

РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ У ПОКРИТТЯХ, НАНЕСЕНИХ СПОСОБОМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАПИЛЕННЯ НА ПЛОСКІ ПОВЕРХНІ

На основі розробленої узагальненої нелінійної математичної моделі теплових процесів при високотемпературному нанесенні захисних покриттів і з використанням побудованої чисельно-аналітичної методики розв'язування відповідних нелінійних крайових задач термпружності проведено дослідження і розрахунок впливу зміни режимів нанесення, геометричних і фізико-механічних параметрів системи тіло – покриття на розподіл температури і залишкових напружень (деформацій) системи шар – напилене двостороннє покриття.

Серед важливих експлуатаційних характеристик покриттів є їх міцність, витривалість, жаротривкість, якість зчеплення з основою (адгезія). Ці властивості визначаються низкою факторів, зокрема теплофізичними, електрофізичними та механічними характеристиками матеріалів підкладки та покриття і їх співвідношенням, структурою покриттів, їх щільністю (пористістю), чистотою напилюваної поверхні основи, величиною залишкових деформацій у напилених покриттях. Так, врахування величини пружних залишкових деформацій, залежності від їх знаку, може вносити суттєві поправки у граничні значення температур, при яких у керамічних, металокерамічних та інших крихких покриттях величини пошкоджуваності при нагріванні досягають критичних значень і покриття втрачають захисні властивості [12]. Експериментальне визначення залишкових деформацій пов'язане з певними труднощами, зумовленими не лише теплофізичними та механічними факторами, а й режимами напилення покриттів та іншими, чисто технічними, можливостями.

Тому у вирішенні проблеми розрахунку і дослідження залишкових явищ у покриттях при високотемпературному напиленні все більшого значення набувають ефективніші аналітичні підходи, побудова математичних моделей, які б враховували визначальні параметри системи, та розробка аналітико-числових методів розв'язування відповідних крайових задач. Саме таким способом дослідимо процес високотемпературного двостороннього напилення покриттів різних товщин ($2\delta_1$ і $2\delta_3$) на поверхні теплопровідного шару постійної товщини $2\delta_2$ з початковою температурою T_{01} (див. рис. 1, де позначено: 3 – основа; 2, 4 – покриття; 1, 5 – випромінювальні поверхні).

У розглядуваному випадку теплофізичні та фізико-механічні характеристики покриттів можуть бути різними і відмінними від таких характеристик матеріалу основи. У межах невеликих температурних інтервалів можна вважати ці характеристики сталими, середніми в кожному інтервалі.

При напиленні покриттів у газовому середовищі доцільно припустити, що на вільних поверхнях основи $z = \pm \delta_2$ у першому інтервалі часу $0 \div \tau_1$ (попереднє радіаційно-конвективне нагрівання основи) та на зовнішніх поверхнях покриттів $\delta_2 + 2\delta_1$ та $\delta_2 + 2\delta_3$ в інтервалах часу $\tau_1 \div \tau_2$ (тривалість

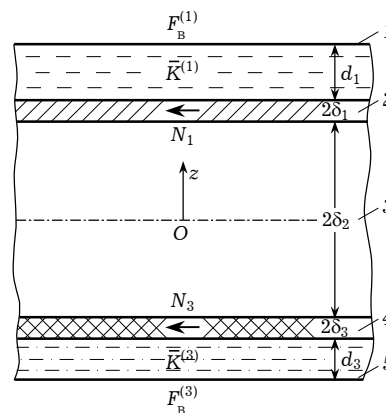


Рис. 1

нанесення покриття) і при $\tau > \tau_2$ (подальша термообробка виробу з покриттям) має місце променистий і конвективний теплообмін з оточуючим середовищем, а в областях контакту основи з покриттями ($z = \pm \delta_2$) – ідеальний тепловий контакт [3].

Розподіл абсолютної температури $T_2(z, \tau)$ за товщиною шару описується розв'язком рівняння теплопровідності [5]

$$a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} = \frac{\partial T_2}{\partial \tau}, \quad (1)$$

який задовольняє початкову умову

$$T_2(z, \tau) = T_{01} = \text{const}, \quad \tau = 0, \quad (2)$$

та узагальнені нелінійні граничні умови [3], єдині для всіх етапів (проміжків часу) і які в розглядуваному випадку мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} G_1^{(1)} [\theta(\tau) - \theta(\tau - \tau_1)] + G_2^{(1)} [\theta(\tau - \tau_1) - \theta(\tau - \tau_2)] + G_3^{(1)} \theta(\tau - \tau_2) &= 0, \quad z = \delta_2, \\ G_1^{(3)} [\theta(\tau) - \theta(\tau - \tau'_1)] + G_2^{(3)} [\theta(\tau - \tau'_1) - \theta(\tau - \tau'_2)] + G_3^{(3)} \theta(\tau - \tau'_2) &= 0, \quad z = -\delta_2, \end{aligned} \quad (3)$$

де $a_2 = \frac{\lambda_2^z}{\omega_2}$ – температуропровідність матеріалу основи;

λ_2^z, ω_2 – коефіцієнт теплопровідності в напрямку z і теплоємність матеріалу основи відповідно;

$\theta(\tau)$ – одинична функція Гевісайда.

Оскільки покриття можуть наноситись на поверхні шару $z = \delta_2$ і $z = -\delta_2$ з різних матеріалів і різних товщин ($\delta_1 \neq \delta_3$), то, взагалі кажучи, початки і завершення напilenня цих покриттів можуть бути різними ($\tau_1 \neq \tau'_1, \tau_2 \neq \tau'_2$).

У співвідношеннях (3) введено такі позначення:

$$\begin{aligned} G_1^{(1)} &= \lambda_2^z \frac{\partial T_2}{\partial z} - \varepsilon_2 \varepsilon_B^{(1)} \sigma_0 (T_B^{(1)})^4 P_B^{(1)} + \varepsilon_2 \sigma_0 [T_2^4 - \varepsilon_{\text{пр}}^{(1)} (T_{\text{пр}}^{(1)})^4] - \\ &\quad - \alpha_2^{(1)} (T_{\text{пш}}^{(1)} - T_2) + q_1^{(1)}, \quad z = \delta_2, \quad 0 < \tau < \tau_1, \\ G_1^{(3)} &= -\lambda_2^z \frac{\partial T_2}{\partial z} - \varepsilon_2 \varepsilon_B^{(3)} \sigma_0 (T_B^{(3)})^4 P_B^{(3)} + \varepsilon_2 \sigma_0 [T_2^4 - \varepsilon_{\text{пр}}^{(3)} (T_{\text{пр}}^{(3)})^4] - \\ &\quad - \alpha_2^{(3)} (T_{\text{пш}}^{(3)} - T_2) + q_1^{(3)}, \quad z = -\delta_2, \quad 0 < \tau < \tau'_1, \\ G_2^{(1)} &= -\omega_1 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} - \lambda_2^z \left(1 + \frac{\alpha_1^{(1)}}{h_1} \right) \frac{\partial T_2}{\partial z} + \varepsilon_1 \varepsilon_B^{(1)} \sigma_0 (T_B^{(1)})^4 P_B^{(1)} - \\ &\quad - \varepsilon_1 \sigma_0 [T_2^4 - \varepsilon_{\text{пш}}^{(1)} (T_{\text{пш}}^{(1)})^4] + \alpha_1^{(1)} (T_{\text{пш}}^{(1)} - T_2) - 4\varepsilon_1 \sigma_0 T_2^3 \frac{\lambda_2^z}{h_1} \frac{\partial T_2}{\partial z} + \\ &\quad + q_1^{(1)} + \left(1 + \frac{\alpha_1^{(1)}}{2h_1} + 2\varepsilon_1 \sigma_0 \frac{T_2^3}{h_1} \right) W_1, \quad z = \delta_2, \quad \tau_1 < \tau < \tau_2, \\ G_2^{(3)} &= -\omega_3 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} + \lambda_2^z \left(1 + \frac{\alpha_1^{(3)}}{h_3} \right) \frac{\partial T_2}{\partial z} + \varepsilon_3 \varepsilon_B^{(1)} \sigma_0 (T_B^{(3)})^4 P_B^{(3)} - \\ &\quad - \varepsilon_3 \sigma_0 [T_2^4 - \varepsilon_{\text{пш}}^{(3)} (T_{\text{пш}}^{(3)})^4] + \alpha_1^{(3)} (T_{\text{пш}}^{(3)} - T_2) + 4\varepsilon_3 \sigma_0 T_2^3 \frac{\lambda_2^z}{h_3} \frac{\partial T_2}{\partial z} + \\ &\quad + q_2^{(3)} + \left(1 + \frac{\alpha_1^{(3)}}{2h_3} + 2\varepsilon_3 \sigma_0 \frac{T_2^3}{h_3} \right) W_3, \quad z = -\delta_2, \quad \tau'_1 < \tau < \tau'_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
G_3^{(1)} = & -\omega_1 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} - \lambda_2^z \left(1 + \frac{\alpha_1^{(1)}}{h_1} \right) \frac{\partial T_2}{\partial z} - \varepsilon_1 \sigma_0 [T_2^4 - \varepsilon_{\text{pc}}^{(1)} (T_{\text{pc}}^{(1)})^4] - \\
& - \alpha_1^{(1)} (T_{\text{pc}}^{(1)} - T_2) - 4\varepsilon_1 \sigma_0 T_2^3 \frac{\lambda_2^z}{h_1} \frac{\partial T_2}{\partial z} + q_3^{(1)} + \\
& + \left(1 + \frac{\alpha_1^{(1)}}{2h_1} + 2\varepsilon_1 \sigma_0 \frac{T_2^3}{h_1} \right) \tilde{W}_1, \quad z = \delta_2, \quad \tau > \tau_2, \\
G_3^{(3)} = & -\omega_3 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} + \lambda_2^z \left(1 + \frac{\alpha_1^{(3)}}{h_3} \right) \frac{\partial T_2}{\partial z} - \varepsilon_3 \sigma_0 [T_2^4 - \varepsilon_{\text{pc}}^{(3)} (T_{\text{pc}}^{(3)})^4] + \\
& + \alpha_1^{(3)} (T_{\text{pc}}^{(3)} - T_2) + 4\varepsilon_3 \sigma_0 T_2^3 \frac{\lambda_2^z}{h_1} \frac{\partial T_2}{\partial z} + q_3^{(3)} + \\
& + \left(1 + \frac{\alpha_1^{(3)}}{2h_3} + 2\varepsilon_3 \sigma_0 \frac{T_2^3}{h_3} \right) \tilde{W}_3, \quad z = -\delta_2, \quad \tau > \tau'_2,
\end{aligned}$$

де λ_1^z, λ_3^z – теплопровідності покриттів;

$$h_1 = \frac{\lambda_1^z}{2\delta_1}, \quad h_3 = \frac{\lambda_3^z}{2\delta_3} \quad \text{– теплопроникливості покриттів};$$

$\omega_1 = 2\delta_1\omega^{(1)}, \omega_3 = 2\delta_3\omega^{(3)}$ та $\omega^{(1)}, \omega^{(3)}$ – зведені та питомі теплоємності покриттів;

$$\sigma_0 = 5.76 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4) \quad \text{– постійна Стефана – Больцмана};$$

$\varepsilon_{\text{в}}^{(1)}, \varepsilon_{\text{в}}^{(3)}$ і $T_{\text{в}}^{(1)}, T_{\text{в}}^{(3)}$ – ступені чорноти та абсолютні температури випромінювальних поверхонь $F_{\text{в}}^{(1)}$ і $F_{\text{в}}^{(3)}$;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – ступені чорноти поверхонь основи та вільних поверхонь покриттів 1 та 3 відповідно;

$\alpha_2^{(1)}, \alpha_1^{(1)}, \alpha_1^{(1)*}; \alpha_2^{(3)}, \alpha_1^{(3)}, \alpha_1^{(3)*}$ – коефіцієнти тепловіддачі у виділених часових інтервалах;

$$P_{\text{в}}^{(1)} = \frac{1}{F_{\text{в}}^{(1)}} \int_{F_1} dF_1 \int_{F_{\text{в}}^{(1)}} \frac{e^{-d_1 \bar{K}^{(1)}}}{\pi d_1^2} dF_{\text{в}}^{(1)}, \quad P_{\text{в}}^{(3)} = \frac{1}{F_{\text{в}}^{(3)}} \int_{F_3} dF_3 \int_{F_{\text{в}}^{(3)}} \frac{e^{-d_3 \bar{K}^{(3)}}}{\pi d_3^2} dF_{\text{в}}^{(3)};$$

$\bar{K}^{(1)}, \bar{K}^{(3)}$ – середні коефіцієнти поглинання середовищ товщин d_1 і d_3 ;

$\varepsilon_{\text{пм}}^{(1)}, \varepsilon_{\text{пм}}^{(3)}$ – ступені чорноти потоків плазмотвірного газу з напилюваними частинками покриттів;

$T_{\text{пг}}^{(1)}, T_{\text{пг}}^{(3)}$ – абсолютні температури потоків плазмотвірного газу вздовж дистанцій наплення d_1 і d_3 відповідно;

$T_{\text{пш}}^{(1)}, T_{\text{пш}}^{(3)}$ – абсолютні температури приповерхневих потоків плазмотвірного газу біля поверхонь основи (попередня термообробка: $\tau < \tau_1, \tau < \tau'_1$) і поверхонь покриттів ($\tau_1 < \tau < \tau_2, \tau'_1 < \tau < \tau'_2$);

$T_{\text{pc}}^{(1)}, T_{\text{pc}}^{(3)}$ – абсолютні температури робочих середовищ ($\tau < \tau_2, \tau < \tau'_2$);

$$W_1 = \int_{-\delta_1}^{\delta_1} w_1 dz, \quad W_3 = \int_{-\delta_3}^{\delta_3} w_3 dz, \quad \tilde{W}_1 = \int_{-\delta_1}^{\delta_1} \tilde{w}_1 dz, \quad \tilde{W}_3 = \int_{-\delta_3}^{\delta_3} \tilde{w}_3 dz$$

– усереднені характеристики джерел тепла $w_1, w_3, \tilde{w}_1, \tilde{w}_3$, розподілених в об'ємах покриттів.

На величину залишкових деформацій впливає розподіл температури в системі, починаючи від моменту кристалізації (або тверднення) покриття до температури робочих середовища. Такий розподіл температури (включаючи температуру в зоні контакту покриття з підкладкою) у довільний момент часу (від початку радіаційно-конвективного нагрівання поверхні основи $z = \pm \delta_2$ до моменту завершення і остигання системи тіло – покриття до температури робочих середовищ) визначається розв'язком сформульованої нелінійної задачі теплопровідності (1)–(3).

Розподіл температури за товщиною шару зумовлює в ньому теплові напруження, що визначаємо за співвідношеннями [1]

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} = \sigma_{yy} &= -\frac{\beta_t^{(2)} E_2}{1 - \nu_2} T_{21}(z, \tau) + \alpha_{11} + \alpha_{21} z, \\ \sigma_{zz} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{xy} &= 0, \quad 0 < \tau < \tau_1,\end{aligned}\quad (4)$$

де $T_{21}(z, \tau)$ – розподіл температури в шарі в першому інтервалі часу; $\beta_t^{(2)}$ – лінійний коефіцієнт температурного розширення матеріалу основи; E_2 , ν_2 – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона основи.

Невідомі сталі α_{ij} визначаємо з умов самозрівноваженості поперечного перерізу системи: рівність нулю головного вектора і головного моменту зусиль, що діють на поперечний переріз. У першому інтервалі часу $0 \div \tau_1$, до нанесення покриття, ці умови мають вигляд

$$\int_{-\delta_2}^{\delta_2} \sigma_{xx} dz = 0, \quad \int_{-\delta_2}^{\delta_2} \sigma_{xx} z dz = 0, \quad (5)$$

звідки отримуємо значення α_{11} , α_{21} :

$$\alpha_{11} = \frac{\beta_t^{(2)} E_2}{1 - \nu_2} \int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{21}(z, \tau) dz, \quad \alpha_{21} = \frac{\beta_t^{(2)} E_2}{2\delta_2(1 - \nu_2)} \int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{21}(z, \tau) z dz. \quad (6)$$

Відмінні від нуля компоненти тензора деформації запишемо як

$$e_{xx} = e_{yy} = \frac{1 - \nu_2}{E_2} (\alpha_{11} + \alpha_{21} z). \quad (7)$$

Суттєві напруження в покриттях формуються після їх кристалізації (або затверднення), $\tau_2 \geq \tau_{кр}$, коли процес релаксації помітно сповільнюється. До цього моменту часу ($\tau_1 \leq \tau < \tau_{кр}$) поверхні шару можна вважати не навантаженими, а розподіли термонапружень і деформацій у шарі визначаються співвідношеннями, аналогічними до (5)–(7), але вже з урахуванням впливу покриття на теплообмін і привнесеного ними в систему певної кількості тепла.

Після кристалізації покриття ($\tau > \tau_{кр}$) напруження σ_{xx} , σ_{yy} описуються співвідношеннями

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -\frac{\beta_t^{(2)} E_2}{1 - \nu_2} T_{23}(z, \tau) + \alpha_{13} + \alpha_{23} z, \quad (8)$$

а сталі α_{13} , α_{23} визначаємо з умов рівноваги поперечного перерізу шару з двосторонніми покриттями

$$N_1 + N_3 + \int_{-\delta_2}^{\delta_2} \sigma_{xx} dz = 0, \quad N_1 \delta_2 - N_3 \delta_2 + \int_{-\delta_2}^{\delta_2} \sigma_{xx} z dz = 0, \quad (9)$$

де

$$N_1 = \frac{2\delta_1 E_1}{1 - \nu_1} [e_{xx}^{(1)} - \beta_t^{(1)} \tilde{T}_1], \quad N_3 = \frac{2\delta_3 E_3}{1 - \nu_3} [e_{xx}^{(3)} - \beta_t^{(3)} \tilde{T}_3] \quad (10)$$

– зусилля у покриттях; E_i , ν_i , $\beta_t^{(i)}$, $i = 1, 3$, – модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт лінійного температурного розширення покриття; \tilde{T}_1 , \tilde{T}_3 – усереднені температури в покриттях [3]; $e_{xx}^{(1)}$, $e_{xx}^{(3)}$ – компоненти тензорів деформацій покриття, значення яких визначаються умовами жорсткого зчеплення, сформованого після $\tau_{кр}$:

$$\begin{aligned} e_{xx}^{(1)} &= e_{xx}^{(2)}, & z &= \delta_2, & \tau &> \tau_{кр}, \\ e_{xx}^{(3)} &= e'_{xx}{}^{(2)}, & z &= -\delta_2, & \tau &> \tau'_{кр}. \end{aligned} \quad (11)$$

Отже, вважаємо, що при $\tau = \tau_{кр}$ напруження в покриттях відсутні. Усереднені за товщиною деформації основи $e_{xx}^{(2)}$, $e'_{yy}{}^{(2)}$ визначаємо для моменту часу $\tau_{кр}$ за формулами (7). При подальшому остиганні системи від $\tau_{кр}$ до температури робочого середовища деформації у покриттях та основі пов'язані такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned} e_{xx}^{(1)} &= e_{xx}^{(2)} - e_{xx}^{(2)} \Big|_{\tau=\tau_{кр}}, & z &= \delta_2, & \tau &> \tau_{кр}, \\ e_{xx}^{(3)} &= e'_{xx}{}^{(2)} - e'_{xx}{}^{(2)} \Big|_{\tau=\tau'_{кр}}, & z &= -\delta_2, & \tau &> \tau'_{кр}. \end{aligned} \quad (12)$$

З урахуванням (10), (12) зусилля в покриттях визначаються співвідношеннями

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{2\delta_1 E_1}{1 - \nu_1} \left[\frac{1 - \nu_2}{E_2} (\alpha_{13} + \alpha_{23} \delta_2) - H_s - \beta_t^{(1)} \tilde{T}_1 \right], \\ N_3 &= \frac{2\delta_3 E_3}{1 - \nu_3} \left[\frac{1 - \nu_2}{E_2} (\alpha_{13} - \alpha_{23} \delta_2) - H_r - \beta_t^{(3)} \tilde{T}_3 \right], \end{aligned} \quad (13)$$

де

$$H_s = \frac{\beta_t^{(2)}}{2\delta_2} \left[\int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{23}(z, \tau_{кр}) dz - \frac{3}{\delta_2} \int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{23}(z, \tau_{кр}) z dz \right],$$

$$H_r = \frac{\beta_t^{(2)}}{2\delta_2} \left[\int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{23}(z, \tau'_{кр}) dz - \frac{3}{\delta_2} \int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{23}(z, \tau'_{кр}) z dz \right],$$

$$\alpha_{13} = \frac{\Phi_3 \Psi_2 - \Phi_2 \Psi_3}{\Phi_1 \Psi_2 - \Phi_2 \Psi_1}, \quad \alpha_{23} = \frac{\Phi_1 \Psi_3 - \Phi_3 \Psi_1}{\Phi_1 \Psi_2 - \Phi_2 \Psi_1},$$

$$\Phi_1 = (A_1 + A_3) B_2 + 2\delta_2, \quad \Phi_2 = (A_1 - A_3) B_2 \delta_2,$$

$$\Phi_3 = A_1 H_s + A_3 H_r + A_1 \beta_t^{(1)} \tilde{T}_1 + A_2 \beta_t^{(2)} \tilde{T}_{23} + A_3 \beta_t^{(3)} \tilde{T}_3,$$

$$\Psi_1 = (A_1 - A_3) B_2, \quad \Psi_2 = (A_1 + A_3) B_2 \delta_2 + \frac{2}{3} \delta_2^2,$$

$$\Psi_3 = A_1 H_s - A_3 H_r + A_1 \beta_t^{(1)} \tilde{T}_1 + \frac{1}{3} A_2 \beta_t^{(2)} \tilde{T}_{23}^* - A_3 \beta_t^{(3)} \tilde{T}_3,$$

$$\begin{aligned}
A_1 &= \frac{2\delta_1 E_1}{1 - \nu_1}, & A_2 &= \frac{2\delta_2 E_2}{1 - \nu_2}, & A_3 &= \frac{2\delta_3 E_3}{1 - \nu_3}, & B_2 &= \frac{1 - \nu_2}{E_2}, \\
\tilde{T}_1 &= \frac{1}{2\delta_1} \int_{-\delta_1}^{\delta_1} T_1(z, \tau) dz, & \tilde{T}_3 &= \frac{1}{2\delta_3} \int_{-\delta_3}^{\delta_3} T_3(z, \tau) dz, \\
\tilde{T}_{23} &= \frac{1}{2\delta_2} \int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{23}(z, \tau) dz, & \tilde{T}_{23}^* &= \frac{3}{2\delta_2^2} \int_{-\delta_3}^{\delta_3} T_{23}(z, \tau) z dz.
\end{aligned} \tag{14}$$

Якщо в співвідношеннях (8)–(14) покласти однаковими всі параметри покриття 1 і 3, отримаємо вирази для визначення розподілу температури і залишкового напружено-деформованого стану системи тіло – покриття при остиганні напилених на поверхні шару однакових покриттів. Якщо, крім того, знехтувати впливом одного з покриттів, то задача зведеться до дослідження залишкового термонапруженого стану шару з покриттям при односторонньому напиленні.

Для розв'язання сформульованої квазістатичної нелінійної задачі термопружності (1)–(3), (4)–(14) використано розроблену чисельно-аналітичну методику розрахунку температурного поля і залишкового напруженого стану системи шар – двостороннє покриття, яка базується на сформульованій математичній моделі [3] та використанні неявної схеми скінченно-різницевого методу [8]. При цьому припускається, що розв'язок задачі існує, єдиний і достатньо гладкий для апроксимації [7]. Слід зауважити, що такий підхід до моделювання процесу високотемпературного напилення, коли напилене тонке покриття розглядається як деяка фізична поверхня [6], значно спрощує розв'язання нелінійних задач термопружності добре відомими числовими методами, зокрема методом сіток, бо дозволяє відразу ввести єдину сіткову область у багат шаровій системі тіло – покриття.

З метою дослідження впливу зміни режимів нанесення покриттів на залишковий термонапружений стан системи основа – покриття розглянемо процес одночасного напилення на поверхні шару із сталі Ст20 ніхромових (Ni80, Cr20) покриттів однакової товщини ($\delta_1 = \delta_3$, $\tau_1 = \tau'_1$). Нехай до початку процесу ($\tau = 0$) температура основи $T_{01} = 293.16\text{K}$. Товщина основи $2\delta_2 = 0.01\text{м}$, покриття – $2\delta_1 = 2\delta_3 = 8 \cdot 10^{-5}\text{м}$. Тривалість першого інтервалу часу (попередній підігрів) – 3 с, другого (напилення) – 17 с; $\lambda_2^z = 56.9\text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$, $\lambda_1^z = \lambda_3^z = 22.6\text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$; $\omega_2 = 36.8 \cdot 10^5\text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; $\omega^{(1)} = \omega^{(3)} = 40 \cdot 10^5\text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; $E_2 = 19.5 \cdot 10^{10}\text{ Н}/\text{м}^2$; $\nu_2 = 0.23$; $\beta_t^{(2)} = 19.5 \cdot 10^{-6}\text{ К}^{-1}$; $E_1 = 20.2 \cdot 10^{10}\text{ Н}/\text{м}^2$; $\nu_1 = 0.3$; $\beta_t^{(1)} = 12.3 \cdot 10^{-6}\text{ К}^{-1}$. Ступінь чорноти поверхні основи $\varepsilon_2 = 0.3$ ($0 \div \tau_1$, $z = \pm \delta_2$), покриття – $\varepsilon_1 = 0.2$; ступінь чорноти поверхонь $F_B^{(1)}$ і $F_B^{(3)}$ випромінювання $\varepsilon_B = 0.9$ [9]. Температура плавлення і кристалізації матеріалу покриття $T_{кр}^{(1,3)} = 1755\text{K}$; температура робочих середовищ $T_{рс}^{(1)} = 293.16\text{ K}$; дистанція напилення – $d_1 = d_3 = 0.1\text{м}$; плазмотвірний газ – аргон [2]. Температура приповерхневого шару турбулентного потоку плазмотвірного газу на поверхнях основи ($0 \leq \tau \leq \tau_1$) та покриття ($\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$) становила 1000K [11]. Коефіцієнти теплообміну приймали однаковими $\alpha_2^{(1)} = \alpha_1^{(1)} = 1252\text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К})$ [10] і $\alpha_1^{(1)} = 473.5\text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К})$. Кутівий коефіцієнт $P_B^{(1)} = 0.33$ при $\bar{K}^{(1)} = \bar{K}^{(3)} = 0$ [4]. Величинами теплових потоків q_i , $i = 1, 2, 3$, а також величинами $\varepsilon_2 \varepsilon_{пр} \sigma_0 T_{пр}^4$ і $\varepsilon_1 \varepsilon_{пр} \sigma_0 T_{пр}^4$ знехтувано.

На рис. 2 зображено графіки зміни з часом температури на контактній (крива 1) та серединній (крива 2) поверхнях шару товщини 0.01 м. До моменту $\tau_2 = 20$ с відбувається підвищення температури поверхні основи в зоні контакту з покриттям і температури серединної поверхні $z = 0$ підкладки, при цьому поверхні $z = \pm \delta_2$, як і слід було чекати, нагріваються швидше, ніж серединна поверхня. Після припинення наплення покриття ($\tau > \tau_2$) зона контакту охолоджується швидше, ніж серединна поверхня. Для розглядуваного випадку $\tau > 130$ с температура по всій товщині системи стає близькою до температури робочого середовища T_{pe} .

Більш наглядно виражений характер розподілу температури з часом має місце при нанесенні покриття на основу товщини 0.05 м (рис. 3). У цьому випадку режим наплення покриття підбирався таким чином, щоб в момент припинення наплення ($\tau = \tau_2$) температура в зоні контакту основи з покриттям була не нижчою від температури плавлення (тверднення) матеріалу покриття. Розрахунки підтвердили, що поверхня основи (крива 1) помітно скоріше нагрівається, ніж її серединна поверхня (крива 2). Після припинення нанесення покриття ($\tau > \tau_2$) температура в зонах контакту $z = \pm \delta_2$ спадає, а температура серединної поверхні ще деякий час продовжує зростати внаслідок притоку тепла з більш нагрітих шарів основи. Далі температури досліджуваних зон підкладки вирівнюються і асимптотично наближаються до заданої температури робочого середовища.

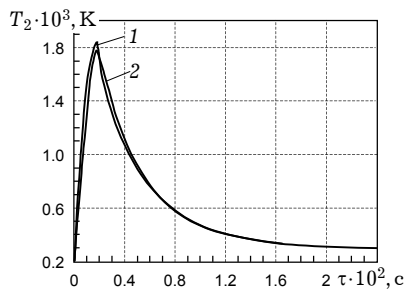


Рис. 2

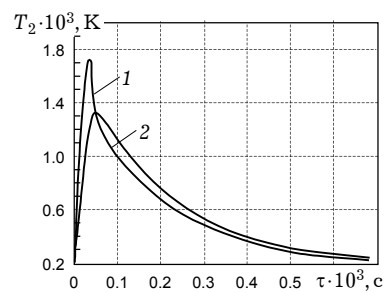


Рис. 3

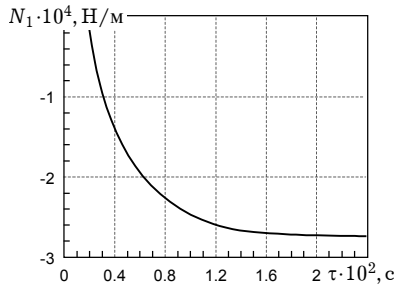


Рис. 4

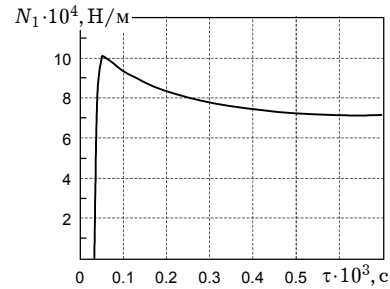


Рис. 5

На рис. 4 наведено зміну з часом залишкового зусилля $N_1 = N_3$ у покритті, нанесеному на основу товщиною 0.01 м, а на рис. 5 – на підкладку товщини 0.05 м. У першому випадку ці зусилля є зусиллями стиску, а в другому випадку – зусиллями розтягу, які мають екстремум і досягають його на етапі охолодження.

З метою дослідження впливу зміни товщини покриття на залишкові зусилля при цих же режимах наплення проведено розрахунки, в яких товщина покриття збільшувалась у 10 і 20 разів порівняно із вибраною в першому випадку товщиною 80 мкм на основи цих же товщин – 0.01 м і

0.05 м. Розрахунки показали, що збільшення товщини покриття зумовлює пониження температури в зоні контакту і на серединній поверхні основи.

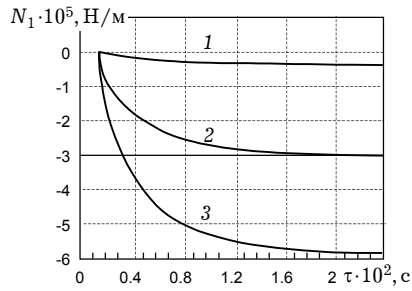


Рис. 6

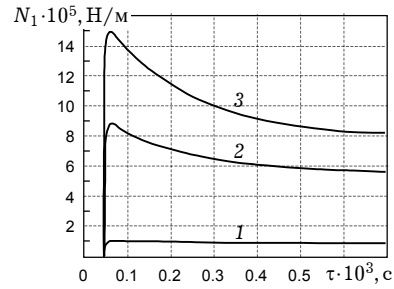


Рис. 7

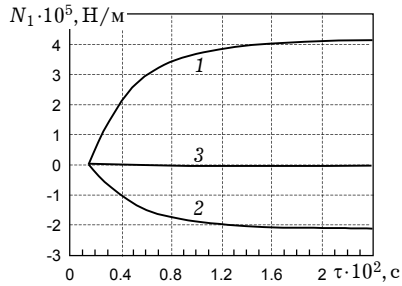


Рис. 8

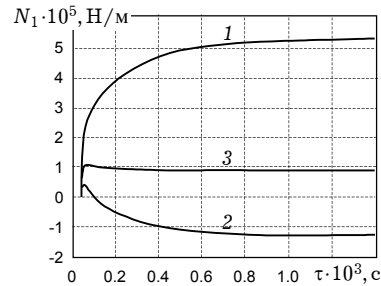


Рис. 9

На рис. 6 і 7 (товщини основи 0.01 м. і 0.05 м) наведено графіки зміни в часі залишкових зусиль N_1 у покриттях різних товщин (криві 1–3 відповідають товщинам $\delta_1 = 4 \cdot 10^{-5}$, $40 \cdot 10^{-5}$, $80 \cdot 10^{-5}$ м). У випадку збільшення товщини покриття в 10 і 20 разів на «тонкій» основі відбувається зростання зусиль стиску майже у 9 і 18 разів. При напilenні покриття на «товстішу» основу ($\delta_2 = 0.05$ м.) в цьому ж температурному режимі спостерігається така ж закономірність: збільшення товщини покриття призводить до збільшення величини зусиль в покриттях, але характер зміни зусиль відмінний від такої зміни у випадку напilenня покриття на «тонку» основу. У цьому випадку залишкові зусилля у покриттях є зусиллями розтягу і досягають максимального, загрозливого значення вже на початковій стадії охолодження (рис. 7).

