

УДК. 669.14.018.025: 539.4

ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГУВАННЯ НА ПАРАМЕТРИ ЗНОСОТРИВКОСТІ СТАЛІ 12X17T

З. А. ДУРЯГІНА¹, О. А. КУЗІН¹, М. О. КУЗІН², Н. В. ЩЕРБОВСЬКИХ¹

¹ Національний університет "Львівська політехніка";

² Інформаційно-обчислювальний центр Львівської залізниці

З допомогою підходів контактної механіки проаналізовано вплив лазерного легування Nb, В, Ni на зміну параметрів зносотривкості сталі 12X17T. Встановлено, що під час експлуатації деталей, коли силове навантаження значно менше границі текучості сталі, доцільно легувати CO₂-лазером потужністю 800 Вт, а коли дорівнює границі текучості, слід використовувати лазер потужністю 6,5 кВт, що підвищує контактну міцність приповерхневих шарів.

Ключові слова: зносотривкість, контактна міцність, лазерне легування, сталь.

Під час експлуатації сепараторів, що застосовують для виробництва аміаку, більшість відмов пов'язана зі зношуванням шпильок, виготовлених зі сталі 12X17T такого хімічного складу: 0,12% С, 0,8% Si, 0,8% Mn, 16...18% Cr, 0,6% Ni, 0,6% Ti. Тому актуально підвищити міцність і довговічність поверхневих шарів цих деталей, щоб подовжити термін експлуатації сепараторів. З цією метою обрали лазерне легування в режимі оплавлення та проаналізували його вплив на зносотривкість корозійнотривких сталей за умов інтенсивних контактних зусиль.

Методика формування поверхневих шарів та моделювання контактної взаємодії під час тертя. Легували CO₂-лазером безперервної дії ЛГН-702 ("Кардамон") потужністю 800 Вт з довжиною хвилі випромінювання 10,6 μm, швидкістю сканування променя за поверхнею зразка $V = 400$ mm/min, діаметром плями лазерного випромінювання 1,5 mm (режим I). Для порівняння обробку за режимом II здійснювали CO₂-лазером безперервної дії фірми "TRUMPF" потужністю 6,3 кВт з довжиною хвилі випромінювання 10,6 μm, плоским пучком розміром $l \times b = 20 \times 1$ mm і швидкістю сканування променя за поверхнею зразка $V = 1690$ mm/min. При цьому система сегментних дзеркал перетворює пучок сферичної форми у плоский, що забезпечує рівномірніший, ніж на установці ЛГН-702, розподіл температурного поля та дає можливість легувати без перекриття доріжок. Внаслідок цього структура поверхневих шарів стає одноріднішою та зменшується рівень напружень.

Поверхневі шари формували, продуваючи азотом, який був додатковим легувальним елементом. Для приготування обмазки (49% Nb + 11% В + 15% Ni + + 25% графіту) [1–3] порошок графіту розводили 3%-им розчином силікатного клею в ацетоні до консистенції суспензії, в яку додавали заздалегідь приготовлену порошкову суміш. Так вдалося збільшити ефективність лазерного променя, оскільки за довжини хвилі 10,6 μm коефіцієнт відбиття графіту становить 22,7%.

Для визначення мікромеханічних характеристик створених поверхневих шарів використовували методику мікроідентування [4, 5], а для встановлення їх міцності, довговічності і зносотривкості – підходи контактної механіки, що базу-

ються на формулюванні і розв'язанні відповідних крайових задач, що моделюють взаємодію тіл в умовах тертя [1]. Загальноприйнято [2], що результати розв'язків задач механіки фрикційної взаємодії тіл (трибомеханіки) є основою для якісного прогнозування і обґрунтування вибору технологічних рішень для управління тертям.

