

Хижняк В.Г.,***Кіндрачук М.В.,******Загребельний В.В.****

*Національний технічний університет

України «КПІ»,

м. Київ, Україна

** Національний авіаційний університет,

м. Київ, Україна

E-mail: nau12@ukr.net

КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ Р6М5 АЗОТОТИТАНУВАННЯМ, АЗОТОХРОМУВАННЯМ ТА ДИСКРЕТНОЮ ЛАЗЕРНОЮ ОБРОБКОЮ

УДК 621.785

Розглянуто структуру, фазовий та хімічний склад, мікротвердість та мікрокрихкість поверхневих зон сталі Р6М5 після хіміко - термічної обробки: азотування з наступним титануванням та хромуванням. Наведено результати дослідження впливу фізико - механічних властивостей комплексних покриттів та дискретної лазерної обробки сталі на їх зносостійкість. Аналіз отриманих даних показав, що більшу зносостійкість в умовах тертя ковзання мають азотохромувані покриття з додатковим зміцненням лазерною обробкою сталі, яка слугує підкладкою для покриттів.

Ключові слова: сталь Р6М5, азототитанування, азотохромування, дискретна лазерна обробка, тертя ковзання, зносостійкість.

Вступ

Захисні покриття на інструментах та деталях машин широко використовуються в теперішній час з метою підвищення працездатності виробів [1 - 3]. Дослідження останніх років направлені на покращення властивостей відомих та створення нових видів покриттів та технологій їх нанесення, розширення номенклатури матеріалів для поверхневої обробки. Для зміцнення інструментальних сталей, зокрема швидкорізальної Р6М5, широко застосовується азотування. Проте недоліками процесу азотування можна вважати тривалість обробки, невисоку якість отриманого поверхневого дифузійного шару, недостатню зносостійкість. В роботі [4] показано, що лазерна обробка (до хіміко – термічної обробки) сталей за певних умов може суттєво прискорювати процеси азотування. Перспективним методом зміцнення інструменту також є створення зносостійких дискретних композиційних покриттів із застосуванням концентрованих джерел енергії [5].

Знайшли використання як моно- так багатощарові покриття на сталях і твердих сплавах, сполуки перехідних матеріалів IV – VI груп періодичної системи (карбід титану TiC, нітрид титану TiN, борид титану TiB₂ тощо). Композиції покриття – сталь поєднують високу твердість та хімічну стабільність, корозійну та зносостійкість, низький коефіцієнт тертя покриттів із в'язкістю основи [6].

В роботі [7] наведено результати дослідження фазового складу та будови багатощарових покриттів за участю бар'єрів на основі карбідів та нітридів титану, ванадію, хрому. Технологія хіміко – термічної обробки поєднує два процеси – азотування і наступної дифузійної металізації. При цьому суттєво підвищується зносостійкість сталей в умовах тертя ковзанням та абразивного зношування. Проте ця технологія обмежує її використання для зміцнення важконавантажених деталей вузлів тертя та інструменту, що піддаються високим локальним навантаженням. Оскільки дифузійна металізація проводиться за температури 1050 °С, сталеві основи відпускається і не може слугувати твердою підкладкою для твердого покриття.

Мета дослідження полягає в отриманні на сталі Р6М5 комплексних покриттів за участю азоту титану і хрому, дискретній лазерній обробці основи під покриттями, встановлені їх будови, фізико – механічних та триботехнічних властивостей.

Методика дослідження

Як об'єкт дослідження було обрано сталь Р6М5. Комплексні титаноазотовані та титанохромувані покриття наносили в закритому реакційному просторі за умов зниженого тиску [1]. Як вихідний реагент використовували порошки титану та хрому, деревне вугілля, чотирихлористий вуглець. Дифузійну металізацію проводили при температурі 1050 °С протягом 2 - 4 годин. Насичення азотом відбувалося при температурі 540°С протягом 21 години в атмосфері аміаку при ступені дисоціації 40 – 45%.

