2. Emerging Robotic Platforms for Minimally Invasive Surgery / V. Vitiello et al. IEEE Reviews in Biomedical Engineering. 2013. Vol. 6. P. 111–126.

4. The Franka Emika Robot: A Reference Platform for Robotics Research and Education / S. Haddadin et al. IEEE Robotics & Automation Magazine. 2022. P. 2–20.

3. Machine Learning on a Robotic Platform for the Design of Polymer-Protein Hybrids / M. J. Tamasi et al. Advanced Materials. 2022. P. 2201809.

УДК 621.952.5

Полінкевич Р.М., канд. тех. наук, доцент
Повстяной О.Ю., доктор техн. наук, професор
Редько Р.Г., канд. тех. наук, доцент
Четвержук Т.І., канд. техн. наук, доцент
Дяченко А.О., аспірант
Луцький національний технічний університет, eti_tar@ukr.net

РОЗРАХУНОК РОЗПОДІЛУ ТЕПЛОТИ ПРИ СВЕРДЛІННІ ГЛИБОКИХ ОТВОРІВ

Деталі з глибокими отворами використовуються у всіх галузях машинобудування та приладобудування.

При свердлінні отворів виникає осесиметричне теплофізичне завдання, пов'язане з розрахунком температурного поля оброблюваної деталі від дії джерела теплоти у формі кільця з рівномірним розподілом інтенсивності тепловиділення.

Представлення теплового процесу дозволяє використовувати фундаментальне рішення рівняння теплопровідності для осесиметричних теплофізичних завдань, наприклад співвідношення для розрахунку температурного поля в необмеженому тілі з миттєвим джерелом потужністю q Дж/м у вигляді кола радіусом r', що діє в площині $z'=0$ в момент часу $t=0$:

$$\theta(r,z,t) = \frac{Q}{8c\rho(\pi at)^{\frac{3}{2}}} exp\left[-\frac{r^2+(r')^2+(z-z')^2}{4at}\right] I_0\left(\frac{rr'}{2at}\right) \quad (1)$$

Відповідно до законів фізики, тепловий режим в тілі з отвором радіуса r_0, на адіабатичній поверхні якого діє кільцеве джерело потужністю $Q = 2\pi r_0\, q$, буде адекватний тепловому режиму в необмеженому тілі в області $r \geq r_0$, якщо в останньому на колі $r = r_0$ розмістити кільце точці $r = 0$ помістити запас теплоти потужністю $Qc = -Q$.

Відповідно до принципу місцевого впливу допустимо розглядати температурне поле в деталі як суму двох полів: загального поля далеко від джерела та місцевого поля безпосередньо у просторі джерела.

У зв'язку з цим, розраховуючи місцеве температурне поле деталі, можна допустити наступну схематизацію. Оброблювану деталь умовно подати необмеженим тілом із циліндричним отвором радіусу r_0.

Далі, приймаючи, що окружна швидкість джерела на кілька порядків більша за швидкість руху подачі, то за значенням критерія Пекле буде $Pe = \frac{2VR}{a} \geq 10$, таке швидкорухоме місцеве джерело в межах одного обороту деталі можна вважати просторовим миттєвим кільцевим з розподілом інтенсивності в напрямку радіусу r і координати z за нормальним законом Гауса:

$$q(r',z') = q_0 exp\left[-k\frac{(r_0-r')^2+(z')^2}{R^2}\right]. \quad (2)$$

Для малих діапазонів часу рішення, яке описує тепловий режим у необмеженому тілі з отвором радіуса r_0 з нормально-тороїдальним джерелом, при $r' = r_0$, $z' = 0$, отримаємо у вигляді співвідношення

$$\theta(r,z,t) = \frac{Q}{8\lambda\pi^2\sqrt{rr_0}\left(t+\frac{R^2}{4ak}\right)} exp\left[-\frac{(r-r_0)^2+z^2}{4a\left(t+\frac{R^2}{4ak}\right)}\right]. \quad (3)$$

Припустимо, що тепловджерело J_0 (рис. 1), що визначає місцеве поле в ділянці близько діаметрального перерізу $z=0$, виникає в момент часу $t=0$. Отже, попередній виток джерела при кутовий швидкості ω і величиною подачі S за один виток джерела (на схемі – миттєве кільцеве джерело J_1) завершився раніше в момент часу $t_1=2\pi/\omega$ на відстані $z_1=S$ від джерела J_0.

