

ІНДУКЦІЙНЕ НАГРІВАННЯ ЯК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ТЕРМООБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ЗАЛІЗНИЧНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Є. Д. Грозенок, Т. І. Дубовик, І. В. Пуха

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Сучасний розвиток залізничного електротранспорту вимагає підвищення надійності, міцності й довговічності деталей при зниженні маси та енерговитрат. Індукційний нагрів – один з найефективніших методів термообробки металів.

Індукційні установки забезпечують точний контроль температури, мінімальні втрати енергії та можливість інтеграції у виробничі лінії. Це особливо важливо для термообробки елементів ходової частини рухомого складу – колісних пар, осей, зубчастих коліс, підшипникових кілець.

Метою роботи було створення чисельної моделі індукційного нагріву заготовок підшипникових кілець зі сталі ШХ15 задля визначення впливу параметрів циклу на рівномірність температурного поля, а також оптимізація енергоспоживання.

Для моделювання застосовано метод скінченних елементів (МСЕ). Геометрія моделі включала індуктор і циліндричну заготовку довжиною $l=190$ мм, радіусом $r=50$ мм. У розрахунковій сітці – понад 60 тис. елементів. Вихідні параметри: частота індуктора $f=800$ Гц, потужність $W=40$ кВт, час нагріву $t=300$ с.

Отримано розподіл температури у перерізі заготовки після нагріву до $T_{\max}=1150^{\circ}\text{C}$. Температура поверхні $T_{\text{пов}}=1140^{\circ}\text{C}$, у центрі $T_{\text{мін}}=1110^{\circ}\text{C}$. Різниця температур не перевищує $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$, що відповідає технологічним вимогам. Після охолодження протягом 5 с температура на осі підвищується до $T_{\text{осі}}=1140^{\circ}\text{C}$ за рахунок внутрішньої теплопровідності.

Для перевірки адекватності проведено експериментальні вимірювання, похибка становила не більше 9 %, що підтверджує достовірність моделі.

Оптимізація параметрів індукційної установки виконувалась у два етапи – при постійній та змінній потужності.

1) Постійна потужність. При варіюванні частоти $f=400\dots 1200$ Гц і часу циклу $t=12\dots 20$ с встановлено, що зменшення частоти та збільшення часу циклу зменшує температурну нерівномірність.

Відносне зниження ΔT становило 34,4 % при $t=12$ с та 26,5 % при $t=20$ с, тоді як енерговитрати зросли лише на 2 %. Для 400 Гц збільшення тривалості циклу з 12 до 20 с знизило ΔT на 54,8 % при зростанні енерговитрат на 7,9 %.

2) Змінна потужність. Використано функцію потужності $W(t)$, що змінюється за законом:

$$W(t) = W_{\min} + (W_{\max} - W_{\min}) \cdot \sin^2(\pi/T_{\text{цикл}}), \quad (1)$$

де: W_{\min} і W_{\max} – мінімальне й максимальне значення потужності в циклі.

Такий режим дозволяє знизити пікові навантаження на індуктор і зменшити перепад температур у заготовці на 11–14 % при сталому енергоспоживанні.

Температурні поля, отримані після індукційного нагріву, використано як початкові умови для чисельного моделювання процесу гарячого штампування.

Визначено залежності зусиль преса від часу при різних варіантах формування (осадка, один прохід, два проходи). Максимальне зусилля при однопрохідному штампуванні становило 573 тс, при двоетапному – 507 тс, що свідчить про зменшення енергоспоживання на 12 %.

При використанні оптимізованих режимів частоти 400–600 Гц та циклу 18–20 с ККД установки збільшився з 55–60 % до 67 %.

Орієнтовне зменшення енергоспоживання становить 8–10 % без втрати якості нагріву.

Під час промислових випробувань на лінії Л-408 № 1 із нагрівачем Robotherm KSO 1200/1,2-A30 (1200 кВт) проведено вимірювання температур на виході індуктора. Моделювання та експеримент показали збіг температурного профілю по довжині заготовки.

Встановлено, що розроблений алгоритм оптимізації може бути інтегрований у систему автоматичного керування нагрівачем для динамічного регулювання частоти й потужності залежно від геометрії деталі.

Таким чином, розроблено повну математичну модель індукційного нагріву, що поєднує рівняння Максвелла і теплопровідності з урахуванням температурної залежності властивостей сталі. Проведено чисельне моделювання процесу нагріву за методом скінченних елементів, результати якого добре узгоджуються з експериментальними даними (похибка ≤ 9 %). Визначено оптимальні режими індукційного нагріву: частота 400–600 Гц, тривалість циклу 18–20 с.

Отримане зниження перепаду температур ΔT на 30–50 % та підвищення ККД установки на 10 %. Встановлено, що застосування двоетапного формування підшипникових кілець дозволяє знизити зусилля преса на 12 % і продовжити термін служби обладнання. Розроблений підхід забезпечує стабільну якість термообробки та енергозбереження в процесі виробництва деталей залізничного електротранспорту.

Список літератури

- [1] Lucia, O., Maussion, P., Dede, E. J., & Burdío, J. M. (2014). Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(5), 2509-2520.
- [2] Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond Cook. *Handbook of Induction Heating*. – CRC Press, 2017. – 55 p.
- [3] *Optimal Control of Induction Heating Processes* By Edgar Rapoport, Yulia Pleshivtseva. – Taylor & Francis Group, 2006. – 370 p.
- [4] Yu. Pleshivtseva, E. Rapoport *Optimization of induction Heaters Design and Operating Modes* // - CRC Press, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Pkwy NW, Suite 300, Boca Raton, Florida, 2006. – 376 pp.