

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Лігус Катерина Олександрівна

УДК 621.785.53

**РОЗРОБКА ТА ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ
ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ
ВИРОБІВ У ПОРОШКОВИХ СУМІШАХ**

Спеціальність – 05.02.01 – Матеріалознавство

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2009

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі технології машинобудування і ремонту машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Дяченко Світлана Степанівна,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри технології машинобудування і ремонту машин, заслужений діяч науки і техніки України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Скобло Тамара Семенівна,
Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, професор кафедри ремонту тракторів, автомобілів та сільськогосподарських машин, лауреат державної премії України, член-кореспондент інженерної академії наук

кандидат технічних наук
Аксьонова Світлана Ізраїлівна,
Державне підприємство «Завод ім. Малишева»,
начальник рентгенівської лабораторії Центральної лабораторії

Захист відбудеться “ 10 ” грудня 2009 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.01 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: Україна, 61002, м. Харків, вул. Петровського, 25.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: Україна, 61002, м. Харків, вул. Петровського, 25.

Автореферат розісланий “ 06 ” листопада 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, професор

І.В. Кіяшко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Існуючі способи хіміко-термічної обробки (ХТО) – азотування і борування, як правило, забезпечують працездатність деталей в умовах тертя і зношування, але вони є досить тривалими і потребують складного та дорогого обладнання. Тому актуальним є пошук таких методів, які значно скорочують процес без погіршення властивостей виробу і не вимагають спеціального устаткування. Для розв'язання цієї проблеми використовують порошкові суміші, пасти, обмазки. Але й на сьогодні тривалість ХТО залишається найважливішим фактором, який зумовлює не тільки її економічність, але також властивості виробів, оскільки така обробка може супроводжуватися зростанням зерна і знеміцненням серцевини. Дана робота направлена на вирішення двох актуальних завдань: по-перше, підібрати такі насичувальні склади, які значно прискорюють процеси ХТО, у порівнянні з тими, що використовують зараз; по-друге, розробити технології, які можна реалізувати без спеціального обладнання. Вирішення цих питань дозволить забезпечити необхідну якість продукції і значно знизити енерговитрати, що дуже важливо для сучасної України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась згідно програми пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості і сільському господарстві», визначеному у Законі України від 11.07.2001 р. № 2623-III, на кафедрі матеріалознавства Національного технічного університету «ХПІ» і кафедрі технології машинобудування і ремонту машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, відповідно до тематики кафедр. Тема дисертаційної роботи була складовою частиною науково-дослідної роботи за госпдоговором № 20454 (137/140), 2005 р. «Дослідження причин руйнування зуба пружного БПУ 00.01 (Сцепка ЗПГ-24 і ЗПГ-15)», (м. Лозова Харківської обл., ВАТ «Лозовський ковально-механічний завод»).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є прискорення і здешевлення процесів ХТО (азотування і борування) за рахунок розробки нових насичувальних сумішей і технологій, які можна здійснити без складного устаткування.

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити такі основні завдання:

- запропонувати нові недорогі насичувальні суміші для азотування та борування, які дозволили б прискорити ці процеси, і вибрати їх оптимальний склад;
- дослідити вплив технологічних параметрів (температури, часу, способу нагрівання) на структуроутворення в поверхневих шарах сталей різних класів і призначення при насиченні азотом і бором з використанням нових сумішей;
- розробити новий низькотемпературний процес азотування титанових сплавів, який забезпечував би вищу міцність серцевини виробів при скороченій тривалості насичення;

– дослідити корозійну стійкість, мікротвердість та зносостійкість виробів після ХТО за новою технологією, оцінити економічну доцільність запропонованих технологій і обґрунтувати рекомендації для практичного використання результатів роботи.

Об'єкт дослідження – процеси насичення сталей і сплавів титану азотом і бором.

Предмет дослідження – розробка ефективних технологій з використанням нових порошкових сумішей для прискорення і спрощення ХТО при збереженні високих експлуатаційних властивостей.

Методи дослідження. В роботі використані оптична та електронна мікроскопія; рентгеноструктурний аналіз; вимірювання мікротвердості; випробування на корозійну стійкість, зносостійкість, мікротвердість. Результати експериментів оброблювалися статистичними методами.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Встановлено, що запропоновані нові насичувальні нанодисперсні суміші набагато прискорюють азотування і борування. Визначений в роботі ефективний коефіцієнт дифузії азоту у сталях в десять разів більший розрахункового. Це пояснюється значно вищою кількістю атомарного азоту при використанні меламіну замість аміаку (відповідно 70 і 40 %) і практично одночасним розпадом нанодисперсних (20–30 нм) частинок при досягненні температури азотування. Прискорення борування пов'язано з високим вмістом аморфного бору (~ 85 %) і великою поверхнею нанодисперсних частинок суміші, що інтенсифікує протікання хімічних реакцій та дифузійних процесів

2. На підставі аналізу закономірностей структуроутворення дифузійних шарів встановлено, що при азотуванні у меламіні, на відзнаку від звичайного процесу в аміаку, швидкість росту азотованого шару збільшується з підвищенням кількості вуглецю і легувальних елементів у сталі. Це явище пояснено з точки зору конкуренції двох процесів – прискорення дифузії за рахунок більшої кількості дефектів кристалічної будови в легованих сталях та гальмування переміщення азоту через його взаємодію з вуглецем та легувальними елементами, а також внаслідок утворення суцільних шарів ϵ - і γ' -фаз з низьким коефіцієнтом дифузії. При тривалості процесу ~ 5 год вирішальним чинником є прискорення дифузії.

3. Використання високоактивного насичувального нанодисперсного середовища дозволило знизити температуру азотування титанового сплаву ВТЗ-1 з 950 °С до 550–600 °С. Встановлена залежність швидкості азотування титанових сплавів від стану поверхні виробу. При наявності на поверхні оксидів процес азотування прискорюється на ~ 20 %. Це пояснюється тим, що на поверхні без оксидів відразу формується шар TiN, який різко гальмує дифузію. До того ж невелика товщина TiN (3–8 мкм) не забезпечує необхідної твердості. Якщо ж поверхня перед азотуванням має оксиди, то це сприяє значному підвищенню твердості (на 22 %) завдяки високій твердості самих оксидів і більшій товщині дифузійних шарів.

Практичне значення отриманих результатів. На базі отриманих

результатів теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено:

- нову суміш для азотування сталей та титанових сплавів, яка дозволяє прискорити процес азотування в порівнянні з традиційним газовим у 10 разів та знизити температуру азотування титанових сплавів майже в 2 рази (на запропонований склад отримано патент України № 42478 “Склад для азотування сталевих та титанових виробів”);

- нову суміш для борування, яка забезпечила прискорення процесу насичення у 2–3 рази в порівнянні з існуючими методами борування при пічному нагріванні (на запропонований склад отримано патент України № 33654 “Склад для борування сталевих виробів”);

- низькотемпературне азотування титанового сплаву у поєднанні зі старінням, що підвищує міцність серцевини виробів.

