

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ЗОНИ ТЕРТЯ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ВАЛІВ РОЗДАВАННЯМ

Дмитриченко М.Ф., доктор технічних наук
 Сопоцько Ю.О.
 Дементєєв О. В.

Постановка задачі. Процес нагрівання тертям при зварюванні, роздаванні отворів, і інших технологічних процесах, активно досліджується як експериментально, так і теоретично [1-7]. При роздаванні валів тертям максимальна температура та її розподіл значно впливають на структуру металу відновлюваного вала, а також на зусилля, необхідне для виконання роздавання. Для розрахунку розподілу температури нагрівання при роздаванні валу тертям необхідно, насамперед, визначити швидкість виділення тепла на границі розділу інструмент-вал.

Аналіз останніх досліджень та постановка завдання. Існують чотири методи розрахунку виділення тепла при терті. Два з них засновані на коефіцієнті тертя, третій - на експериментальному визначенні розсіювання потужності, і четвертий - на зворотній моделі теплопровідності для оцінки виділення тепла [1, 4-6]. У зворотній моделі переносу тепла [6] використовуються результати експериментів по вимірюванню температури вала в процесі його роздавання термопарами, закріпленими на різній відстані від поверхні контакту.

Мета статті. Виконати розрахунок тепловиділення при роздаванні валів тертям з використанням методу, який ґрунтується на вирішенні зворотної задачі теплопровідності, розрахунковим шляхом визначити температуру нагріву вала у зоні контакту з інструментом та на основі отриманих даних визначити осьове зусилля роздавання.

Викладення основного матеріалу. Для визначення виділення тепла на поверхні тертя (границі розділу вал-інструмент) виконаємо побудову зворотної моделі теплопровідності. Експериментальні дані по визначенню температури нагрівання вала в процесі роздавання, одержані за допомогою розташованих у зоні нагрівання термопар, використаємо для розрахунку теплового потоку на поверхні тертя.

Оскільки градієнт температур у твердому тілі визначається за експериментальними вимірами, то тепловий потік можна розрахувати як добуток коефіцієнта теплопровідності твердого тіла на градієнт температур на поверхні. У зворотному завданні теплопровідності використаємо метод кінцевих різниць для оцінки теплового потоку $q(t)$ на границі розділу при терті, за умови, що відомі значення перехідної температури на поверхні вала.

Зміну температури в процесі роздавання вимірювали за допомогою трьох термопар, закріплених на поверхні вала відповідно на відстані 5; 15 і 25 мм від торця вала. При роздаванні валів тертям виділення тепла на границі розділу відбувається приблизно рівномірно, цикл роздавання досить короткий, і втрати тепла на випромінювання й конвекцію незначні. Тому можна припустити, що бічні поверхні вала перебувають в адіабатичному граничному стані, і що розподіл температури по площині, паралельній поверхні тертя, є рівномірним. Таким чином, температура в цій площині, апроксимується одним значенням у точці перетинання при одномірному 1-D аналізі методом кінцевих різниць.

На основі методу кінцевих різниць перехідне диференціальне рівняння, що описує нестационарну 1-D теплопровідність із застосуванням змінних теплових властивостей і з урахуванням поступального руху інструмента, можна записати в такий спосіб:

$$T_{i,j+1} = T_{i,j} + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{\alpha_{i+1,j} + \alpha_{i,j} + \alpha_{i-1,j}}{3} \times (T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}) + u \frac{\Delta t}{\Delta x} (T_{i+1,j} - T_{i,j}) \quad (1)$$

Граничні вузли на поверхні нагрівання ($x = 0$) з індексом $i = 1$ можна виразити наступним чином:

$$T_{1,j+1} = T_{1,j} + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{\alpha_{1,j} + \alpha_{2,j} + \alpha_{3,j} + \alpha_{4,j} + \alpha_{5,j}}{5} \times \frac{(-25T_{1,j} + 48T_{2,j} - 36T_{3,j} + 16T_{4,j} - 3T_{5,j})}{12} + \frac{q_j}{\rho C_P} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2)$$

