

О.Б. Сорока¹, канд.техн.наук, В.А. Тітов², д-р.техн.наук., проф., Б.А. Ляшенко¹, д-р.техн.наук., проф.,
О.В. Герасимова³, інж.

1 – Інститут проблем міцності НАН України, м. Київ, Україна

2 – НТУ України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

3 – Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ДУПЛЕКСНИХ ПОКРИТТІВ НА ШТАМПОВОМУ ІНСТРУМЕНТІ

Обосновано применение дуплексных покрытий с точки зрения создания остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях основа-покрытие. Выполнена минимизация напряжений на поверхности адгезионного контакта в зависимости от нормального нагружения. Показано, что применение дуплексной обработки снижает вероятность пластической деформации основы инструмента в условиях контактного нагружения и обеспечивает стойкость системы основа-покрытие.

The application of duplex coatings in terms of creating residual compressive stresses in the surface layers of the base-coating. The minimization of stress the stresses on the surface of the adhesive contact, depending on the normal load. It is shown that the application of duplex treatment reduces the likelihood plastic deformation tool base in conditions of contact loading and ensures durability of the system base-coating.

Вступ. Використання синергетичних властивостей навантажених поверхневих шарів знайшло втілення в технологіях, які реалізуються за допомогою двох (дуплексні покриття) або, навіть, трьох (триплексні покриття), різних методів нанесення покриттів, які слідуєть один за одним в технологічному процесі. Такі комбіновані процеси знаходять широке застосування 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]. В 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 застосування дуплексної обробки знижує вірогідність пластичної деформації основи в умовах контактного навантаження і забезпечує, таким чином, навантажувальну здатність системи основа-покриття. Покращення 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.

Задачі дослідження. По-перше, добре відомо, що залишкові напруження стиску підвищують експлуатаційні характеристики робочих поверхонь. Разом з тим, високий рівень залишкових напружень стиску в вакуум-плазмових покриттях викликає напруження розтягу (100-250МПа) в 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 1000МПа [7, 8]. Доречно припустити, що в азотованій основі після нанесення PVD-покриття зменшаться але збережуться від'ємні залишкові напруження. Тому задача 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, наступна задача – дослідити та порівняти напруженість поверхні адгезійного контакту азотований шар - PVD-покриття і незміцнена сталева основа- PVD-покриття.

Методи дослідження. Для дослідження залишкових напружень використовувались зразки розміром 5×5×10 мм зі сталі 30ХГСА. Поверхнєве зміцнення зразків здійснювалося за технологією газотермоциклічного іонного азотування (ГТЦ ІА) на устаткуванні ВПА-1 [10] за наступними режимами: тиск реакційного газу $p = 250$ Па; температура процесу $T = 400; 600$ °С; склад реакційного газу – 95%N₂ + 5% C₃H₈; 90%N₂ + 5%C₃H₈ + 5%Ar; 80%N₂ + 5%C₃H₈ + 15%Ar; час обробки $t = 2,5$ години. Застосовувалась попередня термообробка (гартування при 870...890°С у оливі, відпускання при 510...570°С, твердість 37...38 HRC). Покриття з нітриду титану TiN товщиною бмкм наносили на методом конденсації з плазмової фази в умовах іонного бомбардування поверхні на устаткуванні ННВ-6,6-ІІ (Булат-20) при підтримуванні постійної температури основи на рівні 480°С. Визначення залишкових макронапружень проводилося на дифрактометрі ДРОН-4-13С із використанням Fe-K_{α1} випромінювання. Залишкові макронапруження визначалися за допомогою $\sin^2 \psi$ -методу.

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

Результати досліджень. 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.

