

Оцінка залишкових напружень в PVD-покриттях. Повідомлення 2

О. Б. Сорока^а, С. А. Клименко^б, М. Ю. Копейкіна^б

^а Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

^б Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

У вакуум-плазмових покриттях із нітридів титану, алюмінію та ніобію методом гнучкого зразка визначено величини залишкових напружень. Запропоновано експериментально-розрахункову методику виділення структурної та термічної складових залишкових напружень, що дозволяє визначати коефіцієнти термічного розширення матеріалів покриттів та загальний рівень залишкових напружень у покриттях на основі з будь-якого матеріалу. Встановлено залежність залишкових напружень від шорсткості поверхні основи. Показано можливість врегулювання рівня залишкових напружень у покриттях шляхом формування їх дискретної топографії.

Ключові слова: вакуум-плазмові покриття, залишкові напруження, шорсткість, термічна та структурна складові залишкових напружень, дискретна топографія.

Вступ. Вакуум-плазмові PVD-покриття на основі нітридів характеризуються високою твердістю і хорошою адгезією з основою. Завдяки значній зносо- та термостійкості вони широко використовуються для підвищення експлуатаційних властивостей різальних і деформуючих інструментів, деталей пар тертя, лопаток газотурбінних двигунів (ГТД). Аналіз наведених у літературних джерелах даних показує, що для цих покриттів характерні значні залишкові напруження стиску, рівень яких сягає від сотень мегапаскалів до півтора десятка гігапаскалей [1–6]. Виникнення залишкових напружень зумовлене як різницею коефіцієнтів температурного розширення матеріалів основи і покриття (термічна складова), так і взаємодією між зростаючими кристалітами (структурна складова) [1, 7].

Авторами [2, 8] стверджується, що напруження в покритті, зумовлені структурною компонентою (напруження зростання покриття), не залежать від матеріалу основи, а різниця між рівнем залишкових напружень у покриттях, нанесених на різні основи, залежить від термічної компоненти. Саме з високим рівнем залишкових напружень стиску пов'язують тріщиностійкість, зносостійкість та корозійну стійкість поверхонь, модифікованих вакуум-плазмовими покриттями [9–11]. Як зазначається в [12], високий рівень залишкових напружень стиску стримує процеси тріщиноутворення в покриттях при експлуатації різального інструменту, особливо в умовах переривчастого різання. Наявність значних залишкових напружень стиску позитивно впливає на такі характеристики, як границя витривалості [13], границя текучості [14]. Разом із тим завдяки високому рівню залишкових напружень стиску покриття стають більш крихкими, що може призвести до їх спонтанного відшарування ще до початку експлуатації або до порушення зчеплення основи з покриттям у процесі експлуатації [15–20].

У зв'язку з цим необхідно визначити можливості щодо врегулювання рівня залишкових напружень стиску в покриттях. Досягти цього можна шляхом удосконалення технології нанесення покриттів та створення відповідної архітектури поверхні. До розповсюджених методів врегулювання величини залишкових напружень відносять створення систем із проміжними та буферними прошарками, багатошарових покриттів, у тому числі мікро-, наноструктурних та нан шарових [18, 21–29]. Досить простим і доступним з точки зору практичної реалізації є метод формування покриттів дискретної топографії з підвищеними характеристиками адгезійної та когезійної міцності [30–32]. Раніше [33] було показано, що створення дискретної топографії дозволяє також зменшити рівень залишкових напружень у покритті.

Метою роботи є узагальнення результатів досліджень залишкових напружень у PVD-покриттях, виявлення природи та чинників, від яких залежить рівень напружень, а також встановлення шляхів його врегулювання.

Нанесення покриттів. Покриття з нітриду титану TiN ($E_{\text{п}} = 4,4 \cdot 10^5$ МПа [34]) і подвійного нітриду титану та алюмінію $(\text{Ti, Al})\text{N}$ ($E_{\text{п}} = 4,2 \cdot 10^5$ МПа [22]) різної товщини наносили на поліровані зразки (розмір $120 \times 5 \times 0,5$ мм) з швидкорізальної сталі Р6М5 ($E_0 = 2,3 \cdot 10^5$ МПа) методом конденсації з плазмової фази в умовах іонного бомбардування поверхні на устаткуванні ННВ-6,6-И1 (Булат-20) при підтримуванні постійної температури основи на рівні 480 і 520°C відповідно. Також на зразки зі сталі ХВГ ($E_0 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа) при температурі 420°C наносили NbN-покриття ($E_{\text{п}} = 4,0 \cdot 10^5$ МПа) [35] товщиною 5 мкм. Опорний від'ємний потенціал основи складає -200 В. Із метою визначення залежності величини залишкових напружень від шорсткості поверхні основи TiN -покриття наносили на зразки зі сталі Р6М5 після різних видів обробки поверхні: чорнового і чистового шліфування та полірування. Параметри шорсткості поверхні вимірювали за допомогою профілографа моделі MarSurf PS1.

