

5. Tucker, R. Thermal Spray Coatings [Текст] / Robert C. Tucker, Jr // ASM Handbook. – V. 5. – P. 497-509.
6. Swapan, K. Functional Coatings. [Текст] / K. Swapan // Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. – 364 с.
7. The successful use of Plasma Spray Cylinder Coatings in a NASCAR application to achieve friction reduction and cost benefits [Текст] : матеріали Engine Expo 2010, 23 июня 2010 г. Штутгарт : Sulzer Metco, 2010. – 29 с.
8. Киндрачук, М. В. Механизм износа гетерогенных газотермических покрытий на титановом сплаве BT-22 [Текст] / М. В. Киндрачук, Э. А. Кульгавый, А. Л. Шевченко // Междунар. науч. журнал «Проблемы трибологии». – 2011. – №1 (59). – С. 80-87.
9. Войтович, Р. Ф. Высокотемпературное окисление титана и его сплавов [Текст] / Р. Ф. Войтович, Д. И. Головкин ; Ин-т проблем материаловедения АН УССР. – К. : Наук. думка, 1984. – 255 с.
10. Войтович, Р. Ф. Высокотемпературное окисление боридов металлов IV группы: Окисление диборида титана [Текст] / Р. Ф. Войтович, Э. А. Пугач // Порошковая металлургия. – 1975. – № 2. – С. 57-62.

В роботі наведено результати дослідження зносостійких азотованих покриттів на сталях комбінованою лазерною і хіміко-термічною обробкою. Досліджено вплив вторинної структурної гетерогенності поверхні, що виникає у процесі лазерної дискретної обробки, на зносостійкість. Установлено, що попередня лазерна обробка суттєво пришвидшує дифузійні процеси азотування, підвищує мікротвердість і змінює фазовий склад порівняно з традиційними методами азотування

Ключові слова: зміцнення, дискретні покриття, азотування, лазер, напруження, структура, фаза, зносостійкість

В работе приведены результаты исследования износостойких азотированных покрытий на сталях комбинированной лазерной и химико-термической обработкой. Установлено, что предварительная лазерная обработка существенно ускоряет диффузионные процессы азотирования, повышает микротвердость и изменяет фазовый состав по сравнению с традиционными методами азотирования

Ключевые слова: упрочнение, дискретные покрытия, азотирование, свойства, лазер, напряжения, структура, фаза, износостойкость

УДК 621.891

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ДИСКРЕТНО- АЗОТОВАНИХ ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

М. В. Киндрачук

Доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри*
E-mail: nau12@ukr.net

Н. В. Іщук

Аспірант*

E-mail: isnav@ukr.net

В. М. Писаренко

Кандидат технічних наук, доцент**

E-mail: isnav@ukr.net

*Кафедра машинознавства

Національний авіаційний університет

Пр. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680

**Кафедра металознавства

Київський політехнічний інститут

Вул. Політехнічна, 35, Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Лазерні технології дали змогу в останні десятиріччя створити нові методи обробки поверхні, що різко змінюють будову і структурно-напружений стан поверхневих шарів, збільшують їх твердість, зносостійкість та деякі інші властивості. Тому для підвищення надійності й довговічності об'єктів машинобудування, їх поверхневого зміцнення, ефективним є впровадження інтенсивних технологій модифікації поверхневого шару виробів з використанням висококонцентрованих джерел нагрівання (ВКДН) - лазерного й електронного променя, плазмового струменя. Поверхнева обробка ВКДН може бути ефективно за-

стосована для створення робочого шару виробів з макрөгетерогенною регулярною структурою - дискретної будови із твердими й пластичними ділянками. Завдяки дискретності структури поверхневого шару значно підвищується його працездатність - обмежуються ріст напружень і процес тріщиноутворення, підвищується зносостійкість, виключається когезійне розтріскування й адгезійне відшарування [1].

В даний час для зміцнення конструкційних сталей широко застосовується також хіміко - термічна обробка (ХТО), зокрема, азотування. Азотовані шари мають високі антикорозійні й міцнісні властивості. Проте, недоліком процесу азотування можна вважати тривалість обробки, невисоку якість отрима-

ного поверхневого дифузійного шару, недостатню зносостійкість. Це зумовлює необхідність пошуку шляхів формування покриттів, які б дозволили значною мірою уникнути цих недоліків [2, 3].

