

УДК 621.9

С.А. Клименко, аспір.*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля
НАН України***АНАЛІЗ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ЩОДО ІНСТРУМЕНТІВ З
ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ
НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ***(Представлено д.т.н., проф. Клименком С.А.)*

При використанні інструментальних матеріалів з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) при різанні матеріалів практично неможливо виміряти температуру різання традиційними методами, завдяки своїй низькій електропровідності, внаслідок цього зростає роль теоретичних методів розрахунку температур різання і температурних полів.

Вступ. Однією з головних особливостей інструментів з надтвердих матеріалів являється висока теплопровідність цих матеріалів, що обумовлює працездатність і надійність інструменту, продуктивність процесу обробки і якість обробленої поверхні [1]. Саме це визначає низьку температуру контакту різального інструменту зі стружкою оброблюваної деталі, що дає змогу підібрати оптимальні режими різання, які забезпечують високу стійкість інструменту при значній продуктивності обробки.

Експериментальне визначення температури при обробці лезовим інструментом з ПКНБ пов'язано з великими труднощами, так як даний інструментальний матеріал не електропровідний. Дана властивість не дозволяє використовувати для визначення температур таких широковідомих методів як вимірювання температур природною і напівштучною термопарами. В багатьох роботах останніх років [2–4, 6] температура різання визначається методом штучної термопари з подальшим розрахунком температурного поля методом кінцевих елементів. Іншим перспективним методом являється метод безконтактного вимірювання температур, головним недоліком даного методу є трудомісткість процесу, а також значна похибка оцінки.

На сьогодні, експериментальні методи досліджень теплових процесів при різанні, особливо там де використовуються інструменти з ПНТМ, досить трудомісткі, внаслідок цього зростає роль аналітичних

методів, які дозволяють розрахувати рівень температур на поверхнях різального інструменту.

Дана робота присвячена огляду існуючих теоретичних методів визначення температури різання і температурних полів в лезових інструментах із надтвердих матеріалів.

Викладення основного матеріалу. Теоретичному дослідженню теплових явищ при обробці лезовими інструментами з полікристалічних надтвердих матеріалів присвячено багато робіт. На наш погляд з них особливий інтерес становлять підхід до розрахунку температурних полів і потоків викладені в працях А.Н. Резнікова [2, 4], В.А. Остафєва [5], С.С. Сіліна [7], Т.Г. Івченко [8].

А.Н. Резніков [4] використовує для описання температури в будь-якій точці тіла з координатами x, y, z в будь-який момент часу диференційне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_0} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} \right); \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності інструментального матеріалу, кал/см · °С; C – питома масова теплоємність інструментального матеріалу, кал/см · °С; ρ_0 – густина інструментального матеріалу, г/см³.

При різанні металів окремо розглядають температурне поле стружки, ріжучого інструменту, оброблюваної заготовки.

Відповідно до даної методики розрахунок температури на контактних поверхнях інструменту визначається за наступними формулами:

Температура деформації:

$$\Theta_q = \frac{0,6 \cdot \omega \cdot \sigma \cdot q_d}{\lambda \cdot v}; \quad (2)$$

Середня температура на передній поверхні різця:

$$\begin{aligned} \bar{\Theta} = & (1 + \tilde{N}) \cdot \Theta_q \cdot T_u + \\ & + 0,142 \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} L_c \cdot \sqrt{\frac{Kl_1}{v}} \cdot (q_{1T} - 1,3q_1); \end{aligned} \quad (3)$$

Середня температура на задній поверхні різця:

$$\begin{aligned} \overline{\Theta}_c &= (1 + C) \cdot \Theta_q \cdot T_u + \\ &+ 0,1 \frac{\sqrt{\omega \cdot l_2}}{\lambda \sqrt{v}} \cdot (q_{2T} - 1,82q_2), \end{aligned} \quad (4)$$

де

$$T_u = \sqrt{1 - K} - \sqrt{K}, \quad (5)$$

$$K = \frac{l_2}{2 \cdot a} \cdot \text{tg} \phi. \quad (6)$$

Середня температура різання розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{l_1}{\lambda_p (l_1 + l_2)} \times \\ &0,142 \cdot \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{Kl_1}{v}} \cdot q_1 T + (1 + C) \cdot \Theta_q \\ &\times \frac{M_1 \frac{l_1}{\lambda_p} + \frac{\Delta}{40 \cdot \lambda} + \frac{0,184 \sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{Kl_1}{v}}}{}, \end{aligned} \quad (7)$$

де M_1 – безрозмірна величина, яка залежить від величини кута загострення різця і відношення між шириною зрізу і довжинами контакту на передній і задній поверхнях різця.

