

УДК 621.78.08; 621 14.018

О.Г.Добровольський, к.т.н., доцент;
Б.В. Борисевич, (КНУБА, Київ);
В.А. Косенко, к.т.н. доцент (ВДУРоЛ, Київ)

БОРУВАННЯ – ЕФЕКТИВНИЙ СПОСІБ ЗАХИСТУ ДЕТАЛЕЙ ВІД АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

АННОТАЦІЯ. Порівняно характеристики зносостійкості матеріалів і боридних покриттів на сталевих деталях. Визначена перспективність впровадження процесу в машинобудуванні. Дана характеристика властивостей борованих деталей, оцінено можливості застосування їх в якості деталей машин і обладнання.

Ключові слова: боридні покриття, абразивна зносостійкість.

АННОТАЦИЯ. Сравнены характеристики износостойкости материалов и боридных покрытий на стальных деталях. Определена перспектива внедрения процесса в машиностроение. Дана характеристика свойств борированных деталей, оценены возможности применения их в качестве деталей машин и оборудования.

Ключевые слова: боридные покрытия, абразивная износостойкость.

SUMMARY. The compared descriptions of wearproofness of materials and boride coverages are on iron details. Certain perspective of introduction of process is in an engineer. This description of properties of boride details, appraised possibilities of application of them as details of machines and equipment.

Keywords: boride covering, abrasion.

Вступ

Для великої кількості будівельних, дорожніх, гірських, металургійних, сільськогосподарських та інших машин причиною невеликого строку служби являється не злом, а зношування деталей. Найбільш руйнівним серед всіх видів є абразивне зношування. Слід враховувати також те, що витрати на матеріали сягають не менше ніж 50% вартості готової машини, механізму. Тому при створенні машини, приладу, обладнання завжди виникає проблема вибору матеріалу, який переважно робиться за рахунок застосування традиційно давно відомих матеріалів. Впровадження же більш ефективних технологій і матеріалів при цьому гальмується, що приводить до зниження ефективності роботи машини. Одним з напрямів підвищення зносостійкості деталей є напрям, за яким деталі захищають від зношування за допомогою створення на їхній поверхні зносостійких покриттів, взагалі, та борування, зокрема.

Мета і постановка задачі

В роботі поставлена задача порівняти властивості та, в першу чергу, характерис-

тики зносостійкості матеріалів і боридних покриттів на сталевих деталях., а також розкрити сутність процесу борування, способів його здійснення, визначити перспективність впровадження його у виробництві, дати характеристику властивостей борованих деталей, оцінити можливості застосування їх в якості деталей машин і обладнання.

Виклад основного матеріалу

Реальні умови зношування деталей в абразивному середовищі дуже різні, різними є і самі абразиви, що діють на деталь. За різних умов один і той же матеріал зношується не однаково. Наприклад, зносостійка сталь 110Г13Л вважається зносостійкою в ударно абразивних умовах. В той же час ця сталь (при зношуванні за умов дії не жорстко закріпленого абразиву) має зносостійкість, що мало відрізняється від зносостійкості сталі Ст3 [4].

Найбільший вплив на абразивну зносостійкість має відношення H_a/H_m (рис.1), де H_a і H_m .- відповідні значення твердості абразиву і матеріалу, що випробовується. [4].

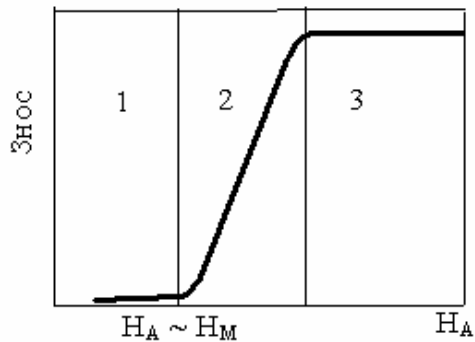


Рис. 1 Схема залежності зносу матеріалу від твердості абразивних зерен за Ваалем

Для подальшої орієнтації в табл. 1 наведені значення твердості природних абразивів [4].

