

УДК 621.793.7

Канд. техн. наук В. Г. Шевченко, О. Г. Попович

Національний технічний університет, м. Запоріжжя

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СКЛАДУ ПОКРИТТЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ В НЬОМУ ТЕМПЕРАТУРНИХ НАПРУЖЕНЬ

Розроблено методику зниження температурних напружень у покриттях на деталях, що працюють в умовах неоднорідного температурного поля. Методика дозволяє розраховувати концентрації компонентів суміші, з якої шляхом напилювання формується захисне покриття.

Покриття, температурні напруження, концентрація компонентів, адгезія

В сучасному машинобудуванні для захисту деталей, які працюють в контакт з агресивними середовищами при підвищених температурах, використовують покриття з матеріалів, інертних до впливу цих середовищ при температурах експлуатації. При підвищених робочих температурах в деталі з нанесеним покриттям у системі «покриття-основа» значно зростають напруження, що часто призводить до руйнування покриття. Температурні напруження обумовлені різницею коефіцієнтів лінійного термічного розширення матеріалів покриття й основи. Для підвищення працездатності та надійності деталей з покриттями, які функціонують в агресивних середовищах при підвищених температурах, важливо вміти регулювати температурні напруження, що виникають у покриттях під час експлуатації. З цією метою застосовують проміжні підшари між основою та зовнішнім шаром покриття, які забезпечують поступовий перехід властивостей від матеріалу основи до матеріалу зовнішнього шару покриття.

Мета роботи – аналітично визначити, як треба обирати склад покриття для деталі, яка працює в агресивному середовищі при підвищених температурах за умов неоднорідності температурного поля, щоб температурні напруження у покритті були мінімальні.

Причиною руйнування більшості покриттів є напруження першого роду, що зрівноважуються в об'ємах, розміри яких мають порядок товщини всього покриття [1]. Тому для аналітичного оцінювання температурного поля і температурних напружень у деталі із захисним покриттям було використано теорію фізики суцільного середовища.

Перш ніж подати загальний розв'язок розгляданого завдання, треба сформулювати два важливих проміжних результати.

Щоб температурні напруження в неоднорідному за властивостями тілі були відсутні, необхідно виконати умову:

$$\alpha_T \cdot \theta = \text{const}, \quad (1)$$

де θ – приріст температури в даній точці тіла

відносно температури T_0 , при якій у ньому відсутні температурні напруження,

α_T – середній коефіцієнт лінійного термічного розширення в інтервалі температур (T_0 ; $T_0 + \theta$).

Зокрема, якщо температура по об'єму тіла постійна, тобто градієнту температур нема ($\theta = \text{const}$), то температурні напруження в тілі, вільному від поверхневих і об'ємних сил, будуть відсутні лише у випадку постійності коефіцієнта лінійного термічного розширення по об'єму тіла $\alpha_T = \text{const}$. Тому, якщо деталь з нанесеним покриттям у робочих умовах нагріта рівномірно по об'єму, то знизити температурні напруження в покритті можна тільки шляхом вибору матеріалів покриття й основи з якомога ближчими коефіцієнтами лінійного термічного розширення. На практиці досягти цього часто неможливо, і в покритті, товщина, а тому і жорсткість якого є малою у порівнянні з товщиною основи, виникають температурні напруження, пропорційні до різниці коефіцієнтів лінійного термічного розширення покриття й основи. (Напруження в основі при цьому на порядок менші за напруження у покритті.) Однак і в цьому разі при застосуванні градієнтного підшару між покриттям і основою працездатність системи «покриття-основа» буде підвищено. Причина цього полягає в тому, що найважливішою характеристикою покриття є міцність його зчеплення з основою (адгезія). У випадку застосування градієнтного проміжного підшару покриття матеріал його тонкого шару, прилеглого до основи, матиме значення α_T таке саме, як і у основи. Тому напруження в цьому тонкому шарі покриття (бо адгезійна міцність менша за когезійну) будуть меншими, ніж напруження у зовнішньому шарі покриття.

Друге питання – якщо тіло виготовлено з матеріалу з градієнтними властивостями, то як повинен змінюватися склад композиції, щоб виконувалася умова мінімізації температурних напружень (1)?

Теплофізичні властивості двохкомпонентної композиції (наприклад, метал-кераміка) є функ-

ціями концентрації c одного з компонентів композиції у розглядуваній точці тіла:

$$\alpha_T = \alpha_T(c), \quad \lambda_T = \lambda_T(c),$$

де λ_T – теплопровідність композиції при температурі T .

Наприклад, відомо [1], що коефіцієнт лінійного термічного розширення композиції ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 3,5 \text{ \% TiO}_2$)-(Ni+Al) змінюється від $\alpha_{T_{кер}} = 6,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при вмісті кераміки ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 3,5 \text{ \% TiO}_2$) у композиції близько 100 % до $\alpha_{T_{ме}} = 13,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при вмісті кераміки ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 3,5 \text{ \% TiO}_2$) біля 0 %, причому залежність близька до лінійної, тобто

$$\begin{aligned} \alpha_{T_{комп}} &= \alpha_{T_{кер}} \cdot c_{кер} + \alpha_{T_{ме}} \cdot c_{ме} = \\ &= \alpha_{T_{ме}} - (\alpha_{T_{ме}} - \alpha_{T_{кер}}) \cdot c_{кер}, \end{aligned}$$

де $c_{кер}$ і $c_{ме}$ – частки кераміки та металічного компоненту в композиції в долях одиниці, $c_{кер} + c_{ме} = 1$.