Для граничних вузлів при $x = L$ (кінцева точка руху інструмента при роздаванні)

$$T_{I,j+1} = T_{I,j} + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot (\alpha_{I,j} + \alpha_{I-1,j}) \cdot (T_{I-1,j} - T_{I,j}) + u \frac{\Delta t}{\Delta x} (T_{I,j} - T_{I-1,j}) \quad (3)$$

де I - число збільшень відстані x ; $i = 1, 2, 3, \dots$;

J - число збільшень часу Δt ; $j = 1, 2, 3, \dots$;

α ($\text{м}^2 \text{с}^{-1}$) – коефіцієнт температуропровідності матеріалу вала;

q_j (Вт м^{-2}) – тепловий потік, викликаний тертям.

ρ (кг/м^3) – питома вага матеріалу

C_P ($\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) – питома теплоємність

u (м/с) – швидкість переміщення інструмента

При цьому q_j - векторна форма $q(t)$ у формулюванні завдання. Величини збільшень вибираються таким чином, щоб дотримувався критерій стабільності для явного чисельного рішення:

$$\frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (4)$$

Єдиним невідомим у зазначеній моделі кінцевих різниць є тепловий потік q_j , викликаний тертям. Рішення зворотного завдання теплопровідності застосовується для визначення q_j . Зворотнє завдання вирішують за допомогою мінімізації цільової функції R , що є нормою найменших квадратів, і визначається відповідно до формули

$$R = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (Y_{ij} - T_{ij})^2 \quad (5)$$

де Y_{ij} и T_{ij} – вектори, що містять вимірювані й розрахункові температури, і верхні індекси i і j позначають збільшення відстані й часу, відповідно.

Припустимо, що матриця температурних вимірів Y_{ij} задається для положень x_i й часу t_j , і існує розумне вихідне припущення q_{0j} для невідомого вектора q_j . Температури T_{ij} необхідно розрахувати на основі прямого формулювання кінцевих різниць і порівняти із вимірними значеннями Y_{ij} . Якщо цільова функція R , що представляє собою середньоквадратичне відхилення між Y_{ij} і T_{ij} , менше, ніж задане припустиме відхилення від граничної величини, приймаються наявні величини q_j . В іншому випадку можна й далі мінімізувати цільову функцію шляхом розрахунку градієнта помилок, виконання кроку корекції по q_j і повторення зазначених кроків. І, нарешті, визначити відповідний тепловий потік, викликаний тертям.

Щоб використовувати вищевказаний метод, необхідно описати зміну $q(t)$. Для апроксимації $q(t)$ використовується лінійна інтерполяція:

$$q(t) = q_j + (q_{j+1} - q_j) \cdot \frac{t - t_j}{\Delta t} \quad (6)$$

$$t_j < t < t_{j+1}$$

де $t_j = j \Delta t$, $j = 1, 2, 3, \dots, J$.

Експериментально визначені термічні цикли та швидкість осьового переміщення дорна в перші 15 с процесу роздавання наведено на рис. 1а,б. Визначена температура на найближчій відстані від торця вала ($x = 5$ мм) використовується для зворотної моделі теплопровідності.