Процес комплексного насичення азотом і металами складався з двох послідовних етапів: азотування та наступної металізації (титанування, хромування).

Дискретну лазерну обробку виконували на установці ЛАТУС – 31, з потужністю 10³ - 10⁵Вт/см². Фазовий склад покриттів визначали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН УМ–1 у мідному монохроматизованому випромінюванні. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі «Neophot 21».

Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні на інденторі 0,5 - 1,0 Н. Рентгеноспектральний аналіз проводили на мікроскопі РЕМ – 200.

Дослідження зносостійкості покриттів в умовах тертя ковзання без змащування проводили за схемою вал – вкладиш на машині тертя М22-М у парі із загартованою сталлю Р6М5 (HRC61-63).

Результати дослідження та їх обговорення

Першим етапом процесу азототитанування, азотохромування було проведено азотування. На другому етапі реалізовували процес дифузійної металізації, а саме, титанування та хромування. Насичення проводили в закритому реакційному просторі в середовищі хлору.

В табл. 1 наведені результати досліджень фазового складу, товщини, мікротвердості та мікрокрихкості покриттів.

Таблиця 1

Результати рентгеноструктурного аналізу та мікромеханічні властивості покриттів на сталі Р6М5 після ХТО: азотування $t = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 36$ год., металізація $t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4$ год

| Вид обробки | Фазовий склад | Товщина, мкм | Мікротвердість, ГПа | Показник мікрокрихкості |
|------------------|----------------------------|--------------|---------------------|-------------------------|
| Азотування | Fe_{2-3}N | 8,0 | 6,3 | 12,5 |
| | Fe_4N | 8,0 | 13,6 | 10,2 |
| Азототитанування | TiC | 6,3 | 36,4 | 85,2 |
| | TiN | 3,0 | 30,4 | 42,4 |
| Азотохромування | Cr_{23}C_6 | 5,0 | 18,2 | 20,4 |
| | Cr_7C_3 | 4,0 | 16,2 | 17,8 |
| | Cr_2N | 4,0 | 8,8 | 15,4 |

Триботехнічні дослідження в умовах тертя ковзання без змащування проводили за схемою вал – вкладиш з вимірюванням лінійного зносу.

В роботі був проведений металографічний та мікрорентгеноспектральний аналізи поверхонь зношування сталі Р6М5 з різним типом покриття. Відомо, що на поверхнях тертя одночасно протікає велика кількість процесів: потік тепла, потік речовини, фізико - хімічні процеси взаємодії тіл із середовищем, деформація, структурні і фазові перетворення та ін. В точках локального контакту покриття-контртіло виникає напруження зсуву, що перевищує межу пружності, при цьому температура матеріалу підвищується. Відбувається зрив матеріалу з верхівок виступів. При цьому ділянки контактної поверхні залишаються чистими і хімічно активними. В результаті утворюються і при подальшому русі тут же руйнуються численні містки мікрозварки двох дотичних поверхонь. При цьому механічна енергія руху перетворюється в тепло. В результаті локального підвищення температури починається формування оксидів елементів покриття та основи. Встановлено, що на поверхні тертя азототитанованої сталі присутня значна кількість кисню (рис. 1, табл. 2), який зв'язаний в оксиди.

