

Оцінка залишкових напружень в PVD-покриттях. Повідомлення 1. Огляд

О. Б. Сорока

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

Проведено огляд результатів досліджень залишкових напружень у вакуум-плазмових покриттях, отриманих методами фізичного осадження. Проаналізовано дані щодо характеру залишкових напружень та фактори, які впливають на їх величину і розподіл. Розглянуто роботи, в яких досліджується вплив залишкових напружень на фізико-механічні характеристики системи основа–покриття. Зроблено висновки щодо подальшого вивчення залишкових напружень у PVD-покриттях та вдосконалення управління їхнім рівнем.

Ключові слова: вакуум-плазмові покриття, залишкові напруження, температура і структурна складові напружень, опорний потенціал, проміжний і буферний прошарки, багатошарове покриття, наноструктурне і наношарове покриття, покриття дискретного типу.

Вступ. Однією з особливостей модифікованих поверхневих шарів конструкційних матеріалів є виникнення в них залишкових напружень. Залишкові напруження в функціональних покриттях впливають на робочі характеристики та довговічність деталей і інструменту з покриттями, а також на характеристики міцності як самого покриття, так і системи основа–покриття. Врахування цих напружень є надзвичайно важливим, бо саме вони відіграють роль “таємного друга” або “ворога” в залежності від знака, розподілу та виду навантаження. Тому існує нагальна потреба у правильній оцінці рівня залишкових напружень, виявленні причин їх виникнення, з’ясуванні технологічних факторів та параметрів архітектури поверхні, що впливають на їх величину.

Використання покриттів, отриманих методом фізичного осадження (PVD), яке почалося ще в 60-х роках минулого століття, набуває подальшого розповсюдження, особливо для деталей та інструментів, які працюють в умовах значних навантажень і високих температур.

Метою роботи є огляд опублікованих досліджень, пов’язаних із визначенням фізичної природи і величини залишкових напружень в PVD-покриттях, виявленням характеристик процесу формування покриття і параметрів архітектури поверхні, які впливають на ці напруження, а також установленням залежності між параметрами міцності і зносостійкості в системі основа–покриття та рівнем залишкових напружень. Маємо надію, що такий огляд дозволить сформулювати задачі і шляхи наступних досліджень залишкових напружень в PVD-покриттях та віднайти методи формування такого “корисного” рівня величин цих напружень, який буде відповідати максимальним механічним властивостям.

Залишкові напруження в PVD-покриттях: значення та розподіл, фізична природа, залежність від технологічних параметрів. Виникнення залишкових напружень обумовлено різними чинниками: різницею коефіцієнтів температурного розширення матеріалів основи і покриття; наявністю

захоплених атомів газу; дефектністю конденсату тощо. Припущення відносно фізичної природи залишкових напружень в PVD-покриттях дещо різні. У роботі [1] рентгенографічним методом визначено, що значення залишкових напружень стиску в TiN-покриттях на основі сталі за кімнатної температури сягають -4 ГПа, за температури нанесення (475°C) вони знижуються до нуля і переходять у напруження розтягу зі зростанням температури, що свідчить про їх термічний характер. У результаті теоретичного розрахунку [2] температурних залишкових напружень у TiN-покриттях на основі нержавіючої сталі та нікелю отримано: $-1,9$ і $-1,22$ ГПа відповідно. Автори стверджують, що ці дані збігаються з одержаними експериментально-рентгенографічним методом.

Найбільш розповсюдженим і переконливим є твердження, що залишкові напруження в PVD-покриттях містять термічну та структурну складову [3–8]. Термічна складова залишкових напружень зумовлена різницею температурних коефіцієнтів розширення матеріалів основи та покриття: під час охолодження від температури нанесення до кімнатної покриття та основа набувають різних значень деформації, що призводить до виникнення залишкових напружень. Структурні напруження є наслідком процесу зростання покриття і зумовлені значною дефектністю конденсату. Авторами, які досліджували залишкові напруження в покриттях, сформованих PVD-методами, встановлено, що їх знак і величина залежать від умов нанесення: опорного потенціалу основи; сили струму дуги випаровувача; температури основи; тиску нітрогену у вакуумній камері. У роботі [3] показано, що при нанесенні покриття підвищується температура основи, що призводить до зменшення величини залишкових напружень. Автори пов'язують це зі збільшенням поверхневої рухомості атомів, що сприяє утворенню більш досконалої структури покриття і зменшенню концентрації дефектів пакування. Цей факт також підтверджує превалюючий вплив структурного механізму виникнення залишкових напружень (за температурним механізмом напруження повинні зростати з підвищенням температури). Величина опорного потенціалу, як показано в [4, 9–11], зумовлює щільність та енергію іонного потоку, що впливає на розмір зерна, склад, морфологію, текстуру та шпаруватість покриття, а за цими параметрами, в свою чергу, визначається рівень залишкових напружень (рис. 1).

