середовище, вид взаємодії, форма абразиву і т. п.) На практиці абразивне зношування одного виду не відбувається. Одночасно відбувається кілька видів зношування, що ускладнює процес дослідження [4, 6]. Тому при розв'язанні цього завдання треба визначити головний вид руйнації поверхонь тертя.

В результаті літературного аналізу було з'ясовано, що висока стійкість до крихкого руйнування, а і стійкість до абразивного зношування при низьких температурах, асоціюються з високою ударною в'язкістю. Так само відомо, що зі зменшенням вмісту шкідливих домішок (а саме сірки і фосфору) в сталі забезпечується досить високі показники ударної в'язкості до температури $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].

Існує велика різноманітність способів підвищення зносостійкості матеріалів різних деталей машин [4]. Всі ці способи можна поділити на три групи: конструктивні, технологічні і комбіновані. Сфера застосування кожного з них визначається конкретними умовами роботи деталі, зносостійкість якої необхідно підвищити.

Результати досліджень

На практиці найбільш широке застосування знайшли технологічні способи підвищення зносостійкості (термічна обробка, нанесення захисних покриттів та ін.), що дозволяють варіювати властивостями зношуваних деталей в широкому діапазоні. Саме ці способи найбільш часто використовуються для підвищення зносостійкості [4–6].

Термічна обробка [2, 4] дозволяє в широкому діапазоні змінювати фізико-механічні властивості матеріалів і їх структуру, при яких можна отримати оптимальну зносостійкість матеріалу для заданих умов зношування. Зміни зносостійкості інструментальних сталей пов'язані з особливостями перетворень в них при загартовуванні і відпуску, а також із впливом низьких температур на фізико-механічні властивості.

У статті [1] викладено результати дослідження впливу низьких температур на зносостійкість інструментальних сталей, а також способи термічної обробки цих сталей, які б підвищили їх зносостійкість в умовах низьких температур.

Оскільки при зниженні температури змінюються властивості і сталей, і середовища зношування, необхідний еталон, який практично не змінював би своїх властивостей при зниженні температури. На думку авторів роботи [2], випробування на зношування не можуть бути проведені згідно з ДСТУ 17367-71, бо в ньому не враховані умови низьких температур.

В якості еталону в роботі [1] для визначення відносної зносостійкості матеріалів використовувався алюмінієво-магнієвий сплав АМг-2, про який так само говориться й у літературному джерелі [2].

Al-Mg-сплави, що здатні до деформування за рахунок термічної обробки, не зміцнюються. Тому вони мають порівняно низьку міцність, але більш високу пластичність в широкому інтервалі низьких температур і відрізняються гарною корозійною стійкістю в різних середовищах.

Також, як відомо [4, 6, 7], дуже важливу роль у процесі зношування матеріалу відіграє карбідна фаза, яка проявляється у вигляді включень на поверхні зношування і є більш твердою, ніж частинки абразиву, за рахунок чого зменшується зношування основного матеріалу. Однак слід зазначити, що позитивний вплив карбідів на опір матеріалів абразивному зношуванню визначається їх кількістю і рівномірністю розподілу в матриці. Останнє є головним чинником, особливо в умовах удару об абразивну поверхню. Великі карбіди мають більш слабкий зв'язок з матрицею і тому легко вириваються з основи абразивними частинками. Крупноблочна структура більш чутлива, ніж дрібнозерниста, до зниження температури, у неї швидше знижується межа втоми. Тому сталі з розвинутою карбідною неоднорідністю сильніше зазнають впливу низьких температур, бо її вплив на ділянки з великими і дрібними карбідами різний.

У цій роботі [1] досліджувалася зносостійкість інструментальних сталей при їх терті об закріплені абразивні частинки (шліфувальну шкурку), що моделює процес зношування робочих органів машин, що працюють у ґрунтах за низьких температур. Випробування проводилися в діапазоні температур від $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для виконання дослідження і проведення експериментів було вибрано дві марки сталей: Х6ВФ, Х6Ф4М.

Ці сталі належать до мартенситного класу та ледебуритної групи. Висока зносостійкість визначається підвищеною кількістю карбідної фази, типом і морфологією карбідів. А як відомо, наявність дрібнозернистих, рівномірно розподілених карбідів в матриці сплаву позитивно впливає на зносостійкість [1].