Процес нанесення покриттів дискретного типу реалізовувався за допомогою “масок”, що являли собою сітчасті екрани, виготовлені з ніхромового дроту [32, 33]. У залежності від параметрів “маски” (діаметр дроту та розмір чарунки) отримували покриття не лише з різними розмірами дискретних ділянок, а й з різною щільністю ψ (відношення загальної площі дискретних ділянок до площі основи).

Визначення залишкових напружень у покриттях. Залишкові напруження у покриттях визначали найбільш простим і доступним методом гнучкого зразка. Суть методу полягає в тому, що тонка пластина (довга і вузька), на яку нанесено покриття, під дією залишкових напружень деформується у вигляді дуги кола. Прогин або радіус кривизни деформованого зразка дозволяє розрахувати залишкові напруження [36, 37]. Перевагою такого експериментально-розрахункового методу є те, що напруження визначаються за кінцевим результатом, тобто їх походження не має значення. При визначенні напружень припускають, що вони рівномірно розподілені по перерізу покриття (це виправдано за умови малої товщини покриття). Перед нанесенням покриття зразок у вигляді тонкої пластини закріплювали в кондукторі з двома

затискувачами. Після нанесення покриття затискувачі кондуктора знімали, зразок деформувався і вимірювали прогин f . Потім за формулою, яка базується на рівнянні пружної лінії для балки, визначали залишкові напруження $\sigma_{\text{п}}^{\text{зал}}$ за залежністю [38]

$$\sigma_{\text{п}}^{\text{зал}} = \frac{32E_0 H_0^3 f}{3a^2 h_{\text{п}} (1 - \nu_0)(2H_0 + h_{\text{п}})}, \quad (1)$$

де $2H_0$, $h_{\text{п}}$ – товщини основи і покриття відповідно; E_0 , ν_0 – модуль пружності першого роду і коефіцієнт Пуассона матеріалу основи відповідно; f – прогин зразка; a – довжина зразка.

Для поділу напружень на структурну і температурну складові деформовані зразки нагрівали в муфельній печі до температури, що відповідає температурі нанесення покриття. Величину прогину фіксували за допомогою фотокамери Nikon Coolpix 7600, яка встановлювалась перед отвором печі, через термоміцне скло. Аналіз отриманих даних свідчить про зменшення прогину зразків у результаті їх нагрівання. Це, очевидно, пов'язано з релаксацією термічної складової залишкових напружень. Величини прогину зразків, що залишилися після нагрівання до температури нанесення покриття, відповідають залишковим напруженням структурного походження.

Залежності залишкових напружень стиску, розраховані за формулою (1) на основі вимірювання прогину f , від товщини покриття h на полірованій основі зі сталі Р6М5, представлено на рис. 1. Отримані дані показують, що для (Ti, Al)N- і TiN-покриттів характерні значні напруження стиску. Спостерігається зменшення рівня залишкових напружень зі зростанням товщини покриття, що узгоджується з фізичними уявленнями про формування PVD-покриттів (зменшення дефектності конденсату і вдосконалення структури наступних шарів покриття [39]).

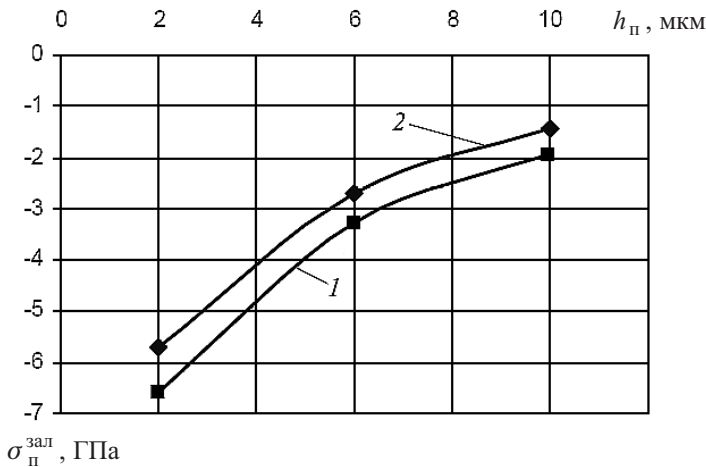


Рис. 1. Залежність залишкових напружень стиску $\sigma_{\text{п}}^{\text{зал}}$ від $h_{\text{п}}$: 1 – (Ti, Al)N-покриття; 2 – TiN-покриття.