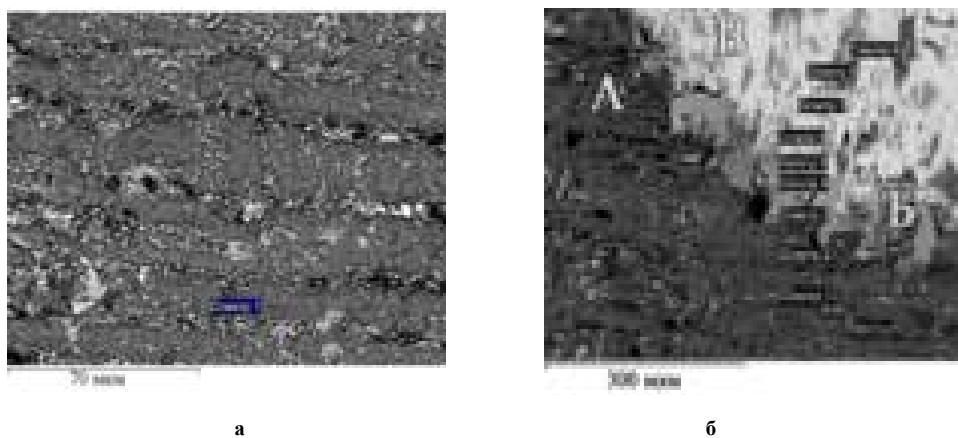


Рис. 1 – Поверхні зносу (а, б) (швидкість ковзання 0,2 м/с, навантаження 30 Н) сталі після азототитанування: азотування $t = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 36$ год, титанування $t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4$ год

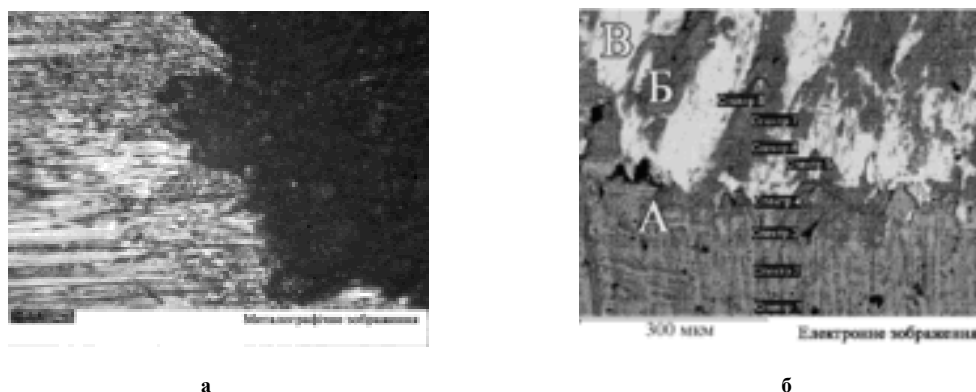
**Розподіл хімічних елементів на поверхні зношування сталі Р6М5 після азототитанування:
азотування $t = 540$ °С, $\tau = 36$ год., титанування $t = 1050$ °С, $\tau = 4$ год**

| Зона | № спектру | Вміст елементів %, (мас) | | | | | | | |
|------|-----------|--------------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|
| | | С | Ti | Fe | V | W | O | Cr | Si |
| А | 1 | 22,19 | 8,05 | 51,34 | - | 12,53 | 3,80 | 1,86 | - |
| | 2 | 19,30 | 40,71 | 30,68 | - | 1,44 | 7,61 | 0,26 | - |
| Б | 3 | + | 3,54 | 59,22 | 0,51 | 6,86 | 28,57 | 1,31 | - |
| | 4 | + | 2,36 | 60,76 | 0,39 | 7,28 | 27,55 | 1,66 | - |
| | 9 | + | 0,89 | 65,49 | 0,36 | 7,52 | 24,08 | 1,65 | - |
| В | 5 | + | 4,05 | 95,34 | - | - | - | 0,29 | 0,31 |
| | 6 | + | 1,92 | 94,14 | - | - | 3,37 | - | 0,56 |
| | 7 | + | - | 99,64 | - | - | - | - | 0,36 |
| | 8 | + | - | 91,49 | - | 1,78 | 6,39 | 0,34 | - |

Після азототитанування на поверхні зношування можна розрізнити три зони: темна (зона А), сіра (зона Б), біла (зона В). Більш темній зоні, зоні А, відповідає фазовий склад поверхні після азототитанування (спектр 1, 2), тобто карбід титану TiC . Крім вуглецю та титану ця зона містить кисень, залізо, вольфрам та хром. В даному випадку хром та вольфрам є складовими контртіла сталі Р6М5. Можна говорити про те, що W і Cr до даної зони потрапляють в процесі тертя з поверхні контртіла, утворюючи оксиди.