Отримані результати прийняті для впровадження у виробництво ТОВ «Докон» (м. Кременчук, Полтавської обл.) для підвищення стійкості прес-форм лиття під тиском та у ВАТ «Харківський тракторний завод ім. Орджо-нікідзе» (м. Харків) для підвищення стійкості втулок. Запропоновані методики використовуються у навчальному процесі НТУ «ХПІ» і ХНАДУ.

Особистий внесок здобувача. Усі результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У спільних роботах здобувачу належать:

- вибір оптимального складу суміші для азотування [8];
- вибір оптимального складу суміші для борування [7];
- методика дослідження впливу параметрів процесів азотування і борування на формування дифузійних шарів на вуглецевих, легованих сталях та титанових сплавах [1, 3, 6, 9–14];
- методика дослідження впливу борування в умовах нагрівання струмами високої частоти на формування дифузійних шарів на сталях [2, 4];
- аналіз корозійної стійкості сталі 40X після ХТО з використанням порошкових сумішей [5].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи оприлюднені й отримали позитивну оцінку на: Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток наукових досліджень 2005» (м. Полтава, Україна, 2005 р.); VI міжнародній міжвузівській науково-технічній конференції «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (м. Гомель, Беларусь, 2006 р.); XIV–XVII міжнародних науково-практичних конференціях MicroCAD “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье” (Харків, Україна, 2006, 2007, 2008, 2009 р.р.); I Університетській науково-практичній студентській конференції магістрів НТУ «ХПІ» (м. Харків, Україна, 2007 р.); міжнародній конференції для студентів й молодих науковців ВТНЗів на іноземних мовах «Інтеграційні процеси й інноваційні технології у світовому і національному вимірі. Досягнення й перспективи технічних наук» (м. Харків, Україна, 2008 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Твердость – универсальный способ оценки качества конструкционных материалов» (м. Харків, Україна, 2008 р.);

VII міжнародній науково-технічній конференції “Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин” (м. Новополоцьк, Беларусь, 2009 р.).

Публікації. Основні результати роботи викладено у 9 статтях, опублікованих у виданнях, що входять до переліку ВАК України, та у 2 патентах.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, 11 висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 211 сторінок, у тому числі 137 сторінок основного тексту, 119 рисунків і 21 таблиця. Список використаних джерел нараховує 146 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і завдання дослідження, викладені положення, що визначають наукову новизну і практичне значення роботи, обґрунтовані рекомендації використання отриманих результатів.

У першому розділі приведений аналіз літературних джерел досліджень вітчизняних і зарубіжних авторів з питань утворення дифузійних шарів після азотування сталей та титанових сплавів і борування сталей. Розглянуті традиційні та сучасні методи насичення поверхні металів азотом і бором. Недоліком традиційного газового азотування є значна тривалість процесу (0,01мм/год) та необхідність використання дорогого устаткування. Недоліком борування, крім тривалості процесу, є крихкість борованих шарів. Аналіз літератури показав, що незважаючи на численність запропонованих методів і способів азотування і борування, проблема прискорення процесів ХТО та отримання дифузійних шарів без застосування складного і дорогого обладнання сьогодні залишається невирішеною та актуальною. Вона потребує розробок нових ефективних недорогих технологій азотування та борування сталей і сплавів, які дозволили б значно скоротити витрати енергії. Виходячи з цього, у роботі обґрунтована мета і сформульовані задачі дослідження.

У другому розділі розглянуті матеріали та методики проведення досліджень. Були обрані сталі та сплави, які широко використовуються в машинобудуванні, хімічній, металургійній промисловості. Матеріалами для дослідження обрані сталі різних класів та призначень, що дозволило детально вивчити будову дифузійних шарів та вплив вуглецю і легувальних елементів на формування поверхневого шару при азотуванні та боруванні за розробленими технологіями. Азотуванню піддавали також титановий сплав ВТ3-1. Перед азотуванням зразки сталей 40Х, 18Х2Н4МА та ХВГ піддавали гартуванню з наступним високим відпуском (покращенню). Сталь 08кп була обрана як модельна, її азотували після нормалізації. Зразки мали вигляд циліндрів діаметром 12 мм та висотою 20 мм.

Азотування проводили за такими режимами: 1. Зразки розміщували у контейнері з внутрішнім діаметром 30 мм та довжиною 185 мм, засипали обраною сумішшю (97–95 % меламіну, 3–5 % фтористого натрію), після чого

контейнер герметично закривали та поміщали у піч. Кількість суміші у контейнері варіювали. 2. На поверхню зразків наносили обмазку, яка складалася з меламінової суміші (3 вагові частки) і бури (2 вагові частки). Обмазку наносили на зразки у 2–3 шари (до 3–4 мм). 3. Багаторазове (циклічне) азотування в контейнері. Воно полягало у нагріванні контейнера зі зразками до заданої температури з видержкою 2 год, охолодженні, доданні у контейнер нової порції меламіну. Кількість циклів від 1 до 5.

Для вивчення впливу меламіну на швидкість формування та властивості дифузійних шарів і вибору оптимальних технологічних параметрів азотування проводили при температурі 450–650 °С через 50 °С протягом 1–7 год. При азотуванні в контейнері кількість суміші варіювали від 0,048–0,052 г/см² до 0,23–0,24 г/см² на поверхню, яка потребує зміцнення.

Титановий сплав перед азотуванням гартували від температури 900 °С. Азотування проводили при температурах 450–650 °С протягом 1–7 год. При цьому вивчався вплив стану поверхні (з оксидами і без них) на будову азотованого шару та швидкість процесу.

Борування здійснювали у пасті. На підготовлені зразки наносили шар пасти, яка містить 80–86 % нанодисперсного полібориду магнію (аморфного бору), 7–10 % фтористого літію і 7–10 % фтористого натрію, товщиною до 3 мм. Процес борування вивчали при пічному нагріванні та нагріванні струмами високої частоти (СВЧ) на ламповому генераторі ВЧГ 60-3/0,44. При пічному боруванні температура дорівнювала 800–1000 °С, видержка варіювалася від 15 до 120 хв. При нагріванні СВЧ температура становила 1100–1150 °С з сумарною видержкою 1–7 хв. Після борування проводили гартування від температури ХТО з наступним низьким відпуском для часткового зняття внутрішніх напружень.