Структурна та температурна складові залишкових напружень. При нагріванні зразків зі швидкорізальної сталі Р6М5 із (Ti, Al)N- і TiN-покриттями товщиною 6 мкм та зі сталі ХВГ із NbN-покриттям товщиною 5 мкм до температури їх нанесення спостерігається зменшення величини прогину на 28...30% вихідного значення. Оскільки значення залишкових напружень прямо пропорційні величинам прогину, приходимо до висновку, що 28...30% залишкових напружень визначаються термічною складовою, зумовленою різницею між коефіцієнтами температурного розширення (КТР) матеріалів основи і покриття. Так, для (Ti, Al)N-, TiN-, NbN-покриттів термічна складова становить $-0,97$, $-0,9$ і $-0,74$ ГПа відповідно, складова структурного походження, що дорівнює 68...71% загальної величини напружень, $-2,23$, $-1,7$ і $-1,82$ ГПа відповідно.

За допомогою отриманого результату, по-перше, існує можливість уточнити значення коефіцієнта температурного розширення матеріалу покриття. По-друге, виходячи з припущення щодо незалежності структурної складової залишкових напружень від основного матеріалу [2, 8], легко знайти загальну величину залишкових напружень для покриття заданої товщини на основі з будь-якого матеріалу як суму термічної та структурної складових. Так, якщо виникнення залишкових напружень у системі основа–покриття зумовлене різницею між коефіцієнтами температурного розширення матеріалів основи і покриття, нормальні залишкові напруження в покритті визначаються за формулою [40]

$$\sigma_{\text{п}}^{\text{зал}} = \frac{(\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{о}})\Delta T}{\frac{1 - \nu_{\text{п}}}{E_{\text{п}}} + \frac{1 - \nu_{\text{о}}}{E_{\text{о}}} \frac{h_{\text{п}}}{2H_{\text{о}}}}, \quad (2)$$

де $\alpha_{\text{п}}$, $\alpha_{\text{о}}$ – середні лінійні коефіцієнти температурного розширення матеріалів покриття й основи в інтервалі ΔT ; ΔT – різниця між температурою формування покриття і кімнатною; $E_{\text{п}}$, $\nu_{\text{п}}$ – модуль пружності першого роду і коефіцієнт Пуассона матеріалу покриття відповідно.

Отримавши значення термічних складових залишкових напружень та враховуючи, що КТР інструментальної сталі дорівнює $10,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, знаходимо КТР (Ti, Al)N-, TiN- і NbN-покриттів, які становлять відповідно $7,7 \cdot 10^{-6}$; $7,4 \cdot 10^{-6}$ і $6,95 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Важливо зазначити, що NbN-покриття рекомендується для підвищення експлуатаційних властивостей різального інструменту, який оснащено полікристалічними надтвердими матеріалами (ПНТМ) на основі кубічного нітриду бору (КНБ) [41, 42]. Покриття дозволяє мінімізувати адгезійну і хімічну взаємодію при точінні загартованих сталей, литих та напилених нікелевих сплавів, вибілених чавунів, внаслідок чого інтенсивність зношування такого інструменту зменшується в 1,25...1,30 раза порівняно з інструментом без покриття. Визначити величину залишкових напружень у покритті на зразку з ПНТМ методом гнучкого зразка неможливо. З урахуванням представлених вище результатів оцінити залишкові напруження у NbN-покритті, нанесеному на ПНТМ на основі КНБ, можна наступним чином (рис. 2,а).