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Проведений аналіз літературних даних з розвитку методів поверхневої модифікації показав, що найбільш перспективним напрямом є одержання поверхневого робочого шару з макронеодомною регулярною структурою дискретного типу із твердими і пластичними ділянками, що чергуються за певною закономірністю. Заміна суцільного зміцнення шару на переривчастий з мозаїчно-дискретною дозволяє перебороти крихкість – основний недолік твердих поверхневих структур, зокрема азотованих. У ряді праць досліджено властивості та обґрунтовано перспективу використання дискретних покриттів та зміцнених шарів, отриманих методами напильня, конденсації у вакуумі, електротермічної та лазерної обробки. Однак відомостей про отримання та триботехнічні властивості дискретно азотованих шарів, отриманих комбінованою ЛХТО немає [4, 5 – 7].

Таким чином, зазначені проблеми зумовлюють необхідність розроблення методів дискретної модифікації та формування триботехнічних властивостей поверхневого шару виробів зі сталі.

Одним із цих шляхів, як показали дослідження, може бути попередня лазерна обробка до хіміко-термічної обробки, яка за певних умов суттєво прискорює процеси ХТО, справляє помітний вплив на кінетику росту, фазовий і хімічний склад, структуру та властивості поверхневих дифузійних шарів.

Разом з тим, властивості дискретних модифікованих шарів досліджені недостатньо. Відсутні науково обґрунтовані принципи вибору режимів і технологій поверхневої обробки й оптимальних конструкцій робочого шару з регульованим співвідношенням частки твердих і пластичних ділянок, які б забезпечили низький рівень напружень при терті та високу зносостійкість.

Тому науковий і практичний інтерес представляє дослідження, спрямовані на одержання зносостійких дискретних азотованих шарів комбінованою лазеро-хіміко-термічною обробкою (ЛХТО).

3. Мета дослідження

Метою даної роботи є створення зносостійких дискретно азотованих покриттів, в основу розробки яких покладений принцип поєднання попередньої лазерної обробки в режимі гартування або легування та наступного азотування.

4. Методика дослідження

Дискретну лазерну обробку сталей 20, У8А, 40Х здійснювали на установці «ЛАТУС-31» за режимами: потужність випромінювання – 0,9-1,1 кВт, діаметр ділянки фокусування променя – 5 мм, швидкість пере-

сування лазерного променя – 0,5, 0,8, 1,2, 1,4, м/хв. При цьому, температура поверхневого шару для сталі перевищувала Ас₃, але була нижчою від температури плавлення.

Азотування проводили в середовищі аміаку за температури 800 – 860 К. Час витримки – 1 – 20 год.

Дослідження зносостійкості покриттів в умовах тертя ковзання без змащування проведено за схемою вал – вкладиш на машині тертя М 22-М у парі із загартованою сталлю 45 (HRC 45 - HRC 48). Програма досліджень: швидкість ковзання – 0,5 м/с; шлях тертя – 1 км, навантаження 10 МПа. Контролювали масовий знос зразка, масовий знос контртіла, лінійний знос пари тертя та коефіцієнт тертя.

Дослідження структури, товщини, фазового складу, мікротвердості та вмісту азоту поверхневих шарів зразків проводили методами металографічного та рентгеноструктурного аналізу в Fe_{Kα} випромінюванні, дюрметричного аналізу та газового аналізу з використанням відповідно металографічного мікроскопа «Neophot-21» з цифровою приставкою, ДРОН-3, ПМТ-3 та аналізатора фірми «Леко» ТМ-114. Оже-спектроскопію проводили оже-мікрозондом марки «JEO» JAMP-10S. Фрактографічні дослідження поверхонь тертя зразків виконували на растровому мікроскопі РЕМ-200.

Аналітичні дослідження напружено-деформованого стану модифікованих поверхневих шарів, навантажених силами тертя. Дослідження зносостійкості покриттів в умовах тертя ковзання без змащення проводились за схемою вал - площина.