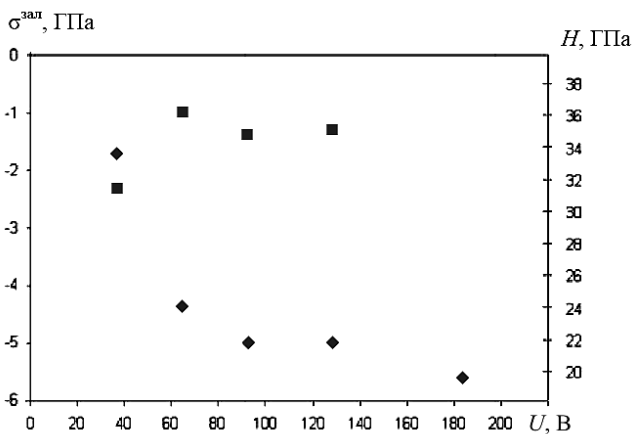


Рис. 1. Залежність залишкових напружень стиску σ^{3al} (◆) в TiAlN-покритті та його нанотвердості H (■) від абсолютного значення від'ємного опорного потенціалу U [11].

У роботі [12] зазначається, що залишкові напруження виникають внаслідок зменшення проміжків між зростаючими кристалітами. Там же здійснена спроба створення моделі виникнення залишкових напружень на основі твердження про те, що в умовах іонного бомбардування перехід від залишкових напружень розтягу до напружень стиску відбувається зі зростанням потоку іонів. Вводиться параметр, що характеризує відношення кількості іонів до кількості атомів, зростання якого супроводжується переходом від додатних значень залишкових напружень до від'ємних. Показано, що чим більшою є енергія іонного потоку, тим меншим буде відношення кількості іонів до кількості атомів, за якого напруження розтягу переходять у напруження стиску. Як правило, для PVD-покриттів характерні значні напруження стиску в площині покриття. У дослідженні [13] показано, що для Ti(CN)-покриттів напруження, виміряні методом вільного прогину тонкої пластини, становлять $-2 \dots -3$ ГПа, а температурні напруження – $10 \dots 20\%$ цієї величини. У роботах [6–8] також стверджується, що напруження в покриттях сягають до -5 ГПа і визначаються термічною і структурною складовими, величина і знак яких залежать від матеріалу основи і потенціалу зміщення. При цьому структурна складова превалює над температурною. Авторами [7, 14] стверджується, що напруження в покритті, зумовлені структурною компонентою, на відміну від зумовлених температурною складовою, не залежать від матеріалу основи і в той же час залежать від товщини покриття [15–17], зменшуючись з її зростанням.

Раніше [18] були отримані значення залишкових напружень в TiN-, Ti(CN)- та (Ti, Al)N-покриттях на титанових сплавах в інтервалі $-1 \dots -5$ ГПа. Зі зростанням товщини покриття вони зменшувались і їх величина залежала від параметрів режиму його нанесення (температура, тиск реакційного газу).

У роботі [19] встановлено, що залишкові напруження в нітридборному покритті, які в залежності від співвідношення в складі покриття атомів бору і нітрогену, склали від -5 до -1 ГПа. Залишкові напруження стиску для Ti(CN)-покриттів на зразку зі сплаву ніобію становили $-2 \dots -3$ ГПа [20]. За даними роботи [21] залишкові напруження стиску в TiN-покритті, отриманому реактивним розпиленням в умовах відсутності оксигену, становили $-7,8$ ГПа. Там же показано, що з підвищенням концентрації оксигену ці напруження в плівках TiO_xN_y знижуються і переходять у слабозротягуючі. Це зумовлено зменшенням параметра решітки внаслідок заміни атомів нітрогену атомами оксигену і утворенням аморфної фази.

Рентгенографічні дослідження залишкових напружень у Ti(CN)-покриттях показують [16], що їх значення знаходяться в інтервалі $-4,6 \dots -5,9$ ГПа, залежать від товщини покриття і збільшуються зі зростанням опорного потенціалу. Розрахунок за допомогою методу гнучкого зразка виявив, що в TiN-покриттях зі зростанням опорного потенціалу залишкові напруження збільшуються від $-4,2$ до $-7,2$ ГПа [14]. У роботі [15] визначено, що залишкові напруження в TiN-покриттях дорівнюють -4 ГПа. За даними [22] їх величина в TiN- і (Ti, Al)N-покриттях сягає до -15 ГПа. Рентгенографічним (XRD) методом у роботі [23] для TiN-покриттів було визначено величини залишкових напружень на рівні -8 ГПа, в той час як в (Ti, Cr)N-покриттях вони сягали -17 ГПа, що, на думку авторів, зумовлено різними напрямками зростання кристалітів у покриттях.

