

УДК 621.793

О.Б. Сорока, к.т.н., с.н.с.

ІПМіц ім. Г.С. Писаренко НАН України

ВПЛИВ АЗОТУВАННЯ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СИСТЕМИ ОСНОВА–PVD-ПОКРИТТЯ

Представлено експериментальні результати дослідження залишкових напружень в азотованих шарах сталі 30ХГСА та приповерхневих шарах дуплексної системи азотована основа–PVD-покриття та порівняльні результати чисельного дослідження дотичних напружень на поверхні адгезійного контакту основа Р6М5–PVD-покриття та азотована основа–PVD-покриття при нормальному навантаженні. Показано переваги дуплексних систем з точки зору напружено-деформованого стану.

Вступ. Синергетичні властивості навантажених поверхневих шарів використовуються в технологіях, що реалізуються за допомогою двох (дуплексні) або навіть трьох (триплексні) різних методів нанесення покриттів, які слідує один за одним у технологічному процесі. Такі комбіновані процеси широко використовуються при формуванні зносостійких шарів на поверхні різального інструменту та деталей фрикційного контакту. Типовий приклад дуплексної технології – нанесення вакуум-плазмових (PVD) покриттів на попередньо азотовані сталі [1]. У роботі [2] показано, що азотування з подальшим нанесенням покриттів TiN та (TiAl)N збільшує несучу здатність та стійкість до абразивного зношування. В дослідженні [3] зазначено, що покриття TiN/Ti(CN), нанесене на азотовану сталеву поверхню, дозволяє підвищити стійкість до ерозійного зношування. Авторами [4] підкреслюється, що використання дуплексної обробки знижує вірогідність пластичної деформації основи в умовах контактного навантаження і забезпечує, таким чином, навантажувальну здатність системи основа–покриття. Покращання абразивного зношування при комбінованій обробці високолегованої сталі азотуванням з подальшим нанесенням PVD-покриття–TiN зазначається в [5].

Мета. Розвиток процесів комбінованої обробки спричинив інтерес до її обґрунтування, з точки зору аналізу напружено-деформованого стану (НДС), в системі азотований шар–PVD-покриття. Це дозволило сформулювати мету роботи: дослідження

впливу попередньої обробки азотуванням на НДС в системі основа–PVD-покриття.

Аналіз останніх досліджень. По-перше, добре відомо, що залишкові напруження стиску підвищують експлуатаційні характеристики робочих поверхонь. Разом з тим, високий рівень залишкових напружень стиску у вакуум-плазмових покриттях викликає напруження розтягу (100–250 МПа) у приповерхневій зоні основи, що, в свою чергу, призводить до зменшення навантажувальної здатності системи основа–покриття [6]. Відомо також, що азотований шар характеризується наявністю залишкових напружень стиску, величина яких сягає до 1000 МПа [7, 8]. Доречно припустити, що в азотованій основі після нанесення PVD-покриття зменшаться але збережуться від'ємні залишкові напруження. Тому завдання полягає в тому, щоб дослідити залишкові напруження в азотованих шарах після формування PVD-покриттів.

По-друге, руйнування в системі основа–покриття залежить від властивостей основи. Наші попередні дослідження показали, що збільшення модуля пружності основи знижує напруження на поверхні адгезійного контакту основа–покриття [9]. Таким чином, наступне завдання – дослідити та порівняти напруженість поверхні адгезійного контакту азотований шар–PVD-покриття і незміцнена сталева основа–PVD-покриття.

Методи дослідження. Для дослідження залишкових напружень використовувалися зразки розміром $5 \times 5 \times 10$ мм зі сталі 30ХГСА. Поверхнєве зміцнення зразків здійснювалося за технологією газотермоциклічного іонного азотування (ГТЦ ІА) на устаткуванні ВПА-1 [10] за такими режимами: тиск реакційного газу $p = 250$ Па; температура процесу $T = 400; 600$ °С; склад реакційного газу – 95 % N_2 + 5 % C_3H_8 ; 90 % N_2 + 5 % C_3H_8 + 5 % Ar; 80 % N_2 + 5 % C_3H_8 + 15 % Ar; час обробки $t = 2,5$ год. Використовувалася попередня термообробка (гартування при 870–890 °С в оліві, відпускання при 510–570 °С, твердість 37–38 HRC). Покриття з нітриду титану TiN товщиною 6 мкм наносили за методом конденсації з плазмової фази в умовах іонного бомбардування поверхні на устаткуванні ННВ-6,6-ІІ1 (Булат-20) при підтримуванні постійної температури основи на рівні 480 °С. Визначення залишкових макронапружень проводилося на дифрактометрі ДРОН-4-13С з використанням Fe- $K_{\alpha 1}$ випромінення. Залишкові макронапруження визначалися за допомогою $\sin^2 \psi$ - методу.