5. Результати дослідження

Встановлено, що після гартування поверхневий шар вуглецевих і низьколегованих сталей включає в себе зони з мартенситною структурою, відпущеного мартенситу, перезагартованого мартенситу і зони термічного впливу. Максимальна мікротвердість сталі 20 по центру загартованих (з оплавленого стану) доріжок становила 4000 МПа, у той час, як після гартування без оплавлення - удвічі менше. Для сталей 40Х і 40ХІЗ вона становила 5200–6250 МПа. У зоні перекриття доріжок загартованої сталі У8 в наслідок локального відпуску мікротвердість знизилась на 25– 40% порівняно з її максимальним значенням 9200 МПа (рис. 1).

Експериментальними дослідженнями встановлено, що площа обробки повинна бути 25 – 40 %. Це обумовлено створенням такого напружено-деформованого стану, який забезпечує мінімальні напруження при терті, що встановлено аналітичними розрахунками композиційного матеріалу, а також підтверджено експериментально. Мінімально навантажена матриця дає можливість релаксувати напруження, викликані силами тертя. Точкові зміцнюючі зони мають розміри 3-5 мм та розташовані на відстані ≈ 10 мм між центрами. В якості матеріалу, що зміцнюються, були використані сталь 40Х. Аналіз отриманих результатів показав, що після лазерної обробки мало місце подрібнення зеренної структури поверхневих шарів сталі 40Х, а після наступного азотування утворювався азотований шар більшої товщини (до 0,46·10⁻³ м) і більшої мікротвердості (до 8 ГПа) у порів'язанні з чисто азотованими ділянками Підвищення зносостійкості при

дискретній обробці, у порівнянні з суцільною обробкою обумовлено таким напружено – деформованим станом, при якому напруження будуть мінімальними [8].

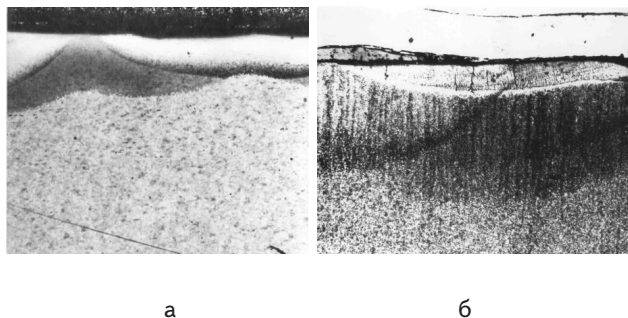


Рис. 1. Мікроструктури сталі У8А після лазерної обробки (0,5 м/хв.): а - без покриття; б - з покриттям, X 500

Досліджено структурно-фазовий стан азотованих шарів після попереднього лазерного легування. При легуванні поверхні металу в безперервному режимі за допомогою лазерного випромінювання до 1 кВт найбільш технологічним параметром для зміни щільності потужності є швидкість переміщення лазерного променя v_l . Збільшення v_l від 0,5 до 1,4 м/хв призводить до зменшення розмірів легованих зон від 800 – 900 до 200 – 300 мкм. Мікрорентгено-спектральним аналізом зразків сталі 20 встановлено, що концентрація легувальних елементів залежить від v_l . Якщо $v_l = 10 - 20$ мм/с, спостерігаємо максимум концентрацій в зоні ЛХТО для всіх легуючих елементів. Якщо $v_l < 10$ мм/с, то зменшення концентрації елементів після ЛХТО зумовлено більшими розмірами оплавлених зон, а якщо $v_l > 20$ мм/с, – вигоранням значної частини легувальної обмазки до плавлення оброблюваного матеріалу.

Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом (зйомкою) в характеристичних випромінюваннях відповідних елементів встановлено, що легувальні елементи у зонах ЛХТО розподілені рівномірно як після імпульсної, так і після безперервної обробки. При цьому вміст легувальних елементів коливається залежно від їх виду: у першому випадку Al не більше 3,5% мас, Mo ~ 4,0% мас, Cr ~ 6,1% мас; а в другому – Al ~ 5% мас, Mo ~ 8,0% мас, Cr ~ 11 % мас.