У роботі [17] вимірювання методом $\sin^2 \psi$ залишкових напружень в одношаровому TiN-покритті показують, що вони складають $-5,6$ ГПа. Шари багатшарового TiN/(Ti, Al)N-покриття також знаходяться у стані стиску з рівнем напружень у інтервалі $-2,7 \dots -4,2$ ГПа для (Ti, Al)N і $-8 \dots -10,1$ ГПа для TiN. Той факт, що величина напружень у більш тонких шарах багатшарового TiN-покриття у порівнянні з моношаром вища, пояснюється тим, що зі зростанням товщини покриття залишкові напруження зменшуються. Це можна пояснити поступовим удосконаленням структури наступних (нарощуваних при нанесенні) шарів [24].

У роботі [25] отримано, що для наноструктурних CrN/NbN-покриттів залишкові напруження зростають від $-4,4$ ГПа при потенціалі основи -75 В до $-9,5$ ГПа при -150 В. На основі скінченноелементного моделювання в [26] отримано величини і розподіл залишкових напружень у TiN-покритті товщиною 3 мкм. Установлено, що значним, майже рівномірним розподілим по товщині покриття, напруженням стиску ($-3,2$ ГПа) у площині покриття (вздовж інтерфейсу) відповідають напруження розтягу в основі (250 МПа). У покритті діють також напруження розтягу у напрямку, нормальному до поверхні, максимум яких (500 МПа) спостерігається в покритті поблизу інтерфейсу. За розрахунками їх величина зростає зі збільшенням товщини покриття і зменшується зі збільшенням твердості матеріалу основи (рис. 2).

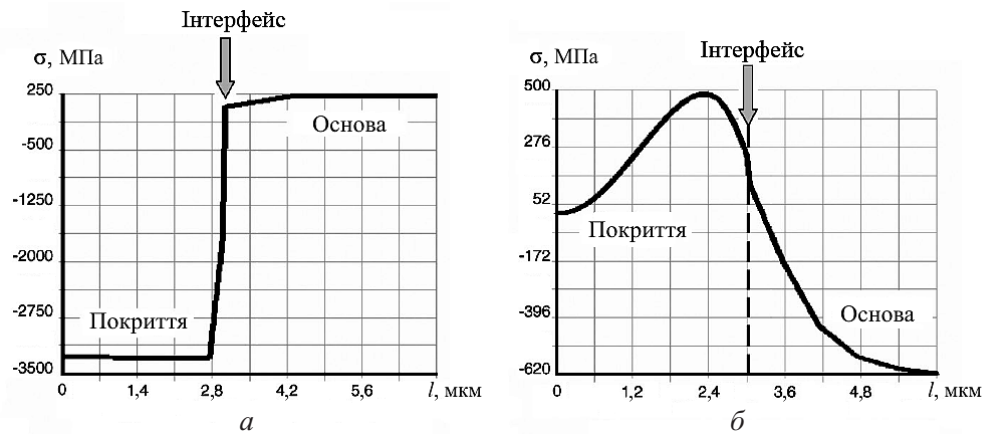


Рис. 2. Розподіл залишкових напружень [26], отриманих на основі скінченноелементного моделювання в TiN-покритті товщиною 3 мкм, в площині покриття (вздовж інтерфейсу) – а та у напрямку, нормальному до поверхні – б.

За методом гнучкого зразка, прогин якого вимірювався після поетапного зняття шарів покриття внаслідок хімічної корозії, отримано розподіл залишкових напружень стиску. Установлено, що напруження зростають у напрямку від інтерфейсу і досягають максимуму всередині покриття, після чого зменшуються ближче до поверхні [12]. У роботах [6, 13] також показано, що значним залишковим напруженням стиску у покриттях відповідають напруження розтягу в основі і напруження зсуву на інтерфейсній поверхні. Аналіз напружено-деформованого стану на інтерфейсній поверхні [13] свідчить, що напруження зсуву становлять $0,1 \dots 0,2$ ГПа. Згідно з даними [6], напруження

розтягу в основі, що відповідають значним (до -5 ГПа) напруженням стиску у покритті, дорівнюють $100...200$ МПа.

Встановлено [2], що розрахункові значення напружень в основі з нержавіючої сталі сягають $1,5$ ГПа і 305 МПа при напруженнях у покритті $-1,9$ ГПа і -380 МПа відповідно. У роботі [27] шляхом розрахунку також отримано значення напружень розтягу в основі $30...70$ МПа при нанесенні вакуум-плазмового покриття. Авторами [28] на основі рентгенографічних досліджень було отримано розподіл залишкових напружень у системі титаноплазмова пластина–(Ti, Al)N-покриття товщиною 3 мкм. Показано, що залишкові напруження стиску, як і за даними [12], зростають від нульових значень на інтерфейсній поверхні і сягають максимуму (-2 ГПа) всередині покриття, після чого зменшуються приблизно до $-1,2$ ГПа ближче до поверхні. Таким напруженням стиску у покритті відповідають напруження розтягу в інтерфейсній зоні основи, максимуму (400 ГПа) ці напруження досягають на глибині приблизно $1,5$ мкм від інтерфейсу (рис. 3).