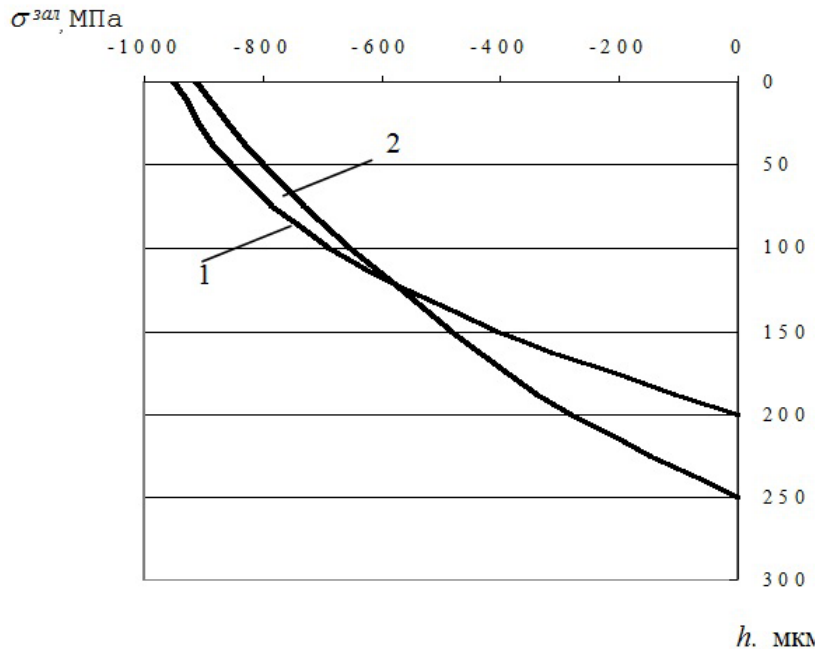


Рис. 1. Розподіл залишкових напружень по глибині азотованого шару зразків зі сталі 30ХГСА після ГТЦ ІА1 – Т= 400°C; 2 – Т= 600°C

Визначено також залишкові напруження на глибині 2мкм від поверхні азотованої з попередньою ТО при Т= 600°C основи зі сталі 30ХГСА після ГТЦ ІА після формування на ній вакуум-плазмового покриття TiN товщиною бмкм.

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

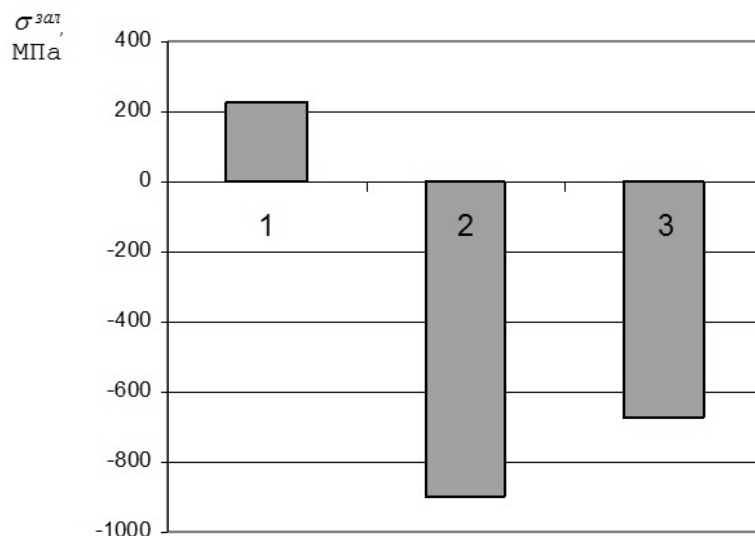


Рис. 2. Залишкові напруження в основі (сталі 30ХГСА) на глибині 2мкм: 1 - на основу нанесено PVD-покриття; 2 - основа азотована на 250мкм; 3 - на азотовану основу нанесено PVD-покриття

Такий результат дозволяє дійти висновку, що для композиції "зміцнена основа - PVD покриття", отриманої із застосуванням попередньої обробки основи за технологією ГТЦ ІА з подальшим формуванням вакуум-плазмового покриття, притаманні залишкові напруження стиску як в 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 з стороною $D=40$ мкм та товщиною h , яка варіювалась 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 із зміцненої азотуванням сталі менші, ніж в покритті на незміцненій основі, що наближає адгезійну стійкість покриттів на сталевих основах до стійкості покриттів на основах з твердих сплавів.