Після лазерного легування та короткочасного азотування ($t = 843$ К; $\tau = 4,5$ год) максимальну мікротвердість мають зони, леговані алюмінієм. Азотування поверхні сталі, легованої Cr та Mo, за аналогічними режимами зумовлює утворення зміцнених шарів з плавним зменшенням мікротвердості за товщиною. Металографічним аналізом встановлено, що азотований шар, отриманий в процесі лазерної обробки, складається із нітридної зони, що формується на поверхні у вигляді білої смуги товщиною 15 – 20 мкм і дифузійного підшару (зони внутрішнього азотування) із структурою азотистого фериту, що характеризується підвищеною травленістю внаслідок виділення надлишкової γ' - фази [9].

Для сталі 20, легованої Cr, під час азотування поверхні спостерігається виділення дисперсних нітридів Cr_2N . Відпуск за температури 250°C сприяє подальшому підвищенню мікротвердості, а отже, можна зробити висновок, що з підвищенням температури і

збільшенням тривалості витримування концентрація розчиненого азоту підвищується, внаслідок чого більше виділиться у процесі охолодження нітридів у дисперсній формі. У процесі відпуску за температури 873 К відбувається коагуляція виділених нітридів, що призводить до зменшення поверхневого шару.

У разі азотування сталі, поверхнево легованої алюмінієм, формується структура, що складається з легованих α -фази та γ' - фази $(Fe, Al)_4N$. При азотуванні сталі, попередньо легованої молібденом, утворюються леговані молібденом нітридні фази на основі заліза. При цьому молібден входить до складу нітридів у невеликій кількості, залишаючись в твердому розчині або утворюючи з іншими елементами інтерметалідні фази. Цим пояснюється невисока твердість зміцненого шару, легованого молібденом.

Суттєвим недоліком азотування є також те, що в системі „покриття – основа” утворюються залишкові напруження розтягування, які негативно впливають на працездатність виробу. Такі покриття не можуть працювати у важко навантажених вузлах тертя. При високих локальних навантаженнях азотований шар продавлюється, оскільки він лежить на м'якій основі, мікротвердість якої значно нижча мікротвердості самого шару. Це обумовлено тим, що технологічний процес азотування передбачає підготовчу термічну обробку сталі: гартування з високим відпуском за температури 800-860 К, яка співпадає з температурою азотування.

Недоліками способу, коли виконують попередню дискретну обробку лазером, а потім азотування є те, що дискретний азотований шар розташований на м'якій основі, мікротвердість якого для сталей 18ХГТ, 40Х і 38ХМЮА відповідно становить 1700 МПа, 2100 МПа і 2400 МПа. Зниження мікротвердості сталей, які мали мікротвердість після лазерної обробки відповідно 6500 МПа, 8200 МПа і 8900 МПа відбувається внаслідок відпуску при температурі азотування 800-860 К.

Тому запропоновано спосіб дискретної обробки азотованих сталевих виробів, що полягає в хіміко – термічній обробці (азотування) в середовищі аміаку при температурі 800 - 860 К із витримкою 15-20 год з наступною лазерною обробкою. Лазерну обробку виконують після азотування дискретно точками із площею обробки 25 - 30 % від загальної площі сталевого виробу, з потужністю 10^5-10^8 Вт/см². Мікротвердість дискретних ділянок під азотованим шаром становила: 18ХГТ – 6500 МПа, 40Х – 8100 МПа, 38ХМЮА - 8700 МПа. Підвищення зносостійкості при дискретній обробці азотованих шарів у порівнянні з азотуванням попередньо оброблених лазером сталей (рис. 3), обумовлено зниженням градієнта твердості між покриттям і основою та таким напружено – деформованим станом дискретної структури, при якому напруження будуть мінімальними.

Проведені експериментальні дослідження триботехнічних властивостей дискретно модифікованих поверхневих шарів. У першій серії досліджували вплив різних схем і площі лазерної обробки на опір зношуванню сталі 40Х.