Ґрунтуючись на підходах контактної механіки, пропонуємо таку алгоритмічну схему вибору оптимальних режимів лазерного легування поверхневих шарів деталей: аналіз експериментальних результатів вимірювання мікротвердості → встановлення функціональних залежностей зміни мікротвердості матеріалу → побудова функціональних залежностей зміни механічних властивостей матеріалу контактуючих тіл → вибір математичної моделі механіки → формулювання і розв'язання відповідних крайових задач, що моделюють режими експлуатації фрагментів конструкції → вибір матеріалів з оптимальними параметрами міцності за даних умов експлуатації.

Основою для моделювання були результати виміру мікротвердості та кількісна металогія мікроструктури сформованих поверхневих шарів. Використовували математичну модель механіки пружного координатно-неоднорідно ізотропного континууму [6]. Функціональні залежності визначали методом найменших квадратів [7]. Для встановлення механічних параметрів матеріалу – модуля пружності використовували відому методику [8, 9], а для характеристик міцності матеріалу – результати праці [11]. Вважали [8], що взаємозв'язок між мікротвердістю за Вікерсом і за Меєром описує співвідношення

$$HV = HM \cdot \sin(68^\circ), \quad (1)$$

а між мікротвердістю за Берковичем і Меєром [13] – вираз

$$HB = HM \cdot \sin(65^\circ). \quad (2)$$

Взаємозв'язок між модулем пружності матеріалу і мікротвердістю за Меєром для корозійнотвирких сталей, а також границю текучості матеріалу розраховували за методикою праці [8]:

$$HM/E = 0,0085, \quad (3)$$

$$[\sigma] \approx HB/3. \quad (4)$$

Коефіцієнт Пуассона є менш структурно чутливий параметр і для сталі 12X17T його приймали рівним 0,3 [10, 11]. Для аналізу контактної міцності поверхневих шарів сталей обмежилися двовимірною задачею про силову контактну взаємодію навантаженого елемента з фрагментом пружного півпростору. В області взаємодії задавали вертикально розподілене навантаження, а фрагмент матеріалу закріплювали вздовж ненавантажених меж. Для розв'язання задачі використовували метод скінченних елементів (варіаційна постава) з відповідною схемою його формулювання [12]. Зміну запасу контактної міцності матеріалу в кожній точці досліджуваної області визначали за виразом

$$Z = \frac{[R] - \chi \sigma_i^* + (1 - \chi) \sigma_1}{[R]}, \quad (5)$$

де $[R]$ – граничний рівень напружень (границя текучості матеріалу); Z – коефіцієнт запасу контактної міцності ($Z \leq 1$). У точках області, де $Z = 1$, матеріал є абсолютно тривкий, а де $Z = 1$ – знеміцнений.

Результати експерименту та їх обговорення. Після лазерного легування сталі за режимом I (Р I) сформувався поверхневий мікрогетерогенний шар товщиною 123... 200 μm (рис. 1a), а після обробки за режимом II (Р II) з обматки того ж складу його товщина зменшилася до 112...120 μm (рис. 2b). Після обробки за режимом II структура шару комірчаста з по-різному орієнтованими вторинними фазами, через що вдається додатково регулювати не тільки її тип, а й розміри

структурних компонентів. При цьому розміри зерен зменшуються з 5...20 μm до 3,5... 10,5 μm , а вторинних фаз – з 1...3,3 μm до 0,9...1,6 μm . Інтегральна питома частка дрібнодисперсних фаз у поверхневих шарах зростає.