Також був опробований процес бороазотування, який полягав в послідовному азотуванні та боруванні. Азотування здійснювали у меламінової суміші при температурі 550 °С протягом 5 год, після цього проводили борування при температурі 850 °С протягом 15–120 хв.

Мікроструктуру та товщину дифузійних шарів досліджували методом оптичної мікроскопії на мікроскопі МІМ-8 за стандартною методикою при різних збільшеннях. За товщину азотованого шару приймали відстань від поверхні до шару, де твердість перевищувала твердість серцевини на 50 МПа, борованого шару – до твердості серцевини. Розмір і форму частинок сумішей вивчали на електронному мікроскопі. Твердість зразків визначали на приборах типу ТК (Роквелл) згідно з ГОСТ 9013–95, мікротвердість – на приладі ПМТ-3 при навантаженні 50, 100 г і витримці 7–15 с за стандартною методикою (ГОСТ 9450–76). Показник мікрокрихкості дифузійних шарів оцінювали при різних навантаженнях від 30 до 200 г відповідно до шкали ВІАМ за допомогою приладу ПМТ-3. Корозійну стійкість вивчали за методом відкритого сосуда у 10 %-му розчині сірчаної кислоти. Для фазового аналізу застосовували рентгенівський апарат ДРОН-3, а також фотометод з використанням рентгенівської камери РКД. Зйомку сталей проводили у хромовому, титанового сплаву – у мідному випромінюванні. Опір абразивному зношуванню

досліджували на машині AP 40.613.20 R 43/82. Знос визначали шляхом контролю втрати ваги досліджуваного зразка.

У третьому розділі викладені результати експериментальних досліджень для одержання необхідної інформації щодо вибору оптимальних технологічних параметрів азотування сталей (кількість суміші з меламіном, температура, тривалість).

Вибір кількості суміші. Залежність товщини шару від кількості суміші для двох сталей наведена на рис. 1. Видно, що з її збільшенням товщина шару спочатку інтенсивно зростає, а починаючи з $0,12\text{--}0,15\text{ г/см}^2$ вже не залежить від кількості суміші. Аналогічні дані отримані і для інших сталей. Кількість суміші не впливає на поверхневу твердість азотованого шару, яка при даній температурі азотування залежить тільки від хімічного складу сталі і підвищується зі збільшенням вмісту вуглецю та легувальних елементів. В той же час кількість суміші сильно впливає на розподіл твердості по глибині: при низькій кількості спостерігається різке зниження мікротвердості від поверхні до серцевини сталі, потім воно уповільнюється, і в межах $0,12\text{--}0,24\text{ г/см}^2$ значення мікротвердості по глибині практично співпадають (рис. 2). Отже можна обмежитися кількістю суміші $\sim 0,12\text{ г/см}^2$. До того ж, як свідчать металографічні дослідження, при вмісті суміші більше $0,12\text{ г/см}^2$ в зоні внутрішнього азотування відбувається утворення нітридної сітки по границях зерен, що викликає окрихчення і може призвести до руйнування усього азотованого шару. Таким чином, як з точки зору товщини шару, його твердості і розподілу по глибині, так і якості дифузійного шару оптимальна кількість суміші дорівнює $0,12\text{--}0,15\text{ г/см}^2$. Далі всі експерименти проводилися при указаній кількості суміші.

Рис. 1. Залежність товщини азотованого шару (x) сталей 08кп та 18Х2Н4МА від кількості суміші; температура $550\text{ }^\circ\text{C}$, тривалість 5 год

Рис. 2. Розподіл мікротвердості сталі 18Х2Н4МА по товщині залежно від кількості суміші; температура $550\text{ }^\circ\text{C}$ тривалість 5 год

Вибір температури азотування. Традиційно температура газового азотування сталевих виробів на підприємствах складає $520\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$. Щоб обрати оптимальну температуру для азотування у суміші з меламіном, задавалися температурним інтервалом від 450 до $700\text{ }^\circ\text{C}$ через $50\text{ }^\circ\text{C}$. Як і слід було чекати, з підвищенням температури товщина азотованого шару збільшується, але при

цьому значно знижується поверхнева твердість. Звертає на себе увагу однаковий характер кривих для всіх досліджених сталей (рис. 3). Враховуючи, що показниками оптимізації є співвідношення поверхневої твердості та товщини азотованого шару, оптимальною для всіх сталей є температуру азотування 550 °С. Підвищення поверхневої твердості з ростом вмісту вуглецю і легувальних елементів пояснюється більшою часткою карбідів та високодисперсних нітридів легувальних елементів у таких сталях.

Вибір тривалості азотування. Для вивчення впливу тривалості азотування на товщину та твердість дифузійних шарів час процесу змінювався від 1 до 7 год при оптимальних температурі та кількості суміші. Як видно з рис. 4, залежність товщини азотування від часу для всіх сталей має вигляд кривих з насиченням: до 5 годин вона підвищується інтенсивно (від ~ 10 до 4 разів залежно від сталі). Зі збільшенням часу від 5 до 7 годин товщина зростає усього в 1,1–1,3 рази, але при цьому починає знижуватися твердість поверхні. Співставляючи товщину азотованого шару та поверхневу твердість, вибираємо оптимальний час азотування 5 годин. За цей час товщина азотованого шару досягає 0,3 мм у сталі 08кп та 0,5–0,6 мм у легованих сталях, тобто швидкість насичення у запронованій суміші для них дорівнює ~ 0,1 мм/год, тоді як при звичайному азотуванні в аміаку – 0,01 мм/год.

Рис. 3. Мікротвердість поверхні (—) та загальна товщина шару (----) залежно від температури азотування протягом 5 год

Рис. 4. Загальна товщина дифузійного шару залежно від часу азотування при температурі 550 °С

Мікроструктура та фазовий склад азотованого шару. Встановлено, що послідовність, мікроструктура та фазовий склад дифузійних шарів, утворених при азотуванні в суміші меламіну, не відрізняються від сформованих в умовах традиційного газового азотування: тонкий поверхневий шар ε - та $\varepsilon + \gamma'$ - фаз і розвинута зона внутрішнього азотування ($\alpha + \gamma'$). В той же час існують суттєві відмінності у процесі дифузії. По-перше, вона значно прискорюється, причому збільшення товщини азотованого шару відбувається, головним чином, за рахунок зони внутрішнього азотування. По-друге, на відзнаку від звичайного азотування, при якому товщина азотованого шару зменшується зі збільшенням вмісту

вуглецю і легувальних елементів, в нашому випадку вона зростає (рис. 4).

Отримані результати дозволили оцінити ефективний коефіцієнт дифузії азоту $D_{\text{еф}}$ ($D_{\text{еф}}$ – середнє між коефіцієнтами дифузії азоту у α -, γ' - та ε -фазах, рис.