Під час тертя зміцненої поверхні яскраво проглядається нерівномірність зношування поверхні, зумовлена анізотропією її структури, і вона чіткіше виражена, коли напрям тертя збігається з напрямом доріжок лазерної обробки (рис. 4, а). Це обумовлено

різною окислювальною здатністю загартованих і незагартованих ділянок, на що опосередковано вказують результати випробувань на корозійну тривкість. Установлено, що зразки, загартовані з перекриттям доріжок 50%, мають вищу корозійну тривкість проти зразків, загартованих з меншим їх перекриттям, що пов'язано з більшою структурною гетерогенністю останніх. Більшою зносостійкістю характеризуються зразки з поверхнею, обробленою перпендикулярно до напрямку тертя порівняно зі зразками, обробленими паралельно напрямку тертя. Знос становить відповідно 1,4 і 1,7 мг/см² за 1000 м шляху тертя.

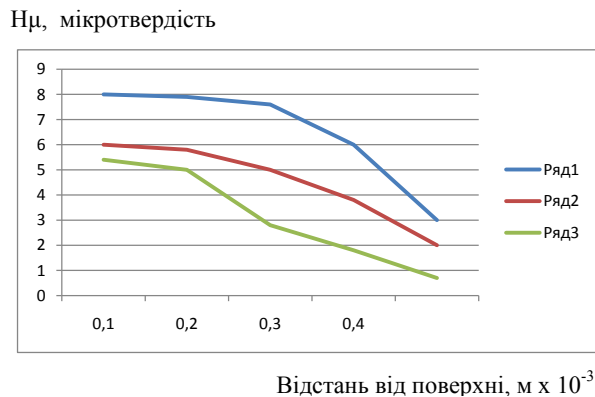
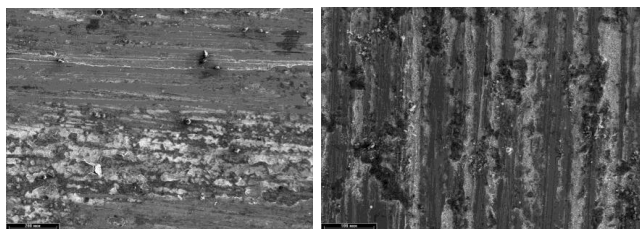


Рис. 3. Зміна мікротвердості по глибині загартованого шару зразків сталі 40X: 1 – азотування + лазерне гартування, 2 - азотування, 3 - лазерне гартування



а б

Рис. 4. Мікроструктури поверхонь тертя: паралельно (а) і перпендикулярно до напрямку тертя (б): а - паралельно, б - перпендикулярно до напрямку тертя

Досліджено вплив параметрів і схеми дискретної лазерної обробки на зносостійкість сталей. Результати триботехнічних досліджень показали, що при дискретній обробці поверхонь лазером з перекриттям, попередня термічна обробка не впливає на зносостійкість. При дискретній лазерній обробці без перекриття вищу зносостійкість мають зразки із попередньо загартованої сталі. Концентрація напружень в цьому випадку плавно змінюється в перехідній зоні від величин, які характерні для зміцнених ділянок до таких у матриці, що узгоджується з аналітичними розрахунками НДС. Для дослідження впливу площі лазерної обробки на зносостійкість сталі 40X поверхню зразків зміцнювали дискретно. Встановлено, що оптимальною щодо зносостійкості є площа обробки, яка становить 25 - 40% від загальної площі поверхні зразка (рис. 5). Поряд з іншими факторами це можна пояснити мінімальною концентрацією напружень, що виникають в умовах тертя.

Проведені дослідження хімічного складу поверхонь тертя методами мікрорентгеноспектральним та оже-спектроскопії показали наявність заліза, вуглецю і кисню, які утворюють оксиди Fe₂O₃ та Fe₃O₄. Утворення на поверхні тертя плівок вторинних структур, які складаються з оксидів, поліпшує умови тертя та зменшує можливість абразивного руйнування матеріалу. Поверхня тертя досить гладка і характеризується пелюстково-плівковою структурою. Щодо зносу контртіла під час тертя в парі з дискретно обробленими поверхнями, то знос контртіла зростає зі збільшенням площі обробленої поверхні. Ці результати узгоджуються з висновками розділу 3, у якому показано, що за об'ємного вмісту вкраплень меншого за 10% зміцнення не суттєве. У разі щільнішого розташування від 20 до 40% пластична деформація помітно обмежується. Крім того, внаслідок зменшення відстані між частинками (понад 40%) відбувається значне локальне зміцнення матриці, що призводить до зниження міцності через утворення тріщин на ослаблених ділянках матриці між частинками [10].