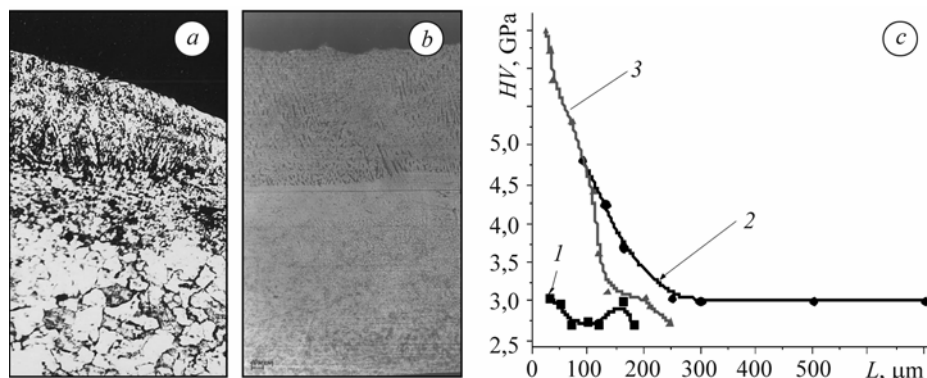


Рис. 1. Мікроструктура поверхнього шару після лазерного легування сталі 12Х17Т за режимами Р І (а) та Р ІІ (б), $\times 500$; характер зміни мікротвердості під навантаженням 0,2 Н (с): 1 – вихідний стан; 2, 3 – лазерне легування за режимами І і ІІ.

Fig. 1. The microstructure of the surface layer after laser alloying of 12H17T steel by conditions I (a) and II (b), $\times 500$; the character of microhardness changes under loading 0.2 N (c): 1 – initial state; 2, 3 – laser alloying by conditions I and II.

В обох випадках поверхневий шар складається з високолегованого Fe_α -твердого розчину (C, Cr, Ni, N) та вторинних фаз ($\text{NbC}_{0,5}$, V_4C , BN, Fe_4N , TiB_2) (рис. 2с). Враховуючи результати термодинамічного прогнозу імовірності утворення фаз [3, 14], рентгеноструктурного фазового [15, 16–18] та мікрорентгеноспектрального аналізів (рис. 2а), встановили, що зменшення концентрації Cr та Fe у поверхневих шарах та сегрегація вуглецю до поверхні з основи сталі, його дифузія з обмазки свідчать про високу імовірність формування карбідних фаз ($\text{NbC}_{0,5}$, V_4C) внаслідок реакційної дифузії. Бор, потрапляючи у ванну розплаву, при 1150... 1400 К утворює бориди, зокрема TiB_2 [19]. Частина бору, що залишилася, йде на формування фази V_4C , що також гальмує ріст зерен та сприяє окрихченню. Азот, розчиняючись у твердому розчині, утворює нітриди BN, Fe_4N .

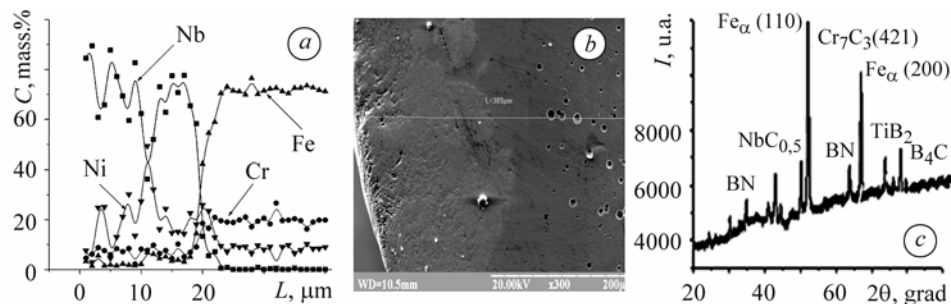


Рис. 2. Розподіл елементів (а), мікроструктура, $\times 500$ (б) та фазовий склад (с) поверхнього шару на сталі 12Х17Т після лазерного легування за режимом І з обмазки.

Fig. 2. Distribution of elements (a), microstructure, $\times 500$ (b) and phase composition (c) of the surface layer of 12H17T steel after laser alloying by condition I.

