

УДК 621.9.02

О.Б. Сорока, к.т.н., с.н.с.*Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України***М.Ю. Копейкіна, м.н.с.***Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України***В.С. Антонюк, д.т.н, проф.***Національний технічний університет України "КПІ"***С.А. Клименко, д.т.н., проф.***Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України*

ОЦІНКА ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ВАКУМ-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТЯХ

Наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень залишкових напружень у покриттях, напилених вакуум-плазмовим методом. Запропонована методика оцінки структурної та температурної складових залишкових напружень у покриттях.

Існують сотні методів поверхневої зміцнюючої обробки металів і сплавів, за допомогою яких є можливість підвищувати працездатність деталей машин і різальних інструментів [1].

Одним з найбільш перспективних напрямків підвищення експлуатаційних властивостей різальних інструментів є нанесення на їх робочі поверхні зносостійких вакуум-плазмових покриттів [2, 3]. Найбільш характерна особливість таких покриттів – відсутність перехідної зони між покриттям та інструментальним матеріалом. Ця обставина досить важлива, тому що створюється можливість надати робочим поверхням інструмента комплекс додаткових властивостей практично без зміни його механічних властивостей – твердості, міцності, в'язкості руйнування та ін. Можливість широкого варіювання температури в зонах осадження дозволяє використовувати вакуум-плазмові методи для нанесення покриттів на інструменти зі швидкорізальної сталі, твердих сплавів, кераміки, полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) і досягати при цьому високої адгезії покриття з основою.

У процесі формування в покриттях виникають залишкові напруження, які значно впливають на напружений стан системи "покриття–основа".

Як правило, залишкові напруження обумовлені різними факторами:

- різницею температурних коефіцієнтів розширення матеріалів покриття і основи, при цьому температура в процесі формування покриття відрізняється від температури його експлуатації;
- наявністю атомів газу, які захоплені в процесі нанесення, та неповним структурним упорядкуванням у покритті при формуванні останнього;
- "заморожуванням" дефектів решітки при конденсації;
- утворенням на поверхні розділу системи "основа–покриття" проміжних фаз, що обумовлено взаємною дифузією.

Як видно, залишкові напруження в напилених покриттях обумовлені як структурою матеріалу покриття, так і температурою, при якій воно формувалося.

Залишкові напруження, що виникають в системі "основа–покриття" у процесі формування покриття можуть мати різні знак та абсолютні величини [4–6]. Залежно від знака самих напружень та умов навантаження в поверхні з покриттями залишкові напруження підвищують або зменшують напруження від зовнішнього навантаження. Особливо небезпечними є залишкові напруження розтягу, які разом з нормальними напруженнями від зовнішнього навантаження ще до початку експлуатації можуть призводити до когезійного розтріскування покриття.

Наявність залишкових напружень стиску (за умов відсутності самовідшарування) може відігравати позитивну роль, зменшуючи напруження розтягу від зовнішнього навантаження. Вважається також, що залишкові напруження стиску – одна з причин підвищення міцності при циклічному навантаженні, межі текучості та міцності при статичному навантаженні [7]. Разом з тим, за умов дії контактного навантаження, коли мають місце напруження стиску, наявність значних залишкових від'ємних напружень може призводити до порушення контактної міцності покриття, тобто наявність інформації про величину та знак залишкових напружень у покритті дозволяє на етапі конструювання покриття приймати рішення про необхідність їх зниження.

Відомо, що рівень залишкових напружень у напиленому вакуум-плазмовому покритті здебільшого визначає працездатність інструменту в процесі обробки різанням [8]. Однак в наш час відсутні методики, які дозволяють оцінити розмір складових залишкових напружень у напилених покриттях, що обмежеє можливості як зі створення покриттів, так і з розробки рекомендацій з управління їхніми властивостями.

Метою цієї роботи є розробка методики оцінки складових залишкових напружень і їх складових у вакуум-плазмових покриттях, нанесених на різальні інструменти, оснащені різними матеріалами, а саме ПНТМ.

