

## *Формування зносостійких структур на сталях дискретною модифікацією поверхні*

М.В. Кіндрачук, доктор технічних наук, професор

В.М. Писаренко\*, кандидат технічних наук, професор

Н.В. Іщук\*

Національний авіаційний університет, Київ

\*Національний технічний університет України «КПІ», Київ

*Розглянуто особливості впливу попередньої лазерної обробки на фазовий склад будову і властивості азотованих шарів на сталях. Показано, що якісний та кількісний характер змін в азотованому шарі визначається заздалегідь сформованим структурно-фазовим станом. Встановлено основні закономірності впливу контурно-променевої схеми лазерного зміцнення на трибологічні характеристики покриттів.*

Для підвищення працездатності поверхонь тертя сталей машин, приладів та інструменту широко використовуються різноманітні покриття та модифіковані шари. Зокрема, 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 [1, 2]. Але під час лазерної обробки поверхні твердого тіла сфокусованим променем виникає значний короточасний градієнт температури у матеріалі, який може спричинити місцеві напруження розтягу, деформування та розтріскування виробу. Ці ефекти значно посилюються, коли термічний вплив поєднують зі зміною хімічного складу приповерхневих об'ємів оброблюваного матеріалу. Це стосується лазерного оплавлення газотермічних або гальванічних покриттів [3], чи лазерного легування і наступної хіміко-термічної обробки [4, 5]. Навіть під час лазерного гартування сплавів променем лазера у місцях перекриття зон термічного впливу не вдається уникнути появи структурної гетерогенності в поверхневих шарах матеріалу. Ця гетерогенність може впливати на опір зміцненої деталі зношуванню, інтенсифікувати корозійні процеси на поверхні та спричинити зародження втомних і особливо корозійно-втомних тріщин, скорочуючи довговічність деталей після такої обробки.

Перспективним методом зміцнення і підвищення довговічності деталей машин є створення зносостійких дискретних композиційних покриттів [6, 7]. Дискретну обробку поверхні виконують із застосуванням концентрованих джерел енергії лазерного та електронного променів [8, 9]. Такі покриття дозволяють забезпечити експлуатаційні показники і зниження напружень. Регулюючи геометрію, структуру і фізико-механічні властивості поверхневих шарів параметрами нагрівання та контурно-променевої схеми лазерного зміцнення можна керувати трибологічними характеристиками покриттів.

Тому метою роботи був вибір оптимальних щодо зносостійкості конструкції та складу дискретних покриттів, сформованих лазерно-хіміко-термічною обробкою.

В роботі [10] аналітично досліджено напружений стан, що виникає під час тертя в приповерхневих шарах матеріалу. Результати свідчать про існування площі

## Структура, зношування, руйнування

дискретних вкраплень ( $\approx 40\%$ ), на якій фіксується мінімум інтенсивності локальних дотичних напружень. Виходячи з ідеалізованих умов, на моделі дискретно обробленого матеріалу, в якому між включенням і матрицею є кільцева перехідна зона, згідно з відомим законом змінювання в ній механічних властивостей досліджено характер напруженого стану, що виникає в умовах навантаження силами тертя ковзанням [7]. Установлено, що перевагу слід надавати дискретній обробці, за якої міцність перехідної зони змінюється лінійно і концентрація напружень у загартованій лазером ділянці знижується та плавно переходить в матрицю, зменшуючись до рівня напруження у матриці. Розроблені способи додаткового зміцнення дискретно оброблених лазером поверхонь хіміко-термічною обробкою (азотуванням). Установлено, що попередня лазерна обробка пришвидшує дифузійні процеси азотування [11]. Запропоновано способи виготовлення дискретних азотованих шарів на легованих [12] та низьковуглецевих сталях [5] комбінованою лазерно-хіміко-термічною обробкою, що включає азотування в середовищі аміаку з попереднім лазерним легуванням хромом, молібденом або алюмінієм сталевих виробів з площею обробки 15 – 25 % від загальної площі сталевого виробу.