Охолоджений до заданої температури зразок з державки опускався на обертовий абразивний круг і стирався протягом 30 с. Перед кожним випробуванням поверхня круга вирівнювалася алмазною шарошкою [1].

До і після стирання зразки зважували на електронних терезах ВЛКТ-500д-М з точністю до 0,005 г. За критерій оцінювання і порівняння матеріалів щодо зносо-

стійкості прийнята відносна зносостійкість, обумовлена відношенням зносу еталона до зносу випробуваного зразка, з урахуванням густини досліджуваних матеріалів за формулою:

$$\varepsilon = U_e \cdot \gamma_m / U_m \cdot \gamma_e, \quad (1)$$

де ε – відносна зносостійкість;

U_e і U_m – ваговий знос зразків з еталонного і випробуваного матеріалів відповідно, мг.

γ_m і γ_e – густина еталонного і випробуваного матеріалів відповідно, г/см³ [1].

Залежно від виду фрикційного контакту, що характеризує певний вид зношування (абразивне, механічне при контакті двох металевих поверхонь, окисне, водневе, зношування при фретинг-корозії і т. п.), проводять або поверхневу, або об'ємну зміцнювальну термічну обробку. Поверхневу термічну обробку можна застосовувати для деталей, величина зносу яких порівняна з глибиною поверхневого зміцнення (1,5...2,0 мм). Ця глибина визначається зниженням вмісту в мартеніті до 50 %. Здебільшого її проводять при зношуванні: механічному, при взаємодії двох металевих поверхонь, при окисному, корозійному, водневому, ерозійному та ін. [1].

При абразивному зношуванні поверхнева термічна обробка не застосовується, оскільки величини зносу при ньому в більшості випадків суттєво (у декілька разів) перевищують величину зміцненого шару при поверхневій термічній обробці. Наприклад, знос робочих органів землерийних машин становить в деяких випадках десятки міліметрів. У зв'язку з цим для деталей машин, що піддаються абразивному зношуванню, застосовують тільки об'ємну термічну обробку.

Саме тому в роботі [1] вибирається об'ємна термічна обробка як технологічний спосіб підвищення зносостійкості інструментальних сталей в умовах низьких температур.

Після гартування з температури 1125 °С і відпуску при підвищених температурах (500 ... 600 °С) сталь Х6Ф4М виявилася найбільш зносостійкою з усіх досліджених. При однаковій температурі відпуску (500 °С)

підвищення температури нагрівання під гартування з 1025 до 1125 °С сприяє зростанню зносостійкості на 30...40 %. Така тенденція зберігається у всьому дослідженому інтервалі температур (+20 ... -60 °С) [1].

Аналіз результатів досліджень показує, що позитивний ефект від підвищеного нагріву сталі Х6Ф4М обумовлений наявністю в цій сталі молібдену, який стримує зростання зерен аустеніту при нагріванні під гартування і відпуск. Це дозволяє підвищити температуру нагрівання, за якою найбільш повно відбуваються структурні перетворення. Після гарту з температури 1125 °С і відпуску за температур 550 °С ... 600 °С у сталі одночасно поєднуються висока твердість (58...60 HRC), міцність (2260 ... 2870 МПа) і ударна в'язкість (450...600 · 10⁵ Дж/м²). Структура сталі після такої термічної обробки характеризується високою дисперсністю і рівномірністю розподілу карбідів у матриці [1].

Роль структури матеріалу як одного з основних чинників, що визначає здатність матеріалу чинити опір зношуванню, очевидна при порівнянні різних режимів термічної обробки сталі Х6Ф4М, що дозволяють отримати однакові механічні властивості. Після відпуску при 450 °С ($t = 1025$ °С) і 600 °С ($t = 1125$ °С), володіючи практично однаковою твердістю (60 ... 61 HRC), міцністю (2820 і 2870 МПа) і суттєво відрізняючись за ударною в'язкістю (870 · 10⁵ і 600 · 10⁵ Дж/м² відповідно), відмінність щодо зносостійкості сталі Х6Ф4М при зазначених режимах термічної обробки становить 40 ... 50 % [1].

