

УДК 539.3: 536.21

РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ФЕРОМАГНІТНИХ ТІЛ

Богдан Дробенко, Олександр Гачкевич

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів

Для підвищення міцності й надійності виробів з електропровідних матеріалів у сучасних технологіях термообробки використовують електромагнітні поля (ЕМП). Безконтактний спосіб передачі енергії до тіла, висока швидкість нагрівання, відносно низьке енергоспоживання, локальний характер дії поля на певні підобласті тіла та високі продуктивність і ступінь автоматизації зумовлюють перспективність використання таких технологій. Відоме застосування такої обробки виробів при гартуванні, лютуванні, зварюванні, очищенні, дегазації, сушінні, легуванні, нанесенні зміцнювальних покриттів та ін. Внаслідок наявності скін-ефекту в розподілі струмів індукційна обробка є ефективним способом приповерхневого зміцнення виробів, зокрема, її використовують для покращення механічних властивостей різних типів вуглецевих сталей. Локальний індукційний нагрів знайшов також широке застосування при високотемпературному відпалі елементів конструкцій з метою повного зняття чи пониження рівня залишкових напружень і деформацій для підвищення міцнісних властивостей таких елементів чи конструкцій загалом.

Дія ЕМП на електропровідне тіло спричиняє протікання в ньому взаємозв'язаних електромагнітних, теплових і механічних процесів, які істотно впливають на функціональні параметри і міцність. Тому для побудови раціональних режимів термообробки із використанням ЕМП і оцінки функціональної здатності виробів з електромагнітних матеріалів важливою є наявність математичних моделей і методів дослідження у взаємодії процесів електропровідності, теплопровідності й деформування в твердих електропровідних тілах залежно від їхньої електропровідності й здатності до намагнічування та поляризації.

Загальні підходи до побудови термомеханічних моделей суцільного середовища, які враховують взаємодію полів різної фізичної природи, достатньо повно висвітлені в літературі. На їхній основі запропоновано численні конкретні моделі опису механічної поведінки електропровідних тіл з різними електропровідністю і здатністю до поляризації та намагнічування за дії зовнішнього ЕМП. У переважній більшості прикладних робіт, присвячених кількісному опису термомеханічних процесів в електропровідних тілах за термообробки з використанням ЕМП, характеристики матеріалів приймають постійними (незалежними від температури), а процеси деформування розглядають у пружному наближенні. Застосування таких моделей у випадках,

<http://iapmm.lviv.ua/cpt2021/materials/C03.08.pdf>

коли тіла нагрівають до високих температур, може призводити до істотних похибок в оцінках параметрів термомеханічного стану тіл.

При розгляді феромагнітних матеріалів виникає ще одна математична складність – адекватного врахування складної нелінійної залежності індукцій електричного і магнітного полів від відповідних напруженостей і температури. При цьому поведінку магнітнотвердих матеріалів у гармонічному ЕМП характеризує динамічна петля гістерезису, і виникає потреба враховувати не лише тепловиділення, яке виділяється в тілі у зв'язку з протіканням індукційних струмів, а й зумовлене перемагнічуванням. При досягненні температури Кюрі феромагнітні матеріали втрачають свої феромагнітні властивості (залежність між індукцією та напруженістю магнітного поля стає лінійною і не залежить від температури).

На основі математичної моделі кількісного опису термомеханічних процесів в електропровідних тілах за квазіусталених електромагнітних навантажень з урахуванням відзначених вище чинників проведено дослідження з визначення раціональних режимів високотемпературної індукційної обробки термочувливих феромагнітних тіл з метою формування в них залишкових напружень, близьких до заданих, мінімізації часу обробки при обмеженнях на допустимі напруження в тілі у процесі їхньої обробки та рівномірності нагрівання за рахунок вибору частоти струму, умов охолодження і геометричних характеристик пристроїв, що індукують ЕМП.

Досліджено вплив умов охолодження на характер розподілу залишкових напружень у циліндрах з магнітнотвердого матеріалу. Реальні умови охолодження змодельовано за допомогою температурно залежного коефіцієнта тепловіддачі. Показано, що шляхом вибору частоти струму та умов охолодження можна істотно регулювати як рівень, так і характер розподілу залишкових напружень у циліндрі в широкому діапазоні значень – від розтягальних до стискальних на межі пластичності. Варіюючи частоту струму і умови охолодження, можна забезпечити необхідний рівень залишкових напружень у виробі за певних обмежень на час нагрівання, або ж мінімізувати час нагрівання за обмежень на напруження. Це дає можливість побудови раціональних режимів індукційної обробки виробів для формування необхідного рівня за міцнісними чи функціональними критеріями залишкових напружень.

RATIONAL DUE TO RESIDUAL STRESSES MODES FOR HIGH TEMPERATURE INDUCTION TREATMENT OF FERROMAGNETIC SOLIDS

A mathematical model and the computer simulation of electromagnetic, temperature and mechanical processes in ferromagnetic solids subjected to induction heating is considered.