Напружено-деформований стан у системі основа–покриття при нормальному навантаженні визначався методом чисельного моделювання в програмному комплексі MSC Visual NASTRAN for Windows.

Викладення основного матеріалу. На епюрах (рис. 1) залишкових напружень в азотованих шарах сталі 30ХГСА можна спостерігати, що при режимах азотування з попередньою термообробкою напруження стиску поступово зменшуються від максимального значення на поверхні до нульових значень на глибині, де закінчується дифузійний шар. При більших температурах процесу товщина азотованого шару збільшується, а рівень залишкових напружень на поверхні деталі зменшується.

Визначено також залишкові напруження на глибині 2 мкм від поверхні, азотованої з попередньою ТО при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ основи зі сталі 30ХГСА після ГТЦ ІА та формування на ній вакуум-плазмового покриття TiN товщиною 6 мкм.

Отримано, що залишкові напруження стиску в азотованому шарі на глибині 2 мкм становлять близько 670 МПа для основи, на якій сформовано PVD-покриття, що приблизно на 230 МПа менше, ніж для азотованої основи без покриття, величина залишкових напружень на тій самій глибині в якій сягає 900 МПа. Різниця 230 МПа у значеннях залишкових напружень відповідає величині напружень розтягу, які обумовлені формуванням PVD-покриття (рис. 2).

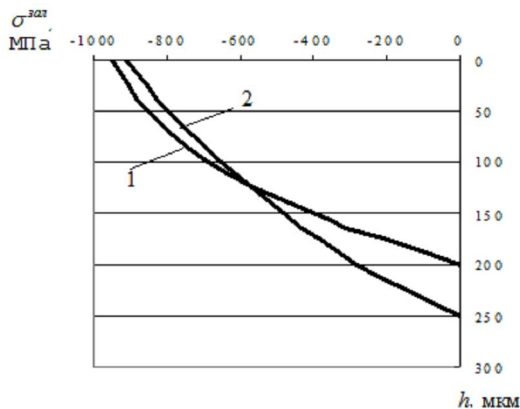


Рис. 1. Розподіл залишкових напружень за глибиною азотованого шару зразків зі сталі 30ХГСА після ГТЦ ІА – $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$

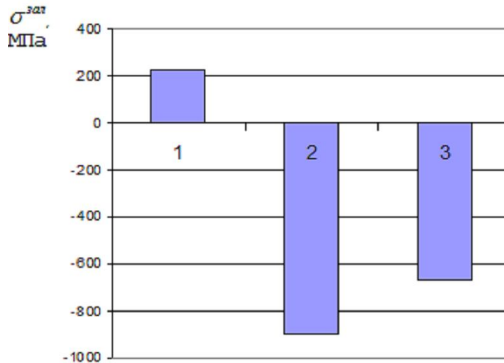


Рис. 2. Залишкові напруження в основі (сталі 30ХГСА) на глибині 2 мкм: 1 – на основу нанесено PVD-покриття; 2 – основа азотована на 250 мкм; 3 – на азотовану основу нанесено PVD-покриття

Такий результат дозволяє дійти висновку, що для композиції зміцнена основа–PVD-покриття, отриманої із використанням попередньої обробки основи за технологією ГТЦ ІА з подальшим формуванням вакуум-плазмового покриття, притаманні залишкові напруження стиску як у приповерхневих шарах основи, так і в покритті. Це вигідно відрізняє таку дуплексну композицію від системи незміцнена основа–PVD-покриття, в якій залишковим напруженням стиску в покритті відповідають залишкові напруження розтягу в приповерхневих шарах основи.