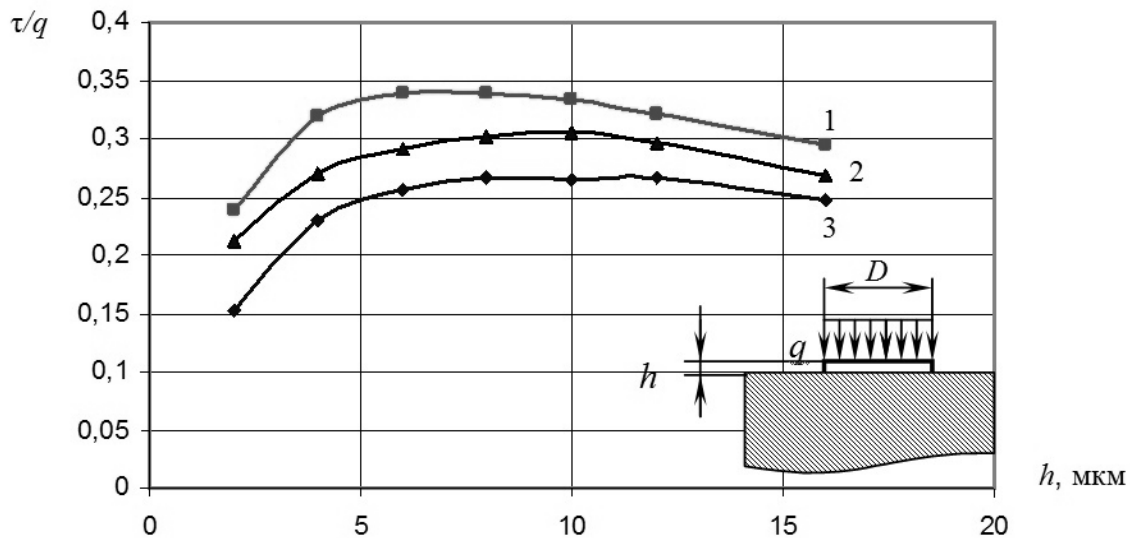


Рис. 3. Залежність дотичних напружень на поверхні адгезійного контакту від товщини покриття для основи: сталь (1), азотована сталь (2), ВК8 (3) при нормальному навантаженні

Висновки.

Проведені дослідження дозволяють обґрунтувати переваги застосування 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.

Список літератури

1. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 235 с.
2. Batista J.C.A, Matthews A. and Godoy C. Micro-abrasive wear of PVD duplex and single-layered coatings// Surface and Coatings Technology.-2001, № 142-144. - С.1137-1143.
3. Zukerman I, Raveh A., Kalman H., Klemberg J.E. Sapielha O. and Martinu L., Thermal stability and wear resistance of hard TiN/TiCN coatings on plasma nitrided PH15-5 steel // Wear-2007, № 263. -С.1249-1252.
4. Sun Y., Bloyce A., Bell T., Finite element analysis of plastic deformation of various TiN coating/substrate systems under normal contact with a rigid sphere // Thin Solid Films.- 1995, №271.-С.122-131.
5. K.Höck, G.Leonhardt, B.Bücker, H.-J.Spies and B.Larisch. Process technological aspects of the production and properties of in situ combined plasma-nitrided and PVD hard-coated high alloy tool steels // Surface and Coatings Technology -1995 – 74-75, Part 1. – С.339-344.
6. Denkena B. and Breidenstein B. Influence of the Residual Stress State on Cohesive Damage of PVD-Coated Carbide Cutting // Advanced Engineering Materials. –2008. –10, №7. –С.613-616.
7. Теория и технология азотирования / Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.И., Бёмер З. – М.: Металлургия, 1991, 320 с.
8. В.Г.Каплун. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах: Автореф. дис. докт. техн. наук, 1991.
9. Сорока Е.Б. Влияние параметров системы «основа-покрытие» на напряженно-деформированное состояние рабочих поверхностей инструментальных материалов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. 2008. - Вип.23. -С.102-108.
10. Рутковский А.В., Сорока О.Б., Скурятівський А.К., Радько О.В. Характеристики матеріалів авіаційної техніки після газотермоциклічного іонного азотування // Проблеми тертя та зношування, 2007.-Вип.48.- С.101-110.