Отже, на основі наведених даних нами було проведено математичне планування та побудовані рівняння регресії з визначення впливу хімічного складу і температур термічної обробки на фізико-механічні властивості, що визначають зносостійкість. За параметр оптимізації прийнято міцність при згині σ_{30} МПа, твердість HRC і ударну в'язкість $a_n \cdot 10^5$, Дж/м². Причому за основні незалежні фактори було обрано: вміст молібдену в випробовуваних сталях, температура гарту і температура відпуску. Рівняння регресії представлене у вигляді полінома:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (2)$$

Таблиця 1 – Основні фізико-механічні властивості досліджуваних сталей [1]

| Марка сталі | Термічна обробка | | Міцність при згині $\sigma_{изг}$ МПа | Ударна в'язкість $a_n \cdot 10^5$, Дж/м ² | Твердість HRC |
|-------------|------------------|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------|
| | Гартування, °С | Відпуск, °С | | | |
| Х6ВФ | 1000 | 200 | 2280 | 730 | 62 |
| | | 250 | 2540 | 650 | 56 |
| | | 300 | 2590 | 650 | 59 |
| | | 400 | 2780 | 1030 | 54 |
| Х6Ф4М | 1025 | 200 | 2480 | 570 | 60 |
| | | 400 | 3000 | 600 | 53,5 |
| | | 450 | 2820 | 870 | 58,5 |
| | | 500 | 2760 | 710 | 56,5 |
| | 1125 | 500 | 2080 | 710 | 56 |
| | | 550 | 2260 | 450 | 62 |
| | | 600 | 2870 | 600 | 58,5 |

де $b_0, b_1, b_2 \dots b_{123}$ – вибірковий коефіцієнт регресії, який можна отримати, використовуючи результати реалізованого коефіцієнта.

За змінні були прийняті такі фактори, вплив яких на властивості матеріалу, що визначають зносостійкість, виявлені. Необхідно встановити їхній спільний вплив на зносостійкість.

У цій ситуації планування експерименту відтворено для трьох невідомих на трьох рівнях варіювання. Вибір рівнів та інтервалів варіювання факторів впливу відбувається виходячи з результатів апріорної інформації.

Інтервал варіювання і кодування факторів, які впливають на експеримент, показані в таблиці 2.

В результаті літературного аналізу було з'ясовано, що легування сталей різними елементами призводять до двояких результатів, тому необхідно відштовхуватися від конкретних умов зношування. Так само враховувати їх вплив на механізм зношування при поєднанні декількох елементів, в результаті легування. А щодо структури сталі, літературні джерела стверджують, що більш стійкими до абразивного зносу при низьких температурах є сталі з дрібнозернистою структурою [2].

В даному випадку в варіюванні хімічного складу (а воно присутнє, так як випробовуваних марок сталей було дві) важливим фактором є зміна вмісту молібдену (від 0 і до 2 відсотків), що в кінцевому підсумку вагомо

вплинули на зносостійкість, стримавши зростання аустенітного зерна при нагріві під загартування і відпуск, що зі свого боку дозволило підвищити температуру нагрівання, при якій найбільш повно відбуваються структурні зміни.

У разі ТО авторами роботи [1] були обрані такі інтервали зміни температур гартування (від 1000 °С до 1125 °С) і відпуску (від 200 °С до 550 °С), які давали б найбільш результативний вплив на структуру і фізико-механічні властивості сталей [1].

Отже, можна вибрати верхні і нижні межі варіювання, відповідно для кожного фактора впливу. Кількість необхідних експериментів обчислюється за формулою:

$$N = 2^k, \quad (3)$$

де k – кількість факторів;

$$N = 2^3 = 8.$$

Кожен експеримент був проведений два рази, після чого було визначено середнє арифметичне показників. На підставі отриманих даних була створена матриця планування і результатів експериментів. Ці дані представлені в таблиці 3.

Для простоти відтворення розраховані коефіцієнти наведені в таблиці 4.

Результати обчислень параметрів оптимізації та статистичної перевірки наведені в таблицях 5, 6.