При розрахунку температур різання по даній методиці передбачається, що інтенсивність джерела тепла розподіляється відповідно до нормального закону з рівномірною швидкістю руху джерела теплоутворення рівного середній швидкості різання. Практика використання даної методики показує, що всі розраховані температури і температурні поля мають завищені значення, в порівнянні з експериментальними [4]. Це зв'язано з тим, що в площині сколювання спостерігається більш інтенсивний ріст температур. Завищені дані про теплові явища обмежують призначення оптимальних режимів різання.

Іншою методикою розрахунку температурних полів, яка враховує, що деформація металу відбувається по всьому об'єму зони стружкоутворення, а не тільки на площині зсуву, як в методиці А.Н. Резнікова, є методика В.А. Остафєва [5]. В даній методиці враховується зміни конвекційного і радіаційного теплообміну з навколишньою середою, в залежності від її теплофізичних властивостей, площі дотику з охолоджуючою поверхнею і її

температури в кожній точці зони обробки, зміну величини термоопору, яка виникає вздовж контактних поверхонь інструменту, стружки і деталі, зміну теплообміну при появі наросту.

За даною методикою температура будь-якої точки тіла з координатами x, y, z , в любий момент часу також визначається диференціальним рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[a(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[a(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \quad (8)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left[a(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - v_x \frac{\partial T}{\partial x} - v_y \frac{\partial T}{\partial y} - v_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{w(x, y, z, t)}{C(T) \cdot \rho(t)};$$

$$a(T) = \frac{K(T)}{C(T) \cdot \rho(T)}; \quad (9)$$

де $K(T)$ – теплопровідність; $C(T)$ – теплоємність; $\rho(T)$ – щільність; v_x, v_y, v_z – проекція вектора швидкості джерела тепла, що переміщується по осям x, y, z ; $W(x, y, z, t)$ – інтенсивність джерела теплоти.

По цій методиці все поле, в межах якого ведеться розрахунок, розбивається на елементи розміром h надзвичайно малої величини $m \times n$.

Значення температур для кожної точки поля в будь-який момент процесу різання можна визначити за формулою:

$$T_{m_i}^{p+1} = T_{m_i}^p \left[1 - \frac{m_i \cdot \Delta t \cdot (K_{j+1} + K_{i+1})}{(\Delta x)^2 \cdot (P + P \cdot C)} - \frac{2m \cdot \Delta t \cdot (K_{i+1} + K_{i-1})}{(P \cdot C + P_p \cdot C_p) \cdot (\Delta y_n)^2} \right] + \quad (10)$$

$$+ \frac{m_i \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2 \cdot (P_c + P_p \cdot C_p)} \cdot (T_{m+1,n}^p \cdot K_{m+1} \cdot T_{m-1,n}^p \cdot K_{m-1}) +$$

$$+ \frac{2m_i \cdot \Delta t}{(\Delta y_n)^2 \cdot (P_c + P_p \cdot C_p)} \cdot (T_{n+1}^p \cdot K_{n+1} \cdot T_{n-1,m}^p \cdot K_{n-1})$$

де $T_{m,n}^p$ – температура точки M_{ij} ; $T_{m,n}^{p+1}$ – температура точки M_{ij} , яка лежить всередині зони; K_{j+1} ; K_{j-1} ; K_{i+1} ; K_{i-1} – коефіцієнт теплопровідності на межі з повітрям.

Розглянувши методику В.А. Остафєва, можна зробити висновок, що вона являється більш точною ніж методика А.Н. Резнікова, але є надзвичайно громіздкою і потребує використання обчислювальної техніки.

Також великий інтерес становить методика С.С. Сіліна [7], яка заснована на використанні методу подібності відносно процесу різання.

Відповідно до даної методики кількість тепла, що виділяється в умовній площині зсуву при різанні, розраховується за формулою:

$$Q_{AB} = \frac{a_1 \cdot b_1 \cdot C_p \cdot \theta_A}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{P_e \cdot B}{4}}}, \quad (11)$$

де θ_A – максимальна температура від первинних пластичних деформацій в умовах площини зсуву (в т. А, на початку різальної кромки), $^{\circ}\text{C}$.

$$\theta_A = \frac{\tau_p}{C_p \cdot B} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{P_e \cdot B}{4}}. \quad (12)$$

Дана залежність показує, що максимальна температура в умовній площині зсуву визначається механічними і термічними властивостями (λ , C , p , a) оброблюваного матеріалу.