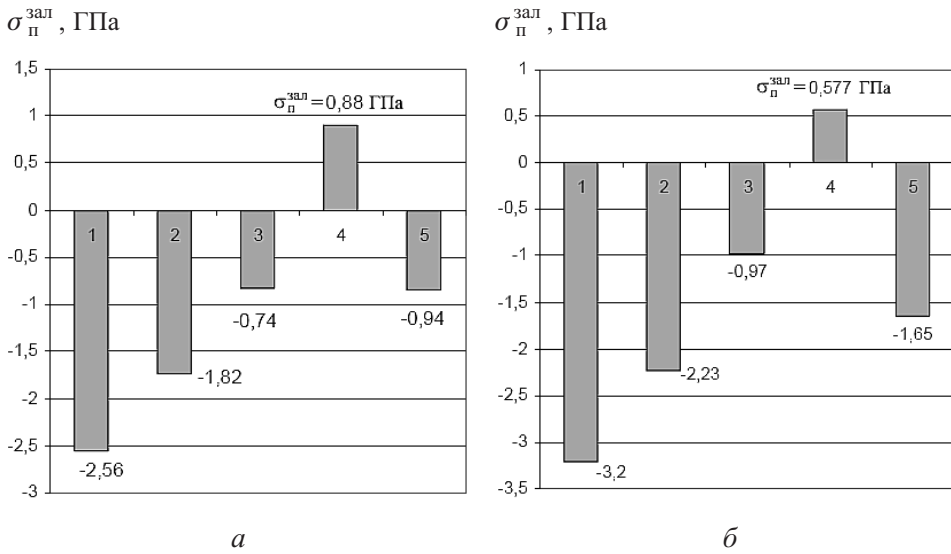


Рис. 2. Рівень залишкових напружень у NbN-покритті товщиною 5 мкм (а) та у (Ti, Al)N-покритті товщиною 6 мкм (б): 1 – сумарні залишкові напруження у сталевих зразках, отримані за залежністю (1); 2 – структурна складова залишкових напружень; 3 – складова залишкових напружень, зумовлена різницею між КТР сталі і покриття; 4 – складова залишкових напружень, зумовлена різницею між КТР матеріалів основи (ПНТМ (а), ВК8 (б)) і покриття; 5 – сумарні залишкові напруження у покриттях, нанесених на ПНТМ (а) та ВК8 (б).

Згідно з залежністю (2) з урахуванням того, що величини коефіцієнтів температурного розширення для NbN-покриття і КНБ становлять $6,95 \cdot 10^{-6}$ і $2,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ відповідно, одержимо, що температурна складова залишкових напружень додатна і дорівнює 0,88 ГПа. Якщо прийняти, що структурна складова залишкових напружень у покритті не залежить від матеріалу основи і складає $-1,82$ ГПа, можна визначити середню величину залишкових напружень у NbN-покритті, нанесеному на ПНТМ на основі КНБ, як суму структурної та температурної складових ($-0,94$ ГПа).

Аналогічно, враховуючи, що відомо загальне значення залишкових напружень у (Ti, Al)N-покритті на сталевому зразку, їх структурна і температурна складові, та, отримавши за залежністю (2) температурну складову залишкових напружень у цьому покритті на основі, наприклад, з вольфрамкобальтового твердого сплаву ВК8 ($\alpha_o = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), знаходимо загальну величину залишкових напружень у (Ti, Al)N-покритті на основі з твердого сплаву (рис. 2,б). Зазначимо, що відповідні розрахунки необхідно проводити для випадку, коли шорсткість поверхні сталевих пластин до нанесення покриття однакова з шорсткістю основи з твердого сплаву або ПНТМ.

Запропонований підхід дозволяє оцінити залежність між співвідношенням термічної $\sigma_{\text{п}}^{\text{т.зал}}$ і структурної $\sigma_{\text{п}}^{\text{с.зал}}$ складових залишкових напружень та відношенням коефіцієнтів температурного розширення матеріалів покриття і основи. Це зроблено на прикладі розрахунків для NbN-покриття товщиною 5 мкм на таких інструментальних матеріалах, як швидкорізальна сталь Р6М5, безвольфрамовий твердий сплав ТН-20 ($\alpha_o = (8,9...9,0) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [43]), сплав

ВК8, різальна кераміка силініт-Р ($\alpha_0 = (3,8...4,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [44]), ПНТМ на основі КНБ (рис. 3).

Аналіз залежності на рис. 3 показує, що ділянка кривої, яка знаходиться вище осі абсцис, відповідає основам (інструментальні сталі, сплав ТН-20), де значення температурної складової залишкових напружень у покритті від'ємне (напруження стиску), тобто збігається за знаком зі структурною складовою. Відповідно ділянка кривої, що розташована нижче осі абсцис, є геометричним місцем точок, які характеризують таку композицію основа–покриття, де залишкові напруження в покритті, зумовлені термічним чинником, є напруженнями розтягу (основи: вольфрамокобальтовий твердий сплав; силініт-Р; ПНТМ на основі КНБ). Точка перетину кривою осі абсцис відповідає нульовому значенню при рівності коефіцієнтів температурного розширення матеріалів основи та покриття.

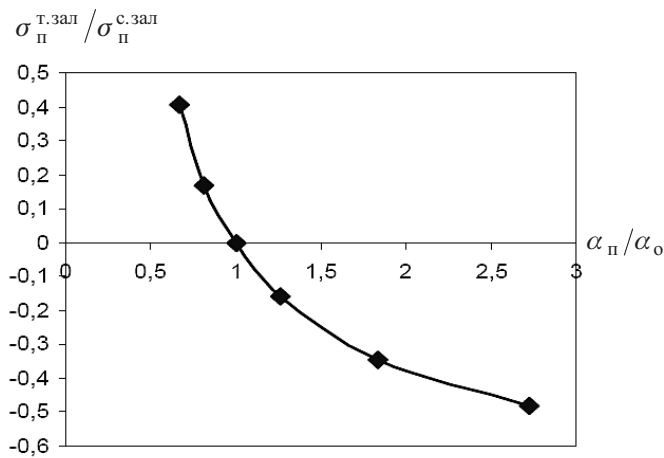


Рис. 3. Залежність відношення термічної складової залишкових напружень до структурної у NbN-покритті товщиною 5 мкм від α_p / α_o для різних матеріалів основи.