Встановили, що мікротвердість у вихідному стані становить 2,72...3,04 ГПа (рис. 1с, крива 1). Після лазерного легування за режимом Р І мікротвердість сформованого шару плавно знижується від 4,27...4,81 ГПа (на глибині до 130 μm)

до мікротвердості основи 3 GPa (рис. 1с, крива 2). Це можна пояснити зменшенням розміру зерен Fe_α -твердого розчину та виділенням вторинних фаз. Під час легування за режимом Р II з обмазки того ж складу мікротвердість поверхневого шару зростає до 6,4...6,5 GPa, а потім падає від 6,46 до 3,6 GPa зі зменшенням глибини шару від 26 до 120 μm (рис. 1с, крива 3).

Легування за режимами I та II дає різну ступінь мікрогетерогенності і різну дисперсність фаз як за глибиною, так і за перерізом, зокрема, зносотривкість поверхневих шарів після обробки за режимом Р I підвищується у 2,5 рази, а за Р II – у 9,5 рази (рис. 3).

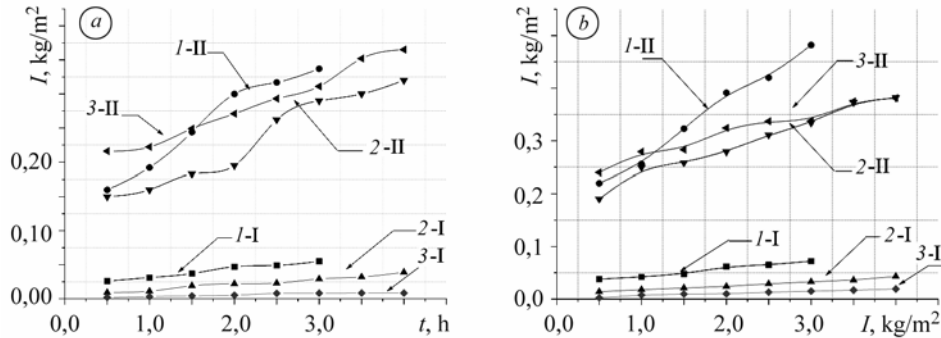


Рис. 3. Інтенсивність зношування пар тертя сталь 12X17T–контргіло (сталь 45);
I-I – вихідний стан; 2-I, 3-I – лазерне легування за режимами I та II;
I-II, 2-II, 3-II – контргіло за навантаження 0,52 (a) та 0,68 МПа (b).

Fig. 3. Wear intensity of a riction pair: steel 12X17T – counterbody (steel 45);
I-I – initial state; 2-I, 3-I – laser alloying by conditions I and II;
I-II, 2-II, 3-II – counterbody under loading 0.52 (a) and 0.68 MPa (b).

Таблиця 1. Розміри зон контактної міцності поверхневих шарів на сталі 12X17T

Коефіцієнт запасу контактної міцності	Сталь у вихідному стані	Після лазерного легування за Р I	Після лазерного легування за Р II
	Об'єм матеріалу з меншим, ніж вказаний на рис. 4а, коефіцієнтом запасу контактної міцності, μm^2		
0,1	0	0	0
0,2	0	0	0
0,3	2	0	0
0,4	4	0	0
0,5	8	4	4
0,6	12	6	6
0,7	16	12	12
0,8	26	18	16
0,9	102	44	40
1	10000	10000	10000

Виявили (рис. 4а), що функція локального розподілу навантаження має параболічну залежність. Таке локальне навантаження викликає у зразках поля напружень (рис. 4b–d). Оскільки напружений стан неоднозначно впливає на контактну міцність поверхневих шарів, аналізували зміну об'єму зон з різними коефіцієнтами запасу міцності (табл. 1) за навантаженням, максимальне значення якого становить 10^8 Pa та змінюється за параболічним законом. Аналогічний ана-

ліз здійснено за силового навантаження, що межує з міцністю сталі у вихідному стані. В результаті визначили мінімальний запас контактної міцності поверхневих шарів на сталі 12X17T (табл. 2). Найменшою контактною міцністю, а отже, і зносотривкістю сталь 12X17T володіє у вихідному стані. Лазерне легування за режимом I підвищує її в 1,6...2 рази, а за режимом II – до 1,8...3 разів.