Отриманні результати дають підставу сподіватися на високі триботехнічні характеристики покриттів та можливість їх оптимізації зміною технологічних параметрів та конструкції дискретних нашарувань.

Лазерну дискретну обробку сталі 40X здійснювали на установці «ЛАТУС-31» за режимами: потужність випромінювання – 0,9 – 1,1 кВт, діаметр ділянки фокусування променя – 5 мм, швидкість пересування лазерного променя – 0,5, 0,8, 1,2, 1,4 м/хв. При цьому температура поверхневого шару для сталі перевищувала  $A_{c3}$ , але була нижчою за температуру плавлення. Азотування проводили в середовищі аміаку за температури 800 – 860 К. Час витримування – 10 – 20 год. Дослідження зносостійкості покриттів в умовах тертя ковзання без змащування проведено за схемою вал – вкладиш на машині тертя М22-М у парі із гартованою сталлю 45 (HRC 45 – 48): швидкість ковзання 0,5 м/с, шлях тертя 1 км, навантаження 10 Н. 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  $Fe_{K\alpha}$  випромінюванні, дюрметричного аналізу та газового аналізу з використанням відповідно металографічного мікроскопу «Neophot – 21» з цифровою приставкою, ДРОН-3, ПМТ-3 та аналізатора фірми «Леко» ТМ114.

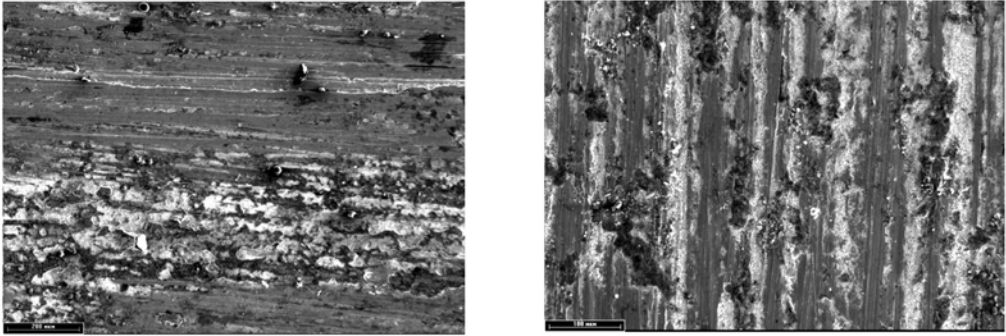
У роботі проведено три серії триботехнічних випробувань зміцнених зразків сталі 40X.

У першій серії досліджували вплив різних схем і площі лазерної обробки на опір зношуванню (рис. 1).



Рис. 1. Схеми лазерного гартування. а – паралельно, б – перпендикулярно до напрямку тертя, діаметр плями лазерної обробки 3 мм, швидкість пересування лазерного променя 0,5 м/хв, в – дискретна обробка променем лазера діаметром 3 мм.

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. 2). Відомо, що гартування безперервним лазерним променем створює анізотропію структури у приповерхневих шарах, вплив якої на міцність і характер руйнування суттєво залежить від напрямку прикладання сили [3].



а

б

Рис. 2. Мікроструктури поверхонь тертя. а – паралельно, б – перпендикулярно до напрямку тертя. x 100.

Більшою зносостійкістю характеризуються зразки з поверхню, оброблену перпендикулярно до напрямку тертя порівняно зі зразками, обробленими паралельно напрямку тертя. Зношування становить відповідно 1,4 і 1,7 мг/см<sup>2</sup> за 1000 м шляху тертя.

Для дослідження впливу площі лазерної обробки на зносостійкість сталі 40Х поверхню зразків зміцнювали дискретно (рис. 1 в). Установлено, що оптимальною щодо зносостійкості є площа оброблення (S), яка становить 30 – 40 % від загальної площі поверхні зразка (рис. 3, крива 1). Поряд з іншими факторами це можна пояснити мінімальною концентрацією напружень, що виникають в умовах тертя [7].