Встановлено, що із зростанням мікротвердості до 9500-9800 МПа інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя зменшується. При подальшому зростанні мікротвердості вони залишаються майже незмінними. Це обумовлено значним впливом на зносостійкість співвідношення пластичності та мікротвердості поверхневого шару.

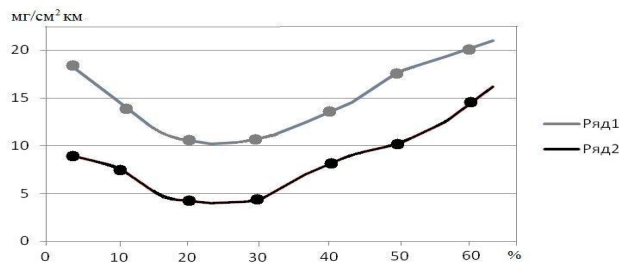


Рис. 5. Зносостійкість сталі 40X в залежності від виду та площі обробленої поверхні: 1 - дискретна обробка лазером; 2 - дискретна обробка: «лазерна обробка + азотування»

У результаті випробувань на зносостійкість виявлено суттєву відмінність триботехнічних характеристик поверхонь, легованих різними нітридоутворюючими елементами з використанням лазерного нагріву, і поверхонь, отриманих комбінованою обробкою. Установлено, що зносостійкість низьковуглецевої сталі, утвореної за комбінованою технологією, в 12 разів вища від зносостійкості азотованої сталі 20 та в 1,2-2 разів вища за зносостійкість сталі 38ХМЮА, азотованої за аналогічними режимами (рис. 6). Підвищення зносостійкості в умовах тертя без змащення зумовлено високою мікротвердістю зміцнених зон і формуванням рельєфу поверхні за типом Шарпі. Найбільша зносостійкість досягається легуванням поверхні сталі алюмінієм з наступним азотуванням.

Досліджено вплив поверхневої концентрації азоту зміцнених поверхонь на їх триботехнічні властивості. Максимальна зносостійкість та найнижчий коефіцієнт тертя спостерігається при значеннях вмісту азоту в діапазоні 6,5-8,0 % мас (рис. 7). Це можна пояснити

ти тим, що у такому випадку поверхневі нітридні шари пар тертя складаються переважно з ϵ -фази (гексагонального карбонітриду $Fe_{2-3}(NC)$, близької до своєї нижньої межі розчинності азоту. Така структура ϵ -фази дозволяє виключити її крихкість та отримання у шарі крихкого нітриду Fe_2N . При цьому твердість зміцненого шару наближується до твердості γ' -фази, з одночасним збереженням пластичності ϵ -фази, створюючи таким чином оптимальні структурні передумови для підвищення зносостійкості.

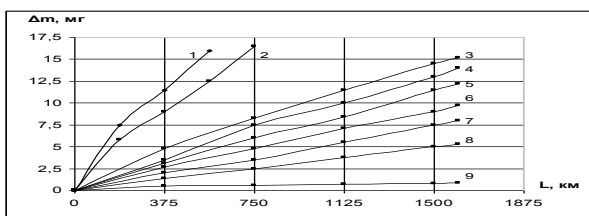


Рис. 6. Знос зразків сталей 20 (1,2) та 38ХМЮА (7) після різних обробок (Δm – зменшення маси зразка, L – шлях тертя): 1 – нормалізація (початковий стан); 2, 7 – азотування, 3 – 5 – лазерне легування (ЛХТО): 3 – алюмінієм, 4 – хромом, 5 – молібденом; 6 – 9 – комбіноване зміцнення (ЛХТО + азотування): 6 – молібденом, 8 – хромом, 9 – алюмінієм

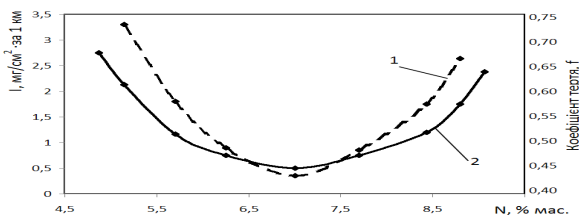


Рис. 7. Залежність інтенсивності зношування (крива 1) і коефіцієнта тертя (крива 2) сталі 40Х від вмісту азоту

У другій серії триботехнічних випробовувань досліджували вплив часу азотування на зносостійкість дискретно оброблених лазером поверхонь сталі 40Х. З'ясовано, що зі збільшенням часу витримування процесу азотування з 1 до 10 год зносостійкість знижується

і наближується до зносостійкості азотованої сталі 40Х без попередньої лазерної обробки.