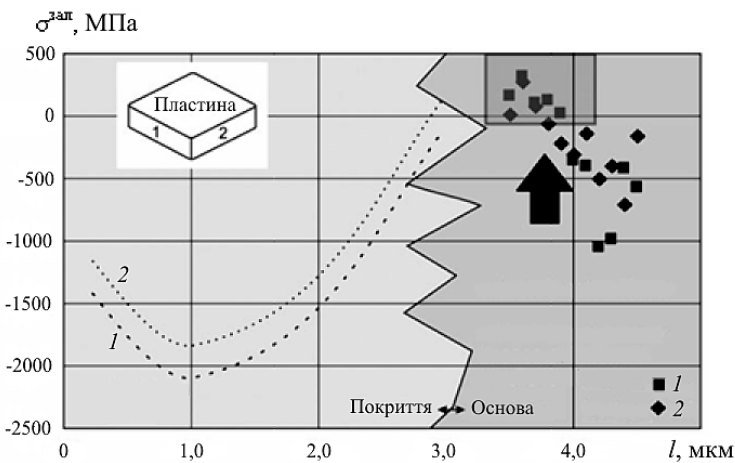


Рис. 3. Розподіл залишкових напружень по глибині (Ti, Al)N-покриття товщиною 3 мкм та у приповерхневій зоні в бокових гранях 1 і 2 титаноплазмової пластины [28].

Зв'язок залишкових напружень із механічними характеристиками в системі основа–покриття. Наявність значних залишкових напружень стиску позитивно впливає на такі характеристики системи основа–покриття, як границя витривалості [29], границя текучості [30]. За даними [31], із залишковими напруженнями корелює величина міцності при розриві. Зв'язок міцності при згині твердого сплаву з величиною залишкових напружень в TiN-покритті відзначають у роботі [32]. Показано, що відносно високий рівень цих напружень забезпечує високу міцність, мінімальний відкол країв різального інструмента та найкращі характеристики при точінні і фрезеруванні. Саме з достатньо високим рівнем залишкових напружень стиску пов'язують підвищені тріщиностійкість, зносостійкість та корозійну стійкість поверхонь, модифікованих вакуум-плазмовими покриттями [33–35]. Як зазначається в [36], високий рівень залишкових напружень стиску (для TiN- і TiCN-покриттів відповідно $-0,8$ ГПа і близько -3 ГПа) стримує процеси тріщиноутворення в покриттях при експлуатації різального інструмента, особливо в умовах переривчастого різання.

На думку авторів [37], зростання залишкових напружень стиску до $-660...-720$ МПа після нанесення вакуум-плазмового TiN-покриття на лопатки компресора вертолітного двигуна зі сплаву VT8M після попереднього зміцнення ультразвуком зумовлює зниження знакозмінних експлуатаційних напружень розтягу та гальмує процес зародження тріщин втоми на кромках лопаток. У результаті на 19% підвищується границя витривалості лопаток.

У роботі [38] на основі скінченноелементної моделі при аналізі контакту ковзання зі зростаючим нормальним навантаженням по поверхні швидко-різальної сталі з TiN-покриттям товщиною 2 мкм і середнім рівнем залишкових напружень стиску у покритті -1 ГПа показано, що наявність залишкових напружень призводить до зростання максимальних напружень розтягу на поверхні за зоною контакту на 10...50% та напружень стиску в покритті безпосередньо під контактом, а експлуатаційні напруження стиску в основному матеріалі зменшуються внаслідок наявності в основі залишкових напружень розтягу. У той же час установлено, якщо в процесі експлуатації виникає пластична деформація основи, має місце релаксація залишкових напружень у покритті. До релаксації цих напружень призводить також виникнення перших тріщин на поверхні покриття, тому вони вже не впливають на процес подальшого тріщиноутворення.

У роботі [39] підкреслюється, що питання про вплив залишкових напружень на рівень напружень розтягу, за яких покриття не розтріскується, залишається до кінця нез'ясованим і потребує подальшого вивчення. У дослідженні [40] показано, що напруження зсуву між кристалітами TiN-покриття стовпчастої структури зменшуються зі зростанням залишкових напружень. Це дає підстави вважати, що наявність високих залишкових напружень стиску забезпечує міцність указаних покриттів. У роботах [11, 41] зазначається, що від рівня залишкових напружень залежить мікротвердість покриття. Зростання залишкових напружень стиску від $-1,7$ ГПа при потенціалі основи 40 В до -5 ГПа при 70...200 В і одночасне зменшення твердості (Ti, Al)N-покриття (рис. 1) у [11] пов'язують із різною орієнтацією кристалітів сформованого покриття. Водночас автори роботи [40] стверджують, що величина мікротвердості не є функцією залишкових напружень.