Максимальна інтенсивність тепловиділення на передній поверхні інструменту визначається по формулі:

$$q_i = \frac{\tau_p \cdot v \cdot B}{\cos \gamma + B \cdot \sin \gamma}; \quad (13)$$

вона буде зростати при збільшенні τ_p , швидкості різання і зменшенні усадки стружки.

Максимальна інтенсивність тепловиділення на задній поверхні інструменту при цьому буде рівна:

$$q_{\zeta} = \tau_p \cdot v \cdot \cos \alpha; \quad (14)$$

вона також збільшується зі збільшенням τ_p , швидкості різання, а збільшення головного заднього кута призводить до зменшення тепловиділення.

Відносна температура різання, за даною методикою, визначається за формулою:

$$\Theta = \frac{0,95 \cdot \tau_p \cdot P_e^{0,375} \cdot E^{0,055} \cdot \operatorname{erf}^{0,4} \sqrt{\frac{P_e \cdot B}{4}}}{C_p \cdot B^{0,625} \cdot F^{0,15} \cdot D^{0,045} \cdot (1 - \sin \gamma)^{0,65} \cdot \sin^{0,03} \alpha}, \quad (15)$$

де $B = \operatorname{tg} \beta$; $D = a_1/b_1$ – критерій, що характеризує геометрію перерізу зрізу; $F = (\lambda_p \cdot \beta \cdot \varepsilon)/\lambda$ – критерій, що відображає вплив геометричних параметрів інструменту і відношення теплопровідності інструментального і оброблюваного матеріалу; $E = \rho_1/a_1$ – критерій, що характеризує величину гостроти ріжучих кромки інструментів.

Проаналізувавши дану методику визначення температур різання можна сказати, що швидкість різання і товщина зрізу збільшують температуру різання. Температура різання збільшується також зі збільшенням міцності оброблюваного матеріалу, а збільшення теплопровідності і об'ємної теплостійкості оброблюваного матеріалу і збільшення теплопровідності інструментального матеріалу сприяє зниженню

температури різання. Радіус заокруглення ріжучої кромки інструмента також визиває ріст температури різання. До недоліків даної методики можна віднести те, що не враховується форма вершини різця, коефіцієнт тертя в зоні контакту та інші умови процесу різання матеріалів.

Більш простою методикою розрахунку, є методика розрахунку температур різання і теплових потоків за Т.Г.Івченко [8]. В ній визначаються температури різання в залежності від експлуатації лезового інструменту.

Для опису трьохмірного стаціонарного поля використовується диференційне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} = 0, \quad (16)$$

де Θ , x , y , z , τ – температура, координати точок і час.

В даній методиці лезовий інструмент розглядається у вигляді необмеженого клина з кутом загострення β . Джерело теплоти представляє двовимірним прямокутником з розміром $b \times l$.

Температура поля, що виникає в різальному інструменті під дією такого джерела описується наступним чином:

$$\Theta(x, y, z) = \frac{K\beta q}{4\pi\lambda} \int_0^l dx_u \int_{-0,5b}^{0,5b} \frac{dz_u}{\sqrt{(x-x_u)^2 + y^2 + (z-z_u)^2}}, \quad (17)$$

де: x, y, z – координати будь-якої точки тіла; λ – коефіцієнт теплопровідності; $K\beta$ – коефіцієнт переходу від необмеженого простору до необмеженого клину; q – щільність розподілу теплового потоку.

Щільність розподілу теплового потоку визначається за формулою:

$$q = \frac{\nu[(P_z - F_{m3}) \sin \gamma + (P_N - F_{mn}) \cos \gamma]}{2S \cdot t \cdot [k(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma]} \cdot k, \quad (18)$$

де ν – швидкість різання; S – подача; t – глибина різання; k – коефіцієнт поздовжньої усадки стружки; γ – передній кут різця; P_z – тангенціальна сила різання; F_{m3} – сила тертя по задній поверхні різця; P_N – нормальна складова сил різання; F_{mn} – сила тертя по передній поверхні леза.

Температурне поле може бути описане у наступному вигляді:

$$\Theta(x, y, z) = \frac{K\beta q}{4\pi\lambda} \int_0^l d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{d\xi_u}{\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2 + (\xi - \xi_u)^2}}, \quad (19)$$

де $\psi, \psi_u, \xi, \xi_u, \eta$ – безрозмірні координати; $P = K\beta q/4\lambda$ – розмірний коефіцієнт; $\alpha = 0,5b/l$ – безрозмірна ширина перерізу; $T(\psi, \eta, \xi)$ – закон розподілення температур у безрозмірному вигляді.