Таблиця 1
Твердість деяких природних абразивів

Абразив	HV, ГПа	Абразив	HV, Па
Гіпс	0,29	Манганіт	5,73
Мармур	1,08	Нефріт	5,88
Вапняк	0,98-1,47	Скло	5,85-6,03
Флюорит	1,72	Гематит	5,65-6,17
Вугілля	0,3-4,17	Ортоклаз	7,08
Доломіт	3,14-4,07	Халцедон	9,07
Кремій	9,18-9,8	Кварц	7,84-12
Гірський криштал	10,29-11	Граніт	13,62-16,46
Топаз	14,46	Корунд	20,15-22,54

При $H_a/H_m < F_1$ ($0,7 < F_1 < 1,1$), абразивне зношування відсутнє, хоча знос матеріалу можливий. В цій області може відбуватися інший вид зношування, наприклад, утомлюваний знос, який характеризується значно меншою інтенсивністю. При $H_a/H_m > F_2$ ($1,3 < F_2 < 1,7 \dots 5,5$) зношування велике і ϵ величина постійна. За умови $F_1 < H_a/H_m < F_2$ спостерігається тенденція до збільшення зносостійкості зі зростанням твердості матеріалу. Виходячи з даних табл. 1 можна зробити висновок, що крім корунду, що характеризується більшою твердістю, абразивна дія природних мінералів на бориди заліза майже відсутня. Це пояснює дуже високу абразивну зносостійкість борованих сталей.

Для порівняння характеристик зносостійкості різних матеріалів застосовувались данні, що були отримані при зношуванні ма-

теріалів на лабораторній машині тертя Х4-Б, яка найчастіше застосовується при дослідженні абразивної зносостійкості (ГОСТ 17361 – 71).

За стандартом (ГОСТ 17361-71) в якості абразиву застосовували корундову абразивну шкурку, твердість якої складає HV20150... HV22500 МПа. За цієї умови можна передбачити, що матеріали з більшою твердістю практично не повинні зношуватись або зношуватись незначно і не за схемою абразивного зношування. Більшість матеріалів, що застосовуються в якості абразивно зносостійких, мають меншу твердість ніж твердість корунду. Закономірність їх зношування знаходиться в зоні 2 (рис.1), тому при випробуванні на машині тертя Х4-Б із застосуванням корундової шкурки вони повинні зношуватись і тим сильніше, чим більшим буде відношення H_a/H_m .

Загартовані вуглецеві і леговані сталі характеризуються твердістю, що не перевищує HV7 МПа і, відповідно, відносною абразивною зносостійкістю $\epsilon = 3 \dots 6$. Існує багато способів, які захищають сталі деталі від абразивного зношування. Серед них кращу абразивну зносостійкість мають покриття матеріалів на сталях, що мають більшу твердість ніж твердість сталей. Це такі матеріали: хром (HV7-13 ГПа), нітрид титану TiN (HV20 ГПа), бориди заліза FeB і Fe₂B (HV18-23 ГПа), та ін. Серед них високою твердістю і, відповідно, більшою зносостійкістю мають бориди заліза FeB і Fe₂B. Наприклад, відносна зносостійкість гальванічного покриття з хрому, що має твердість покриття з хрому, що має твердість HV9,849 ГПа, складає $\epsilon = 6,649$; боридного покриття на сталі 10 складає $\epsilon = 121,9$; боридного покриття на сталі 65 – $\epsilon = 132 \dots 136$; боридного покриття на сталі 38 ХМЮА – $\epsilon = 92 \dots 110,5$ [4]. Такі високі значення відносною абразивної зносостійкості боридних покриттів на сталях пояснюються не тільки їх високою твердістю, а також високою міцністю з'єднання покриття зі сталлю. Спосіб, за яким наносять боридні покриття, називається боруванням.

Борування полягає в насиченості поверхні сталевих деталей бором при нагріванні у середовищі, що містить бор, в результаті

чого утворюється шар боридів заліза FeB і Fe_2B (рис. 2), твердість яких складає $HV21000$ МПа і $HV18000$ МПа, відповідно. Така висока твердість боридів заліза, яка втричі перевищує твердість загартованих сталей, забезпечує високу стійкість деталей, що працюють в умовах термостійких, механічних впливів і абразивного зношування. Завдяки цьому строк служби деталей машин і обладнання після борування стає більш тривалий, ніж після традиційних способів обробки, таких як гартування, цементація, азотування та інші.