Це питання зводиться до розв'язання системи двох рівнянь (2 і 3):

рівняння теплопровідності [2] для стаціонарного температурного поля $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0\right)$ при відсутності внутрішніх джерел теплоти ($w = 0$)

$$\text{div}[\lambda_T[c(P)] \cdot \text{grad}\theta(P)] = 0 \quad (2)$$

з його граничними умовами,

та умови мінімізації температурних напружень

$$\alpha_T[c(P)] \cdot \theta(P) = \alpha_T^* [cP^*] \cdot \theta(P^*). \quad (3)$$

З цих двох рівнянь треба визначити дві функції координат точки P тіла: шукана концентрація одного з компонентів c , що визначає склад композиції, та температурне поле θ в тілі.

Фізичний сенс описуваної методики полягає в наступному. Якщо шари матеріалу, які в робочих умовах нагріваються до більш високої температури, матимуть менший коефіцієнт термічного розширення, то ці шари набудуть при виконанні співвідношення (3) таку саму величину температурної деформації, що й шари, які функціонують при меншій температурі, але мають більший коефіцієнт термічного розширення. В результаті ті та другі шари будуть розширяться, так би мовити, незалежно, не стискаючи та не розтягуючи одні одних. Зрозуміло, що співвідношення (3) може бути виконано в тому разі, якщо шари покриття, які в умовах експлуатації нагріваються до більш високої температури, будуть збагачені тим компонентом, який має менший коефіцієнт термічного розширення (наприк-

лад, кераміка у порівнянні з металічним матеріалом).

Для вирішення задачі про мінімізацію температурних напружень у покритті, яке зчеплене з основою, в умовах градієнта температур необхідно задовольнити дві умови. Перша: щоб у покритті не виникало напружень внаслідок різниці деформації шару покриття, прилеглого до основи, і деформації основи на межі покриття-основи, необхідно, щоб переміщення точок покриття й основи на поверхні їхнього контакту дорівнювали одні одним. (Основу виготовлено з однорідного матеріалу.) Друга умова: щоб у покритті не виникало напружень внаслідок неоднакової температурної деформації різних шарів самого покриття, треба виконати умову (3). Таким чином, ця задача зводиться до розв'язання наступної системи чотирьох рівнянь.

Рівняння теплопровідності основи:

$$\text{div}[\lambda_{T_{осн}} \cdot \text{grad}\theta_{осн}(P)] = 0, \quad (4)$$

де $\lambda_{T_{осн}}$ – теплопровідність основи при температурі T .

Температура основи $\theta_{осн}(P)$ однозначно визначається рівнянням (4) з граничними умовами для функції $\theta_{осн}(P)$:

$\theta_{осн}(P_{зовн}) = \theta_{зовн}$ – температура зовнішньої поверхні основи;

де $P_{зовн}$ – множина точок зовнішньої поверхні основи;

q – густина теплового потоку, що відводиться з одиниці площі зовнішньої поверхні основи.

Граничними умовами до рівняння теплопровідності для покриття є рівність температур і рівність теплових потоків з боку покриття й основи на поверхні їхнього контакту:

$$\theta(P_{зрп}) = \theta_{осн}(P_{зрп}) = \theta_1;$$

$$\begin{aligned} \lambda_{(T_0+\theta_1)}[c(P_{зрп})] \cdot \text{grad}\theta(P_{зрп}) = \\ = \lambda_{(T_0+\theta_1)осн} \cdot \text{grad}\theta_{осн}(P_{зрп}). \end{aligned}$$

Умова рівності переміщень точок покриття й основи $u_{покр}$ на поверхні їхнього контакту:

$$u_{покр}(P_{зрп}) = u_{осн}(P_{зрп}). \quad (5)$$

Тут переміщення точок покриття визначаються за відносною деформацією шару покриття, прилеглого до основи. При відсутності напружень у покритті ця деформація є суто температурною:

$$\varepsilon_{покр}(P_{зрп}) = \alpha_{T_1}(P_{зрп}) \cdot \theta_1.$$

Нелінійне рівняння теплопровідності для покриття (2).

Умова мінімізації температурних напружень у покритті (3), в якій вважаємо, що точка P^* належить множині точок P_{zpl} поверхні контакту покриття й основи, тоді $\theta(P^*) = \theta_1$.

Таким чином, на основі теорій термопружності та теплопередачі розроблено методику визначення концентрацій компонентів захисного покриття для деталі, яка працює в агресивному середовищі при підвищених температурах за умов неоднорідності температурного поля. Методику спрямовано на зниження в покритті температур-

них напружень, які виникають у випадку різниці в коефіцієнтах термічного розширення матеріалів покриття й основи, а також при утворенні в деталі градієнта температур.

Перелік посилань

1. Кудинов В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. — М. : Машиностроение, 1981. — 192 с.
2. Коваленко А. Д. Термоупругость / А. Д. Коваленко. — К. : Вища школа, 1975. — 216 с.

Поступила в редакцию 17.07.2009

V. G. Shevchenko, A. G. Popovich

CALCULATION OF COATING COMPOSITION FOR MINIMIZATION OF THERMAL STRESS IN THE COATING

Разработана методика снижения температурных напряжений в покрытиях на деталях, работающих в условиях неоднородного температурного поля. Методика позволяет рассчитывать концентрации компонентов смеси, из которой путем напыления формируется защитное покрытие.

Покриття, температурные напряжения, концентрация компонентов, адгезия

There is developed technique for reduction of thermal stress in the coating of parts, operating in conditions of temperature gradient. The technique allows to calculate concentrations of mixture components used for protective coating formation by spraying.

Coating, thermal stresses, concentration of components, adhesion