Оскільки основним результатом формування твердих загартованих лазером ділянок матриці є зміцнення, то наявність жорстких вкраплень (діаметром 3 мм) зміцнює матрицю, обмежуючи її пластичну течію.

Оптимальне відношення відстані між центрами включень до їх розміру  $L/d \geq 3,3$ , за якого частинки найбільш ефективно стискають матрицю, обмежують її пластичну деформацію і забезпечують максимальний опір втомному зношуванню [13]. Зона підвищених дотичних напружень, що виникає в результаті взаємодії полів напружень від сусідніх вкраплень, заглиблюється в матеріал нижче від вкраплень. Це, в свою чергу, знижує навантаження на матрицю в області між включеннями і забезпечує додатний градієнт напружень від поверхні тертя. У разі менших міжцентрових відстаней міцність композиції зменшується внаслідок утворення тріщин на ослаблених межах розділу частинок. На рис. 4 а – в показано поверхні тертя сталі 40Х з площею дискретної обробки 10 і 30 %.

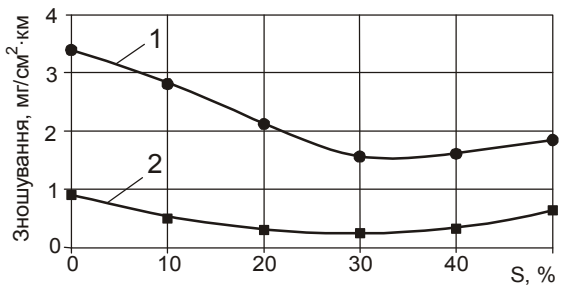


Рис. 3. Залежність зношування від площі обробленої поверхні. 1 – дискретна лазерна обробка, 2 – дискретна лазерна обробка+азотування.

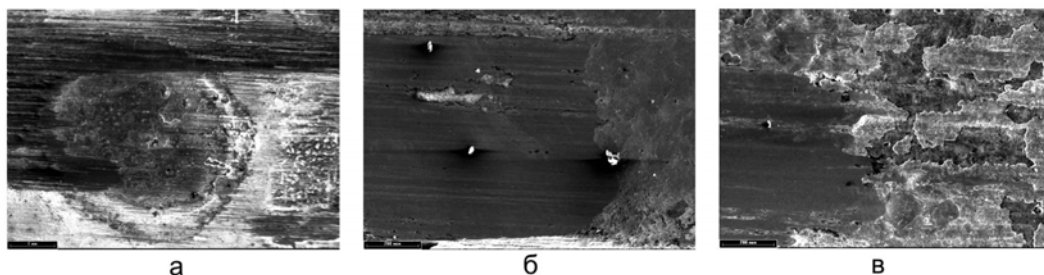


Рис. 4. Мікроструктура поверхонь тертя сталі 40X з площею дискретної обробки. а – 30 %, б – 10 %, в – 30 %. а –  $\times 15$ , б, в –  $\times 100$ .

Дослідження показали, що триботехнічні характеристики робочих поверхонь з покриттями дискретного типу залежать від їх площі. Так, при площі 30 – 40 % коефіцієнт тертя зменшується в 1,4 – 2,2 рази, а швидкість зношування в 1,2 – 1,5 рази у порівнянні з суцільними покриттями. Проведені дослідження хімічного складу поверхонь тертя методами мікрорентгеноспектральним та оже-спектроскопії показали наявність заліза, вуглецю і кисню, які утворюють оксиди  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ . Утворення на поверхні тертя плівок вторинних структур, які складаються з оксидів, поліпшує умови тертя та зменшує можливість абразивного руйнування матеріалу (рис. 4 б, в). Різні ділянки поверхні окислюються при терті з різною швидкістю (рис. 2). У більшій мірі окислюється зона перекриття доріжок, більш гетерогенна порівняно з центральною частиною гартованої доріжки, яка має структуру відпущеного мартенситу. Зменшуючи ширину зони термічного впливу, в цілому можна забезпечити досить високий рівень жаростійкості сталі після лазерного гартування і відповідно керувати її триботехнічними властивостями.