Таблиця 2 – Кодування факторів експерименту

| Фактори | Кодова позначка | Рівні | | | Інтервал варіювання | Розмірність |
|------------------------|-----------------|-------|--------|------|---------------------|-------------|
| | | -1 | 0 | +1 | | |
| Молібден (Мо) | X_1 | 0 | 1 | 2 | 1,25 | % |
| Температура гартування | X_2 | 1000 | 1067,5 | 1125 | 1,25 | °С |
| Температура відпуску | X_3 | 200 | 375 | 550 | 0,65 | °С |

Таблиця 3 – Матриця планування та результати експерименту

| № | Марка сталі | X_1 | X_3 | X_2 | Y_1 | | | Y_2 | | | Y_3 | | |
|---|-------------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------|----|------|
| | | | | | 1 | 2 | сер. | 1 | 2 | сер. | 1 | 2 | сер. |
| 1 | Х6ВФ | + | - | - | 2260 | 2300 | 2280 | 720 | 740 | 730 | 62 | 62 | 62 |
| 2 | ----- | + | + | - | 2775 | 2785 | 2780 | 1015 | 1045 | 1030 | 53 | 55 | 54 |
| 3 | ----- | + | - | + | 2340 | 2320 | 2330 | 630 | 670 | 650 | 52 | 56 | 54 |
| 4 | ----- | + | + | + | 2630 | 2670 | 2650 | 700 | 720 | 710 | 52 | 52 | 52 |
| 5 | Х8М2Ф | - | - | - | 2495 | 2465 | 2480 | 570 | 570 | 570 | 63 | 57 | 60 |
| 6 | ----- | - | + | - | 2730 | 2790 | 2760 | 705 | 715 | 710 | 56 | 57 | 56,5 |
| 7 | ----- | - | - | + | 2105 | 2055 | 2080 | 440 | 460 | 450 | 52 | 55 | 53,5 |
| 8 | ----- | - | + | + | 2860 | 2880 | 2870 | 595 | 605 | 600 | 59 | 58 | 58,5 |

Таблиця 4 – Коефіцієнти для рівняння регресії

| Коефіцієнти | 1 рівняння | 2 рівняння | 3 рівняння |
|-------------|------------|------------|------------|
| b_0 | 7851,429 | 1495,714 | 152,857 |
| b_1 | -3540,000 | -697,143 | 2,571 |
| b_2 | -5,531 | -1,006 | -0,091 |
| b_3 | -10,857 | 0,171 | -0,204 |
| b_{12} | 3,377 | 0,731 | 0,000 |
| b_{13} | 0,012 | 0,000 | 0,000 |
| b_{23} | 8,200 | 3,086 | 0,022 |
| b_{123} | -0,008 | -0,003 | -2,857E-5 |

Незначущий коефіцієнт при факторі означає, що цей фактор не впливає або впливає незначно, на параметр оптимізації. Однак на величину коефіцієнту регресії впливає не тільки роль цього фактору, але також обраний інтервал варіювання. Тож при завузьких межах варіювання визначених параметрів зміна кількісних значень функції оптимізації може бути дійсно дуже малою. Однак треба розуміти, що тільки за цим фактом не можна робити загальний висновок, цей фактор значу-

щим чи ні. Тому статистичний сигнал фактора повинен бути за можливістю перевірений або хоча б проаналізований з технологічної точки зору, зокрема фізичного смислу математичної моделі, що побудовано.

Отже внаслідок обробки даних матриці планування експерименту, після проведення перевірки, внаслідок статичного характеру залежностей (критерії Фишера, Кохрена, Стюдента, таблиця 6), були отримані такі адекватні рівняння регресії:

$$\begin{cases} \sigma_{изг} = 7851,429 - 3540Mo - 5,531T_z - 10,857T_v + 3,377MoT_z + 0,012T_vT_z + 8,2Mo - 0,008MoT_zT_v \\ a_n = 1495,714 - 697,143Mo - 1,006T_z - 0,1717T_v + 0,731MoT_z + 3,086MoT_v - 0,003MoT_zT_v \\ HRC = 152,857 - 2,571Mo - 0,091T_z - 0,204T_v + 0,022MoT_v - 0,000029MoT_zT_v, \end{cases} \quad (4)$$

де Mo – процентний вміст молібдену, %;
 Tz – температура гартування, С;
 Tv – температура відпуску, С.