Отримані результати розрахунків свідчать, що з ростом відношення α_p / α_o знак залишкових напружень структурного характеру не змінюється, доля залишкових напружень стиску термічного характеру знижується, а розтягу – підвищується.

Таким чином, запропонований експериментально-розрахунковий метод дозволяє визначити величину залишкових напружень і їх складових у вакуум-плазмових покриттях при нанесенні на основу з будь-яких матеріалів (тверді сплави, різальна кераміка, полікристалічні надтверді матеріали інструментального призначення).

Залежність залишкових напружень від шорсткості основи. Враховуючи, що залишкові напруження у PVD-покриттях у значній мірі зумовлені структурною складовою, доречно зробити припущення про залежність їх рівня від шорсткості основи. На рис. 4 представлено залежність залишкових напружень стиску в TiN-покритті від шорсткості сталі Р6М5 після різних видів обробки основної поверхні: чорнового ($Ra0,895$) і чистового ($Ra0,253$) шліфування та полірування ($Ra0,07$).

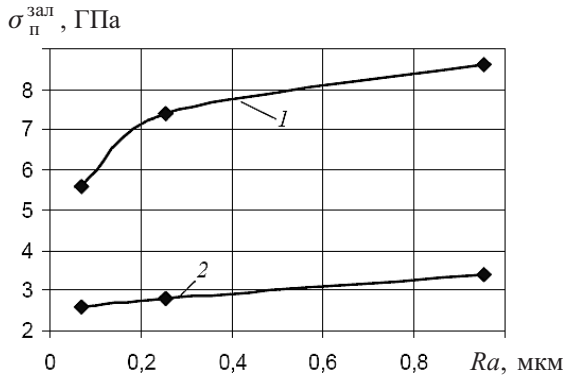


Рис. 4. Залежність абсолютних значень залишкових напружень стиску $\sigma_{II}^{\text{зал}}$ в TiN-покритті, що має різну товщину, від шорсткості основи: 1 – $h = 2$ мкм; 2 – $h = 6$ мкм.

Аналіз наведених залежностей показує, що зі зростанням шорсткості основи підвищується рівень залишкових напружень. Найбільш суттєво така залежність проявляється для більш тонких покриттів. Отримані результати узгоджуються з даними, наведеними в роботі [45].

Треба зазначити, що шорсткість поверхні з покриттям перевищує вихідну шорсткість основи. При цьому шорсткість поверхні залежить від технології попередньої обробки і рівня шорсткості основи. Так, шорсткість попередньо полірованої поверхні з TiN-покриттям товщиною 2 мкм збільшується приблизно в 2,5 раза порівняно з вихідною шорсткістю, після чистового шліфування вона підвищується приблизно в 1,3 раза, в той час як після чорнового шліфування практично не змінюється (рис. 5).

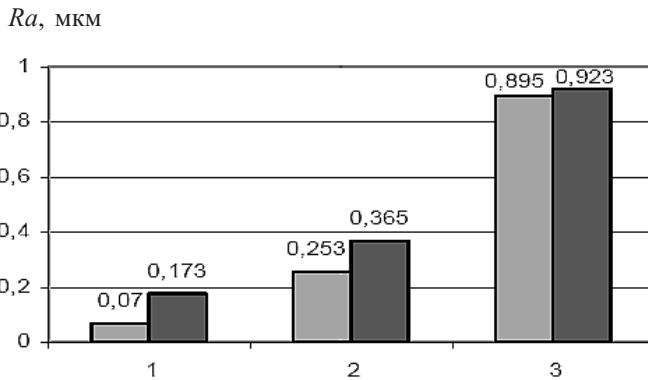


Рис. 5. Шорсткість поверхні зразків зі швидкорізальної сталі Р6М5, оброблених поліруванням (1), чистовим (2) та чорновим шліфуванням (3), до (світлі прямокутники) і після (темні прямокутники) нанесення TiN-покриття.

Зниження рівня залишкових напружень у покриттях шляхом зменшення шорсткості основи не завжди доцільно, оскільки характер обробки поверхні основи впливає на адгезійну міцність у системі основа–покриття [46], і низька шорсткість основи її погіршує. З урахуванням цього, а також того, що шорсткість поверхні тертя з покриттям (інструменту або деталі пари тертя) значно впливає на її довговічність [47], вивчити це питання необхідно окремо.