Щодо зношування контртіла під час тертя в парі з дискретно обробленими поверхнями, то воно зростає зі збільшенням обробленої площі. Ці результати узгоджуються з висновками праці [7], у якій показано, що за об'ємного вмісту крапель меншого за 10 % зміцнення не суттєве. У разі щільнішого їх 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 утворення тріщин на ослаблених ділянках матриці між частинками.

Встановлено, що з ростом мікротвердості до 9500 – 9800 МПа інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя зменшуються. При подальшому рості мікротвердості вони залишаються майже незмінними. Це обумовлено значним впливом на зносостійкість співвідношення пластичності та мікротвердості поверхневого шару, яке визначається його структурою, хімічним та фазовим складом.

У другій серії триботехнічних випробовувань досліджували вплив тривалості часу азотування на зносостійкість дискретно оброблених лазером поверхонь сталі 40X. З'ясовано, що зі збільшенням часу витримування процесу азотування від 1 до 10 год зносостійкість збільшується і наближується до зносостійкості азотованої сталі 40X без попередньої лазерної обробки (таблиця).

Отримані результати можна пояснити зменшенням ефекту дискретної структури. Так, в разі азотування протягом 1 год товщини азотованого шару на оброблених лазером 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.

Триботехнічні характеристики дискретно обробленої сталі 40X

Обробка	Товщина азотованого шару, мм		Зношування, мг/см <sup>2</sup> ·км	Коефіцієнт тертя, <i>f</i>
	на ділянках з лазерною обробкою	на ділянках без лазерної обробки		
Лазерна обробка + азотуванням 1 год	0,35	0,02	0,33	0,45
Лазерна обробка + азотуванням 5 год	0,39	0,06	0,38	0,48
Лазерна обробка + азотуванням 10 год	0,45	0,12	0,45	0,59
Азотуванням 10 год	-	0,12	0,80	0,68

Досліджено вплив поверхневої концентрації азоту зміцнених поверхонь на їх триботехнічні властивості. Максимальна зносостійкість спостерігається при значеннях концентрацій азоту в діапазоні 6,0 – 8,5 % мас (рис. 5). Це пояснюється тим, що поверхневі нітридні шари пар тертя складаються переважно з  $\epsilon$ -фази (гексагонального карбонітриду  $Fe_{2-3}(NC)$ ), близької до нижньої межі розчинності азоту. Така структура  $\epsilon$ -фази дозволяє виключити її крихкість та отримання в шарі крихкого нітриду  $Fe_2N$  ( $\epsilon$ -фаза більш пластична, ніж гранецентрований нітрид  $Fe_4N$ ). При цьому, твердість зміцненого шару наближується до твердості  $\gamma$ -фази з одночасним зберіганням пластичності  $\epsilon$ -фази, утворюючи таким чином, оптимальні структурні передумови для підвищення зносостійкості.

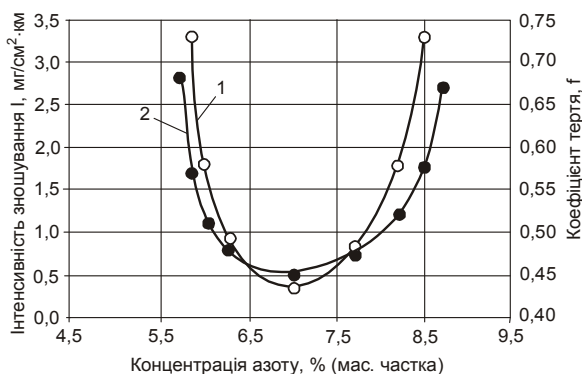


Рис. 5. Залежність інтенсивності зношування (1) і коефіцієнта тертя (2) від концентрації азоту.