Останнє підтверджується значним вмістом на поверхні в зоні А кисню. В зоні Б, що безпосередньо примикає до основи (зона В) зафіксована максимальна кількість кисню. Скоріше за все це пов'язано з утворенням оксидів титану та заліза. Також в даній зоні, як і в зоні А присутні W, Cr і незначна кількість V. Світла зона (В) представляє собою основу сталі Р6М5. В ній присутні окремі сірі оксидні ділянки незначної площі, витянуті за напрямком ковзання. Це пов'язано з утворенням оксидів титану і заліза. Плівка оксиду титану TiO_2 (рутила) має добрі захисні властивості і в зоні контакту ізолює поверхню карбіду та матеріалу основи від взаємодії з матеріалом контртіла. Окремі області сірого кольору на поверхні зношування, сформувалися шляхом перенесення часток оксиду TiO_2 або зруйнованого покриття TiC .

Металографічним аналізом поверхні зношування сталі після азотохромування встановлено формування в результаті тертя трьох зон (рис. 2, табл. 3).



**Рис. 2 – Поверхні зносу (а, б) ($V = 0,18$ м/с, $P = 30$ Н)
сталі Р6М5 після азотохромування:
азотування $T = 540$ °С, $\tau = 36$ год, хромування $T = 1050$ °С, $\tau = 4$ год**

Зона А- поверхня сталі, що складається з вуглецю, азоту, хрому та заліза. На відміну від процесів азототитанування кисень в даній зоні не виявлено. Лише в точці спектру № 3 присутня невелика кількість кисню. Мікрорентгеноспектральним аналізом встановлено, що основним елементом зони Б є кисень, залізо, вуглець та хром. Також в даній зоні знаходяться вольфрам та ванадій, які потрапили до даної зони за рахунок транспортування в процесі тертя елементів контртіла зі сталі Р6М5. Зона В представляє собою основу сталі Р6М5 після зносу. Основним елементом даної ділянки є кисень та залізо.

**Розподіл хімічних елементів на поверхні зношування сталі У8А після азотохромування:
азотування $t = 540$ °С, $\tau = 36$ год., хромування $t = 1050$ °С, $\tau = 4$ год**

| Зона | № спектру | Вміст елементів %, (мас.) | | | | | | | | |
|------|-----------|---------------------------|------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| | | C | N | Fe | V | W | O | Cr | Si | Mn |
| А | 1 | + | 4,52 | - | - | - | - | 4,52 | - | - |
| | 2 | + | 4,70 | - | - | - | - | 95,30 | - | - |
| | 3 | + | 6,71 | 1,02 | - | - | 2,14 | 90,13 | - | - |
| Б | 6 | + | - | 56,59 | 0,30 | 4,91 | 31,02 | 7,17 | - | - |
| | 7 | + | - | 57,12 | 0,38 | 4,50 | 31,01 | 6,99 | - | - |
| В | 4 | + | - | 96,14 | - | - | - | 3,05 | 0,32 | 0,49 |
| | 5 | + | - | 98,67 | - | - | - | 0,98 | 0,36 | - |
| | 8 | + | - | 99,19 | - | - | - | 0,47 | 0,35 | - |

Очевидно, що матеріал покриття приймає активну участь у формуванні вторинних структур. Крім того, окремі елементи зруйнованого та окисленого покриття закріплюються на поверхні тертя. Таким чином, формується структура - м'яка основа з твердими включеннями карбідних та оксидних фаз, що гальмує зношування і сприяє підвищенню зносостійкості.

В табл. 4 наведено результати триботехнічних досліджень покриттів. В результаті випробувань сталі Р6М5 після різних видів обробки за схемою вал – вкладиш в умовах тертя ковзання без змащування встановлено, що за зменшенням коефіцієнта тертя та величини зносу покриття можна розташувати наступним чином: азотування, азототитанування, азотохромування. Висока зносостійкість покриттів $Cr_{23}C_6 \rightarrow Cr_7C_3 \rightarrow Cr_2N$ визначається комплексом їх властивостей. В першу чергу низьким коефіцієнтом тертя та значною пластичністю, про що свідчить їх низька мікрокрихкість.