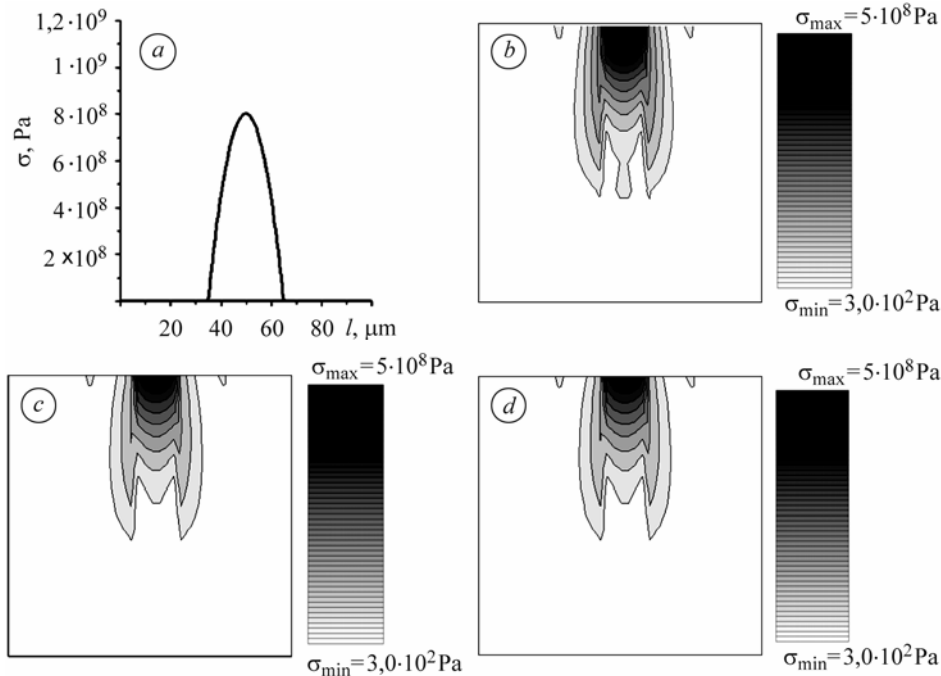


Рис. 4. Функція локального розподілу навантаження у зоні тертя поверхневих шарів сталі 12X17T (a); епюри розподілу напружень за локального навантаження у вихідному стані (b) та після лазерного легування за режимами I (c) та II (d).

Fig. 4. Function of load local distribution in the zone of friction of the surface layer of 12H17T steel (a); distribution of stresses under local load in the initial state (b) and after laser alloying by conditions I (c) and II (d).

Таблиця 2. Мінімальний коефіцієнт запасу контактної міцності поверхневих шарів на сталі 12X17T

Стан шарів	Мінімальний коефіцієнт запасу контактної міцності	
	під навантаженням 10^8 Pa	під навантаженням, що межує з міцністю матеріалу у вихідному стані
Вихідний	0,2584	0
Після лазерного легування за режимом I	0,4180	0,03
Після лазерного легування за режимом II	0,4563	0,09

ВИСНОВКИ

Зі збільшенням потужності лазерного випромінювання суттєво підвищується зносотривкість та контактна міцність приповерхневих шарів. За експлуатації під навантаженнями, меншими за границю текучості сталі 12X17T, лазерне легування необхідно виконувати за режимом I (потужність лазера 800 Вт), а за збільшення навантажень використовувати лазер потужністю 6,3 кВт.

РЕЗЮМЕ. С использованием подходов контактной механики проанализировано влияние лазерного легирования Nb, В, Ni на изменение параметров износостойкости стали 12Х17Т. Установлено, что при режимах эксплуатации деталей, когда силовая нагрузка намного меньше границы текучести стали, целесообразно легирование CO₂-лазером непрерывного действия мощностью 800 Вт. Если силовая нагрузка в процессе эксплуатации равна границе текучести стали, следует применять лазер мощностью 6,5 кВт, что повышает контактную прочность приповерхностных слоев.