5). Розрахунки проводили за рівнянням $x = 2\sqrt{D\tau}$, де x – глибина шару, τ – час (в нашому випадку 5 год).

На цьому рисунку штриховою лінією показаний розрахунковий ефективний коефіцієнт дифузії $D_{\text{еф.р.}}$. Як і слід було чекати, $D_{\text{еф.р.}}$ практично співпадає з коефіцієнтом дифузії азоту у α -фазі. Дійсний $D_{\text{еф}}$ для всіх сталей значно вищий розрахункового, причому він під-вищується при збільшенні в сталі кількості вуглецю та легувальних елементів. Прискорення дифузії азоту при використанні запропонованого середовища можна пояснити двома явищами:

Рис. 5. Залежність ефективного коефіцієнта дифузії азоту для різних сталей від температури азотування; час азотування 5 год

– по-перше, при використанні суміші з меламіном значно (на 75 %) підвищується кількість активних радикалів азоту, у порівнянні з азотуванням в аміаку, тобто збільшується потік, від якого, відповідно до другого закону Фіка, залежить коефіцієнт дифузії;

– по-друге, нанодисперсний порошок, маючи дуже велику активну поверхню, практично відразу при досягненні заданої температури розкладається з виділенням атомарного азоту.

Прискорення дифузії при збільшенні вмісту вуглецю і легувальних елементів, на наш погляд, можна пояснити так. Коефіцієнт дифузії залежить не тільки від потоку, але й від стану кристалічної ґратки металу: чим більші її спотворення, тим інтенсивніша дифузія. Як відомо, з підвищенням вуглецю і легувальних елементів спотворення збільшуються, і слід чекати прискорення дифузії у таких сталях. Але одночасно з дифузією відбувається і інший процес – взаємодія атомарного азоту з вуглецем і легувальними елементами, що гальмує дифузію. За звичайних умов азотування, яке продовжується десятки годин, другий фактор є превалюючим, і швидкість росту дифузійного шару з підвищенням кількості вуглецю і легувальних елементів зменшується. У нашому випадку, коли час азотування скорочується до 5 годин, активні радикали азоту не встигають утворити карбіди і нітриди легувальних елементів, і фактор прискорення дифузії за рахунок більшого спотворення кристалічної ґратки є головним. Для всіх проаналізованих сталей отримані рівняння, користуючись якими можна прогнозувати товщину азотованого шару за даних умов процесу.

Циклічне азотування. З метою досягнення ще вищої швидкості процесу було апробоване циклічне азотування. Аналіз отриманих результатів свідчить,

що азотування у 2 цикли дає практично ту ж глибину, що й після одноциклової видержки протягом 4 год, у 3 цикли – протягом 6 год. Те ж саме можна сказати і відносно поверхневої мікротвердості. Однак циклічне азотування дозволяє отримувати більшу глибину дифузійного шару без зниження твердості поверхні.

Азотування у обмазках. Ще простішою обробкою є азотування в обмазці з меламінової суміші, яке не потребує герметизації. На прикладі сталі ХВГ виконано порівняльне дослідження обох варіантів азотування. Структури поверхневих шарів зразків, азотованих за обома варіантами, ідентичні і відрізняються лише товщиною відповідних шарів. Але при такому варіанті азотування швидкість росту дифузійного шару зменшується майже вдвічі і суттєво знижується поверхнева твердість, у порівнянні з азотуванням у контейнері – з 1170 МПа до 790 МПа. Таким чином, такий варіант азотування не рекомендується.

Четвертий розділ присвячений розробці прискореного азотування титанових сплавів. Враховуючи високу насичувальну здатність меламінової суміші, були проведені експерименти по насиченню титанового сплаву при низьких температурах 450–650 °С.

Встановлено, що при використанні запропонованої суміші азотування активно відбувається вже при температурі 550–600 °С. На поверхні утворюється шар нітридів (TiN, Ti₂N) та зона внутрішнього азотування. Середня швидкість росту товщини шару сягає 30–35 мкм/год, тоді як при традиційному азотуванні в цьому інтервалі температур процес практично не іде (рис. 6).

Подальше підвищення температури прискорює азотування, але під рівномірним шаром нітридів починається ріст голок нітридів у кристалографічних напрямках пластинчастої структури, яку сплав отримав після гартування, та по границях зерен. Це може викликати окрихчення сплаву, тому оптимальною температурою азотування слід вважати 550–600 °С.

При тривалості процесу 5 год товщина шару досягає 0,18 мм, а поверхнева твердість збільшується до 11,5 ГПа, що близько до значень, які досягаються при традиційному високотемпературному азотуванні за час майже 100 год. Збільшення часу азотування понад 5 год не має сенсу, поперше, внаслідок незначного підвищення твердості поверхні та товщини шару, подруге, у зв'язку зі зростанням розмірів голок нітридів, що може негативно позначитися на властивостях.

Рис. 6. Залежність загальної товщини азотованого шару від температури азотування для традиційного газового азотування (----) та розробленого процесу (—)

Азотування в інтервалі температур 550–600 °С має переваги ще й у тому, що його можна сумістити зі старінням, яке здійснюють після гартування саме при цих температурах. Це зміцнює серцевину виробів (мікротвердість підвищується з 5 до 6 ГПа).

Окремо слід зупинитися на ролі оксидів, які завжди формуються на поверхні виробів після гартування. Дослідження показали, що в присутності оксидів на поверхні утворюється шар зі змішаною структурою оксидів та нітридів, який не перешкоджає дифузії азоту вглиб виробу. Якщо ж оксиди відсутні, на поверхні відразу утворюється щільний суцільний шар нітридів, який гальмує дифузію азоту. Як наслідок, принципово змінюється розподіл твердості по товщині шару (рис. 7). Отже, після гартування не потрібна операція видалення оксидного шару, що спрощує процес і забезпечує кращі властивості.

У п'ятому розділі розглянуті технологічні процеси прискореного борування сталей у обмазці з нової насичувальної суміші на основі нанорозмірного полібориду магнію з активаторами. Встановлений оптимальний склад обмазки, який забезпечує максимальну товщину боридів: 80 % полібориду магнію, 10 % фтористого натрію (NaF) і 10 % фтористого літію (LiF). При сумарному вмісті активаторів менше 20 % товщина боридного шару знижується, а при кількості > 20 % активність насичення не підвищується, тому немає сенсу збільшувати їх кількість.

Рис. 7. Розподіл мікротвердості по товщині азотованого шару титанового сплаву ВТЗ-1 після азотування при 550 °С протягом 5 год

Запропонована обмазка забезпечує захист від кисню, що дозволяє проводити процес борування в звичайній окиснювальній атмосфері без спеціального устаткування і без герметизації або застосування захисних атмосфер.