Варто відзначити, що при більш жорстких умовах випробування ($P = 80N$) за зносостійкістю азотована сталь наближається до азохромованої та азототитанової, що обумовлено зниженням твердості сталі при високотемпературній металізації (1050 °С) до 25 - 30 HRC. В той час, як при азотуванні ($t = 640$ °С) зберігається твердість вихідної загартованої сталі.

**Зносостійкість сталі Р6М5 в залежності від виду обробки
та навантаження при швидкості 0,5 м/с**

| Вид обробки | Знос, мкм, при навантаженні, Н | | |
|-------------------------|--------------------------------|------|------|
| | 40 | 60 | 80 |
| Азотування | 15,2 | 21,5 | 30,5 |
| Азототитанування | 8,1 | 14,0 | 23,0 |
| Азототитанування + л.о. | 7,5 | 9,8 | 12,3 |
| Азотохромування | 6,0 | 10,7 | 20,1 |
| Азотохромування + л.о. | 5,9 | 7,5 | 10,5 |

Тому зразки після азототитанування і азотохромування піддавали дискретній лазерній обробці з метою загартування сталі, як підкладки під покриттями. Лазерну обробку проводили дискретно точками діаметром 3 мм із площею обробки 55 - 60 % від загальної площі обробленої поверхні.

Твердість зміцнених ділянок сталі внаслідок самогартування становила 60 - 62 HRC. Результати триботехнічних випробувань свідчать про ефективність такої обробки композиції покриття – основа, яка експлуатується при високих локальних навантаженнях. Зносостійкість комплексних покриттів після дискретної лазерної обробки вища в 1,9 - 2,1 рази порівняно з покриттями без лазерної обробки і в 2,8 - 3,0 рази порівняно з азотованою сталлю. Це обумовлено тим, що дискретно загартований шар сталі, де зосереджуються максимальні напруження тертя, забезпечує рівномірний розподіл навантаження в системі «сталь - покриття», чинить опір руйнуванню покриття під дією тангенціально направлених сил тертя, демпфірує їх, тобто слугує міцною основою для покриття, підвищуючи його працездатність у екстремальних умовах експлуатації, виключаючи його продавлювання, викришування та відшарування.

Висновки

1. Встановлено, що при азототитануванні на сталі Р6М5 формується покриття з шарів карбіду титану TiC та нітриду титану TiN з мікротвердістю 38,0 – 38,5 та 27,0 – 27,2 ГПа відповідно; при азотохромуванні з шарів карбідів Cr₂₃C₆, Cr₇C₃ та нітриду хрому Cr₂N з мікротвердістю 18,2 – 18,5, 16,2 – 16,8 та 8,8 – 9,0 ГПа відповідно.

2. Зносостійкість сталі Р6М5 в умовах тертя ковзання без змащування із захисними покриттями порівняно з азотуванням зростає в 1,5 – 2,0 рази, а після додаткової дискретної лазерної обробки сталі в 2,2 – 3,0 рази. Це обумовлено тим, що дискретно загартований шар сталі слугує міцною основою для покриття, підвищуючи його працездатність у екстремальних умовах експлуатації, виключаючи його продавлювання, викришування та відшарування.