Залишкові напруження в покриттях дискретного типу. Аналіз значень залишкових напружень, отриманих експериментально-розрахунковим методом на основі вимірювання прогину деформованої пластини з подальшим розрахунком за формулою (1), показує, що в (Ti, Al)N-покриттях дискретного типу порівняно із суцільними покриттями спостерігається зниження залишкових напружень зі зменшенням розмірів дискретних ділянок (рис. 6). Необхідно зазначити, що наведені результати отримані для покриттів дискретного типу з однаковою щільністю ($\psi = 57\%$), що свідчить про релаксацію напружень у покритті дискретної топографії, а не лише про зменшення прогину зразка за рахунок зменшення площі, в межах якої діють напруження. Зі зростанням товщини покриттів знижується вплив розміру дискретної ділянки на величини залишкових напружень стиску. Чим менший розмір дискретної ділянки, тим менший вплив товщини покриттів на величини залишкових напружень.

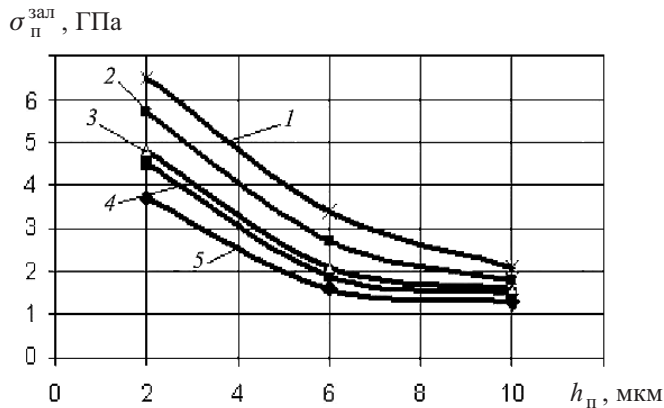


Рис. 6. Залежність абсолютних значень залишкових напружень стиску $\sigma_p^{\text{зал}}$ від товщини покриття h_p для суцільного (1) та дискретного типу з розмірами ділянок 0,25 × 0,25 (2), 0,1 × 0,1 (3), 0,08 × 0,08 (4) і 0,04 × 0,04 мм (5).

Таким чином, зменшення розмірів дискретних ділянок покриття при збереженні його щільності дозволяє обмежити залишкові напруження стиску.

Висновки

1. Для покриттів, сформованих методами PVD, характерні значні залишкові напруження стиску, обумовлені двома механізмами: температурним і структурним. На значення залишкових напружень стиску впливають склад покриття та його товщина. Зі зростанням товщини покриття рівень напружень зменшується.

2. Запропоновано підхід, що дає можливість визначати значення коефіцієнтів термічного розширення матеріалу покриттів, величину залишкових напружень і їх складових у вакуум-плазмових покриттях у випадку нанесення на основу з різних матеріалів, наприклад на тверді сплави та полікристалічні надтверді матеріали інструментального призначення.

3. Встановлено, що зі зростанням шорсткості основи підвищується рівень залишкових напружень у покритті.

4. Показано, що знизити рівень залишкових напружень можна шляхом створення дискретної топографії поверхні. Величина залишкових напружень у покриттях дискретного типу залежить від розміру дискретних ділянок. Це дозволяє забезпечити необхідний рівень залишкових напружень на проектвальній та технологічній стадіях.

Резюме

В вакуум-плазменных покриттях из нитридов титана, алюминия и ниобия методом гибкого образца определены величины остаточных напряжений. Предложена экспериментально-расчетная методика выделения структурной и термической составляющих остаточных напряжений, которая позволяет определить коэффициенты термического расширения материалов покрытий и общий уровень остаточных напряжений в покрытиях на основе из любого материала. Установлена зависимость остаточных напряжений от шероховатости поверхности основы. Показана возможность урегулирования уровня остаточных напряжений в покрытиях путем формирования дискретной топографии поверхности.