SUMMARY. The influence of laser alloying of Nb, В, Ni on the change on wear-resistance parameters was investigated using the method of contact mechanics. It was found that in exploitation conditions when working loading is much less than the yield strength of 12Х17Т steel it is advisable to alloy components, using continuously working CO₂-laser of a power of 800 Вт. If working loading during exploitation is equal to the yield strength of the steel, the laser of a power of 6.5 Вт should be used. This will increase a contact strength of the near-surface layers.

1. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Чернец М. В. К теории контактной прочности элементов конструкций // Физ.-хим. механика материалов. – 1981. – № 6. – С. 69–72.
2. Goryacheva I. G. Contact mechanics in tribology. – Dordrecht etc.: Kluwer, 1998. – 344 p.
3. Патент на корисну модель 31067. Україна, (2006) В 21 F 21/00. Спосіб отримання бар'єрного шару на елементах атомного енергетичного устаткування / З. А. Дурягіна, В. І. Алімов, Г. В. Лазько, М. В. Афанасьєва. – Опубл. 25.03.2008; Бюл. № 6.
4. Мильман Ю. В. Зависимость твердости от нагрузки на индентор и твердость при фиксированной диагонали отпечатка // Проблемы прочности. – 1990. – № 6. – С. 52–56.
5. Tabor D. Indentation hardness: fifty years on. A personal view // Phil. Mag. A. – 1996. – 74, № 5. – P. 1207–1212.
6. Бурак Я., Кузін М. Побудова математичної моделі механіки металічних пружних систем з врахуванням дисипативних явищ // Машинознавство. – 2008. – № 10. – С. 8–11.
7. Зельдович Я. Б., Зельдович А. Д. Элементы прикладной математики. – М.: Наука, 1972. – 592 с.
8. Булычев С. Н. Соотношение между восстановленной и невосстановленной твердостью при испытании наномикроиндентированием // Журн. техн. физики. – 1999. – № 7. – С. 42–48.
9. Мильман Ю. В. Новые методики микромеханических испытаний материалов методом локального нагружения жестким индентором // Сучасне матеріалознавство 21 сторіччя. – К.: Наук. думка, 1998. – С. 637–656.
10. Беркович И. И., Громаковский Д. Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Уч. для вузов / Под ред. Д. Г. Громаковского. – Самара: Самарс. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
11. Таблицы физических величин: Справ. / Под ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
12. Приложение методов теории пластичности и ползучести к решению инженерных задач: в 2-х ч. – К.: Выщ. шк., 1991.
13. Сопротивление материалов: в 2-х ч. / Под ред. В. Т. Трощенко. – К.: Наук. думка, 1993.
14. Вплив лазерного мікролегування ніобієм на зносотривкість нержавіючих сталей / В. В. Широков, Х. Б. Василів, З. А. Дурягіна та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – № 4. – С. 12–18.
15. Дурягіна З. А., Лазько Г. В. Структура та властивості сталі 12Х18Н10Т після комплексного лазерного легування // Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – № 3. – С. 681–685.
16. Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д., Дейнеко Л. М. Вплив бору на структуроутворення і опір міжкристалітній корозії аустенітної сталі // Металознавство та обробка матеріалів. – 2004. – № 2. – С. 54–61.
17. Дурягіна З. А., Лизун О. Я., Пілюшенко В. Л. Сплави з особливими властивостями. – Львів: Нац. ун-т “Львівська політехніка”, 2007. – 277 с.
18. Дурягіна З. А., Лазько Г. В., Пилипенко Н. В. Комп'ютерне моделювання оптимальних параметрів лазерного легування корозійотривких сталей // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 1. – С. 20–25.
19. Лостухов В. Ф., Бобіна М. М. Властивості легуваних боридних покриттів на сталях // Металознавство та обробка матеріалів. – 1995. – № 1. – С. 46–50.

Одержано 29.11.2010