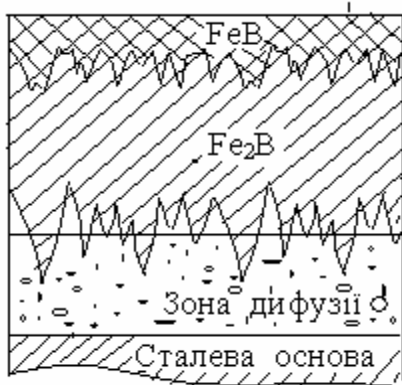


Рис.2. Схематичне зображення структури двофазного шару боридів заліза на нелегованій сталі

Боруванню можуть підлягати сталі феритного, перлітного і аустенітного класів. В процесі борування на поверхні деталі утворюється зона боридів, хімічний склад, форма і структура яких залежить від хімічного складу сталі. Вуглець і легуючі елементи зменшують глибину насичуемого шару: чим більший їх вміст, тим менша глибина борування (рис. 3).

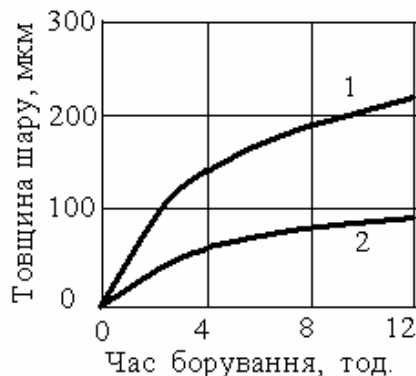


Рис. 3. Принципова залежність товщини шару від часу борування для вуглецевих (1) і легованих (2) сталей

Вуглець і деякі хімічні елементи витискуються в зону, що знаходиться нижче боридного шару, а ті хімічні елементи, що розчинюються в боридах заліза, легують їх.

Застосовують такі способи борування:

1. *Борування в газових середовищах.* Гази, що містять бор (борани), токсичні і вибухонебезпечні. Їх слід розбавляти газами, що не містять бору (воднем, аргоном тощо). Через токсичність і вибухонебезпечність цей безумовно прогресивний спосіб ХТО практично не застосовують у виробництві.

2. *Борування у твердих середовищах* (у порошках карбиду бору B_4C , феробору) в герметизованих контейнерах, в захисних газах або у вакуумі. Процес проводять при температурах $900...950$ °С на протязі 4...6 годин, після цього деталі охолоджують, витягують з контейнера і при необхідності термічно обробляють (гартування, відпуск). При цьому нагрівання деталі необхідно виконувати у захисній атмосфері для збереження високої стійкості борованого шару, що разом з необхідністю проведення робіт по герметизації контейнерів, робить цей процес складним і дорогим. Для уникнення цього недоліку процесу борування і гартування виконують у шахтних печах у захисній атмосфері, яка створюється при додаванні у піч тріетаноламіну [6].

3. *Електролізне борування*, яке проводиться в розплаві суміші бури з повареною сіллю та речовини, що містить бор, наприклад, карбід бору B_4C , феробор або порошок бору. Також можна проводити процес без застосування бури, застосовуючи тільки хлористі солі в суміші з компонентами, що містять бор. Процес виконують у муфелі з жароміцної сталі, у якості анода застосовують графітові стрижні; напруження постійного струму в процесі борування знаходиться в межах 6...24 В. Недоліком електролізного борування є низька стійкість муфеля з жароміцної сталі, при руйнуванні якого виливається розплав бури, який важ-

ко вбирати. Крім того труднощі виникають з гартуванням деталей після буровання. Спосіб застосовується для широкого спектру виробів простої форми за різним призначенням.

4. *Буровання безелектролізне в рідкому середовищі.* Рідким середовищем може бути розплав суміші бури, повареної солі з активуючими домішками та речовини, що містить бор (карбід бору, феробор або порошок бору) або розплав хлористих солей без бури з тими ж активуючими домішками. Більш ефективним є другий варіант. Наприклад, коли боруюча суміш складається з 92...96% NaCl, 2...5% NaF і 1,5...3% порошку бору і буровання виконується у соляній ванні без використання муфеля з жароміцної сталі, то процес стає більш швидким (на 25%), значно економічнішим. Його виконують за температури 850...920 °C. За 2,5...3 години витримки за цієї температури створюється боридне покриття товщиною 0,1...0,12 мм.

Безелектролізне буровання характеризується зручністю виконання термічної обробки. Цей спосіб застосовують переважно у випадку обробки деталей складної форми. Недоліком 3 і 4 способів стає необхідність відмивати деталі від бури та інших солей. Вода стає отруйною, що робить процес екологічно небезпечним.