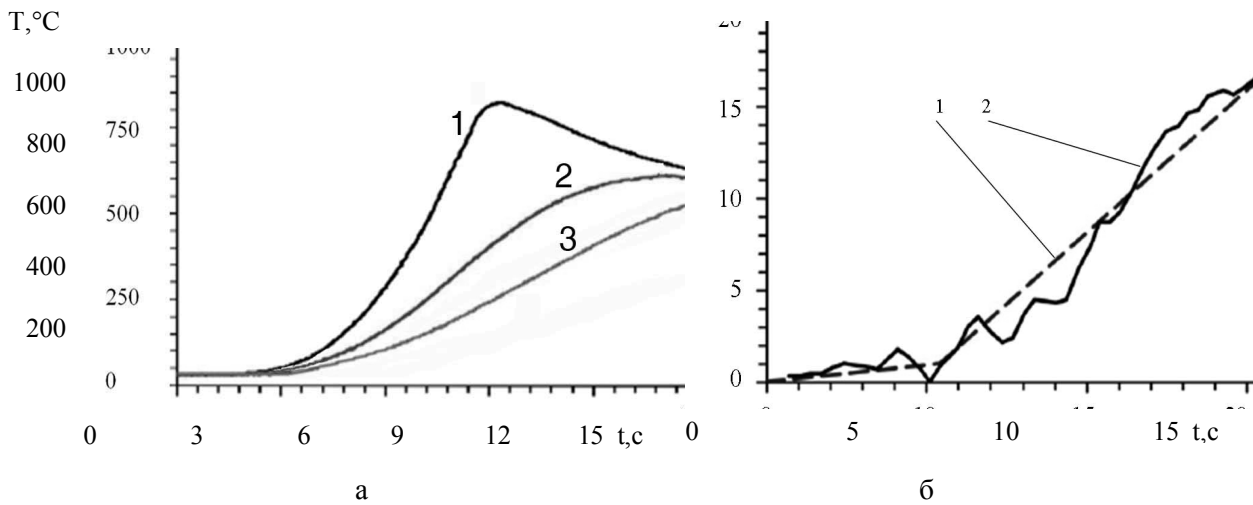


Рисунок 1. – Зміна температури поверхні вала (а) на відстані x від торця вала: $x=5$ (1); 15 (2), 25 мм (3); осьове переміщення інструмента в процесі роздачі (б): 1- розрахункове, 2- експериментальне

На рис. 2 показано розрахункову зміну температури нагріву вала на внутрішньому діаметрі вала в зоні початкового контакту з дорном і на зовнішній поверхні вала.

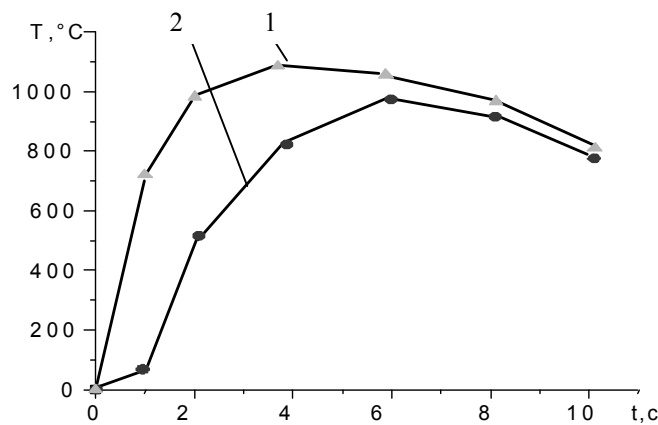


Рисунок 2. – Розрахункова зміна температури нагріву вала, отримана з використанням зворотного методу: 1 - на внутрішньому діаметрі вала в зоні початкового контакту з дорном, 2 - на зовнішньому діаметрі вала

Температура нагріву вала у зоні роздавання досягає максимального значення 1080°C на поверхні контакту вал-інструмент приблизно за 4 с після початку процесу роздачі. Аналіз даних, представлених на рис.1,б і рис. 2, показує, що осьове переміщення інструменту, тобто процес роздавання вала, починається після досягнення максимальної температури у зоні контакту з інструментом і перевищення на зовнішній поверхні вала нижнього значення температурного інтервалу гарячої деформації сталі 40X ($800 \dots 1250^\circ\text{C}$) [7]. Оскільки температура нагріву вала у зоні роздавання перевищує температуру поліморфного перетворення сталі 40X ($A_{C3}=830^\circ\text{C}$), то метал вала після роздавання буде мати структуру нормалізації.