У роботі досліджували також вплив площі дискретно азотованої сталі 40X на триботехнічні властивості (рис. 3, крива 2). Характер залежності зносостійкості від площі обробки такий же, як і для дискретної лазерної обробки (рис. 3, крива 1). Проте додаткове азотування суттєво підвищує зносостійкість.

Особливістю морфологічної будови сформованих поверхонь тертя являється наявність хвилястості субмікрорельєфу, що свідчить про високу сегментальну рухомість мікрооб'ємів поверхневого шару. Під впливом напружень зсуву плівки в умовах тертя легко деформується без руйнування, що свідчить про пластичність вторинних структур.

Результати мікрорентгеноспектрального аналізу поверхонь тертя показали, що окрім вуглецю, хрому, марганцю, кремнію, заліза та азоту на поверхні присутні інші елементи в кількості приблизно 40 – 60 %.

Оже-спектри поверхневого тертя реєстрували в режимі автоматичного запису з кроком 1 еВ. Для аналізу розподілу елементів за глибиною поверхневого шару проводили розпилення поверхні променем іонів  $Ag^+$  з наступним реєструванням спектру та побудовою профілів зміни амплітуд спектральних ліній різних елементів за глибиною.

Встановлено, що в процесі тертя в поверхневих шарах виникає інтенсивна дифузія елементів як із зовнішнього середовища, так і з об'єму на поверхню. При цьому, концентрація азоту на поверхнях тертя після випробувань збільшилась до 10 – 18 %, вуглецю – до 14 – 55 %, кисню – до 16 – 35 %. Суттєве збільшення поверхневої концентрації азоту та вуглецю можна пояснити їх дифузією з об'єму покриття, а кисень і, частково, азот потрапляють із зовнішнього середовища (повітря).

Дослідженнями вторинних структур і поверхневого шару, в якому протікають процеси трибоактивування, встановлено наявність на поверхнях зразків як твердих розчинів азоту в  $\alpha$ -залізі, так і хімічних сполук на базі хрому, марганцю і кремнію.

Рухомою силою самоорганізації вторинних структур першого типу є зменшення вільної енергії, а головним механізмом – перехід до рідкоподібного стану.

При формуванні вторинних структур другого типу трансформовування матеріалу відбувається за рахунок переведення основних деформаційних процесів в область пружних деформацій при аномально високій твердості. Частинки зносу в цьому випадку є результатом відділення та подрібнення крихких плівок та мають довільну форму.

Поєднання рухомості вторинних структур першого типу та високої твердості вторинних структур другого типу дозволяє досягати високої зносостійкості деталей трибоз'єднань.

Таким чином встановлено, що, шляхом корегування структурно-фазового та хімічного складу трибоелементів можливо керувати процесом формування вторинних структур для забезпечення підвищення зносостійкості матеріалу. Головні механізми підвищення зносостійкості сталей внаслідок використання комбінованої лазерно-хіміко-термічної обробки: зміцнення поверхневих шарів; утворення сприятливої схеми залишкових напружень; зміна закономірностей деформування поверхневих шарів; зміна хімічних та адгезійних властивостей поверхні. Найбільш високу зносостійкість мають дифузійні шари, що складаються з  $\epsilon$ -фаз – нітридної ( $\text{Fe}_3\text{N}$ ) та карбонітридної [ $\text{Fe}_{2-3}(\text{N},\text{C})$ ].