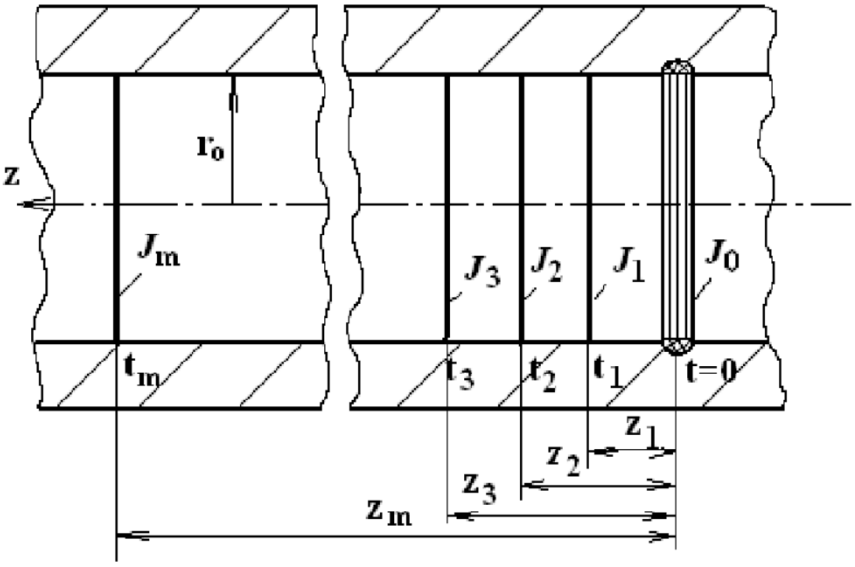

Рис. 1 – Схема для розрахунку акумуляції теплоти в тілі з отвором.

Оскільки підвищення температури місцевого поля від кожного джерела визначається за досить короткий проміжок часу, для розрахунку температури загального поля можна використовувати співвідношення (3), поклавши $r=r_0$, $t_i=2\pi m/\omega$, $z_i=mS$, отримаємо вираз

$$\theta_0 \frac{Q}{16\pi^3 \lambda r_0} \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega}{m_i} exp\left[-\frac{\omega S^2}{8\pi a} \cdot m_i\right]. \quad (4)$$

Вплив виходу теплоти, який враховується під час дослідження процесу в необмеженому тілі, можна врахувати з використанням співвідношення (1). У цьому випадку слід в останньому врахувати $r=0$, $r=r_0$, $z=z_i$, $t=t_i$, $I_0(0)=1$. В результаті отримаємо, що зниження температури місцевого поля за m витків джерела теплоти (при при $t_i=2\pi m/\omega$, $z_i=mS$) визначається співвідношенням

$$\theta_c = \frac{-Q_c}{8c\rho(\pi a)^{\frac{3}{2}}} \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\omega}{2\pi m_i}\right)^{\frac{3}{2}} exp\left[-\omega \frac{r_0^2+(Sm_i)^2}{8\pi a m_i}\right] \quad (5)$$

Таким чином, відповідно до методів представлення для тіла, обмеженого зсередини отвором, місцеве поле в дії нормально-тороїдального джерела, розраховується за формулою (3); підвищення температури місцевого поля за рахунок акумуляції теплоти визначається співвідношенням загального температурного поля (4) і зниження температури місцевого поля, викликане спадом теплоти для кожного з m_i кільцевих джерел розраховується за формулою (5).

Список посилань

1. Антонюк В.С. Теплові явища при обробці матеріалів різанням: навч. посіб. / В.С. Антонюк, С.Ан. Клименко, С.А. Клименко. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 156 с. – Бібліогр.: с. 149-155.

2. Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Kuruc, M.; Simna, V.; Moravcikova, J.; Vopat, T.; Lisovenko, D. Experimental Study of Drilling Temperature, Geometrical Errors and Thermal Expansion of Drill on Hole Accuracy When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. Materials 2020, 13, 17, doi:10.3390/ma13143232.

3. Storchak M., Kushner V., Möhring HC. et al. Refinement of temperature determination in cutting zones. J Mech Sci Technol. – 2021. – Vol. 35. – P. 3659–3673. DOI:10.1007/s12206-021-0736-4