Використаємо дані розрахунку температури для визначення енергосилових параметрів роздавання. Для визначення загального осьового зусилля P роздавання вала зі сталі 40X використовуємо формулу:

$$P = 0,25 \cdot \pi \cdot \beta \cdot \sigma_T \cdot (D - d_0) [\ln D_0 / d_0 (1 + \sin \alpha) + \sin \alpha] \cdot (1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \quad (7)$$

де β – коефіцієнт Лоде ($\beta = 2/3^{0,5} = 1,15$)

σ_T – межа текучості сталі 40X при заданій температурі роздавання;

D, d - діаметр відповідно дорна й внутрішнього отвору вала до роздавання,

α - кут роздачі. μ - коефіцієнт тертя (для частоти обертання $n = 33 \text{ с}^{-1}$ $\mu = 0,2$ [8]).

Після підстановки у формулу (7) конкретних значень, визначимо розрахункове зусилля, необхідне для роздавання вала зі сталі 40X: $P = 824 \text{ кг} = 8075 \text{ Н}$.

Висновки

1. Виконано розрахунок тепловиділення при роздаванні валів тертям з використанням методу, який ґрунтується на вирішенні зворотної задачі теплопровідності. У даному методі експериментальні дані, одержані за допомогою розташованих на зовнішній поверхні вала термопар, використано для розрахунку температури нагріву вала у зоні контакту з інструментом.

2. Температура нагріву вала у зоні роздавання досягає максимального значення 1080°C на поверхні контакту вал-інструмент приблизно за 4 с після початку роздавання.

3. Осьове переміщення інструменту, тобто процес роздавання вала, починається після досягнення максимальної температури у зоні контакту з інструментом і після досягнення на зовнішній поверхні вала нижнього значення температурного інтервалу гарячої деформації сталі 40X.

4. Метал вала після роздавання буде мати структуру нормалізації, оскільки температура нагріву вала у зоні роздавання перевищує температуру поліморфного перетворення сталі 40X.

5. На основі даних розрахунку температури нагріву визначено осьове зусилля роздавання валу заданих розмірів із сталі 40X інструментом із сплаву ВК6. Отримані дані можуть бути використані при розрахунку енергосилових параметрів устаткування для відновлення деталей інших типорозмірів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Лебедев В.К., Миргород Ю.А., Вакуленко С.А. Математическое моделирование тепловых процессов и вязкого течения металла при сварке трением // Автомат. сварка. - 1987. - №1. - С.3-6.

2. Лебедев В.К., Черненко И.А. Распределение мощности в стыке при сварке трением // Автомат. сварка. - 1984. - №12. - С. 23-25.

3. Норицын И.А., Газизов Б.Я. Крутящий момент при осадке стержня вращающимся инструментом с локальным нагревом за счет трения // Кузнечно-штамповое производство. - 1976. - №8. - С. 34-36.

4. Лебедев А.Р. Исаев А.Н. Компьютерное моделирование осесимметричного локального нагружения цилиндрических заготовок при дорновании отверстий // Кузнечно-штамповое производство. - 2001. - №5. - С. 37-39.

5. Fu L., Duan L. The coupled deformation and heat flow analysis by finite element method during friction welding // Weld. Res. Suppl. 1998. - №5. - P. 202s-207s.

6. Özisik MN. Orlande HRB. Inverse heat transfer: fundamentals and applications. New York: Taylor & Francis; 2000.

7. Марочник сталей и сплавов/В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. Ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

8. Енергетичні параметри процесу відновлення деталей автомобілів роздачею з локальним нагріванням за рахунок сил тертя / Голяк О.Л., Зяхор І. В., Сопочко Ю.О., Дементєєв О. В. – Управління проектами, системний аналіз і логістика. - 2010. - №7. - С. 51-56.

РЕФЕРАТ

Дмитриченко М.Ф., Сопочко Ю.О., Дементєєв О. В. Дослідження температурних режимів зони тертя при відновленні валів роздаванням./ Микола Федорович Дмитриченко, Юрій Олександрович Сопочко, Олександр Вікторович Деметєєв// Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ– 2012. – Вип 10.

При роздаванні валів з нагріванням тертям максимальна температура та її розподіл значно впливають на структуру металу відновлюваного вала, а також на зусилля, необхідне для виконання роздавання. Для розрахунку розподілу температури нагрівання при роздаванні валу тертям необхідно, насамперед, визначити швидкість виділення тепла на границі розділу інструмент-вал.