Безрозмірна температура різання визначається за формулою:

$$T_p = \frac{1}{(1 + \chi)} \left[\int_0^1 d\psi \int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{d\xi_u}{\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \xi_u^2}} + \int_0^{\chi} d\eta \int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{d\xi_u}{\sqrt{\psi_u^2 + \eta^2 + \xi_u^2}} \right], \quad (20)$$

де $\chi = h/l$ – безрозмірний вираз зносу по задній поверхні.

Температура різання розраховується з врахуванням розмірного коефіцієнта P :

$$\Theta = P \cdot T_p. \quad (21)$$

Безрозмірна температура різання залежить від безрозмірної ширини перерізу $a = 0,5b/l$, а також від безрозмірного зносу задньої поверхні $\psi = h/l$.

Такий опис закону розподілу температур у безрозмірному вигляді $T(\psi, \eta, \xi)$ дозволяє встановити загальні закономірності зміни температури, які для кожного окремого варіанта обробки коректують розмірним коефіцієнтом P .

Для того щоб визначити оптимальну методику розрахунку температур різання і температурних полів в лезовому інструменті з ПНТМ було проведено порівняння температур різання розрахованими за даними методиками при обробці сталі У8 інструментом з киборита ($S = 0,1$ мм/об; $t = 1,5$ мм;)

За даними роботи [1] експериментальна температура різання даного матеріалу інструментом із киборита не перевищує 1100 °С.

Як видно з рисунку 1, найбільш припустимою методикою розрахунку температур різання та теплових потоків в інструментах з ПНТМ є методика С.С. Сіліна як одна з самих точних.

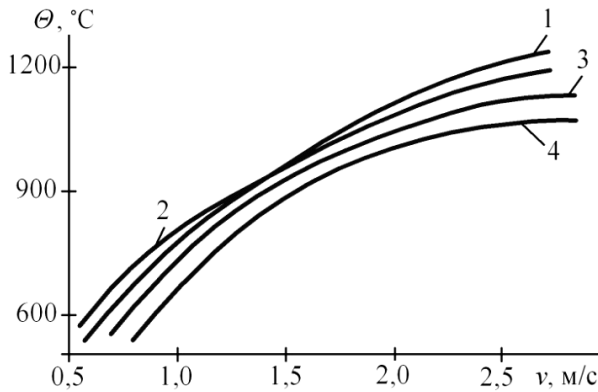


Рис. 1. Залежність температури від швидкості різання інструментом з киборита при розрахунку за методиками: 1 – А.Н. Резнікова, 2 – С.С. Сіліна, 3 – В.А. Остафєва, 4 – Т.Г. Івченко

Висновки. Швидкість відведення тепла із зони різання сприяє підвищенню стійкості інструменту та якості обробленої поверхні. Саме тому теоретичний розрахунок температури різання і температурних полів має бути максимально точним, враховуючи якомога більше параметрів інструментального матеріалу. У той же час точний теоретичний розрахунок теплових явищ при обробці матеріалів різанням утруднений через велику кількість взаємозалежних впливів, які виникають від самих різних факторів, які супроводжують процес різання. Саме тому у всіх розглянутих методиках спостерігається одній і ті ж допущення і обмеження, які приводять до розходжень з експериментальними значеннями температур різання. Приведені

методики не враховують форму стружки, яка може бути ідеальною тільки в розрахунках. В зв'язку з цим представляє великий теоретичний і практичний інтерес отримання аналітичних залежностей для розрахунку температури різання, які адекватно враховують особливості структури та фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, реальні явища в зоні різання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: в 6-ти т. (Под общей ред. Н. В. Новикова. Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / С. А. Клименко, А. А. Виноградов, Ю. А. Муковоз и др. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, НПУ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 315 с.
2. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1984. – 286 с.
3. Даниелян А.М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов. – М.: Машгиз, 1964.–274 с.
4. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение. 1981.– 345 с.
5. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности инструмента. – М.: Машиностроение. 1979.– 217 с.
6. Якимов О.В., Усов А.В. Теплофизика механічної обробки. – Одеса: Астропринт, 2000. – 256 с.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1972.– 157 с.
8. Аналітичне визначення температури різання в залежності від умов експлуатації різального інструменту / Т.Г. Івченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: машинобудування і машинознавство. Випуск 95. – Донецьк: ДОНТУ, 2005.– 234 с.

КЛИМЕНКО Сергій Анатолійович – аспірант Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- теорія різання та різальний інструмент;

Подано 09.09.2011