Отримані результати можна пояснити зменшенням ефекту дискретної структури. Так, у разі азотування протягом 1 год товщини азоту шару на лазерно оброблених ділянках і ділянках без лазерної обробки суттєво розрізняються і становлять відповідно 0,35 і 0,02 мм. Водночас за витримування азотування 10 год товщина азотованого шару відповідно становить 0,45 і 0,12 мм, що призводить до утворення суцільного зміцненого шару.

У роботі досліджували також вплив площі дискретно азотованої сталі 40Х на триботехнічні властивості. Характер залежності зносостійкості від площі обробки такий же, як і для дискретної лазерної обробки. Проте додаткове азотування суттєво підвищує зносостійкість.

6. Висновки

Досліджено вплив технологічних параметрів лазерного легування на структурно фазовий стан легуваних алюмінієм, хромом та молібденом поверхневих шарів та фазовий склад після наступного азотування. Встановлено, що поверхнєве зміцнення, яке включає легування при лазерному нагріванні та наступне азотування, дозволяє отримати зносостійкість у 1,5 – 3 рази вищу за зносостійкість азотованих нітролів типу 38Х2МЮА. При цьому найбільша мікротвердість (2000Н) та зносостійкість низьковуглецевих сталей досягається азотуванням поверхні, легованої алюмінієм.

Максимальна зносостійкість спостерігається при значеннях концентрації азоту в діапазоні 6,0-8,8% мас. Це обумовлено тим, що поверхневі нітридні шари пар тертя складаються переважно з ϵ -фази, близької до своєї нижньої межі розчинення азоту.

Установлено, що з ростом мікротвердості до 9500-9800 МПа інтенсивність зношування й коефіцієнт тертя зменшуються. При подальшому рості мікротвердості вони залишаються майже незмінними. Це обумовлено істотним впливом на зносостійкість співвідношення пластичності й мікротвердості поверхневого шару.

Література

1. Кіндрачук, М. В. Триботехнічні властивості плазмових покриттів з дискретною структурою / М. В. Кіндрачук, Н. В. Іщук, В. В. Постернак // Проблеми трибології. – 2003. - №1. – С.75-81.
2. Кіндрачук, М. В. Напружено-деформований стан дискретно оброблених лазером сталей під час контактної взаємодії / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, Н. В. Іщук // Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ, 2006. – Вип. 46. – С.29 –39.
3. Кіндрачук, М. В. Закономірності формування азотованих шарів, комбінованою лазерно – хіміко – термічною обробкою сталей / М. В. Кіндрачук, Н. В. Іщук, Л. Ф. Головка, В. М. Писаренко // Металознавство та обробка металів. – 2007. - №1. - С.31 –35.
4. Кіндрачук, М. В. Поверхнєве зміцнення сталей нанесенням дискретних азотованих шарів / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, О. В. Герасимова, Н.В. Іщук // Технологічні системи. – 2007. – №1. С.45 – 49.
5. Корнієнко, О. А. Формування покриттів триботехнічного призначення комбінованою, лазеро-хіміко-термічною обробкою / О. А. Корнієнко, М. С. Яхья, Н. В. Іщук, В. М. Писаренко // Проблеми тертя та зношування: науково-технічний збірник. – К.: НАУ, 2008. – Вип. 49, т.2. – С.61 – 65.
6. Кіндрачук, М. В. Визначення параметрів дискретної структури покриттів триботехнічного призначення / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, В. М. Кіндрачук, О. А. Корнієнко, Н. В. Іщук // Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ, 2008. – Вип. 50. – С.5 – 15.