Література

1. Лоскутов В.Ф. Диффузионные карбидные покрытия / В.Ф. Лоскутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницький, М.В. Кіндрачук. – К.: Техніка, 1991. – 168с.
2. Хижняк В.Г. Диффузионные покрытия с участием хрома и алюминия на стали 12Х18Н9Т с барьерным слоем нитрида титана / В.Г. Хижняк, М.В. Аршук // Известие высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. № 3. – С. 69 – 70.
3. Трибологія [М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут]. – К.: НАУ – друк, 2009. – 392с.
4. Пат. № 19551. Україна МПК (2006) С23С8/02 Спосіб комбінованої лазерно-хіміко-термічної обробки матеріалів. / М.В. Кіндрачук, Л.Ф. Головка, В.М. Писаренко, Н.В. Іщук. – Заяв. 04.07.2006. № С23С 8/02 Опубл. 15.12.2006, бюл. № 12.
5. Пат. 25412 Україна, МПК (2006) С23С 8/02. Спосіб отримання зносостійких дискретних азотованих шарів / М.В. Кіндрачук, Н.В. Іщук, В.М. Писаренко, Л.Ф. Головка, М.С. Яхья, - № u 2007 03002; Заявл. 22.03.07, опубл. 10.08.07, Бюл. № 12. – 5с.
6. Hishimoto T. Two-sten Cr and Al diffusion on TiAl at high temperatures / T. Hishimoto, T. Jzumi, S. Hayashi, T. Narita // Intermetallies. – 2003. – № 11. – P. 225 - 235.
7. Хижняк В.Г. Будова та зносостійкість карбідних і нітридних покриттів титану, ванадію та хрому на сталі У8 / В.Г. Хижняк, Н.А. Курило, М.М. Шахрайчук // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2007. №3. – С. 105 - 109.

Поступила в редакцію 30.11.2015

Khyzhnyak V.H., Kindrachuk M.V., Zagrebelniy V.V. **Complex method of surface hardening of steel P6M5 by nitro-titanizing and nitro-chromizing discrete laser treatment.**

It is considered the structure, phase and chemical composition, microhardness and microfragility of surface areas of steel P6M5 after chemical - thermal treatment: nitriding with further titanizing and chromizing. It is shown the dependence of physical and mechanical properties of complex coatings and discrete laser treatment on wear-resistance. Results analysis shows that nitro-chromized coating on laser treated steel used as coating substrate is characterized by highest wear-resistance under sliding friction conditions.

Keywords: steel P6M5, nitro-titanizing, nitro-chromizing, discrete laser treatment, friction, wear resistance.

References

1. Loskutov V.F. , Hizhnyak V.G. Kunickij Yu.A, Kindrachuk M.V. Diffuzionnye karbidnye pokrytiya, K.: Tehkhnika, 1991, 168p.
2. Hizhnyak V.G., Arshuk M.V. Diffuzionnye pokrytiya s uchastiem hroma i alyuminiya na stali 12H18N9T s barenym sloem nitrida titana , , Izvestie vysshih uchebnyh zavedenij. CHernaya metallurgiya, 2012. No3, P. 69 – 70.
3. KindrachukM.V., LabunecV.F., PashechkoM.I., KorbutE.V., Tribologiya , K.: NAU – druk, 2009, 392p.
4. Pat No19551. Ukraïna MPK (2006) S23S8,02 Sposib kombinovanoï lazerno-himiko-termichnoï obrobki materialiv. , M.V. Kindrachuk, L.F. Golovko, V.M. Pisarenko, N.V. Ishchuk, Zayav. 04.07.2006. NoS23S 8,02 Opubl. 15.12.2006, byul. No12.
5. Pat. 25412 Ukraïna, MPK (2006) S23S 8,02. Sposib otrimannya znosostijkih diskretnih azotovanih shariv , M.V. Kindrachuk, N.V. Ishchuk, V.M. Pisarenko, L.F. Golovko, M.P. YAhya, - Nou 2007 03002; Zayavl. 22.03.07, opubl. 10.08.07, Byul. No12, 5p.
6. Hishimoto T. Two-sten Cr and Al diffusion on TiAl at high temperatures, T. Hishimoto, T. Jzumi, P. Hayashi, T. Narita ,, Intermetalliep, 2003. No11. R. 225 – 235.
7. Hizhnyak V.G. Budova ta znosostijkist karbidnih i nitridnih pokrittiv titanu, vanadiyu ta hromu na stali U8 , V.G. Hizhnyak, N.A. Kurilo, M.M. Shahrajchuk ,, Naukovi visti NTUU «KPI», 2007. No3, P. 105 – 109.