## Література

1. Коваленко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучем лазера. – К.: Техніка, 1990. – 192 с.
2. Кіндрачук М.В., Дудка О.І., Сухенко Ю.Г. Формування зносостійких евтектичних покриттів концентрованими джерелами енергії. – К.: ІЗМН, 1997 – 119 с.
3. Похмурська Г.В. Формування структурної гетерогенності в межах при лазерній обробці та її вплив на основні експлуатаційні властивості. Автореф. дис. ... докт. техн. наук / ЗНТУ. – Запоріжжя, 2006. – 36 с.
4. Кіндрачук М.В., Іщук Н.В., Головка Л.Ф. Закономірності формування азотованих шарів комбінованою лазерно-хіміко-термічною обробкою сталей // Металознавство та обробка металів. – 2007. – № 1. – С. 31 – 35.
5. Пат. 31198 Україна, МПК (2006) С 23 С 8/02. Спосіб комбінованої лазерно-хіміко-термічної обробки сталевих виборів / М.В. Кіндрачук, Н.В. Іщук, В.М. Писаренко. Заявл. 20.12.07, опубл. 25.03.08. – Промислова власність. – 2008. – Бюл. – № 6. – 4 с.
6. Ляшенко Б.А., Кузема Ю.А., Дигам М.С. Упрочнение поверхности металов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью. – Киев: ИПП АН УССР, 1984. – 57 с.
7. Кіндрачук М.В. Напружно-деформований стан дискретно оброблених лазером сталей під час контактної взаємодії // Проблеми тертя та зношування. – 2006. – № 46. – С. 29 – 39.
8. Кіндрачук М.В. Триботехнічні властивості плазмових покриттів з дискретною структурою // Проблеми трибології. – 2003. – № 1. – С. 75 – 81.

9. Ляшенко Б., Антонюк В., Сорока О. Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів // Вісн. Терноп. держ. техн. ун-та. – 2005. – № 1. – С. 54 – 59.
10. Кіндрачук М.В. Моделювання напружено-деформованого стану композиційних матеріалів, навантажених силами тертя. // Металознавство та обробка металів. – 1998. – № 1 – 2. – С. 63 – 72.
11. Пат. 19551 Україна, МПК (2006) С 23 С 8/02. Спосіб комбінованої лазерно-хіміко-термічної обробки матеріалів / М.В.Кіндрачук, Н.В.Ищук, В.М.Писаренко, Л.Ф.Головко. – Заявл. 04.07.06, опубл. 15.12.06. Промислова власність. – 2006. – № 12. – 4 с.
12. Пат. 25412 Україна, МПК (2006) С 23 С 8/02. Спосіб отримання зносостійких дискретних азотованих шарів / М.В. Кіндрачук, Н.В. Ищук, В.М. Писаренко, Л.Ф. Головко, М.С. Яхья. – Заявл. 22.03.07, опубл. 10.08.07. Промислова власність. – 2007. – № 12. – 4 с.
13. Ковальський А.В. Моделирование напряженного состояния композиционного материала, нагруженного силами трения. // Проблемы трения и изнашивания. – 1985. – № 12. – С. 85 – 87.

Одержано 06.04.09

**М.В. Кіндрачук, В.Н. Писаренко, Н.В. Ищук**

### **Формирование износостойких структур на сталях дискретной модификацией их поверхности**

#### **Резюме**

Рассмотрены особенности влияния предварительной лазерной обработки на фазовый состав, строение и свойства азотированных шаров на сталях. Показано, что качественный и количественный характер изменения в азотированном слое определяется предварительно сформированным структурно-фазовым состоянием. Установлены основные закономерности влияния контурно-лучевой схемы лазерного упрочнения на трибологические характеристики покрытий.

**M.V. Kindrachuk., V.N. Pisarenko, N.V. Ischuk**

### **Formation of wear resistant structures in steels at discrete changes of their surfaces**

#### **Summary**

Influence of the preliminary laser treatment on the phase composition, structure and properties of steel nitride surface layers were considered. It was shown that the strong changes of the steel structure inside of nitrided layers related to the phase and structure composition after laser treatment. The basic laws of influence of the contour-beam scheme of laser hardening on tribological