1. Внуков Ю. Н., Марков А. А., Лаврова Л. В., Бердышев Н. Ю. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Под общ. ред. Ю. Н. Внукова. – Киев: Техніка, 1992. – 143 с.
2. Vijgen R. O. E. and Dautzenderg J. H. Mechanical measurement of the residual stress in thin PVD films // *Thin Solid Films*. – 1995. – **270**, No. 2. – P. 264 – 269.
3. *US Pat. 5075181*. High Hardness/High Compressive Stress Multilayer Coated Tool / D. T. Quinto, J. H. Kaufmann. – Publ. 24.12.91.
4. Carvalho N. J. M., Zoestbergen E., Kooi B. J., and De Hosson J.Th. M. Stress analysis and microstructure of PVD monolayer TiN and multilayer TiN/(Ti, Al)N coatings // *Thin Solid Films*. – 2003. – **429**, No. 1-2. – P. 179 – 189.
5. Oettel H., Wiedemann R., and Preissler S. Residual stresses in nitride hard coatings prepared by magnetron sputtering and arc evaporation // *Surface Coatings Technol.* – 1995. – **74-75**, Pt. 1. – P. 273 – 278.
6. Leoni M., Scardi P., Rossi S., et al. (Ti, Cr)N and Ti/TiN PVD coatings on 304 stainless steel substrates: Texture and residual stress // *Thin Solid Films*. – 1999. – **345**, No. 2. – P. 263 – 269.
7. Sheng-Sheng Zhao, Hao Du, Wei-Gang Hua, et al. The depth distribution of residual stresses in (Ti, Al)N films: Measurement and analysis // *J. Mater. Res.* – 2007. – **22**, No. 10. – P. 2659 – 2662.
8. Falub C. V., Karimi A., Ante M., and Kalls W. Interdependence between stress and texture in arc evaporated Ti–Al–N thin films // *Surface Coatings Technol.* – 2007. – **201**, No. 12. – P. 5891 – 5898.
9. Lamastra F. R., Leonardi F., Montanan R., et al. X-ray residual stress analysis on CrN/Cr/CrN multilayer PVD coatings deposited on different steel substrates // *Ibid.* – 2006. – **200**, No. 22-23. – P. 6172 – 6175.

10. Keller D. A., Hirsch T., Hora P., und Tomala V. Einfluss der Eigenspannungen in Schichtverbundwerkstoffen bei Trockenreibung // *Blech, Rohre, Profile*. – 1993. – **40**, No. 11. – S. 834 – 842.
11. Klocke F. and Krieg T. Coated tools for metal cutting – features and applications // *CIRP Ann.* – 1999. – **48**, No. 2. – P. 515 – 525.
12. Табаков В. П., Смирнов М. Ю., Циркин А. В. Механизм разрушения износостойких покрытий режущего инструмента в процессе резания // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2006. – № 6. – С. 41 – 45.
13. Трапезон А. Г., Ляшенко Б. А., Рутковский А. В. О влиянии вакуумных покрытий на сопротивление усталости технического титана // *Пробл. прочности*. – 1995. – № 11-12. – С. 32 – 40.
14. Рутковский А. В., Ляшенко Б. А., Гонкало А. П., Сорока Е. Б. Об упрочняющей роли вакуум-плазменных покрытий // *Там же*. – 1999. – № 6. – С. 123 – 126.
15. Rickerby D. S. Internal stress and adherence of titanium nitride coatings // *J. Vacuum Sci. Technol.* – 1986. – **4**, No. 6. – P. 2809 – 2814.
16. Choi H. C. and Kim K. S. Analysis of the spontaneous interfacial decohesion of a thin surface film // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1992. – **40**, No. 1. – P. 75 – 103.
17. Rickerby D. S. and Newbery R. B. Structure, properties and applications of TiN coatings produced by sputter ion plating // *Vacuum*. – 1988. – **38**, No. 3. – P. 161 – 166.
18. Rossi S., Fedrizzi L., Leoni M., et al. (Ti, Cr)N and Ti/TiN PVD coatings on 304 stainless steel substrates: wear-corrosion behaviour // *Thin Solid Films*. – 1999. – **350**, No. 1-2. – P. 161 – 167.
19. Kamiya S., Nagasawa H., Yamanobe K., and Saka M. A comparative study of the mechanical strength of chemical vapor-deposited diamond and physical vapor-deposited hard coatings // *Ibid.* – 2005. – **473**, No. 1. – P. 123 – 131.
20. Laukkanen A., Holmberg K., Koskinen J., et al. Tribological contact analysis of a ball sliding on a flat coating surface. Pt. III: Fracture toughness calculation and influence of residual stresses // *Surface Coatings Technol.* – 2006. – **200**, No. 12-13. – P. 3824 – 3844.
21. Bemporad E., Sebastiani M., Pecchio C., and Rossi S. High thickness Ti/TiN multilayer thin coatings for wear resistant applications // *Ibid.* – 2006. – **201**, No. 6. – P. 2155 – 2165.
22. Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 235 с.
23. Верецака А. С., Карпушевски Б., Дюбнер Л. Г. Анализ основных аспектов проблемы применения многослойно-композиционных нано-структурированных функциональных покрытий для режущего инструмента // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – Вип. 2. – С. 87 – 100.
24. Bromark M., Larson M., Hedenqvist P., and Hogmark S. Wear of Ti/TiN multilayer coatings // *Surface Coating Technol.* – 1997. – **90**, No. 3. – P. 217 – 223.