7. Іщук, Н. В. Дослідження особливостей впливу попередньої лазерної обробки на фазовий склад, будову і властивості азотованих шарів на сталях У8, 40Х13, 12Х8Н10Т та 40Х / Н. В. Іщук // Проблеми тертя та зношування. – К. НАУ, 2010 – Вип. 53. – С. 221 – 225.
8. Пат. 19551 України МПК (2006) С23С 8/02. Спосіб комбінованої лазеро – хіміко – термічної обробки матеріалів / Іщук Н. В., Писаренко В. М., Кіндрачук М. В., Головка Л. Ф., - №4 2006 07450; заявл. 04.07.06; опубл. 15.12.06, Бюл. № 12. – 6с.
9. Пат. 25412 Україна, МПК (2006) С23С 8/02. Спосіб отримання зносостійких дискретних азотованих шарів / Кіндрачук М. В., Іщук Н. В., Писаренко В. М., Головка Л. Ф., Яхья М. С., - № 200703002; заявл. 22.03.07; опубл. 10.08.07, Бюл. № 12. – 5с.
10. Пат. 31198 Україна, МПК (2006) С23С 8/02. Спосіб комбінованої лазеро-хіміко-термічної обробки сталевих виробів / Кіндрачук М. В., Іщук Н. В., Писаренко В. М., Головка Л. Ф., Яхья М. С., Корнієнко А. О. – 3200714419; заявл. 20.12.07; опубл. 25.03.08, Бюл. № 6. – 4 с.

Розглянуто питання класифікації гетерогенних структур і середовищ. Основна увага приділена питанню упорядкованих (правильних) гетерогенних середовищ з двоякоперіодичною структурою. Приведено співвідношення зв'язку між парою еквівалентних періодів. Зроблено акцент на відмінність понять двоякоперіодична решітка періодів і двоякоперіодична структура та сформульована умова визначення її двоякоперіодичності

Ключові слова: двоякоперіодична структура, класифікація, паралелограм періодів, умова двоякоперіодичності

Рассмотрены вопросы классификации гетерогенных структур и сред. Основное внимание уделено вопросу упорядоченных (правильных) гетерогенных сред с двоякопериодической структурой. Приведено соотношение связи между парой эквивалентных периодов. Сделан акцент на различие понятий двоякопериодическая решётка периодов и двоякопериодическая структура и сформулировано условие определения ее двоякопериодичности

Ключевые слова: двоякопериодическая структура, классификация, паралелограмм периодов, условие двоякопериодичности

УДК 678, 62-976

КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР И УСЛОВИЕ ИХ ДВОЯКО- ПЕРИОДИЧНОСТИ

С. Т. Толмачев

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*

E-mail: kafEM@mail.ru

С. Л. Бондаревский

Старший преподаватель*

E-mail: kafEM@mail.ru

*Кафедра электромеханики

Криворожский национальный университет

ул. XXII Партсъезда, 11,

г. Кривой Рог, Украина, 50027

1. Введение

Гетерогенная структура (среда) (ГС) – неоднородная система, состоящая из двух или более однородных частей (фаз). Деление систем на гомогенные (однородные) и гетерогенные несколько условно, поскольку все физические системы состоят из дисперсионной среды и дисперсной фазы и различаются лишь размерами частиц последней: в гомогенных системах частицы дисперсной фазы имеют размеры молекул и атомов [1]. И хотя ГС имеют широкое распространение, в настоящее время отсутствует их общепринятая классификация.

Одним из элементов классификации является упорядоченность (правильность) ГС. Среди упорядоченных ГС важное место занимают двоякоперіодические структуры. В теоретическом и практическом отношениях важен вопрос о принадлежности ГС к классу двоякоперіодических структур, который не

рассматривался в научно-технической литературе. Условие двоякоперіодичности многокомпонентных ГС является конструктивным средством при решении задач их композиции и декомпозиции, определения локальных и приведенных свойств и т.п.

2. Литературный обзор

Несмотря на то, что четкую границу между ГС и гомогенной фазой в общем случае провести затруднительно, в научно-технической литературе ГС получили достаточно точное определение. ГС – неоднородные системы, состоящие из внутренней (дисперсной) фазы частиц с четко выраженными границами, и внешней (дисперсионной) фазы, являющейся той средой, в которой распределены частицы дисперсной фазы [1]. Они имеют широкое распространение и отличаются