Борування при пічному нагріванні. Рентеноструктурний аналіз показав, що при всіх температурах і різній тривалості процесу дифузійний шар складається з двох боридів – FeB з твердістю 21–22 ГПа та Fe₂B з твердістю 18–16 ГПа, тому поверхнева твердість не залежить від температури і часу борування. З підвищенням температури дифузійні процеси прискорюються і товщина шару боридів збільшується, головним чином, за рахунок росту перехідної зони. Але при цьому укрупнюється зерно, що погіршує властивості серцевини деталі. Нижче 800 °С борування проводити немає сенсу через дуже повільну дифузію.

Температура обумовлює розподіл твердості по товщині борованого шару: чим вища температура, тим повільніше змінюється твердість у перехідній зоні (рис. 8), що попереджує сколювання твердого і досить крихкого шару боридів.

Проаналізувавши вплив температури борування на товщину дифузійного шару, твердість і її розподіл, а також враховуючи необхідність спрощення технологічного процесу, ми дійшли висновку, що для конструкційних та інструментальних сталей (крім швидкорізальних) раціонально суміщати нагрів

під гартування з процесом борування, як і при традиційному боруванні.

В результаті досягається оптимальне співвідношення між товщиною шару боридів, його твердістю і її розподілом та властивостями серцевини деталі. Для швидкорізальних сталей борування слід проводити після гартування. Температура борування дорівнює 1000 °С, що забезпечує твердість поверхні 23 ГПа.

Для вибору оптимальної тривалості борування були проведені експерименти з видержкою при температурах борування від 15 до 120 хв. Залежність товщини боридів від тривалості борування для різних сталей наведена на рис. 9. З ходу кривих видно, що швидкість приросту товщини шару боридів суттєво залежить від складу сталі: вона зменшується зі збільшенням вмісту вуглецю і легувальних елементів.

Рис. 8. Розподіл мікро-твердості сталі 30ХГСА по товщині борованого шару залежно від температури (час борування 1 год)

Рис. 9. Залежність товщини боридів від тривалості борування для різних сталей: 1 – сталь 45; 2 – 40Х; 3 – 30ХГСА; 4 – У8; 5 – ШХ15; 6 – У12; 7 – 18Х2Н4МА; 8 – 4Х5МФС; 9 – Р18; 10 – Р6М5; 11 – 30Х13

При цьому змінюється сам характер кривих: для конструкційних та вуглецевих інструментальних сталей зі збільшенням часу спостерігається уповільнення росту боридного шару (рис. 9, кр. 1–6), для спеціальних та швидкорізальних сталей – його прискорення з різною інтенсивністю (рис. 9, кр. 7–11). Це пояснюється, перш за все, тим, що і вуглець, і легувальні елементи гальмують дифузію бору. Крім того, при збільшенні їх кількості, за даними рентгеноструктурного аналізу, починають утворюватися карбіди бору (наприклад, B_4C) та бориди легувальних елементів (Cr_2B , MoB_2 та ін.), які частину бору забирають на себе, чим і уповільнюють ріст шарів боридів заліза.

Наведені на рис. 9 криві дозволяють обирати час борування залежно від умов експлуатації деталей, які обумовлюють необхідну глибину борування.

Дослідження показали, що використання запропонованого для борування складу обмазки суттєво (приблизно у три рази) підвищує коефіцієнт дифузії бору для всіх сталей (рис. 10). Як і при азотуванні, це пов'язано з двома причинами – нанодисперсним характером порошкової суміші, що прискорює її взаємодію з поверхнею виробу, і значно вищою кількістю в ній бору.

Борування з використанням нагрівання СВЧ. Дифузійні шари на сталях отримували не лише при пічному нагріванні, а і за допомогою індукційного нагрівання струмами високої частоти. Індукційне нагрівання проводили цик-лічно: зразок нагрівали до температури 1100–1150 °С залежно від марки сталі, потім охолоджували до ~750 °С, щоб не допустити перегріву та оплавлення поверхні зразка, і знову нагрівали до температури 1100–1150 °С. Кількість циклів змінювали від 5 до 30. Тривалість одного циклу 10 с (1 с – нагрів до 1100–1150 °С, 9 с – охолодження від 1100–1150

Рис. 10. Залежність коефі-цієнтів дифузії бору при різних температурах борування

до 750 °С). Після останнього циклу зразок охолоджували у воді або оливі, залежно від марки сталі.

Борування при індукційному нагріванні дозволяє отримати на поверхні структури евтектичного типу, які складаються з боридів заліза, бороцементиту і евтектики. Встановлено, що загальна тривалість борування при індукційному нагріванні не повинна перевищувати 5 хв, щоб запобігти оплавлення деталей. При часі процесу менше 2 хв товщина дифузійного шару недостатня.

Слід звернути увагу на дві особливості боруваних шарів евтектичного типу:

- на твердість поверхні значно впливає час борування, тоді як при пічному процесі твердість практично не залежить від його тривалості;
- вони мають нижчу твердість, ніж бориди FeB та Fe₂B, що утворюються при пічному боруванні (рис. 11).

Але індукційне борування має і деякі переваги. Перш за все це запобігання росту зерна у серцевині виробу, оскільки, на відміну від пічного борування, висока температура досягається тільки на поверхні. Крім того боридні шари зі структурою евтектичного типу характеризуються значно меншою крихкістю і схильністю до сколювання, в порівнянні з одно- і двофазними боридними шарами. Це особливо важливо у випадку роботи зміцнених виробів в умовах динамічного навантаження.

Бороазотування. Для усунення крихкості боридного шару проводили послідовне насичення металу спочатку азотом (550 °С, 5 год), а потім бором за розробленими режимами. На прикладі сталі 18X2H4MA показано, що такий процес за 1–2 год забезпечує формування боридів в поверхневому шарі з твердістю і товщиною, як і після борування (рис. 12). Але присутність азотованого підшару приводить до більш плавного розподілу мікротвердості в перехідній зоні, що знижує мікрокрихкість дифузійних шарів майже в 2 рази.

а

б

Рис. 11. Розподіл мікротвердості по товщині сталі 40Х залежно від тривалості борування при пічному (а) та індукційному нагріванні (б)

Дослідження корозійної стійкості та абразивної зносостійкості. Порівняння азотованих і борованих зразків показало, що після азотування корозійна стійкість вища, ніж після борування. Корозійну стійкість азотованого шару забезпечує ε-фаза, і доки шар ε-фази існує, корозія практично не відбувається. Вона реєструється після того, як ε-фаза починає локально руйнуватися, і розвивається повільно. Борований шар кородує по границях голок боридів, спочатку в локальних місцях, які перетворюються у глибокі каверни.