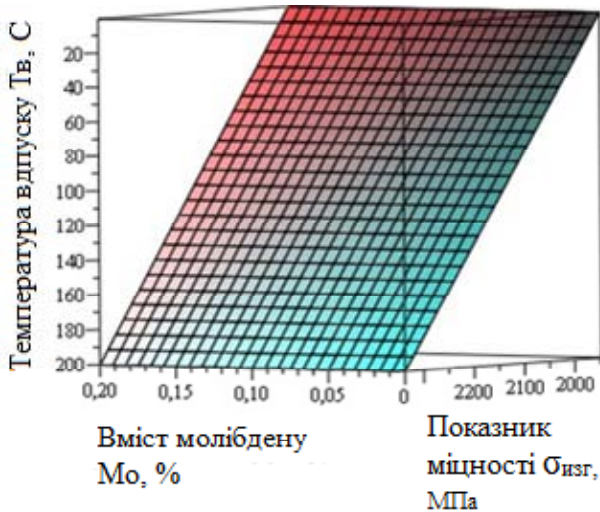


Рис. 1. Діаграми взаємного впливу хімічного складу та температури термічної обробки для міцності при згині у зг при постійній температурі гартування Tz = 1067,5 °С

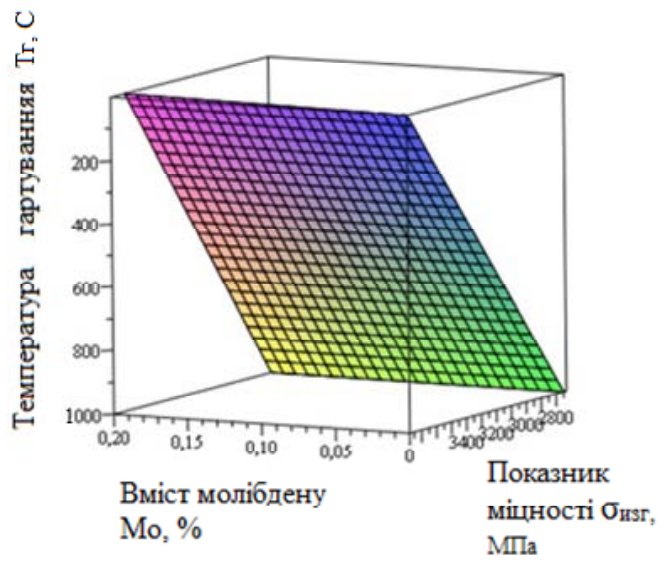


Рис. 2. Діаграми взаємного впливу хімічного складу та температури термічної обробки для міцності при згині у зг при постійній температурі відпуску Tv = 375 °С

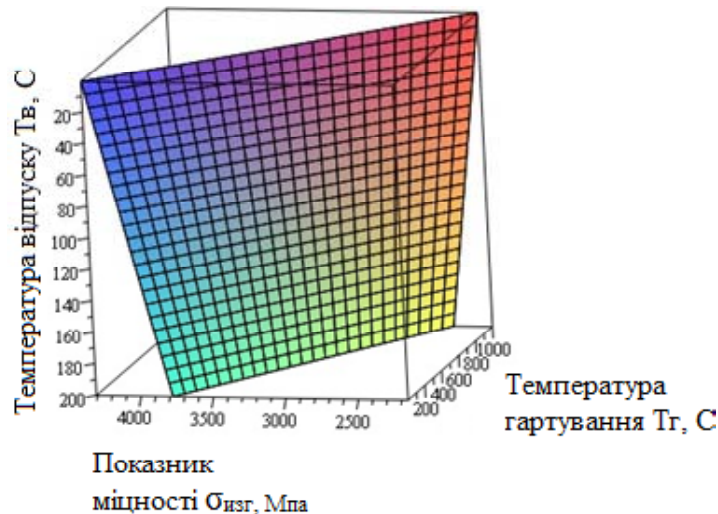


Рис. 3. Діаграми взаємного впливу хімічного складу та температури термічної обробки для міцності при згині у зг при постійному вмісті молібдену Mo = 1 %

Просторові діаграми показують, що збільшення температури відпуску збільшує міцнісний показник із спільним незначним позитивним впливом підвищення вмісту молібдену (рис. 2). Зі збільшенням температури гарту показник міцності збільшується. Молібден незначно знижує негативний вплив температури гартування (рис. 3). Спільний вплив температур гартування та відпуску: з підвищенням температури гарту показник міцності знижується; проте підвищення температури відпуску зміщує залежність в сторону більших показників міцності.

В умовах абразивного зношування у межах низьких температур математична і фізична моделі розрахунку працездатності робочих органів поки не існує і створення таких є надмірно складним, бо на механізм зношування впливає велика кількість факторів. Поява ж нових методів підвищення зносостійкості в таких умовах ґрунтуються на знаходженні нових факторів і у визначенні ступеня їх впливу на підвищення морозостійкості матеріалів.

Висновки

Отже внаслідок проведених теоретико-аналітичних досліджень було встановлено, що важливим чинником, який суттєво впливає на процес зношування та руйнацій поверхні тертя є температурний градієнт. Дослідження, проведені в інтервалі температур від +20 до –70, дозволили встановити, що зниження температури негативно впливає на такі фізико-механічні властивості сталей, як твердість, міцність та ударна в'язкість, що викликає збільшення частки крихкого руйнування мікрооб'ємів матеріалу деталей при взаємодії поверхні матеріалу з абразивними частками, що, в свою чергу, сприяє збільшенню швидкості відділення мікрочасток поверхневого шару випробуваного матеріалу та, як результат, збільшенню масового зношування деталей.

Аналіз літературних джерел дозволив встановити несистемність досліджень механізму зношування сталей типу Х6ВФ, Х8М2Ф в умовах низьких температур та нагальну потребу зробити математичний аналіз впливу найголовніших чинників на зносостійкість матеріалу деталей, які працюють в умовах низьких температур, а саме робочих органів землерийних машин. У роботі нами вперше було проведено математичне планування процесу зношування за умов низьких температур та отримана математична модель (у вигляді системи рівнянь регресії) впливу масової частки молібдену в сталі та температури термічної обробки (а саме темпе-

ратури гартування і відпуску) сталі на її фізико-механічні властивості (міцність, твердість та ударну в'язкість), які і визначають їх взаємозалежність із зносостійкістю випробуваного матеріалу.

Графоаналітичний аналіз дозволив встановити, що зі збільшенням вмісту молібдену у сталі, за рахунок стримування росту зерен аустеніту при гартуванні та відпуску, що дозволяє підвищити температуру підігріву, відбувається подрібнення структури матриці матеріалу та можливим виникнення структури сорбіт + бейніт. Також доведено, що в порівняно невеликих інтервалах зміни температур загартування і відпуску можливо інтенсивно впливати на структуру сталей, чим набуває властивостей що, забезпечують найбільшу зносостійкість для конкретних умов абразивного зношування в заданому інтервалі температур роботи деталі.

Ця наукова розробка має великі теоретико-практичні значення, що розширює знання у даній предметній площині.

Список літератури

1. Тарасов Г. Ф. Термическая обработка сталей как фактор повышения их износостойкости при низких температурах / Тарасов Г. Ф., Горбуля А. И. // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического университета им. ак. М.Ф. Решетнева. – 2005. – № 3. – С. 253–257.
2. Ларионов В. П. Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений / Ларионов В. П. – Новосибирск : Наука, 1976. – 206 с.
3. Зорин А. М. Трещиностойкость стали в области низких температур / Зорин А. М. // Автоматическая Сварка. – 1991. – № 6. – С. 357–365.
4. Попов С. М. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні: Навчальний посібник / С. М. Попов, Д. А. Антонюк, В. В. Нетребко. – Запоріжжя : ЗНТУ, ВАТ «Мотор Січ», 2010. – 368 с.
5. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю. П. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
6. Popov S. N. Adequacy analysis of methods of forecasting the abrasive stability steels and alloys / S. N. Popov // Problems of Tribology. – Хмельницький: Хмельницький національний університет Міністерства освіти і науки України: журнал – 2005. – №2 (35). – С. 95–101.
7. Graff L. Discrete element method simulation of wear due to soil-tool interaction: a thesis... master science: Agricultural and Bioresource Engineering / Lyndon Graff. – Saskatoon, Canada, 2010. – 120 p.

Одержано 06.12.2019

Попов С. Н., Нетребко В. В. Структурно-логический синтез и математическая оптимизация физико-механических параметров при изнашивании материалов в условиях низких температур

Цель работы. Провести теоретико-аналитическое исследование влияния низких температур на процесс изнашивания материалов и разработать алгоритм структурно-логического синтеза с математической оптимизацией физико-механических параметров.