Разом із тим високий рівень залишкових напружень стиску може призвести до утворення і росту тріщини вздовж інтерфейсу, а також до випинання покриття (втрата стійкості) з наступним розтріскуванням [42, 43]. У той же час зазначається, що за відсутності експлуатаційного навантаження для покриттів на плоских поверхнях спочатку відбувається випинання, а потім виникають зусилля, достатні для росту інтерфейсної тріщини [42]. У [42, 43] пропонуються також вирази для визначення критичної величини залишкового напруження, яка відповідає випинанню. У роботі [44] показано, що поле залишкових напружень визначає траєкторію поширення крихких тріщин як у випадку локального руйнування під дією індентора, так і повного спонтанного руйнування покриття. Спонтанне відшарування покриття від основи ще до початку експлуатації внаслідок значних напружень стиску спостерігається в роботі [40], а в [41] повідомляється про зниження за рахунок залишкових напружень стиску зчеплення покриття з основою в процесі експлуатації. Автори [45, 46] також стверджують, що внаслідок занадто високого рівня

залишкових напружень покриття стають більш крихкими і зменшується їх зчеплення з основним матеріалом. У роботі [28] початок тріщиноутворення в основному матеріалі інструмента з покриттям пов'язують із наявністю в приповерхневій зоні основи залишкових напружень розтягу, до яких додаються напруження розтягу, що виникають у процесі експлуатації інструмента.

Експериментальні дослідження показують, що занадто високі значення залишкових напружень у твердих керамічних покриттях можуть призводити до їх локального руйнування та відшарування, наприклад, на кромці чи на поверхні зі значною шорсткістю, коли товщина покриття перевищує радіус кромки або шорсткість поверхні [38]. Водночас тонкі, відносно параметрів шорсткості, покриття є менш схильними до руйнування внаслідок дії залишкових напружень. На думку авторів [25], залежність адгезійної міцності від залишкових напружень є екстремальною, а її максимум спостерігається при залишкових напруженнях $-5,4$ ГПа і потенціалі субстрату -95 В. У роботі [47] встановлено, що існує оптимальний рівень залишкових напружень із точки зору забезпечення несучої здатності системи основа–покриття.

Вплив архітектури поверхні на величини залишкових напружень. “Корисний” рівень залишкових напружень сприяє підвищенню зносостійкості покриттів, передчасному їх розтріскуванню, покращанню механічних характеристик системи основа–покриття, в той час як при занадто високому рівні покриття стають більш крихкими, має місце передчасне відшарування від основи. Тому необхідно знизити занадто високі залишкові напруження і зберегти їх на “корисному” рівні. Досягти цього можна шляхом удосконалення технології нанесення покриттів та створення відповідної архітектури поверхні.

До удосконалень архітектури поверхні відносять формування систем із проміжними і буферними прошарками та багатошарових покриттів, у тому числі мікро- і наноструктурних, а також наношарових. Так, зменшити залишкові напруження в системі основа–покриття можна, якщо між твердим PVD-покриттям та основою розмістити тонкі металеві прошарки [26, 40, 48–55]. Авторам [26] вдалося отримати Ti/TiN-покриття, товщина яких сягала до 16 мкм, зі зниженими порівняно з TiN-покриттями залишковими напруженнями та покращаною адгезійною міцністю в системі основа–покриття, а також підвищеною зносостійкістю, особливо в умовах корозійного й ерозійного зношування.

Згідно з даними [52], введення тонкого титанового прошарку дозволяє знизити рівень залишкових напружень, забезпечити адгезійну міцність і покращити опір абразивному зношуванню. Підвищення стійкості в умовах корозійного зношування в системі нержавіюча сталь–Ti/TiN-покриття порівняно з основою з одношаровим TiN-покриттям також пояснюється зменшенням залишкових напружень та покращанням зчеплення покриття з основою [41]. У роботі [53] відзначається, що адгезія, яку забезпечують прошарки на кшталт Al, Ti або Cu, що розміщені між твердим (Ti, Al)N-покриттям та сталевією основою, покращується зі зменшенням модуля пружності матеріалу прошарку. Показано [55], що прошарок титану, який отримав назву буферного, ефективно розміщувати не тільки між покриттям і основою, а й всередині самого TiN-покриття. Залишкові напруження в покритті зменшуються зі збільшенням товщини буферного шару (рис. 4).