Рис. 12. Розподіл мікро-твердості по товщині дифузійного шару сталі 18Х2Н4МА після боро-азотування при різній тривалості в порівнянні з борованим та азото-ваним шарами

Отже, при утворенні суцільного нітридного шару на поверхні азотування може збільшити корозійну стійкість сталі до 20 разів, тоді як борування – у 1,7–2 рази. В той же час азотування підвищує абразивну зносостійкість сталей усього у 1,5–2 рази залежно від марки сталі, тоді як борування – у 3–4 рази. Таким чином, для забезпечення зносостійкості сталей доцільніше проводити борування за розробленою технологією.

За рахунок дешевої насичувальної речовини, різкого скорочення тривалості процесу, зниження на 40 % температури (для титанових сплавів), а отже, витрати на електроенергію очікуваний економічний ефект може сягати сотен тисяч грн (залежно від програми). При азотуванні втулки за новою технологією вартість однієї деталі знижується з ~ 162 грн до ~ 24 грн, при боруванні – з ~ 103 грн до ~ 29 грн.

Застосування результатів дисертаційної роботи у ТОВ «Докон» (м. Кременчук, Полтавської обл.) для поверхневого зміцнення сталевих прес-форм лиття під тиском алюмінієвих, цинкових і магнієвих сплавів дозволило підвищити їх стійкість у 2–3 рази, у порівнянні з прес-формами, що зміцнюються за традиційними технологіями. Результати прийняті для впровадження в ВАТ «Харківський тракторний завод ім. Орджонікідзе» (м. Харків) для підвищення стійкості контактних втулок зі сталі 40Х, що зменшило витрати на проведення ХТО у 3,5–6,7 разів. Результати дисертаційної

роботи використовуються у навчальному процесі кафедри «Матеріалознавство» НТУ «ХПІ» та кафедри «Технологія машинобудування і ремонту машин» ХНАДУ для студентів різних спеціальностей.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасних методів поверхневого зміцнення деталей хіміко-термічною обробкою показав, що, незважаючи на застосування ряду нових насичувальних середовищ і обладнання, проблема прискорення процесів і в теперішній час не є вирішеною. Тому розробка технологій, які забезпечували б значне скорочення часу обробки, її спрощення, здешевлення без погіршення властивостей виробів залишається актуальним питанням.

2. Запропоновано нове насичувальне середовище на основі нанодисперсного порошку меламіну (розмір частинок 20–30 нм), яке прискорює процес азотування сталевих виробів, у порівнянні з традиційним азотуванням в аміаку, у 10 разів. При цьому процес не потребує спеціального обладнання, здійснюється в контейнері, який може бути поміщений в будь-яку піч. Оптимальними параметрами процесу є: температура 550 °С, час видержки 5 год, кількість меламіну 0,1–0,12 г/см² оброблюваної поверхні.

3. Суттєве зростання швидкості азотування пояснюється значно вищою кількістю атомарного азоту при використанні меламіну замість аміаку (відповідно 70 і 40 %) і практично одночасним розпадом нанодисперсних частинок при досягненні температури азотування. На підставі аналізу закономірностей структуроутворення дифузійних шарів встановлено, що при азотуванні у меламіні, на відзнаку від звичайного процесу в аміаку, швидкість росту азотованого шару збільшується з підвищенням кількості вуглецю і легувальних елементів у сталі. Це явище пов'язане з тим, що при короткочасному азотуванні (5 год) головну роль грає прискорення дифузії азоту за рахунок більшої кількості дефектів кристалічної будови у таких сталях, а її гальмування через взаємодію з вуглецем та легувальними елементами ще не відбувається.

4. Використання високоактивного насичувального нанодисперсного середовища дозволило знизити температуру азотування титанового сплаву ВТЗ -1 з 950 °С до 550–600 °С і забезпечити за 5 год утворення шару товщиною до 140–170 мкм з твердістю 9,4–11,5 ГПа залежно від стану поверхні. До того ж низькотемпературне азотування дає можливість поєднати його зі старінням сплаву, що додатково зміцнює серцевину (підвищує її твердість на 20 %), і не супроводжується ростом зерна. Оптимальним режимом є: температура 550–600 °С, час видержки 5 год, кількість меламіну 0,1–0,12 г/см² оброблюваної поверхні.

5. Присутність перед азотуванням на поверхні титанового виробу оксидів забезпечує вищу твердість азотованої поверхні (на 22 %) і прискорює процес обробки, у порівнянні з азотуванням виробів з очищеною від оксидів поверхнею. Таким чином, азотування може здійснюватися безпосередньо після гартування виробів без додаткової механічної обробки для видалення оксидів з

поверхні.

6. Запропоновано нове насичувальне середовище у вигляді обмазки на основі нанодисперсного аморфного бору, яке при пічному нагріванні прискорює процес у 2–3 рази у порівнянні з існуючими технологіями. Збільшення швидкості росту боридних шарів пояснюється високим вмістом аморфного бору (85 %) і великою поверхнею нанодисперсних частинок суміші, що інтенсифікує протікання хімічних реакцій та дифузійних процесів. Індукційне нагрівання виробів у розробленому середовищі дозволяє отримати необхідну товщину боридного шару (до 150 мкм) протягом 2–5 хв. При цьому серцевина залишається практично холодною, що виключає ріст зерна і пов'язане з цим окрихчення металу.

7. Для більшості сталей оптимальним є борування при температурі, яка співпадає з нагрівом під гартування, що дозволяє суміщати ці процеси. Тривалість борування обирається залежно від вимог до деталі, але не менше 30 хв для конструкційних сталей, 45 хв – для вуглецевих інструментальних та 120 хв – для високолегованих. Швидкорізьальні сталі спочатку піддають гартуванню за звичайним режимом (температура 1220–1280 °С залежно від марки), потім виконується борування при 1000 °С і кінцевою обробкою є відпуск.

8. Розроблено процес бороазотування (азотування 5 год при 550 °С, наступне борування 1–2 год при 850 °С), який забезпечує поверхневу твердість 22 ГПа, товщину зміцненого шару 0,4–0,5 мм з плавним розподілом твердості від поверхні до серцевини. Такий режим знижує бал мікрокрихкості борованих шарів майже вдвічі.

9. Експлуатаційні випробування показали, що для підвищення корозійної стійкості більш ефективним є азотування, для отримання високої абразивної зносостійкості – борування. Азотування збільшує корозійну стійкість до 20 разів, зносостійкість – не більше ніж у 1,3–2 рази, борування підвищує корозійну стійкість у 1,7–2 рази, а зносостійкість у 3–4 рази.

