УДК 539.375.5:621.793.74

Копилов В.І., докт. техн. наук, професор
Петренко В.В., аспірант
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ
Кузін М.О., докт. техн. наук, професор
Національний університет «Львівська політехніка»
Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СТАН СИТЕМИ «ОСНОВА – ПОКРИТТЯ» В УМОВАХ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ І ТРІЩИНОУТВОРЕННІ ПРИ ВИПРОБУВАННІ НА ЗГИН

Розробка та вдосконалення технології плазмового напилення високоміцних та високотемпературних покриттів відноситься до одних із основних напрямів розвитку сучасного матеріалознавства. Зокрема, це стосується створення багатофазових покриттів на основі сумішей керамічних та металевих матеріалів [1, 2]. У сформованому покритті характерна наявність тріщин, що виникають при нанесенні та що розвиваються при експлуатації матеріалу. Розроблюються підходи до конструювання структури покриття з позиції гальмування розвитку тріщини у системі «основа – покриття».

Як при утворенні з'єднання, так і при руйнуванні покриттів відбувається зміна вільної поверхні та поверхневої енергії контактної системи «основа – покриття». Процеси, що супроводжують встановлення міцних зв’язків при формуванні покриттів, а також і їх руйнуванні, залежатимуть від напруженого і енергетичного стану отриманої композиції.

В умовах впливу зовнішніх факторів, таких як напруги, деформації, температурні поля, можливе зародження та розповсюдження тріщин, що супроводжується розтріскуванням або відшаруванням покриття.

Метою роботи було опробування методики оцінки тріщиностійкості та характеру руйнування багатофазного плазмового покриття за умов випробування композиції на вигин на базі розгляду енергетичного балансу системи «основа – покриття» в момент виникнення тріщини, розтріскування та відшарування.

Характеристикою опору руйнування матеріалів служить коефіцієнт інтенсивності напруг K_{1c}, пов'язаний в свою чергу з роботою, яку необхідно виконати для ініціювання поширення тріщини G_{1c},

Поряд з критичними параметрами K_{1c} і G_{1c} ініціювання тріщин визначається інтегральною характеристикою - питомою ефективною роботою руйнування $\gamma_{еф}$, за допомогою якої можна регулювати кінетику руйнування.

За цих умов діють основні залежності [2, 3]:

$$K_{1C} = \sqrt{\frac{2\pi E \gamma_{\acute{y}\hat{o}}}{(1-\nu^2)}}\,,\ G_{1C} = \frac{(1-\nu^2)K_{1C}}{E}\,,\ K_{1C} = \lambda (G_{1C}E)^{1/2}, \qquad G_{1C} = 2\gamma_{1c}\,, \tag{1}$$

де ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності; λ - постійна, яка залежить від коефіцієнта Пуассона.

При розрахунку енергії, запасеної в системі «основа-покриття» ΔU, в момент виникнення тріщини в покритті враховується робота, виконана прикладеною силою, розсіювання, пов'язане з пластичною деформацією поверхневих шарів основи, зміна міжфазної енергії та енергія деформації, яка звільняється при розвитку тріщини [2 3]:

$$\Delta U = \Phi\,(\Delta W, \Delta W_d, \Delta U_s, \Delta U_e) \tag{2}$$

Формування покриттів в умовах плазмового напилення визначається сукупністю явищ в поверхневих шарах контактуючих систем, що приводять до встановлення міцних зв'язків на певній площі фізичного контакту $\bar{F}_{\phi}$ [4]. При розгляді фізичної моделі взаємодії і фактичної площі контакту необхідно враховувати основні параметри і фізико-механічні характеристики, як елементів покриття (швидкість і дисперсність частинок), так і поверхневих шарів, такі як структуру, дислокаційну будову, параметри грат, температуру в контакті, міцність міжатомних зв'язків. що у свою чергу впливає на адгезійні і когезійні властивості покриття.

Для міжфазної тріщини (відшарування) отримуємо ріщення [2]: :

$$\gamma_{\text{мф}} = \left(\bar{F}_{\text{ф}}\right)^2 \frac{(\sigma_{в}^{\text{осн}})^2 \cdot d}{E_o}\left(\frac{1-\nu^2}{16\pi}\right) \quad \text{та} \quad K_{1C} = \left[\left(\bar{F}_{\text{ф}}\right)^2 \frac{(\sigma_b^{\text{осн}})^2 \cdot d\left(1-\nu^2\right)}{8\pi}\sigma_n\right]^{1/2} \qquad (3)$$

На рис. 1 представлена функціональна залежність параметрів (швидкість, дисперсність частинок, площа фізичного контакту), що характеризують процес напилення покриття, з одного боку, і адгезійно-когезійні властивості $(\Delta G_{мф}, \Delta G_n)$ при навантаженні композиційного матеріалу до моменту руйнування покриття, з іншого боку [2].

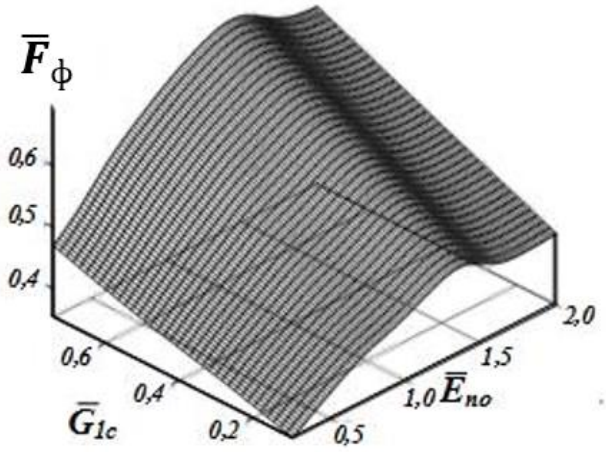

Рис.1 – Співвідношення інтенсивності вивільненої енергії при утворенні міжфазної тріщини та при розтріскуванні покриття $\bar{G}_{1c} = \Delta G_{мф} / \Delta G_n$ залежно від відносної площі контакту $\bar{F}_{\phi}$ та відношення модулів пружності покриття/основа $\bar{E}_{по}$.

На рис.2 представлені результати розрахунків енергетичних параметрів систем (*G* та *U*) від параметрів напилення і властивостей сформованого покриття.

Маючи у своєму розпорядженні теоретичні або експериментальні дані про швидкість і діаметр частинок, що напиляються, відносної площі фізичного контакту або міцності зчеплення таких частинок (ламелів, сплетів) до основи, можна оцінити тріщиностійкість даного покриття [1, 2].

Під впливом навантаження для покриттів різного складу характерний різний режим руйнування – адгезійне чи когезійне. У деяких випадках когезійна руйнація може супроводжуватися розривом адгезійних зв'язків.

Розрахунково-експериментальні дані для низки покриттів та систем в результаті випробувань на вигин, у тому числі і за наявності штучно наведених тріщин (концентратори напруги), що робиться для порівняння, представлені у таблиці 1.

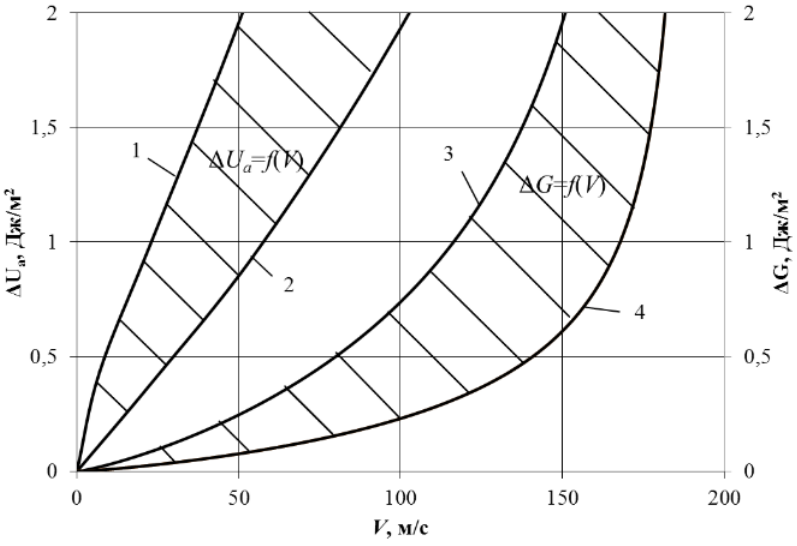

Рис.2 – Енергетичні характеристики системи «основа – покриття» в залежності від параметрів напилення: залежність роботи адгезії ΔU_a (заштрихована зона між кривими 1-2) і залежність вивільненої енергії при руйнуванні міжфазної зони ΔG (область між кривими 3-4) від швидкості частинок V.

Таблиця 1 – Розрахункові параметри тріщиностійкості та напружень в покритті системи «основа – покриття»

№	Матеріал суміші для покриттів	σ_{cr}, ИПа	G, Дж/м	K_{1c},МПа·м$^{1/2}$
1	NiCr (50%) – ZrO_2 (50%), без штучної тріщини	86,32	505	2,51
2	NiCr (50%) – ZrO_2 (50%), із однією трішиною	74,93	357	2,11
3	NiCr (50%) – ZrO_2 (50%), з двома трішинами	59,19	202	1,59
4	NiAl (50%) – ZrO_2 (50%)	69,40	336	2,09

Отримані експериментально-теоретичні дані дають можливість описати взаємозв'язок параметрів напилення з характеристиками тріщиностійкості системи (K_{1c}, ΔG Зі збільшенням щільності покриття та з наближенням його модуля пружності до пружних характеристик основного матеріалу збільшується стійкість до руйнування.

Список посилань

1. Kopylov V. I. Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties [Text] / V. I. Kopylov // Eastern-Eurohean Journal of Enterprise Technologies.– 2016.– 5/5 (83).– P. 49–57.

2. Копилов В.І., Смирнов І.В., Селіверстов І.А. Формування та властивості плазмових багатофазних покриттів з нанорозмірними складовими**.** Монографія. Вид. Киев: «Наукова думка**»,** 2019. – 480 с.

3. Hu M.S., Evans A.G. The cracking and decohesion of thin films on ductile substrates// Acta metall.- 1989. -V.37, No 3.- P.917-925.

4. Копилов В. І. Вплив параметрів частинок і мікрорельєфу поверхні на формування фізичної площі контакту при газотермічному напиленні [Текст] / В. І. Копилов, І. В. Смирнов // Вестник национального технического університету Украины «Киевский политехнический институт». – 2008. **–** № 53. **–** С. 5–17.