Зміну температури в процесі роздавання вимірювали за допомогою трьох термопар, закріплених на поверхні вала відповідно на відстані 5; 15 і 25 мм від торця вала. При роздаванні валів тертям виділення тепла на границі розділу відбувається приблизно рівномірно, цикл роздавання досить короткий, і втрати тепла на випромінювання й конвекцію незначні. Виконано розрахунок тепловиділення при роздаванні валів тертям з використанням методу, який ґрунтується на вирішенні зворотної задачі теплопровідності.

На основі даних розрахунку температури нагріву визначено осьове зусилля роздавання валу заданих розмірів із сталі 40X інструментом із сплаву ВК6.

Результати статті можуть бути використані при розрахунку енергосилових параметрів устаткування для відновлення деталей роздавання різних типорозмірів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА : ВІДНОВЛЕННЯ ВАЛІВ, РОЗДАВАННЯ, НАГРІВАННЯ ТЕРТЯМ, ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ.

ABSTRAKT

Dmytrychenko M. F., Sopotsko Y. O., Dementeev O. V. Researches on thermal mode of friction zones of processes of restoration of shafts by means of distribution / Mykola Dmytrychenko, Yuri Sopotsko, Olexandr Dementeev // Management of projects, systems analysis and logistics. – K.: NTU – 2012. – Vol 10.

Under distribution of shafts by means of friction, the maximum thermal value and its spacing have sufficient influence on structure of metal of parts under restoration and on efforts necessary for processes of distribution. It is necessary, first of all, to determine the value of heat generation on point of separation of details from tools.

Thermal mode changes during the distribution processes were followed by measuring with the help of three thermo couples, that were mounted on surfaces of shafts at the distance of 5, 15 and 25 mm from shafts' ends. At the moments of distribution of shafts by means of friction, heat reflection at points of separation was presented more or less cycles of distribution were quite short and heat consumption for reflecting and convection were not sufficient. There was accomplished calculation of heat reflection during processes of distribution of shafts by means of friction. There was used a method based on problem of thermal exchange.

The calculation make it possible to determine axial force of distribution of shafts of pre-calculated dimensions made of 40X steel by dorns made of BK6 alloys.

The materials may be used for calculation of energetic and power parameters of equipment for restoration of parts of different range of sizes by means of distribution.

KEY WORDS: RESTORATION OF SHAFTS, HEATING BY MEANS OF FRICTION, THERMAL CONDUCTIVITY.

РЕФЕРАТ

Дмитриченко Н.Ф., Сопотко Ю.А., Дементеев А. В. Исследование температурных режимов зоны трения при восстановлении валов раздачей. / Николай Федорович Дмитриченко, Юрий Александрович Сопотко, Александр Викторович Деметеев // Управление проектами, системный анализ и логистика. – К.: НТУ– 2012. – Вып.10.

При раздачи валов с нагреванием трением максимальная температура и ее распределение значительно влияют на структуру металла восстанавливаемого вала, а также на усилие, необходимое для выполнения раздачи. Для расчета распределения температуры нагрева при раздаче вала трением необходимо первоначально определить скорость выделения тепла на границе раздела инструмент - деталь.

Изменение температуры в процессе раздачи измеряли с помощью трех термопар, закрепленных на поверхности вала соответственно на расстоянии 5; 15; и 25 мм от торца вала.

При раздачи валов трением выделение тепла на границе раздела происходит примерно равномерно, цикл раздачи достаточно короткий, и потеря тепла на излучение и конвекцию незначительное. Выполнен расчет тепловыделения при раздаче валов трением с использованием метода, который базируется на решении обратной задачи теплопроводности.

На основе данных расчета температуры нагрева определено осевое усилие раздачи вала заданных размеров из стали 40X инструментом из сплава ВК6.

Результаты статьи могут быть использованы при расчете энергосиловых параметров установок для восстановления раздачей деталей разных типоразмеров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВАЛОВ, РАЗДАЧА, НАГРЕВ ТРЕНИЕМ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ.