

УДК 621.923.1

Усов А. В., Тонконогий В. М., Рибак О. В.

РОЗРОБКА САПР ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

Нанесення плазмових покриттів різного хімічного складу з наперед заданими структурою та фізико-механічними властивостями дозволяє модифікувати поверхню деталей, змінюючи їхні антикорозійні, зносостійкі, теплові та інші характеристики. В машинобудуванні широко застосовуються карбідні, боридні й нітридні покриття, які характеризуються дуже високою твердістю та крихкістю. При обробці шліфуванням таких покриттів найбільш розповсюдженими дефектами є тріщини, сколювання, припалення та відрив нанесеного покриття від поверхні деталі [1].

При створенні системи САПР шліфування нанесених покриттів потрібно враховувати критерії міцності та руйнування з метою не допустити відриву напиленого шару та розвитку мікрodefektів структури покриття у магістральні тріщини, що призводять до втрати експлуатаційної придатності деталі. Разом з тим, слід забезпечити необхідну якість оброблюваної поверхні, зокрема задану шорсткість, а також максимальну продуктивність процесу шліфування.

Вивченню причин утворення дефектів при шліфуванні покриттів присвячені роботи [2, 3] та інші, у яких напружено-деформований стан поверхневого шару деталей з покриттям переважно розглядається з якісної сторони або оцінюється експериментальними методами для кожного окремого випадку характеристик покриття та основи. Існуючі моделі напружено-деформованого стану покриття є неповними, оскільки ґрунтуються на таких припущеннях, як гіпотеза про його однорідність. Натомість врахування структурних особливостей плазмових покриттів, зокрема, їхньої пористості, а також міцності зчеплення покриття з основою критично важливе для підвищення ефективності та якості технологічного процесу шліфування.

Метою роботи є побудова математичної моделі, яка буде враховувати дані умови і обмеження, і стане основою розроблюваної системи САПР.

Визначення критеріїв збереження суцільності покриттів на етапі проектування технологічних операцій шліфування ґрунтується на аналізі напружено-деформованого стану поверхневого шару деталей з покриттям. При побудові розрахункової схеми процесу шліфування вважатимемо, що кривизна круга та оброблюваної деталі у межах зони контакту не має суттєвого впливу на геометрію контактної взаємодії шліфувального круга з поверхнею покриття. Крім того, вплив неоднорідностей структури, таких як мікротріщини, включення, пори тощо, враховується у вигляді умовних мікрodefektів (рис.1). Оскільки при шліфуванні поверхні напруження та тепловий потік поширюються переважно в глибину оброблюваної деталі та в напрямку руху шліфувального круга, розглянемо плоску задачу.

При шліфуванні поверхні деталей з покриттям температурне поле і напружено-деформований стан визначаються рівнянням нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \begin{array}{l} 0 \leq x < \infty; \\ -\infty < y < \infty. \end{array} \quad (1)$$

та рівнянням пружності Ламе у переміщеннях:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \bar{v}(x, y) = \frac{\nu}{2G}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial y}; \quad B^T = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} \alpha_t, \quad (3)$$

де $T(x, y, \tau)$ – температура в момент часу τ у точці з координатами (x, y) ;
 a – коефіцієнт теплопровідності;
 α_t – температурний коефіцієнт лінійного розширення;
 μ, G – сталі Ламе;
 v, ν – компоненти вектора переміщень точки (x, y) ;
 $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа.

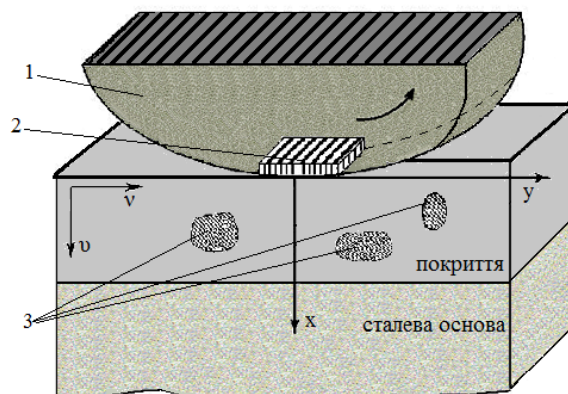


Рис. 1. Схема шліфування деталі з плазмовим покриттям:

1 – шліфувальний круг радіуса $R_{кр}$; 2 – зона контакту круга з оброблюваною поверхнею;
 3 – шар покриття, що містить мікродфекти з характерним розміром ℓ_0

Для даної задачі початкові умови мають вигляд:

$$T(x, y, 0) = 0. \tag{4}$$

Для температурних та деформаційних полів граничні умови можна сформулювати наступним чином:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q(y, \tau)}{\lambda}, |y| < a^*, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma T = 0, |y| > a^* \tag{5}$$

$$\sigma_x(x, y, \tau)|_{x=0} = \tau_y(x, y, \tau)|_{x=0} = 0, \tag{6}$$

де $q(y, \tau)$ – інтенсивність теплового потоку, що формується внаслідок взаємодії шліфувального круга з деталлю;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу покриття;

$2a^*$ – довжина зони контакту круга з оброблюваною поверхнею;

γ – коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем;

σ_x, τ_{xy} – нормальні та дотичні напруження.

Вивчення ролі неоднорідності структури покриттів проводились за допомогою встановленого теоретичним шляхом критерію локального руйнування у вигляді нерівності:

$$\ell_0 < \frac{D \cdot a \cdot \lambda^2 v_q K_c^2}{\pi^2 \left[C \cdot v_{кр} G(1 + \mu) \alpha_t \cdot \left(1 - 2 \exp\left(-\frac{v_q \sqrt{Dt}}{at} \right) \right) \right]}, \tag{7}$$

де $v_{кр}, v_q, t$ – параметри режиму шліфування;

D, C – параметри інструменту;

λ, a – теплофізичні характеристики оброблюваного покриття;

K_c – тріщиностійкість даного покриття;

G – його модуль пружності;

μ – коефіцієнт Пуассона;

α_t – температурний коефіцієнт лінійного розширення;

ℓ_0 – характерний лінійний розмір дефекту структури.

Обробку покриття без шліфувальних тріщин можна забезпечити, якщо обмежити локальні та залишкові напруження, які діють у зоні контакту шліфувального круга з оброблюваною поверхнею. Уникнути відриву напиленого шару в процесі обробки дозволяє критерій порівняння адгезійної міцності зчеплення покриття з основою та напружень, що руйнують зчеплення. Якість оброблюваних поверхонь буде забезпечена, якщо за допомогою управляючих технологічних параметрів підібрати такі режими обробки, змащувально-охолоджуючі рідини та характеристики інструменту, що поточні значення дотичних та нормальних напружень, а також сил шліфування не будуть перевищувати своїх граничних значень.

Для поверхневого шару, що має структурні та технологічні неоднорідності, в залежності від типу дефекту умови розривності розв'язку матимуть вигляд:

$$\begin{cases} \langle \bar{v} \rangle = 0; \langle \sigma_x \rangle \neq 0; \\ \langle \bar{v} \rangle = 0; \langle \tau_{xy} \rangle \neq 0; \end{cases} \quad \text{– на включеннях,} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \langle \bar{v} \rangle \neq 0; \langle \sigma_x \rangle = 0; \\ \langle \bar{v} \rangle \neq 0; \langle \tau_{xy} \rangle = 0; \end{cases} \quad \text{– на тріщиноподібних дефектах.} \quad (9)$$

Тут $\langle \bar{v} \rangle, \langle v \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$ – стрибки компоненти зміщень та напружень.

Граничний рівноважний стан поверхневого шару, що зазнає деформації, будемо оцінювати класичними критеріями міцності. З-поміж критеріїв руйнування, що враховують локальні фізико-механічні властивості неоднорідних матеріалів, для даного випадку слід застосувати критерій силового підходу, пов'язаний з коефіцієнтом інтенсивності напружень. Коли навантаження призводить до того, що інтенсивність напруження K_I стає рівним граничному значенню K_{Ic} , то тріщиноподібний дефект перетвориться на магістральну тріщину.

Моделювання впливу вихідної кусочної однорідності деталей з покриттями на термо-механічні процеси під час шліфування здійснюється методом розривних розв'язків [4]. Під ними слід розуміти такі розв'язки, які задовольняють рівнянням теплопровідності Фур'є та пружності Ламе скрізь, за винятком границь дефектів. При переході через границі дефектів поля зміщень та напружень зазнають розриви I роду, тобто відбуваються стрибки $\langle v \rangle, \langle v \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$.

Напружено-деформований стан шару покриття також оцінюється методом розривних розв'язків. Межа поділу між нанесеним матеріалом та основою розглядається як дефект, при переході через який поля зміщень та напружень зазнають розривів. Побудова розривних розв'язків рівнянь Ламе здійснюється за допомогою методу Треффца:

$$\bar{v} = \psi_1 + (x-a)\psi'_0, \quad \bar{v} = \psi_2 + (x-a)\psi'_0; \quad \psi'_0 = \frac{\psi'_1 + \psi'_2}{3-4\eta}, \quad e = \psi'_1 + \psi''_2 + \psi'_0, \quad (10)$$

$$\text{де } \Delta \psi_0(x, y) = 0, \Delta \psi_j(x, y) = b_k^j T^{(j)}, (j = 1, 2) \quad \text{“ ' ”} = \frac{\partial}{\partial x}, \quad \text{“ ' ”} = \frac{\partial}{\partial y}$$

Напруження знаходять за формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (1 - \mu)\psi'_0 + \psi'_1 + (x - a_k)\psi''_0; \\ \sigma_y &= \mu\psi'_0 + \psi'_2 + (x - a_k)\psi''_0; \\ \tau_{xy} &= \psi_1^2 + 2(x - a_k)\psi'_0 + \psi'_2 + \psi_0' \end{aligned} \tag{11}$$

Якщо температурне поле описується інтегральною залежністю, знайденою за допомогою перетворень Фур'є і Лапласа:

$$T_0(x, y, \tau) = \int_{-a}^a d\tau \int_0^\tau \chi(t - \tau, x, y - \eta) dt, \tag{12}$$

де $q(t, x, y - \eta) = \frac{1}{2\pi i} \int_r K_p^m(y - \eta, x) e^{pt} dp$, $\chi(y, \tau) = \sum_{m=0}^\infty \chi_m(y) 2e^{-\tau} L_m(2\tau)$, $L_m(2\tau)$ –

поліноми Лагерра; $K_p^m(y - \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{-t\beta(y-\eta)}}{l_{m,\beta p}}$, $l_{m,\beta p}$ – вираз, що враховує теплофізичні властивості напиленого шару, його товщину та граничні умови.

В залежності від типу дефектів реалізуються граничні умови (8) або (9). Тоді рішення задачі (2), (3), (6), (8), (9) для поверхневого шару, який містить вказані дефекти, може бути зведене до розв'язку системи сингулярних інтегральних рівнянь відносно стрибків зміщень

$$\left\langle \tilde{u}'_k(\tilde{y}) \right\rangle, \left\langle \tilde{v}'_x(\tilde{y}) \right\rangle - \text{у випадку тріщин та стрибків напружень } \left\langle \sigma_x(\tilde{y}) \right\rangle, \left\langle \tau_{xy}(\tilde{y}) \right\rangle \text{ для}$$

включень:

$$\int_{-l_1}^{l_1} \frac{\left\langle \tilde{u}'_1(\eta) \right\rangle}{y - \eta} d\eta + \sum_{k=1-l_k}^S \int_{-l_k}^{l_k} \left[\left\langle \tilde{u}'_1(\eta) \right\rangle K_k^{(1)}(d, y - \eta) + \left\langle \tilde{v}'_1(\eta) \right\rangle M_k^{(1)}(d, y - \eta) \right] d\eta = F_1, \tag{13}$$

где $K_k^{(i)}(d, y - \eta); M_k^{(i)}(d, y - \eta)$ – параметри, які відображають розміщення та орієнтацію дефектів відносно глобальної системи координат XOY;

d^* – параметр, що характеризує фізико-механічні властивості матеріалу покриття.

Обчислення регулярних інтегралів у (13) проводиться за квадратурними формулами Гаусса-Чебишева, а сингулярних інтегралів з ядрами Коші – методом ортогональних многочленів [5]. При цьому отримуємо систему алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів. Відтак, у поверхневому шарі з дефектами l_k знаходимо напруження та зміщення за формулами:

$$\begin{aligned} \|\sigma_x, \tau_{xy}, u', v'\| &= \sum_{k=1-l_k}^n \int_{-l_k}^{l_k} \|R_k^{(m)}[(x - \xi), y]\| P^{(i)}(\xi) d\xi, \quad R_k^m(x, y) = -(\alpha_k)^m \nu_k^{(m)} [K_n^{(S_k-m)}], \quad m = 0, 1 \\ K_n^{(0)}(x, y) &= \frac{(-sqny)^n |y|}{4\pi(x^2 + y^2)} \left[\frac{y^2 - x^2}{y^2 + x^2} - (n-1) \right], \quad n = 0, 1, 2, \dots \\ K_n^{(1)}(x, y) &= \frac{(-sqny)^n x}{4\pi(x^2 + y^2)} \left[\frac{2y^2}{x^2 + y^2} - (n-1) \right] \end{aligned} \tag{14}$$

Особливості поля напружень при $y \rightarrow \pm l_k$ відображає його поведінку довкола вершин дефектів типу тріщин, включень, структурних неоднорідностей. Характер поля напружень

у безпосередній близькості від загостреного кінця дефекту за класичною теорією пружності визначається коефіцієнтами інтенсивності напружень $K_I = iK_{II}$.

Таким чином, провівши відповідні обчислення, було з'ясовано, що бездефектну обробку нанесених покриттів можна забезпечити, якщо в процесі шліфування локальні напруження будуть обмежені граничними значеннями:

$$\sigma_{\max}(x, \tau) = 2G \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t T_k \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \leq [\sigma_{\text{лч}}]. \quad (15)$$

При цьому адгезійна міцність зчеплення покриття з основою буде більшою за напруження, що руйнують зчеплення:

$$\sigma_y < \tau_{\text{адгез.зч.}} \quad (16)$$

Умова бездефектного шліфування, що враховує структурні неоднорідності оброблюваного матеріалу покриття, дозволяє врахувати дефекти виходячи з їхнього характерного розміру. У випадку рівномірного розподілу структурних неоднорідностей відносно зони контакту шліфувального круга з поверхнею, у якості критеріального співвідношення можна використовувати наступний вираз:

$$l_0 < \frac{K_c^2}{x[GT_k(1+\nu)\alpha_t]^c}. \quad (17)$$

Технологічні параметри в даній формулі закладені у зв'язку величини контактної температури T_k з умовами шліфування.

Наведені нерівності дозволяють встановити зв'язок між технологічними характеристиками процесу шліфування та напружено-деформованим станом поверхневого шару деталей з покриттям. Вони задають область відповідних значень цих параметрів, що задовольняють отриманим термомеханічним критеріям.

ВИСНОВКИ

На основі отриманих критеріальних співвідношень побудована математична модель, яка буде закладена в систему САПР шліфування зносостійких плазмових покриттів. Підсумкові нерівності встановлюють функціональний зв'язок між фізико-механічними властивостями оброблюваних матеріалів покриттів та основними технологічними параметрами процесу шліфування. При цьому враховуються властивості оброблюваного матеріалу та гарантується необхідна якість готового виробу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Усов А. В. Повышение эффективности процесса бездефектного шлифования материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию : дис. д-ра техн. наук / А. В. Усов. – К., 1991. – 426 с.
2. Лебедев В. Г. Повышение надежности рабочих поверхностей деталей машин, напыленных минералокерамикой Al_2O_3 и WC / В. Г. Лебедев, Т. В. Чумаченко // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. – Одеса, 2013. – Вип. 1(2). – С. 89–97.
3. Кужженков А. А. Разработка оксидно-нитридных многослойных покрытий для режущего твердосплавного инструмента : дис. канд. техн. наук / А. А. Кужженков. – М., 2016. – 186 с.
4. Полянин А. Д. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики / А. Д. Полянин, В. Ф. Зайцев, А. И. Журов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 256 с.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2018 р.