10. Оцінка ефективності використання розроблених процесів показала, що за рахунок дешевої насичувальної речовини, різкого скорочення тривалості процесів, зниження на 40 % температури (для титанових сплавів), а отже, витрат електроенергії, очікуваний економічний ефект може сягати сотен тисяч гривень (залежно від програми). На прикладі втулки показано, що при її азотуванні за новою технологією ціна деталі знижується з ~ 162 грн до ~ 24 грн, при боруванні – з ~ 103 грн до ~ 29 грн.

11. Запропоновані технології були апробовані на виробництві ТОВ «Докон» (м. Кременчук, Полтавської обл.) для підвищення стійкості прес-форм лиття під тиском. Встановлено, що після азотування вона збільшилася у 2–2,5 рази, після борування - у 2–3 рази, в порівнянні зі стійкістю прес-форм, що зміцнюються за традиційними технологіями. Результати прийняті для впровадження в ВАТ «Харківський тракторний завод ім. Орджонікідзе» (м. Харків) для підвищення стійкості контактних втулок зі сталі 40Х, що зменшило витрати на проведення ХТО у 3,5–6,7 разів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Каратеев А. М. Повышение эффективности азотирования за счет применения вещества с высоким содержанием азота / А. М. Каратеев, А. А. Павлюченко, Е. А. Костик * // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 4/1 (16). – С. 59–64.
2. Костик В. О. Предпосылки для интенсификации процесса борирования сталей 40X и У8 / В. О. Костик, Е. А. Костик, О. А. Олейник // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ", 2005. – № 23. – С. 131–136.
3. Костик В. О. Формирование микроструктуры борированного слоя на поверхности углеродистой конструкционной и инструментальной сталях из обмазок при печном нагреве / В. О. Костик, О. В. Сапуцкая, Е. А. Костик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 5/1 (17). – С. 63–68.
4. Костик В. О. Интенсификация процесса борирования сталей Р6М5 и Р18 из обмазок при индукционном нагреве токами высокой частоты / В. О. Костик, А. А. Павлюченко, Т. А. Оприщенко, Е. А. Костик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 4/3 (28). – С. 43–47.
5. Костик К. О. Порівняльний аналіз корозійної стійкості сталі 40X після ХТО з використанням нанодисперсних порошків / К. О. Костик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 6/1 (36). – С. 52–55.
6. Дьяченко С. С. Повышение долговечности изделий методом борирования в пастах из нанодисперсных порошков / С. С. Дьяченко, Е. А. Литус, В. О. Костик // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка : Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарства виробництва. – Харків, 2009. – Випуск 80. – С. 174–179.
7. Пат. України на корисну модель 33654, МПК С 23 С 8/00. Склад для борування сталевих виробів / Павлюченко О. О., Костик В. О., Костик К. О.; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u200800226 ; заявл. 04.01.08 ; опубл. 10.07.08, Бюл. № 13.
8. Пат. України на корисну модель 42478, МПК⁸ С 23 С 8/26–32. Склад для азотування сталевих і титанових виробів / Костик В. О., Литус К. О.; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u200900225 ; заявл. 13.01.09 ; опубл. 10.07.09, Бюл. № 13.
9. Костик В. О. Исследование микроструктуры и свойств поверхностного слоя углеродистых сталей после борирования из обмазок при печном нагреве / В. О. Костик, Е. А. Костик // Розвиток наукових досліджень 2005.– Полтава : ІнтерГрафіка, 2005. – Т. 8. – С. 42–43.
10. Костик Е. А. Повышение эксплуатационных свойств легированной стали азотированием с применением нового азотосодержащего вещества / Е. А. Костик, А. А. Павлюченко // Исследования и разработки в области

машиностроения, энергетики и управления : VI междунар. межвуз. науч.-техн. конф., 4-5 мая 2006 г. : тезисы докл. – Беларусь. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого., 2006. – С. 27–29.

11. Костик Е. А. Исследование влияния параметров химико-термической обработки на процессы насыщения сплавов азотом / Е. А. Костик, А. А. Павлюченко, А. М. Каратеев, В. О. Костик // I Університетська наук.- практ. студ. конф. магістрів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 24–26 квітня 2007 р. : Тези доп. – Харків : НТУ "ХПИ", 2007. – Т. 1. – С.129.

12. Воскобойник О. В. Перспективна нанотехнологія борування легованих сталей / О. В. Воскобойник, В. О. Костик, К. О. Костик // Матеріали XVI междунар. научно-практич. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 4–6 червня 2008 р. : Тези доп. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2008. – Ч. 1. – С. 267.

13. Літус К. О. Прогресивний спосіб підвищення експлуатаційних властивостей поверхні титанового сплаву / К. О. Літус, С. С. Дяченко, В. О. Костик // Матеріали XVI междунар. научно-практич. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 20–22 травня 2009 р. : Тези доп. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2009. – Ч. 1. – С. 351.

14. Доляк І. В. Підвищення експлуатаційних властивостей поверхні виробів методом борування нанодисперсними пастами / І. В. Доляк, В. О. Костик, С. С. Дяченко, К. О. Літус // Матеріали XVI междунар. научно-практич. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, 20–22 травня 2009 р. : Тези доп. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2009. – Ч. 1. – С. 334.

* К. О. Костик – дівоче прізвище К. О. Літус

АНОТАЦІЯ

Літус К. О. Розробка та застосування ефективної технології хіміко-термічної обробки виробів у порошкових сумішах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2009.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної проблеми прискорення, здешевлення і спрощення процесів ХТО (азотування і борування) за рахунок розробки нових насичувальних сумішей і технологій, які не потребують складного та дорогого спеціального обладнання.

Запропоновано оптимальний склад нових насичувальних порошкових нанодисперсних сумішей та технологічні параметри обробки (температура, час, спосіб нагрівання). Завдяки значно більшому (у 1,75–2 рази) вмісту насичувальних елементів в активному атомарному стані та малому розміру частинок порошків (~ 20–30 нм) азотування прискорюється у ~ 10 разів,

борування – у 2–3 рази, у порівнянні з традиційними технологіями. При боруванні з індукційним нагріванням процес скорочується до 2–5 хв і не супроводжується ростом зерна серцевини, що виключає окрихчення виробів.

Розроблено новий низькотемпературний процес азотування титанових сплавів (550–600 °С), який суміщає азотування і старіння сплаву та забезпечує вищу міцність серцевини виробів при скороченні тривалості насичення у 10 і більше разів.

Досліджено корозійну стійкість, мікрокрихкість та зносостійкість виробів після ХТО за новими технологіями, оцінено економічну доцільність запропонованих технологій і обґрунтовано рекомендації для практичного використання результатів роботи.