25. *Castanho J. M. and Vieira M. T.* Effect of ductile layers in mechanical behaviour of TiAlN thin coatings // *J. Mater. Proc. Technol.* – 2003. – **143-144**, No. 1. – P. 352 – 357.
26. *Gerth J. and Wiklund U.* The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel // *Wear.* – 2008. – **264**, No. 9-10. – P. 885 – 892.
27. *Kim G. S., Lee S. Y., Hahn J. H., et al.* Effects of the thickness of Ti buffer layer on the mechanical properties of TiN coatings // *Surface Coatings Technol.* – 2002. – **171**, No. 1-3. – P. 83 – 90.
28. *Ляшенко Б. А., Рутковский А. В., Сорока Е. Б., Липинская Н. В.* О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях // *Пробл. прочности.* – 2001. – № 4. – С. 62 – 68.
29. *Veprsek S. and Reiprich S.* A concept for the design of novel superhard coatings // *Thin Solid Films.* – 1995. – **268**, No. 1-2. – P. 64 – 71.
30. *Ляшенко Б. А., Мовшович А. Я., Долматов А. И.* Упрочняющие покрытия дискретной структуры // *Технол. системы.* – 2001. – № 4 (10). – С. 17 – 25.
31. *Пат. 68303 Україна, МПК С23 С14/32.* Спосіб нанесення зносостійких несущільних покриттів / В. А. Рутковський, В. С. Антонюк, В. М. Волкогон и др. – Чинний з 15.07.2004, Бюл. № 7.
32. *Соловых Е. К., Ляшенко Б. А., Рутковский А. В. и др.* Технологическое обеспечение вакуум-плазменных покрытий дискретной структуры // *Технол. системы.* – 2007. – № 2. – С. 22 – 27.
33. *Ляшенко Б. А., Антонюк В. С., Сорока Е. Б., Рутковский А. В.* О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях дискретной структуры // *Сверхтвердые материалы.* – 2005. – № 2. – С. 72 – 75.
34. *Sun Y., Bloyce A., and 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**, No. 1-2. – P. 122 – 131.
35. *Сорока О. Б., Конейкіна М. Ю., Антонюк В. С., Клименко С. А.* Оцінка залишкових напружень в вакуум-плазмових покриттях / // *Вісн. ЖДТУ. Техн. науки.* – 2007. – № 3 (42). – С. 41 – 45.
36. *А.с. 1675689 СССР, МКИ G 01 L1/00.* Способ определения остаточных напряжений в полосовых заготовках / Г. Л. Колмогоров. – Опубл. 19.10.88, Бюл. № 33.
37. *Хасуй А.* Техника напыления: Пер. с яп. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
38. *Методы* испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов / Под общ. ред. А. Т. Туманова. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 1.– 320 с.
39. *Valvoda V., Cerny R., Kuzel R., et al.* Dependence of microstructure of TiN coating on their thickness // *Thin Solid Films.* – 1988. – **158**, No. 2. – P. 225 – 232.

40. *Аппен А. А.* Основные физико-химические принципы создания жаростойких неорганических покрытий // Жаростойкие покрытия. – М.: Наука, 1965. – С. 3 – 54.
41. *Клименко С. А., Береснев В. М., Копейкина М. Ю., Гриценко В. И.* Слоистые вакуумно-дуговые покрытия Ti–NbN–Al₂O₃, Nb–NbN–Al₂O₃ на инструментах, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми материалами на основе кубического нитрида бора // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – 5, № 1-2. – С. 57 – 61.
42. *Копейкина М. Ю., Клименко С. А., Мельничук Ю. А., Береснев В. М.* Повышение работоспособности режущих инструментов, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, вакуумно-дуговыми покрытиями // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 5. – С. 87 – 97.
43. *Самойлов В. С., Эйхманс Э. Ф., Фальковский В. А. и др.* Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент: Справочник – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
44. *Гнесин Г. Г., Осипова И. И., Ронгаль Г. Д. и др.* Керамические инструментальные материалы. – Киев: Техніка, 1991. – 388 с.
45. *Attar F. and Johannesson T.* Adhesion evaluation of thin ceramic coatings on tool steel using the scratch testing technique // Surface Coatings Technol. – 1996. – 78, No. 1-3. – P. 87 – 102.
46. *Bouzakis K.-D., Michailidis N., Skordaris G., et al.* Effect on PVD coated cemented carbide inserts cutting performance of micro-blasting and lapping of their substrates // Ibid. – 2005. – 200, № 1-4. – P. 128 – 132.
47. *Суслов А. Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

Поступила 10. 03. 2009