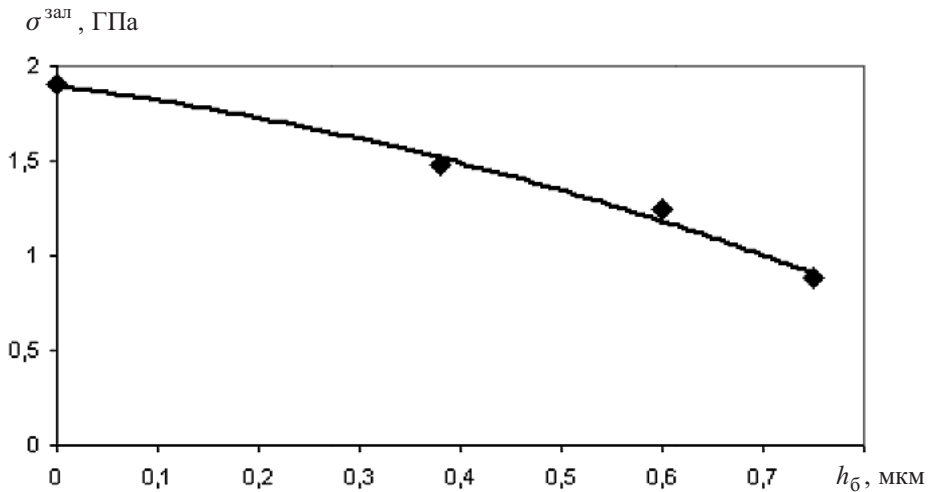


Рис. 4. Залежність залишкових напружень стиску в TiN-покритті від товщини h_b буферного прошарку Ti [54].

Раніше [56] також встановлено майже трикратне зменшення залишкових напружень у TiN-покритті при введенні між основою та покриттям шару чистого хрому. Регулювати рівень залишкових напружень у покритті й отримувати таким чином покриття більшої товщини без зниження адгезійної міцності, за даними [26, 34, 48, 49], дозволяє також багатошаровість. Як зазначалось вище, в роботі [17] показано, що залишкові напруження шарів TiN багатошарового TiN/(Ti, Al)N-покриття значно вищі, ніж одношарового TiN-покриття. Одним із найбільш перспективних напрямків удосконалення функціональних покриттів, у тому числі з точки зору їх напруженого стану, є концепція покриттів із нанорозмірними зернами [55–59], а також багатошарових покриттів із мікро- і нанорозмірними зернами та нанотовщинами шарів [48, 49]. Наприклад, більш низький рівень залишкових напружень і підвищений опір ерозійному зношуванню наноструктурного TiN-покриття відповідають мінімальному розміру кристалітів (9 нм) [57].

В Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України запропоновано і розроблено новий концептуальний підхід до формування архітектури поверхневих шарів – створення поверхонь із дискретною топографією [60]. На відміну від покриттів, отриманих методом електроіскрового легування та методами модифікації поверхні висококонцентрованими джерелами нагріву, для PVD-покриттів, зокрема для покриттів, отриманих методом катодно-іонного бомбардування, відбувається цілеспрямована заміна суцільного шару покриття переривчастим (фрагментованим) шаром [61, 62]. Дискретизація дозволяє зберегти екрануючу функцію суцільних покриттів і одночасно з цим уникнути таких недоліків покриттів суцільного типу, як когезійне розтріскування та адгезійне відшарування. Окрім того, можна не просто зменшити рівень залишкових напружень у покритті, а отримати бажані “корисні” значення напружень за рахунок варіювання розмірами дискретних ділянок [56, 63], що, зокрема, дає можливість збільшити зносостійкість твердосплавного різального інструмента [64].

Висновки

1. Установлено, що покриття, сформовані PVD-методами, мають значні залишкові напруження стиску, які в окремих випадках можуть сягати до $-10...-17$ ГПа, їм відповідають залишкові напруження розтягу до 400 МПа в основному матеріалі.

2. Залишкові напруження стиску в покриттях обумовлені двома механізмами: температурним і структурним.

3. На значення залишкових напружень стиску впливають умови нанесення покриття, його склад та геометричні параметри.

4. Вплив залишкових напружень стиску на експлуатаційні характеристики має екстремальний характер і залежить від рівня напружень. Встановлено, що “корисний” рівень залишкових напружень підвищує зносостійкість покриттів, запобігає їх передчасному розтріскуванню, покращує механічні характеристики системи основа–покриття. Занадто високий рівень залишкових напружень зумовлює крихкість покриття, що призводить до їх передчасного відшарування від основи.

5. Зберегти залишкові напруження на “корисному” рівні можна завдяки вдосконаленню архітектури поверхні.

Резюме

Выполнен обзор результатов исследований остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях, полученных методами физического осаждения. Проанализированы данные о характере остаточных напряжений и факторы, которые влияют на их величину и распределение. Рассмотрены работы, в которых исследуется влияние остаточных напряжений на физико-механические характеристики системы основа–покрытие. Показана необходимость дальнейшего изучения остаточных напряжений в PVD-покрытиях и усовершенствования путей управления их уровнем.

1. *Caughlin T. A., Nagy D. R., and King H. W.* Residual stress, hardness and chemical stability of TiN coating // *J. Adv. Mater.* – 2001. – **33**, No. 1. – P. 63 – 68.
2. *Кононенко В. И., Пупань Л. И.* Формирование остаточных напряжений в композиционных покрытиях // *Високі технології в машинобудуванні.* – Харків: НТУ ХПІ, 2005. – С. 209 – 212.
3. *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.
4. *Pauleau Y.* Generation and evolution of residual stresses in physical vapour-deposited thin films // *Vacuum.* – 2001. – **61**, No. 2-4. – P. 175 – 181.
5. *Knuyt G., Lauwerens W., and Stals L. M.* A unified theoretical model for tensile and compressive residual film stress // *Thin Solid Films.* – 2000. – **370**, No. 1-2. – P. 232 – 237.