Ключові слова: азотування, борування, нанодисперсний порошок, поверхнева твердість, дифузійний шар, мікрокрихкість, корозійна стійкість, зносостійкість.

АННОТАЦІЯ

Литус Е. А. Разработка и применение эффективной технологии химико-термической обработки изделий в порошковых смесях. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, 2009.

Анализ современных методов поверхностного упрочнения деталей химико-термической обработкой показал, что, несмотря на применение ряда новых насыщающих сред и оборудования, проблема ускорения процессов и в настоящее время остается не решенной. Поэтому разработка новых технологий, которые обеспечили бы значительное сокращение длительности обработки, удешевление и упрощение без ухудшения свойств изделий остается актуальным вопросом.

В работе предложена новая насыщающая порошковая нанодисперсная смесь на основе меламина (размер частиц 20–30 нм), которая ускоряет процесс азотирования стальных изделий, по сравнению с традиционным азотированием в аммиаке, в 10 раз. Процесс осуществляется в контейнере, который можно поместить в любую печь. Оптимальными параметрами являются: температура 550 °С, время выдержки 5 ч, количество смеси 0,1–0,12 г/см² обрабатываемой поверхности. Ускорение азотирования достигается за счет большего количества атомарного азота при использовании предложенной смеси вместо аммиака (соответственно 70 и 40 %) и практически одновременной реакции нанодисперсных частиц с поверхностью изделий при достижении температуры азотирования.

Применение высокоактивной насыщающей нанодисперсной среды позволило снизить температуру азотирования титанового сплава ВТ3-1 с 950 °С до 550–600 °С и обеспечило образование слоя толщиной до 140–170 мкм за 5 ч, тогда как при традиционном азотировании титановых сплавов, несмотря на

высокую температуру (900 °С), необходимая толщина получается за 100–120 ч. Поверхностная твердость составляет 9,4–11,5 ГПа, в зависимости от состояния поверхности. Низкотемпературный режим азотирования совмещается со старением сплава, что дополнительно упрочняет его сердцевину (повышает ее твердость на 20 %), и не сопровождается ростом зерна. Наличие перед азотированием на поверхности титановых изделий оксидов обеспечивает повышение твердости азотированной поверхности на 22 % и ускорение процесса азотирования, по сравнению с азотированием изделий с очищенной от оксидов поверхностью. Поэтому азотирование можно проводить непосредственно после закалки изделий без дополнительной механической обработки для удаления оксидов с поверхностью.

Предложена новая насыщающая среда на основе нанодисперсного аморфного бора для борирования изделий в обмазках, которая при печном нагреве ускоряет процесс в 2–3 раза по сравнению с существующими технологиями. При индукционном нагреве в этой среде процесс насыщения еще ускоряется, что позволяет получить необходимую толщину борированного слоя (до 150 мкм) за 2–5 мин, при этом сердцевина остается холодной, что не приводит к росту зерна и охрупчиванию изделия. Увеличение скорости роста борированных слоев в предложенной смеси объясняется высоким содержанием аморфного бора (до 85 %) и практически мгновенным реагированием частиц порошка размером ~ 10 нм с поверхностью, что интенсифицирует химические и диффузионные процессы. Для большинства сталей оптимальным является борирование при температуре, которая совпадает с нагревом под закалку, что позволяет совмещать эти процессы. Длительность борирования выбирается в зависимости от требований к детали, но не меньше 30 мин для конструкционных сталей, 45 мин – для углеродистых инструментальных и 120 мин – для высоколегированных. Быстрорежущие стали борировать при температуре 1000 °С после закалки, а затем уже следует отпуск.

Разработан процесс бороазотирования (азотирование 5 ч при 550 °С, последующее борирование 1–2 ч при 850 °С), который обеспечивает поверхностную твердость до 22 ГПа, толщину упрочненного слоя до 0,4–0,5 мм с плавным распределением твердости от поверхности к сердцевине. Такой режим снижает балл микрохрупкости борированных слоев почти в 2 раза.

Установлено, что для повышения коррозионной стойкости более эффективным является азотирование, для увеличения износостойкости при абразивном изнашивании – борирование. Азотирование повышает коррозионную стойкость до 20 раз, износостойкость не более чем в 1,3–2 раза, борирование увеличивает коррозионную стойкость в 1,7–2 раза, а износостойкость в 3–4 раза.

Оценка эффективности использования разработанных процессов показала, что за счет дешевого насыщающего вещества, резкого сокращения длительности процесса, снижения на 40 % температуры (для титановых сплавов), а следовательно, затрат на электроэнергию, ожидаемый экономический эффект может достигать сотен тысяч грн (в зависимости от программы). При

азотировании втулки по новой технологии цена одной детали снижается с ~ 162 грн до ~ 24 грн, при борировании – с ~ 103 грн до ~ 29 грн.

Предложенные технологии опробованы на предприятии ООО «Докон» (г. Кременчуг Полтавской обл.) для повышения стойкости пресс-форм литья под давлением. Стойкость пресс-форм литья под давлением после ХТО увеличилась в 2–3 раза по сравнению со стойкостью деталей, упрочненных традиционными технологиями. Результаты приняты для внедрения в ОАО «Харьковский тракторный завод им. Орджоникидзе» (г. Харьков) для повышения стойкости контактных втулок из стали 40X, что уменьшило затраты на проведение ХТО в 3,5–6,7 раз.

Ключевые слова: азотирование, борирование, нанодисперсный порошок, поверхностная твердость, диффузионный слой, микрохрупкость, коррозионная стойкость, износостойкость.

ABSTRACT

Litus K.A. Development and Use of the Efficient Thermochemical Treatment Procedure of Articles in Powder Mixtures. – Manuscript.

The theses solves the actual scientific and practical problem of the acceleration and simplification of thermochemical treatment (nitriding and boriding) using new saturating mixtures and procedures not requiring special complex and costly equipment.

The work suggests new nano-sized powder mixtures allowing 10 times nitriding acceleration and 2–3 times boriding acceleration (during furnace heating) as compared to the conventional processes, ensuring the necessary surface hardness and diffusional layers thickness. This effect is achieved due to a much larger quantity of the active saturating atoms and nano-sized particles of powder mixtures. Boriding by induction heating decreases the time to 2–5 minutes and does not cause the grain size growth in the article core which eliminates its brittleness. The amount of saturation mixture, temperature, process duration and heating techniques are optimized.

The new low-temperature (550–600 °C) nitriding of titanium alloys combined with the ageing increases the article core strength and reduces the process duration more than 10 times.

The investigation gives the data on the microbrittleness, corrosion and wear resistance after suggested processes and shows the efficiency of their practical use.

Key words: nitriding, boriding, nano-sized powder, surface hardness, diffusional layer, microbrittleness, corrosion and wear resistance.