

УДК 621.793; 539.3

М. Долгов<sup>1</sup>, канд. техн. наук; І. Смирнов<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## СИНГУЛЯРНІСТЬ НАПРУЖЕНЬ ПРИ СТВОРЕННІ ТА РУЙНУВАННІ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ПОКРИТТІВ

**Резюме.** Розв'язано задачу теорії пружності для матеріалів з TiN вакуумно-дуговими покриттями. Розглянуто бігармонічне рівняння теорії пружності в полярних координатах. Отримано залежності порядку сингулярності для TiN вакуумно-дугових покриттів від конфігурації вільного краю покриття. Показано, що найнебезпечнішим для досліджених вакуумно-дугових покриттів є кут вільного краю покриття, який дорівнює 45...80°.

**Ключові слова:** порядок сингулярності, вакуумно-дугові покриття, нітрид титану.

**N. Dolgov, I. Smirnov**

## STRESS SINGULAR OF VACUUM ARC COATINGS AFTER DEPOSITION AND CRACKING

**The summary.** A study of a problem of elasticity theory for materials with TiN vacuum arc coatings is presented. The biharmonic equation of elasticity theory in polar coordinates is solved. Order of the singularity for TiN vacuum arc coatings depending on the free edge configuration of the coating is obtained. It is shown that the most dangerous angle of the free edge of TiN vacuum arc coating is equal to 45 ... 80°.

**Key words:** order of the singularity, vacuum arc coatings, titanium nitride

**Постановка проблеми.** Вакуумно-дугові покриття широко використовуються в різних галузях промисловості, їх наносять як на масивні матеріали, наприклад, металорізальні інструменти для підвищення зносостійкості [1,2], так і на дрібнодисперсні порошки для газотермічного напилювання [3]. Формуються вакуумно-дугові покриття з потоку частинок, що перебувають у різних станах – іонному, атомарному та у вигляді краплинної фази. Співвідношення цих станів визначає механізм процесу синтезу покриття й істотно залежить від активності, складу робочого газу, а також режимів горіння вакуумної дуги. Використовуючи катоди з різних матеріалів та формувальні сепаратори, а також змінюючи склад середовища в робочому просторі вакуумної установки, можна з простих компонентів створювати багаточарові, дискретні, градієнтні та нанокристалічні покриття [4–6]. Для визначення причин руйнування елементів конструкцій з вакуумно-дуговими покриттями необхідно враховувати їх напружений стан як при створенні, так і при випробуванні та експлуатації. При розтягуванні зразків з вакуумно-дуговими покриттями відбувається їх розтріскування [7]. Наявність вільного краю покриття викликає появу сингулярності полів напружень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Започаткував вивчення сингулярності полів напружень М.Л. Вільямс [8], який визначив сингулярність напружень у пластинах різної конфігурації з однорідних і композитних матеріалів. Сингулярність полів напружень у зразках із плазмовими покриттями залежно від кута вільної кромки розглянуто раніше [9]. Зниження кута вільної кромки теплозахисних

плазмових покриттів підвищує термоциклічну витривалість [10].

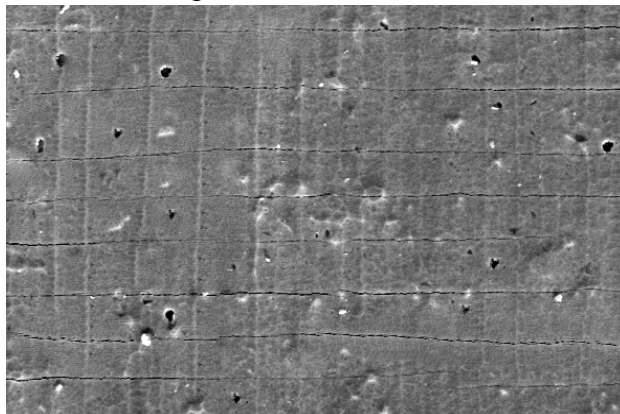
Кут вільної кромки вакуумно-дугових покриттів важливий при формуванні дискретних покриттів із зрізаних конусів, а також правильних зрізаних пірамід з трьома, чотирма і шістьма гранями [6, 11]. Також конфігурація вільної кромки важлива при створенні плямистих і смугастих вакуумно-дугових покриттів [12, 13]. Але вакуумно-дугові покриття відрізняються від пористих плазмових покриттів вищі значення модуля пружності.