Розраховано максимальні дотичні напруження в зоні адгезійного контакту покриття з основою при нормальному розподіленому навантаженні q ділянки вакуум-плазмового покриття TiN ($E = 4,4$ ГПа), яка має форму квадрата зі стороною $D = 40$ мкм та товщиною h , що варіювалася в межах 2–16 мкм (рис. 3) на різних основах: сталь Р6М5 ($E = 2,3$ ГПа), азотована сталь ($E = 4,0$ ГПа), твердий сплав ВК8 ($E = 7,2$ ГПа). Аналіз залежностей (рис. 3) показав, що максимальні дотичні напруження τ на поверхні адгезійного контакту покриття з основою зі зміцненої азотуванням сталі менші, ніж у покритті на незміцненій основі, що наближає адгезійну стійкість покриттів на сталевих основах до стійкості покриттів на основах із твердих сплавів.

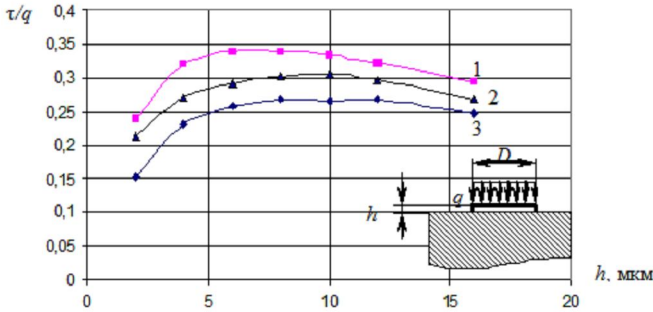


Рис. 3. Залежність дотичних напружень на поверхні адгезійного контакту від товщини покриття для основи: сталь (1), азотована сталь (2), ВК8 (3) при нормальному навантаженні

Висновки. Проведені дослідження дозволяють обґрунтувати переваги використання дуплексних покриттів з точки зору створення залишкових напружень стиску в поверхневих і приповерхневих шарах основа–покриття та мінімізації напружень на поверхні адгезійного контакту від нормального навантаження.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев и др. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. – 235 с.
2. Batista J.C.A. Micro-abrasive wear of PVD duplex and single-layered coatings / Batista J.C.A., Matthews A., Godoy C. // Surface and Coatings Technology. – 2001, № 142–144. – С. 1137–1143.
3. Thermal stability and wear resistance of hard TiN/TiCN coatings on plasma nitrided PH15-5 steel / I.Zukerman, A.Raveh, H.Kalman et al. // Wear. – 2007, № 263. – С. 1249–1252.
4. Sun Y. Finite element analysis of plastic deformation of various TiN coating/substrate systems under normal contact with a rigid sphere / Y.Sun, A.Bloyce, T.Bell // Thin Solid Films. – 1995, № 271. – С. 122–131.
5. Process technological aspects of the production and properties of in situ combined plasma-nitrided and PVD hard-coated high alloy tool steels / K.Höck, G.Leonhardt, B.Bücken et al. // Surface and Coatings Technology. – 1995. – 74–75, Part 1. – С. 339–344.

6. *Denkena B.* Influence of the Residual Stress State on Cohesive Damage of PVD-Coated Carbide Cutting / *B.Denkena, B.Breidenstein* // *Advanced Engineering Materials*. – 2008. – 10, № 7. – С. 613–616.
7. Теория и технология азотирования / *Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.И. Шниц и др.* – М. : Металлургия, 1991. – 320 с.
8. *Каплун В.Г.* Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах : автореф. дис. ... докт. техн. наук / *В.Г. Каплун*. – К., 1991.
9. *Сорока Е.Б.* Влияние параметров системы «основа–покрытие» на напряженно–деформированное состояние рабочих поверхностей инструментальных материалов / *Е.Б. Сорока* // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем* : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – Вип. 23. – С. 102–108.
10. Характеристики матеріалів авіаційної техніки після газотермоциклічного іонного азотування / *А.В. Рутковський, Е.Б. Сорока, А.К. Скуратівський та ін.* // *Проблеми тертя та зношування* : зб. наук. праць. – 2007. – Вип. 48. – С. 101–110.

СОРОКА Олена Борисівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України.

Наукові інтереси:

- міцність матеріалів;
- напружено-деформований стан виробів з покриттям.

Подано 23.09.2010