Найбільш простим і доступним методом визначення залишкових напружень у покриттях є метод, побудований на тому, що під дією залишкових напружень у покритті довга вузька і тонка пластинка, на яку воно нанесено, деформується у вигляді дуги кола. У деформованій таким чином пластинки вимірюють прогин або визначають радіус кривизни зразка і за формулами розраховують залишкові напруження [9, 10]. Перевагою такого розрахунково-експериментального методу є те, що напруження розраховуються за остаточним результатом, тобто їх походження не має значення.

При визначенні напружень припускають (рис. 1), що їх розподіл є рівномірним (це виправдано за умови малої товщини покриття), тобто визначаються середні значення залишкових напружень, хоча реально вони нерівномірно розподілені по перерізу покриття.

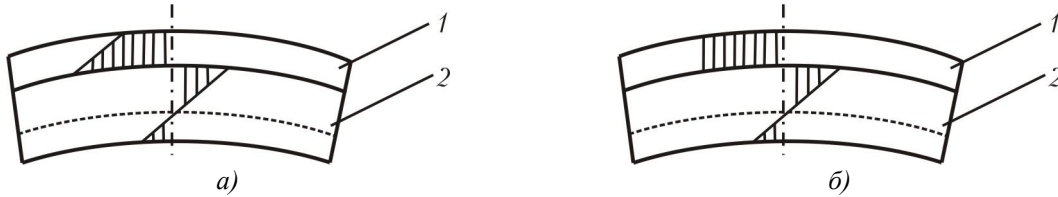


Рис. 1. Епюри залишкових напружень у покритті (1) і основі (2):
а – реальні; б – умовні

Використовуючи рівняння пружної лінії для балки, залишкові напруження в покритті можна визначити за залежністю [11]:

$$\gamma^{\text{зан}} = \frac{32E_o H_o^3 f}{3a^2 h_n (1 - \nu_o) (2H_o + h_n)}, \quad (1)$$

де $2H_o$, h_n – відповідно товщини основи і покриття; E_o , ν_o – відповідно модуль пружності основи першого роду і коефіцієнт Пуасона матеріалу основи; f – прогин зразка; a – довжина зразка.

З використанням методу розрахунку тонких пластин на вигин можна визначити залишкові напруження наступним чином [10]:

$$\sigma_n^{\text{зан}} = \frac{4E_o H_o^3}{3R h_n (1 - \nu_o^2) (2H_o + h_n)}, \quad (2)$$

де R – радіус кривизни, який отримує зразок у результаті деформації, що спричиняється залишковими напруженнями.

Під дією залишкових напружень зразок деформується у вигляді дуги кола з прогином f , за величиною якого визначаються залишкові напруження (рис. 3).

Радіус кривизни R розраховується через прогин f і хорду l за залежністю:

$$R = \frac{l^2 + 4f^2}{8f}, \quad (5)$$

де l – хорда сегмента, а f – стріла сегмента.

З урахуванням пружних властивостей покриття залишкові напруження визначаються за формулою [10]:

$$y_n^{\text{зан}} = \left[\begin{aligned} & \left(h_n^3 E_n + 8H_o^3 E_o \right) \left(\frac{1}{6R h_n E_n (h_n + 2H_o)} + \frac{1}{12R H_o E_o (h_n + 2H_o)} \right) + \\ & \frac{1}{24R^2 E_o H_o} \end{aligned} \right] \cdot \frac{2H_o E_o E_n}{h_n E_n + 2H_o E_o}, \quad (3)$$

В умовах лінійного напруженого стану при $h \ll H$ залежність (3) перетворюється на відому формулу Стоня [10]:

$$y_n^{\text{зал}} = \frac{2E_o H_o^2}{3R h_n} \quad (4)$$

Температурна складова залишкових напружень у покритті визначається за залежністю [5]:

$$y_n^{\text{зал}} = \frac{(\alpha_n - \alpha_o) \Delta T}{\frac{1 - \nu_n}{E_n} + \frac{1 - \nu_o}{E_o} \cdot \frac{h_n}{2H_o}} \quad (6)$$

де α_n , α_o – середні лінійні коефіцієнти розширення матеріалів покриття й основи в інтервалі ΔT ; ΔT – різниця між температурою нанесення покриття й основи; ν_n , ν_o – відповідно коефіцієнти Пуассона матеріалів покриття й основи.

Виходячи з вищенаведеного, була розв'язана задача про визначення сумарних залишкових напружень у покритті NbN, що рекомендується для підвищення працездатності різальних інструментів, оснащених ПНТМ на основі кубічного нітриду бора (КНБ) [12]. Для цього на зразок зі сталі ХВГ ($E_o = 2,1 \times 10^5$ МПа) розміром $120 \times 15 \times 0,5$ мм методом конденсації з плазмової фази в умовах іонного бомбардування поверхні на установці ННВ-6,6-И1 («Булат-20») при підтримуванні постійної температури основи на рівні 420 °С наносили покриття NbN ($E_n = 4,0 \times 10^5$ МПа) товщиною 5 мкм. Перед нанесенням покриття зразок закріплювали в кондукторі, який являє собою пластину з двома затискувачами (рис. 2, а). Після нанесення покриття затискувачі кондуктора знімали, зразок деформувався і вимірювали набутий таким чином прогин зразка (рис. 2, б).



Рис. 2. Кондуктор (1) зі зразком (2): після нанесення покриття (а) і розрахункова схема обчислення радіуса кривизни R (б)

Величина прогину зразка з покриттям $f = 2,2$ мм відповідала радіусу кривизни зразка $R = 750$ мм.

Розрахована за формулою (1) середня величина залишкових напружень у покритті NbN склала $-2,56$ ГПа (рис. 3).

Для поділу напружень на структурну і температурну складові деформовані зразки нагрівали в муфельній печі до температури 420 °С, що відповідає температурі нанесення покриття. Зменшення прогину, яке фіксували за допомогою фотокамери, склало $28-30$ % від вихідного значення. Ця частина прогину, мабуть, обумовлена залишковими напруженнями ($-0,74$ ГПа), викликаними різницею коефіцієнтів температурного розширення матеріалів основи і покриття. Напруження, що залишилися при нагріванні (які відповідають $70-72$ % загальної деформації зразка), пов'язані з дією залишкових напружень структурного походження ($-1,82$ ГПа).

Експериментальна оцінка величини температурної складової залишкових навантажень на рівні $28-30$ % від загальної величини залишкових навантажень у покритті, напиленому на сталеву основу, дає можливість уточнити значення коефіцієнта температурного розширення матеріалу покриття, що важливо для розрахункового визначення розміру цієї складової, наприклад за залежністю (6). Для покриття NbN вона складає $\alpha_n = 6,95 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

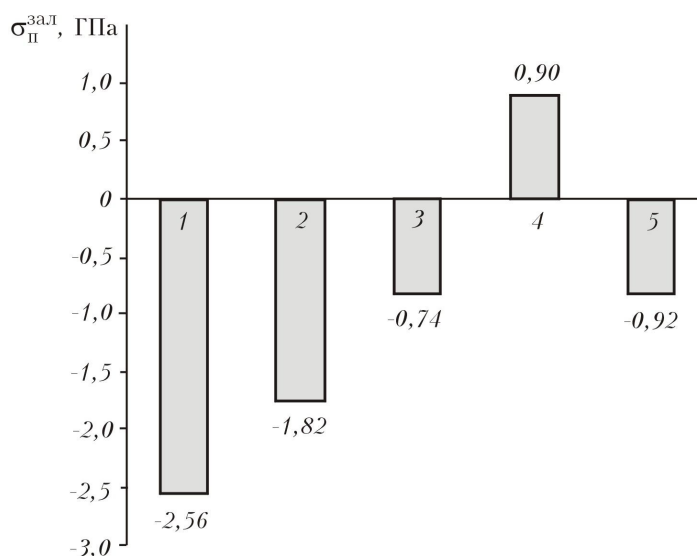


Рис. 3. Рівень залишкових напружень у покритті NbN товщиною 5 мкм:

1 – сумарні залишкові напруження в покритті на зразку зі сталі ХВГ, отримані на основі розрахунково-експериментального методу (залежність 1); 2 – структурна складова залишкових напружень; 3 – складова залишкових напружень, обумовлена різницею коефіцієнтів температурного розширення сталі ХВГ і NbN; 4 – складова залишкових напружень, обумовлена різницею коефіцієнтів температурного розширення КНБ і NbN (залежність 6); 5 – сумарні залишкові напруження у покритті на ПНТМ

Як зазначалося вище, покриття NbN рекомендується для підвищення працездатності різального інструменту, оснащеного ПНТМ на основі КНБ. Одержати величину залишкових напружень у покритті на зразку ПНТМ методом нанесення покриття на тонку пластинку, що отримує прогин під їх дією, не можливо. З урахуванням представлених вище результатів оцінка залишкових напружень у покритті NbN на ПНТМ на основі КНБ може бути виконана таким чином.

Відповідно до залежності (6), виходячи з того, що величини коефіцієнтів температурного розширення для NbN і КНБ складає $6,95 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ і $2,55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ відповідно, одержуємо, що температурна складова залишкових напружень у покритті NbN, напиленому на КНБ, позитивна і складає 0,90 ГПа (рис. 3).

Вважаючи, що структурна складова залишкових напружень у покритті не залежить від матеріалу основи, одержуємо середню величину залишкових напружень у покритті NbN, нанесеному на ПНТМ на основі КНБ, як суму структурної і температурної складових – $[-0,92 \text{ ГПа}]$ (рис. 3).

Висновок. Таким чином, запропонований підхід дає можливість визначити величину залишкових напружень і їх складових у вакуум-плазмових покриттях у випадку напилення на зразки із матеріалів з особливими властивостями, а саме полікристалічних надтвердих матеріалів інструментального призначення.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що вакуум-плазмові покриття NbN, напилені на ПНТМ на основі КНБ, характеризується залишковими напруженнями стиску.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ляшенко Б. А., Клименко С. А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 50–59.
2. Береснев В.М., Перлов Д.Л., Федоренко А.И. Экологически безопасные вакуумно-плазменные оборудование и технологии нанесения покрытий. – Харьков: ХИСП, 2002. – 300 с.
3. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
4. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
5. Антен А.А. Основные физико-химические принципы создания жаростойких неорганических покрытий // Жаростойкие покрытия. – М.: Наука, 1965. – С. 3–54.
6. Остаточные напряжения в покрытии из нитрида титана, осажденного в вакууме / Н.В. Матвеев, А.Н. Краснов, И.В. Милосердов и др. // Проблемы прочности. – 1985. – № 5. – С. 90–93.
7. Об упрочняющей роли вакуум-плазменных покрытий / А.В. Рутковский, Б.А. Ляшенко, А.П. Гопкало, Е.Б. Сорока // Проблемы прочности. – 1999. – № 6. – С. 123–127.

8. *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: Мат. 7-го Международ. науч.-техн. семинара, 20–22.02. 2007 г., г. Свалява. – Киев: АТМ України, 2007. – С. 175–177 с.
9. Способ определения остаточных напряжений в полосовых заготовках: А.с. 1675689 СССР, МКИ G01L1/00 / Г.Л. Колмогоров. – Оpubл. 19.10.88, Бюл. № 33.
10. *Хасуй А.* Техника напыления. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
11. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов / Под общ. ред. А.Т. Туманова. – Т. 1. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
12. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.

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

Наукові інтереси:

- міцність матеріалів;
- напружено-деформований стан виробів.

КОПЄЙКІНА Марина Юріївна – молодший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- різальні інструменти;
- підвищення працездатності різальних інструментів.

АНТОНЮК Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- різальні інструменти;
- підвищення працездатності різальних інструментів.

КЛИМЕНКО Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- різальні інструменти;
- підвищення працездатності різальних інструментів.

Подано 10.06.2007