**Метою роботи** є дослідження сингулярності полів напружень, які виникають при створенні вакуумно-дугових покриттів, а також після їх розтріскування внаслідок дії зовнішнього навантаження.

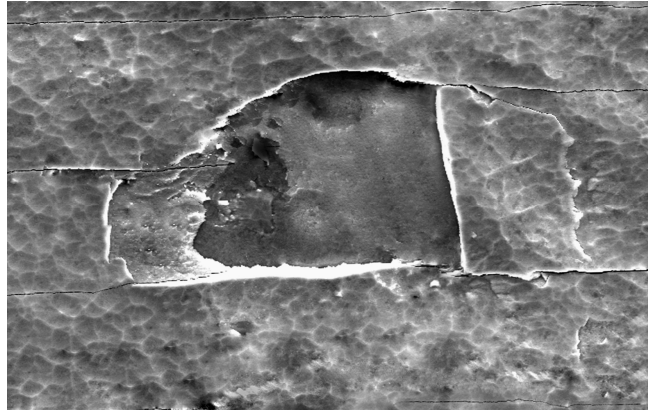
**Результати досліджень.** Вакуумно-дугове покриття з TiN завтовшки 3–6 мкм напилювали на зразки з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т товщиною 1мм на модернізованій установці АНГА-1 [3]. Режими визначали, виходячи з максимальної концентрації іонів металу в потоці плазми. В даному випадку діапазон концентрацій іонів Ті складав  $7 \cdot 10^{15} \dots 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  залежно від дистанції напилювання, що відповідало струму дуги 120...140 А при залишковому тиску в камері  $3 \cdot 10^{-3}$  Па. Зразки з покриттям піддавалися розтягуванню на розривній машині FM-1000.

Вакуумно-дугове покриття при розтягуванні розтріскується (рис. 1а). Тріщини в покритті утворюються з певним кроком. Після розтріскування покриття в околі вільної кромки виникає сингулярність напружень, яка викликає його відшаровування (рис. 1б). У зразках з вакуумно-дуговими покриттями існують два види сингулярності полів напружень. Перший виникає при формуванні конфігурації вільної кромки вакуумно-дугового покриття (рис. 2а), а другий — після розтріскування покриття (рис. 2б).

Розглянемо ці сингулярності детальніше. При визначенні сингулярності в околі вільної кромки покриття використовуємо полярну систему координат з центром у точці О (рис. 2а). Тоді положення будь-якої точки зразка (основи і покриття) визначається відстанню від початку координат О і кутом  $\theta$  між радіус-вектором  $r$  і фіксованою віссю Oz. Покриття займає область  $0 < \theta \leq \pi/2$ . Модулі пружності та зсуву, а також коефіцієнти Пуассона покриття й основи позначимо відповідно  $E_c, G_c, \mu_c$  и  $E_s, G_s, \mu_s$ . Тут і далі індекси  $c$  відносяться до покриття,  $s$  – до основи.



а)



б)

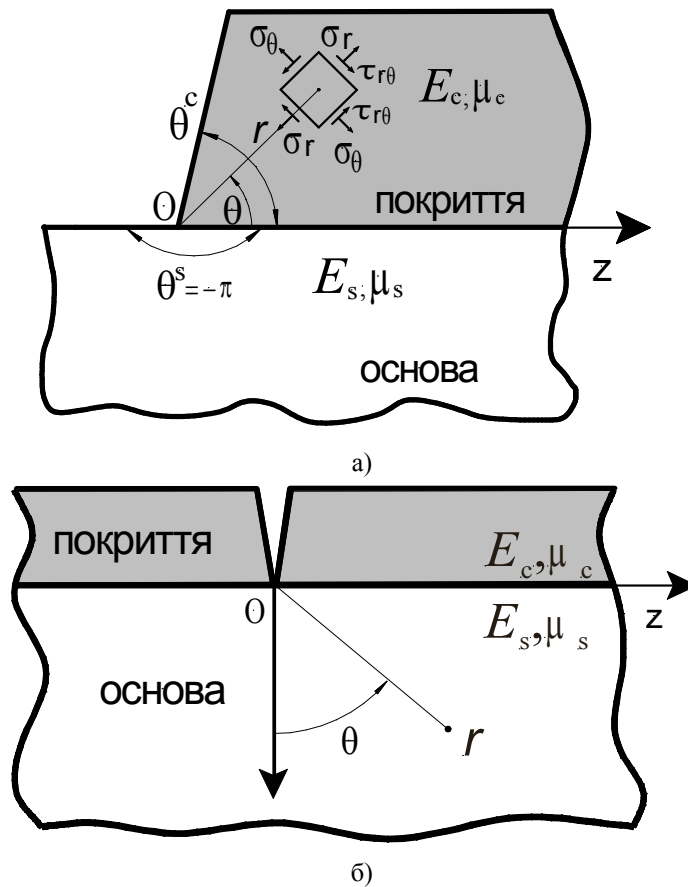
Рисунок 1. Розтріскування (а) і відшарування (б) вакуумно-дугового покриття після випробувань на розтяг ( $\times 1200$ )

Для розв'язання крайової задачі використовуємо бігармонічні рівняння теорії пружності для функції напружень  $\varphi$ , що залежить від  $r$  і  $\theta$  (функції Ері) [9,14].

$$\begin{aligned} \nabla^4 \varphi_s &= 0; \\ \nabla^4 \varphi_c &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

де

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}. \quad (2)$$



б)

Рисунок 2. Сингулярність у покритті: а) в околі вільної кромки покриття, б) після розтріскування покриття

Загальні розв'язки рівнянь (1) шукаємо у вигляді

$$\varphi_s = r^{\lambda+1} f_s(\theta), \quad (3)$$

де

$$f_s(\theta) = C_1 \sin(\lambda+1)\theta + C_2 \cos(\lambda+1)\theta + C_3 \sin(\lambda-1)\theta + C_4 \cos(\lambda-1)\theta. \quad (4)$$

$$\varphi_c = r^{\lambda+1} f_c(\theta), \quad (5)$$

де

$$f_c(\theta) = C_5 \sin(\lambda+1)\theta + C_6 \cos(\lambda+1)\theta + C_7 \sin(\lambda-1)\theta + C_8 \cos(\lambda-1)\theta. \quad (6)$$

( $C_1, \dots, C_8$  – довільні сталі).

При  $r \rightarrow 0$  компоненти напружень пропорційні  $r^{\lambda-1}$ , а компоненти переміщень –  $r^\lambda$ , де  $\lambda - 1$  – порядок сингулярності поля напружень, тобто

$$\begin{aligned} \sigma_r^s; \sigma_r^c; \tau_{r\theta}^s &\sim r^{\lambda-1}, \\ \sigma_r^c; \sigma_r^c; \tau_{r\theta}^c &\sim r^{\lambda-1}, \\ u^s, v^s, u^c, v^c &\sim r^\lambda. \end{aligned} \quad (9)$$

З граничних умов і умов неперервності, а також виразів для компонентів напружень і переміщень отримуємо систему восьми лінійних рівнянь відносно сталих  $C_1, \dots, C_8$ :

$$\sum_{i=1}^8 C_i \cdot a_{ij}(\lambda) = 0, \quad (10)$$

де  $a_{ij}(\lambda)$  – коефіцієнти при невідомих довільних сталих, які наведено в [9].

Існування нетривіальних значень  $C_1, \dots, C_8$  можливо, якщо

$$|\Delta(\lambda)| = 0, \quad (11)$$

де  $|\Delta(\lambda)|$  – визначник 8-го порядку, складений з коефіцієнтів при  $C_1, \dots, C_8$ .

Прирівнявши визначник до нуля, отримуємо характеристичне рівняння відносно  $\lambda$ . Корені трансцендентного характеристичного рівняння необхідні при вивченні характеру сингулярності полів напружень. Особливе значення з точки зору сингулярності має область малих значень  $r$ .

Характеристичне рівняння (11) має нескінченну кількість дійсних і комплексних розв'язків. Обмеживши область розв'язків нерівністю  $0 < \text{Re}(\lambda) < 1$ , отримуємо порядок сингулярності для полів напружень і переміщень. Значення  $\lambda=0$  та  $\lambda=1$  є тривіальними розв'язками характеристичного рівняння, що відповідають переміщенню й обертанню абсолютно твердого тіла. Порядок сингулярності полів напружень залежить тільки від пружних характеристик і конфігурації кута вільної кромки покриття і не залежить від умов навантаження.

Розв'язок трансцендентного характеристичного рівняння було отримано чисельно. Досліджено вплив кута  $\theta^c$  вільної кромки TiN вакуумно-дугового покриття із відносною поверхні основи на порядок сингулярності. Оскільки модуль пружності TiN вакуумно-дугових покриттів за даними різних дослідників знаходиться в інтервалі від 386 [15] до 640 ГПа [16], то для розрахунків було прийнято значення  $E_c = 617$  ГПа [17] та  $\mu_c = 0,3$ . Залежність показника сингулярності від кута  $\theta^c$  зображено на рис. 3 штриховою лінією. Суцільна лінія відповідає випадку, коли  $G_s = G_c$ ,  $\mu_s = \mu_c = 0,3$ . Для даного випадку розв'язок характеристичного рівняння для кута  $\theta^c = 180^\circ$  співпадає з відомим результатом механіки руйнування ( $\lambda - 1 = -0,5$ ).

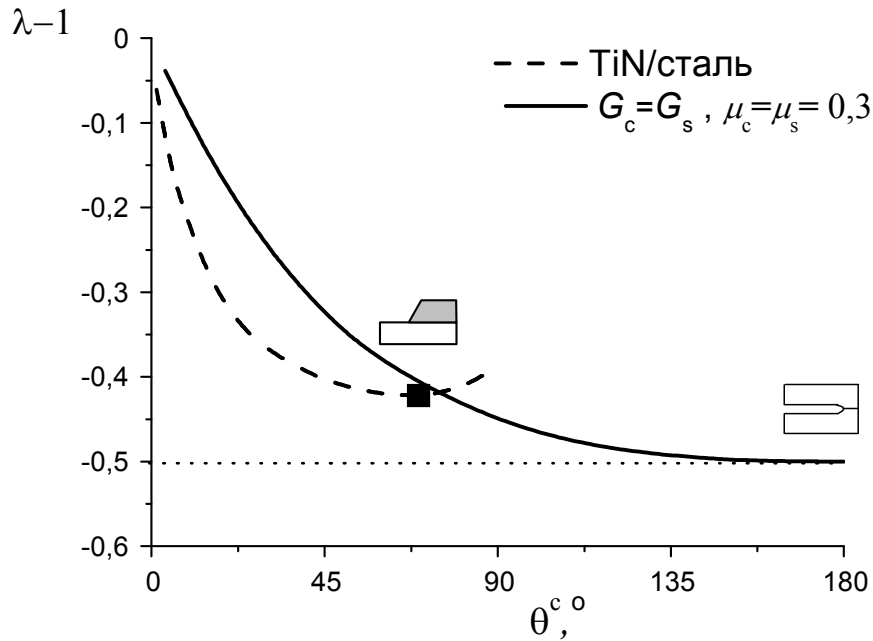


Рисунок 3. Залежність показника сингулярності  $\lambda - 1$  від кута вільної кромки TiN вакуумно-дугового покриття  $\theta^\circ$ , яке напилене на сталь 12X18H10T ( $E_s = 210$  ГПа,  $\mu_c = 0,28$  [9])

Аналіз залежності  $\lambda - 1$  від кута  $\theta^\circ$  вільної кромки TiN вакуумно-дугового покриття дозволяє зробити висновок, що сингулярність полів напружень має складний характер. Максимальне значення сингулярності в системі основа–покриття виникає при куті вільної кромки вакуумно-дугового покриття  $70^\circ$  (на рис. 3 ця точка зображена у вигляді чорного квадрата). Найнебезпечнішим кутом вільної кромки є кут  $45\dots 80^\circ$ . Такий кут слід уникати при проектуванні вакуумно-дугових покриттів, оскільки необхідно прагнути до зниження сингулярності полів напружень. Тому при проектуванні й нанесенні таких покриттів необхідно домагатися зниження цього кута до величини менше  $45^\circ$ .

Також була досліджена сингулярність полів напружень, що виникає в покритті після його розтріскування. В даному випадку порядок сингулярності є коренем трансцендентного характеристичного рівняння, яке отримали А.Р. Зак і М.Л. Вільямс [18]. Розраховані значення показника сингулярності як функції співвідношення модулів зсуву покриття і основи наведено на рис. 4. Точкою на рисунку наведено показник сингулярності ( $\lambda - 1 = -0,5$ ) для тріщини в однорідному матеріалі. Так само на цьому рисунку наведено розв'язок трансцендентного характеристичного рівняння для  $\theta^\circ = 90^\circ$ , отриманого в роботі [9]. Необхідно відзначити, що для TiN вакуумно-дугового покриття існує два корені ( $\lambda_1 - 1 = -0,387$  та  $\lambda_2 - 1 = -0,280$ ). Оскільки значення цих коренів дуже близькі, то в таких покриттях немає сильної та слабкої сингулярностей на відміну від плазмових покриттів [9]. Тому при визначенні інтенсивності напружень необхідно брати до уваги два корені  $\lambda_1 - 1$  та  $\lambda_2 - 1$ .

Аналіз графіків, наведених на рис. 4, дозволяє зробити висновок, що показник сингулярності у вакуумно-дугових покриттях після розтріскування вище в порівнянні з аналогічним показником для покриттів, у яких кут вільної кромки  $\theta^\circ = 90^\circ$ . Це ще раз доводить доцільність створення вакуумно-дугових покриттів дискретної структури [5,6,11].

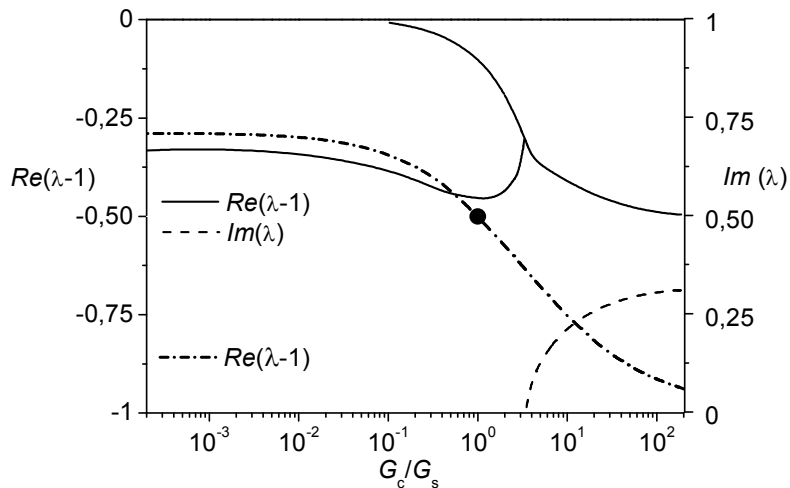


Рисунок 4. Корені характеристичних рівнянь, отриманих у [9] (суцільна лінія –  $Re(\lambda - 1)$ ); штрихова –  $Im(\lambda)$ ) і в [18] (штрих-пунктирна лінія –  $Re(\lambda - 1)$ )

**Висновки.** Отримані результати свідчать про те, що, змінюючи технологічні параметри напилювання покриттів і кут вільної кромки покриття, можна впливати на величину сингулярності, а отже, на напружений стан системи основа–покриття на етапі напилювання і проектування покриття. Зроблено висновок, що для вакуумно-дугових покриттів з TiN найнебезпечнішим кутом вільної кромки є кут  $45\text{...}80^\circ$ . Тому при проектуванні й нанесенні таких покриттів необхідно домагатися зниження цього кута до величини менше  $45^\circ$ .