6. *Rickerby D. S.* Internal stress and adherence of titanium nitride coatings // *J. Vacuum Sci. Technol.* – 1986. – **4**, No. 6. – P. 2809 – 2814.
7. *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 Techn.* – 2007. – **201**, No. 12. – P. 5891 – 5898.
8. *Rickerby D. S., Jones A. M., and Bellamy B. A.* X-ray diffraction studies of physically vapour-deposited coatings // *Ibid.* – 1989. – **37**, No. 1. – P. 111 – 137.
9. *Rickerby D. S., Eckold G., Scott K. N., and Buckley-Golder I. M.* The interrelationship between internal stress, processing parameters and microstructure of physically vapour deposited and thermally sprayed coatings // *Thin Solid Films.* – 1987. – **154**, No. 1-2. – P. 125 – 141.
10. *Bull S. J.* Correlation of microstructure and properties of hard coatings // *Vacuum.* – 1992. – **43**, No. 5-7. – P. 387 – 391.
11. *Ahlgren M. and Blomqvist H.* Influence of bias variation on residual stress and texture in TiAlN PVD coatings // *Surface Coatings Techn.* – 2005. – **200**, No. 1-4. – P. 157 – 160.
12. *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.
13. *Changqing Liu, Zhujing Jin, Weltao Wu, et al.* Residual stress and damage mode of hard Ti(CN) coating // *Acta Met. Sin.* – 1990. – **3**, No. 10. – P. 246 – 251.
14. *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.
15. *US Pat. 5075181.* High hardness/ high compressive stress multilayer coated tool / *D. T. Quinto, H. J. Kaufmann.* – Publ. 24.12.91.
16. *Murotani T., Hirose H., Sasaki T., and Okazaki K.* Study on stress measurement of PVD-coating layer // *Thin Solid Films.* – 2000. – **377-378**, No. 1. – P. 617 – 620.
17. *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 // *Ibid.* – 2003. – **429**, No. 1-2. – P. 170 – 189.
18. *Антонюк В. С., Сорока О. Б., Рутковський А. В., Мірненко В. І.* Залишкові напруження в вакуум-плазмових покриттях TiN, (TiAl)N, (TiC)N // *Вісн. Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля.* – 2004. – № 7 (77), ч. 2. – С. 206 – 210.
19. *Djouadi M. A., Bouchier D., et Stambouli V.* Effets thermiques sur la contrainte interne dans le nitrure de bore depose par evaporation assistes par faisceau d'ions // *Mem. Etud. Sci. Rev. Met.* – 1991. – **88**, No. 9. – P. 628 – 630.
20. *Changqing Liu, Zhujing Jin, and Weltao Wu.* Residual stress and damage mode of hard Ti(CN) coating // *Acta Met. Sci.* – 1990. – **26**, No. 1. – P. B27 – B32.

21. *Pinh Jin and Shigeo Maruno*. Stress relaxation in reactively sputter-deposited TiO_xN_y films // *Jap. J. Appl. Phys.* – 1991. – **30**, No. 9A. – P. 2052 – 2062.
22. *Oettel H., Wiedemann R., and Preissler S.* Residual stresses in nitride hard coatings prepared by magnetron sputtering and arc evaporation // *Surface Coatings Techn.* – 1995. – **74-75**, Pt. 1. – P. 273 – 278.
23. *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.
24. *Valvoda V., Cerny R., Kuzel R., et al.* Dependence of microstructure of TiN coating on their thickness // *Ibid.* – 1988. – **158**, No. 2. – P. 225 – 232.
25. *Lewis D. B., Reitz D., Wustefeld C., et al.* Chromium nitride/niobium nitride nano-scale multilayer coatings deposited at low temperature by the combined cathodic arc/unbalanced magnetron technique // *Ibid.* – 2006. – **503**, No. 1-2. – P. 133 – 142.
26. *Bemporad E., Sebastiani M., Pecchio C., and Rossi S.* High thickness Ti/TiN multilayer thin coatings for wear resistant applications // *Surface Coatings Techn.* – 2006. – **201**, No. 6. – P. 2155 – 2165.
27. *Трапезон А. Г.* Методологические проблемы при исследовании тонкопленочных покрытий // *Пробл. прочности.* – 2007. – № 2. – С. 99 – 112.
28. *Denkena B. and Breidenstein B.* Influence of the residual stress state on cohesive damage of PVD-coated carbide cutting // *Adv. Eng. Mater.* – 2008. – **10**, No. 7. – P. 613 – 616.
29. *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.
30. *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.
31. *Kamachi K., Ito T., and Yamamoto T.* Residual stresses of chemical carbides, coated with TiN by CVD process and by PVD process // *Int. Conf. “Residual Stresses in Sciences and Technology”* (Garmish-Partenkirchen, 1986). – Oberursel, 1987. – Vol. 1. – P. 479 – 483.
32. *Quinto D. T., Santhanam A. T., and Jindal P. C.* Mechanical properties, structure and performance of chemically vapor-deposited and physically vapor-deposited coated carbide tools // *Mater. Sci. Eng.* – 1988. – **105-106**, Pt. 2. – P. 443 – 452.
33. *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 // *Surface Coatings Techn.* – 2006. – **200**, No. 22-23. – P. 6172 – 6175.
34. *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.

35. *Klocke F. and Krieg T.* Coated tools for metal cutting – features and applications // *CIRP Ann.* – 1999. – **48**, No. 2. – P. 515 – 525.
36. *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.
37. *Богуслаев В. А., Жеманюк П. Д., Яценко В. К. и др.* Повышение несущей способности лопаток компрессора // *Вест. двигателестроения.* – 2005. – № 3. – С. 79 – 89.
38. *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 Techn.* – 2006. – **200**, No. 12-13. – P. 3824 – 3844.
39. *Holmberg K., Ronkainen H., Laukkanen A., et al.* Tribological analysis of TiN and DLC coated contacts by 3D FEM modeling and stress simulation // *Wear.* – 2008. – **264**, No. 9-10. – P. 877 – 884.
40. *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.
41. *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.
42. *Teixeira V.* Mechanical integrity in PVD coatings due to the presence of residual stresses // *Thin Solid Films.* – 2001. – **392**, No. 2. – P. 276 – 281.
43. *Ляшенко Б. А., Ришин В. В., Шаривкер С. Ю. и др.* К анализу напряженного состояния покрытий // *Жаростойкие и теплостойкие покрытия: Тр. IV Всесоюз. совещ.* – Л.: Наука, 1969. – С. 454 – 456.
44. *Бякова А. В., Горбач В. Г.* Сопротивление разрушению и оценка хрупкой прочности покрытий с начальным полем остаточных напряжений // *Пробл. прочности.* – 1994. – № 1. – С. 51 – 61.
45. *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.
46. *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 // *Thin Solid Films.* – 2005. – **473**, No. 1. – P. 123 – 131.
47. *Hills D. A. and Ashelby D. W.* The influence of residual stress on contact-load-bearing capacity // *Wear.* – 1982. – **75**, No. 2. – P. 221 – 239.
48. *Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М., Григорьев С. Н.* Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 235 с.
49. *Верещака 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.* – 2008. – Вип. 2. – С. 87 – 100.

50. *Bromark M., Larson M., Hedenqvist P., and Hogmark S.* Wear of Ti/TiN multi-layer coatings // *Surface Coating Techn.* – 1997. – **90**, No. 3. – P. 217 – 223.
51. *Rickerby D. S., Bull S. J., Robertson T., and Hendry A.* The role of titanium in the abrasive wear resistance of physically vapour-deposited TiN // *Surface Coating Techn.* – 1990. – **41**, No. 1. – P. 63 – 74.
52. *Herranen M., Wiklund U., Carlsson J. O., and Hogmark S.* Corrosion behaviour of Ti/TiN multilayer coated tool steel // *Ibid.* – 1998. – **99**, No. 1-2. – P. 191 – 196.
53. *Castanho J. M. and Vieira M. T.* Effect of ductile layers in mechanical behaviour of TiAlN thin coatings // *J. Mater. Proc. Techn.* – 2003. – **143-144**, No. 1. – P. 352 – 357.
54. *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.
55. *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 Techn.* – 2002. – **171**, No. 1-3. – P. 83 – 90.
56. *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.
57. *Sue J. A.* Development of arc evaporation of non-stoichiometric titanium nitride coatings // *Surface Coatings Techn.* – 1993. – **61**, No. 1-3. – P. 115 – 120.
58. *Musil J.* Hard and superhard nanocomposite coatings // *Ibid.* – 2000. – **125**, No. 1-3. – P. 322 – 330.
59. *Veprek S. and Reiprich S.* A concept for the design of novel superhard coatings // *Thin Solid Films.* – 1995. – **268**, No. 1-2. – P. 64 – 71.
60. *Ляшенко Б. А., Мовшиович А. Я., Долматов А. И.* Упрочняющие покрытия дискретной структуры // *Технол. системы.* – 2001. – № 4 (10). – С. 17 – 25.
61. *Пат. 68303 України, МПК С23 С14/32.* Спосіб нанесення зносостійких несущільних покриттів / В. А. Рутковський, В. С. Антонюк, В. М. Волкогон та ін. – Чинний від 15.07.2004, Бюл. № 7.
62. *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.
63. *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.
64. *Сорока Е. Б.* Влияние параметров покрытий и остаточных напряжений на износостойкость режущего инструмента // *Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте: Тр. VII Междунар. науч.-техн. семинара (20–22 фев. 2007 г) – Свалява.* – Киев: АТМ Украины, 2007. – С. 175 – 177.

Поступила 10. 03. 2009