5. *Буровання з паст (обмазок)* доцільно застосовувати при зміцненні масивних великогабаритних виробів, а також за необхідності місцевого буровання. Буровання з паст займає проміжне положення між бурованнями з порошків і розплавів. Воно передбачає приготування обмазки, що містить бор, підготовку поверхні деталі, нанесення і просушування обмазки, нагрівання і витримку підготовлених деталей за заданим режимом, охолодження і очищення деталі [7, 8]. До складу обмазок входять V_4C або бор, $Na_2B_4O_7$ або Na_3AlF_6 та активуючі домішки. Товщина обмазки складає 2...4 мм. Для нагрівання використовують печі з електроопором або з індукційним нагріванням ТВС. Цей спосіб є більш екологічно чистим і приємним для застосування у виробництві.

6. *Термоциклічне буровання (ТЦБ).* Цей спосіб став подовженням розвитку способу "Буровання з паст" і частіше застосовується в поєднанні з ним [1-3,]. В той же час за певних умов його можна виконувати в поєднанні з іншими способами буровання.

Термоциклічне буровання полягає в тому, що при термодифузійному насиченні поверхні сталюї деталі температура не залишається незмінною, як за інших способах буровання, а змінюється циклічно: нагрівання і охолодження відбувається в інтервалі температур 600...1000 °C циклічно з витримкою від 1 до 60 хв. і кількості циклів від 3 до 20. Разом з цим при нагріванні відбувається перетворення феритноперлітної структури сталі на аустенітну, а при охолодженні – з аустенітної на перлітноферитну. Саме такі перетворення стимулюють дифузійні процеси. В результаті ТЦБ приводить до утворення більш дрібної структури і підвищенню таких важливих характеристик як пластичність і ударна в'язкість. Крім того ТЦБ дозволяє уникнути росту зерна серцевини деталі, покращує зчеплення дифузійного шару з основою. Спосіб краще поєднується з гартуванням в останньому циклі, а наступний відпуск забезпечує необхідну твердість серцевини і поверхневого шару. Процес ТЦБ можна реалізовувати на стандартному обладнанні термічного цеха.

7. *Буровання у віброкіплячому шарі.* Процес виконують у віброкіплячій суміші порошків V_4C (15%), хлористого амонію NH_4Cl (1...2%), і корунду Al_2O_3 , при температурі 950 °C на протязі 2 годин. Спосіб дозволяє легко виконувати термічну обробку. Його продуктивність перевищує традиційні способи буровання у 1,5...2 рази. Але цей спосіб ще недостатньо досліджений і у виробництві не застосовувався.

8. *Буровання відливок при їх виготовленні.* При цьому способі процес насичення поверхні сталі бором виконується безпосередньо при виготовленні відливку. Насичуюча обмазка, що містить бор, наноситься на поверхню моделі, що вигоряє при заливанні металу у форму, просушується, засипається формуючою сумішшю в контейнері і заливається металом. Після охолодження відливок виймається з форми. В результаті на поверхні відливка утворюється боридна евтектика з високою в'язкістю і міцністю, до-

статньою твердістю і зносостійкістю. Товщина борованого шару складає 0,5...5 мм. Метод знаходиться на стадії досліджень і широко не застосовується у виробництві.

Властивості боридних покриттів. Негативною стороною боридних покриттів є їх крихкість. Більшу крихкість має FeB, меншу - Fe₂B. Крім того напруження, що виникають у шарах цих боридів (рис.2), різні за знаком: у шарі FeB вони розтягуючи, у шарі Fe₂B – напруження стискання. Коефіцієнт тріщиностійкості K_{1C} у фази FeB складає 1,12...1,4, а у фази Fe₂B – 2,5...2,9 МПа·мм^{1/2}. Виходячи з цих характеристик і, незважаючи на більшу твердість бориду FeB, за працездатністю в багатьох випадках слід віддавати перевагу бориду Fe₂B. Застосовуючи певні режими борування і термічної обробки, а також легування, можна регулювати утворення одноборидного покриття, що містить Fe₂B (рис.2) без шару FeB.

Завдяки високій твердості боридні покриття в безударних умовах експлуатації характеризуються високою зносостійкістю, яка в практичних умовах перевищує показники традиційно зміцнених сталей (гартування, цементация тощо) у 2... 10 разів, а при роботі в контакт з неметалевими матеріалами (гума, дерево, пластмаса, кераміка) – до 15 разів.

Боридні покриття корозійностійкі щодо повітря, води, СО-середовищ, сірчаної кислоти, азотнокислотних середовищ тощо. Вони також жароміцні – до температур 800...900 °С. Покриття мають коефіцієнт тертя нижчий на 30 % порівняно з поверхнею деталей, обробленими традиційно застосовуваними методами термообробки (при швидкостях ковзання вищих за 2 м/с). Такі властивості в умовах сухого тертя ковзання забезпечують у 4...6 раз більшу зносостійкість за цементовані сталі.

Завдяки голкоподібній структурі (рис.2) боридні покриття мають гарне зчеплення з основним металом, а при застосуванні термічної обробки, що зміцнює металеву основу, забезпечується відсутність продавлювання покриття навіть за високих питомих навантажень.

Застосування. Крихкість обмежує застосування борування як у машинобудуванні, так і в інструментальному виробництві. Але вплив борування на абразивну зносостійкість деталей, що працюють в умовах безударного абразивного зношування, важко переоцінити. Отак, обов'язковим став процес борування сполучених пальців ланок гусениць і втулок гусеничних машин на багатьох заводах.

Боруванню піддають конструкційні середневуглецеві нелеговані і леговані сталі 30, 35, 40, 45, 50, 30ХГС, 40ХС, 50Г, а також інструментальні сталі (5ХНМ та інші). Наразі борування набуло великий попит промислового використання [6, 7]. Воно значно підвищує зносостійкість втулок грязевих насосів, деталей пресформ і машин для лиття кольорових металів, деталей гусеничних машин, різних транспортерів і ланцюгів, що працюють у абразивних середовищах.

В інструментальному виробництві раціонально використовувати борування для зміцнення витяжних штампів, металевих матриць, штампів, інструментальних штампів, вимірювального інструменту, деревообробного інструменту, ріжучого інструменту по неметалевим матеріалам, циркулярних ножів, пластин пресформ для пресування цегли тощо. Борування підвищує експлуатаційну стійкість формоутворюючого інструменту для гарячої обробки тиском. Стійкість борованих сталевих пуансонів, протяжок, прошивних матриць на 25...30% вища за азотованих. Перелічені приклади не охоплюють номенклатуру всіх деталей, що були випробувані і можуть дати значний ефект при застосуванні борування. Цей процес також може бути використаним при виготовленні таких деталей, як вали, вісі, пальці, ролики, втулки, зірочки і колеса зубчасті, цапфи ковзання, ланки ланцюгів транспортуючих пристроїв, деталей сигаретних машин тощо. В інших галузях борування може бути перспективним при зміцненні сопел і дуг піскометів, запірної арматури на теплових електростанціях, парових сопел і сопел котлів і т.п.

В зв'язку зі збільшенням дефіциту високолегованих сталей роль борування з ко-

жним роком буде зростати. Це обумовлено можливістю заміни високолегованих сталей менш дефіцитними низько- і середньо-легованими в поєднанні з ХТО, а також із збільшенням строку їх експлуатації.

Висновки

Наведені результати лабораторних досліджень абразивної зносостійкості різних конструкційних матеріалів на машині тертя Х4-Б за ГОСТ 17361-71.

Порівняні властивості і, в першу чергу, характеристики зносостійкості матеріалів і боридних покриттів на сталених деталях в умовах виробництва. Доведена сутність процесу борування і надані сучасні способи його виконання. Визначена перспективність впровадження цього процесу у машинобудуванні. Дана характеристика властивостей борованих деталей, оцінені можливості застосування їх в якості деталей машин і обладнання.

Література

1. *Лыкденев Б. Д.*, Автореферат докт. диссертации. Барнаул, 2008. 52 с.
2. *Гурьев А.м.*, Лыкденев Б.Д., Иванов С.Г. и др. Ползуновский альманах. Барнаул, № 3, 2008, с. 10 - 16.
3. *Гурьев А.М.*, Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Физические основы термоциклического борирования. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. 216с.
4. *Добровольский А.Г.*, Кошеленко П.И. Абразивная износостойкость материалов. – Киев: Техника, 1989, 128 с.
5. *Гурьев, А.М.* Физические основы химико-термоциклической обработки сталей [Текст] /Б.Д. Лыкденев, Н.А. Попова, Э.В. Козлов // Монография. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. – 250 с.
6. *Ворошнин Л.Г.*, Ляхович Л.С. Борирование стали. – Metallurgia, 1978 – 248 с.
7. *Косенко В.А.*, Добровольский А.Г. Братица Л.С., Юрченко И.Г., Повышение износостойкости сигаретных машин борированием./Табак, №4, 1987. 16-20 с.

Рецензент: В.Б. Яковенко, д.т.н., проф.
(КНУБА, Київ)

Отримано: 10.09.2012 р.