#### Література

1. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями [Текст] / А.С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. Повышение работоспособности режущих инструментов, оснащенных ПСТМ на основе КНБ, вакуумно-дуговыми покрытиями [Текст] / М.Ю. Копейкина, С.А. Клименко, Ю.А. Мельничук, В.М. Береснев // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 5. – С.87–97.
3. Смирнов, И.В. Некоторые особенности ионно-плазменной металлизации керамических порошков [Текст] / И.В. Смирнов // Современная электрометаллургия. – 2011. – №2. – С. 15–19.
4. О формировании микро-, нанослойных покрытий методом вакуумно-дугового осаждения [Текст] / Ю.В. Кунченко, В.В. Кунченко, Г.Н. Кармазов, И.М. Неклюдов // Физическая инженерия поверхности. – 2004. – Т.2. – №12. – С. 102–108.
5. Матвеев, Н.В. Получение несплошных износостойких покрытий в вакууме с применением формирующего сепаратора [Текст] / Н.В. Матвеев // Сварочное производство. – 2007. – № 5. – С. 35–38.
6. Антонюк, В.С. Дискретні покриття на різальному інструменті [Текст] / В.С. Антонюк, О.Б. Сорока, Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский // Проблемы прочности. – 2007. – №1. – С. 138–143.
7. Multicracking observation in films by video microscopes / V.N. Borovytsky, N.A. Dolgov, A.V. Rutkovsky, V.V. Fesenko // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – №5(21). – С. 54–56.
8. Williams, M. L. Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension / M. L. Williams // Journal of Applied Mechanics. – 1952. – V.19. – P. 526–528.
9. Долгов, Н.А. Сингулярность полей напряжений в системе основа-покрытие [Текст] / Н.А. Долгов, Е.Б. Сорока // Проблемы прочности. – 2004. – №6. – С. 119–127.
10. Sjoström, S. Influence of TBC end geometry on the TMF life of an APS TBC / S. Sjoström, H. Brodin // Procedia Engineering. – 2010. – V.2, No1. – P.1363–1371.
11. Матвеев, Н.В. Параметры несплошных износостойких покрытий, получаемых в вакууме [Текст] / Н.В. Матвеев // Сварочное производство. – 2003. – №4. – С. 15–22.
12. Недашковский, А.П. Анализ и синтез технологических процессов обработки лопаток ГТД на основе функционально-ориентированного подхода [Текст] / А.П. Недашковский, А.Н. Михайлов, Е.А. Михайлова // Міжнародний збірник наукових праць “Прогресивні технології і системи машинобудування”. – Вип. №37. – С. 159–167.

13. Пат. України № 54100 А МПК 7 С23С 14/04. Спосіб нанесення нітридного декоративного рельєфного покриття на поверхню виробу [Текст] / Михайлов В.О. – № 2002053915, заявл. 14.05.2002.
14. Тимошенко, С.П. Теорія пружності [Текст] / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
15. Characterization and hardness modelling of alternate TiN y TiCN multilayer cathodic arc PVD coating on tool steel / E. Bemporad, C. Pecchio, S. De Rossi, F. Carassiti // Surface and Coatings Technology. – 2001. – V.146–147. – P. 363–370.
16. Bell, T. Surface engineering design: modelling surface engineering systems for improved tribological performance / T. Bell, K. Maoa, Y. Suna // Surface and Coatings Technology. – 1998. – V.108–109, No10. – P. 360–368.
17. Hörling, A. Mechanical properties and machining performance of  $Ti_{1-x}Al_xN$ -coated cutting tools / A. Hörling, L. Hultmana, M. Odénb et al // Surface and Coatings Technology. – 2005. – V.191, No 2–3. – P. 384–392.
18. Zak, A. R. Crack point stress singularities at a bi-material interface / A. R. Zak, M. L. Williams // Journal of Applied Mechanics. – 1963. – V.30. – P. 142–143.

*Отримано 04.05.2011*