Відомо, що значний вплив на величину та знак залишкових зусиль та деформацій в покритті має співвідношення коефіцієнтів температурного розширення матеріалів покриття та основи. Для оцінки такого впливу розглянуто три випадки: 1) $\beta_t^{(1)} = 2\beta_t^{(2)}$; 2) $\beta_t^{(1)} = \beta_t^{(2)}/2$, 3) $\beta_t^{(1)} = \beta_t^{(2)}$. Розрахунки проводились для цих же товщин основи – 0.01 м. (рис. 8) та 0.05 м. (рис. 9). Номери розрахункових варіантів відповідають номерам графіків на рис. 8 і 9.

При нанесенні покриття на «тонку» основу для співвідношень $\beta_t^{(1)}$ і $\beta_t^{(2)}$ за другим і третім випадками (криві 2 і 3) у покритті виникають стискувальні, а у першому випадку (крива 1) – розтягуювальні залишкові зусилля.

Для цих же співвідношень $\beta_t^{(1)}$ і $\beta_t^{(2)}$, але при нанесенні покриття на «товстішу» основу, характер зміни залишкових зусиль у покриттях інший. Для першого і третього випадків ці зусилля є зусиллями розтягу, а у другому випадку – зусиллями стиску. При цьому у другому і навіть у третьому випадках зусилля на ранніх стадіях остигання мають додатний екстремум, а пізніше, у другому випадку, міняють знак.

Отже, побудована на основі нелінійної математичної моделі процесів при високотемпературному нанесенні покриття чисельно-аналітична методика дозволяє враховувати в комплексі вплив низки геометричних, теплофізичних і фізико-механічних параметрів на розподіл температури в системі тіло – покриття і на формування в покриттях залишкових зусиль і деформацій на характерних технологічних етапах і на підставі результатів розрахунків раціоналізувати температурні режими та інші параметри для регулювання залишкового напружено-деформованого стану системи основа – покриття, що важливо при теоретичному прогнозуванні втрати функціональних властивостей покриттями при експлуатації елементів конструкцій з покриттями в широкому діапазоні зміни температур.

1. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1964. – 517 с.
2. Борисов Ю. С., Харламов Ю. А., Сидоренко С. Л., Ардатовская Е. Н. Газометрические покрытия из порошковых материалов: Справочник. – Киев: Наук. думка, 1987. – 544 с.
3. Гавриш А. П., Шевчук П. Р. Математическое моделирование процессов при высокотемпературном напылении покрытий // Мат. методы и физ.-мех. поля. – 1991. – Вып. 33. – С. 13–18.
4. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. – 935 с.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
6. Подстригач Я. С., Шевчук П. Р. Температурные поля и напряжения в телах с тонкими покрытиями // Тепловые напряжения в элементах конструкций. – 1967. – Вып. 7. – С. 227–233.
7. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
8. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
9. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1005 с.
10. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
11. Юдаев Б. Н., Михайлов М. С., Савин В. К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. – М.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
12. Silberschmidt V. V. Computational analyses of damage and failure evolution in ceramic coatings under thermal loading // Proc. 1st World Cong. Comput. Mechanics, Vienna (Austria), July 7–12, 2002 / Eds: H. A. Mang, F. G. Rommerstorfer, J. Eberhardsteiner; <http://wccm.tuwien.ac.at>.

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ПОКРЫТИЯХ, НАНЕСЕННЫХ СПОСОБОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

На основе разработанной обобщенной нелинейной математической модели тепловых процессов при высокотемпературном нанесении защитных покрытий и с использованием построенной чисельно-аналитической методики решения соответствующих нелинейных краевых задач термоупругости проведено исследование и расчет влияния изменения режимов нанесения, геометрических и физико-механических параметров системы тело – покрытие на распределение температуры и остаточных напряжений (деформаций) системы слой – напыленное двухстороннее покрытие.

CALCULATION OF RESIDUAL STRAINS IN COATINGS MADE BY HIGH-TEMPERATURE DEPOSITION ON PLANE SURFACES

On the basis of developed generalized nonlinear mathematical model of thermal processes under high-temperature deposition of protective coating and using the developed numerical-analytic procedure for solution of corresponding nonlinear boundary-value thermoelasticity problems, the investigation and calculation are made of effect of deposition change regimes, geometric and physical-mechanical parameters of the system: body – coating on temperature and residual stress (strain) distribution for the system: sphere – deposited two-lateral coating.

Ін-т прикл. проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів

Одержано
18.04.03