Методы исследования. Для исследования износостойкости материала деталей машин, которые работают в условиях низких температур, применена методика исследований, которая базируется на комплексной

проработке данных на базе комплексного многофакторного подхода [4-6]. Этот метод основывается на структурно-логическом синтезе априорной информации, анализа характеристик рабочего органа, условий изнашивания и свойств внешней среды, с дальнейшим учетом влияния структурно-фазового состояния и физико-механических факторов материалов в конкретных условиях контактного взаимодействия.

Полученные результаты. Проведено теоретико-аналитическое исследование, определены основные факторы, которые способны влиять на механизм разрушения и величину износа в конкретных условиях эксплуатации. Рассмотрены способы повышения износостойкости при изнашивании сталей в условиях низких температур от +20 °С к -70 °С. Установлено, что снижение температуры внешней среды негативно влияет на физико-механические свойства материала и вызывает увеличение доли хрупкого разрушения микрообъемов материала. Построены уравнения регрессии влияния химического состава и температур термической обработки на физико-механические свойства.

Научная новизна. Предложен и отработан алгоритм структурно-логического синтеза с математической оптимизацией физико-механических параметров. Графоаналитический анализ позволил установить, что с увеличением содержания молибдена в стали, за счет сдерживания роста зерен аустенита при закалке и отпуске позволяет повысить температуру подогрева, происходит измельчение структуры матрицы материала и возможно возникновение структуры сорбит + бейнит. Поэтому доказано, что в определенных интервалах температур закалки и отпуска дает возможность интенсивно влиять на структурно-фазовое состояние сталей, что может обеспечить наибольшую износостойкость для конкретных условий абразивного изнашивания.

Практическое значение. На практике полученные данные дадут возможность применять числовые количественные расчеты для выбора технологических способов для повышения износостойкости (термическая обработка, нанесение защитных покрытий, и др.) с учетом температурного влияния. Позволяют получить прогноз износостойкости в зависимости от физико-механических свойств деталей в достаточно широком диапазоне параметров.

Ключевые слова: износостойкость, температура, абразив, сталь, хрупкость, твердость, структура.

Popov S., Netebko V. Structural-logical synthesis and mathematical optimization of physical-mechanical parameters at wearing the materials in low temperatures

Purpose. To conduct theoretical and analytical studies of the influence of low temperatures on the process of material wear and make an algorithm for structural and logical synthesis with mathematical optimization of physico-mechanical parameters.

Research methods. In order to study the wear resistance of the material of parts of the machines operating in low temperature conditions, a research methodology based on complex data processing based on a complex multifactorial approach was used [4-6]. This method is based on the structural-logical synthesis of a priori information, analysis of the characteristics of the working body, wear conditions and properties of the environment, with subsequent consideration of the influence of the structural-phase state and physico-mechanical factors of materials in specific conditions of contact interaction.

Obtained results. Theoretical and analytical studies have been carried out and the main factors that can influence on the mechanism of destruction and the amount of wear and tear under specific conditions of operation have been determined. The ways of increasing the wear resistance at wear of steels in the conditions of low temperatures from +20 °C to -70 °C have been considered. It has been found that lowering the ambient temperature adversely affects the physical and mechanical properties of the material and causes an increase in the fraction of brittle destruction of the micro-volumes of the material. Regression equations were done to determine the effect of chemical composition and heat treatment temperatures on physical and mechanical properties.

Scientific novelty. The algorithm of structural-logical synthesis with mathematical optimization of physico-mechanical parameters is proposed and worked out. Graphoanalytic analysis has shown that with increasing molybdenum content in steel, due to the restriction of the growth of austenite grains during tempering and tempering, which allows to increase the temperature of heating, there is a grinding of the structure of the matrix of the material, and possibly the emergence of the structure of sorbitol + bainite. Therefore, it is proved that in certain intervals of tempering and tempering temperatures it is possible to intensely influence on the structural-phase state of steels, which will provide the greatest wear resistance for specific conditions of abrasive wear.

Practical value. In practice, the obtained data will allow to use the numerical quantitative calculations to select technological methods for increasing the wear resistance (heat treatment, coating, etc.), taking into account the temperature effect. It is possible to obtain the forecast of wear resistance depending on the physical and mechanical properties of the parts in a sufficiently wide range of parameters.

Key words: wear resistance, temperature, abrasive, steel, fragility, hardness, structure.