

УДК 539.3: 538.3: 536.21: 518.12

Проблеми термомеханіки електропровідних тіл

Дробенко Б. Д.¹, д.ф.-м.н., с.н.с., пров.н.с.Гачкевич О. Р.^{1,2}, д.ф.-м.н., проф., зав. відділу¹ Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України (вул. Наукова, 3^б, м. Львів, 79060, Україна)² Політехніка Опольська (вул. Любошицька, 3, м. Ополе, 45036, Польща)

Дія електромагнітного поля (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 їх 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 їх 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, коли тіла нагрівають до високих температур, може призводити до істотних похибок в оцінках параметрів термомеханічного стану тіл. За підвищених температур властивості електропровідних тіл є іншими, ніж у природному стані. Зокрема, конструкційні сталі з низьким та середнім вмістом вуглецю вже при температурах близько 550 – 600°C деформуються переважно пластично внаслідок залежності межі пружності від температури (див. рис. 1а). Електропровідність таких сталей у діапазоні температур від 20 до 1000°C може змінюватись у 6–8 разів (рис. 1б).

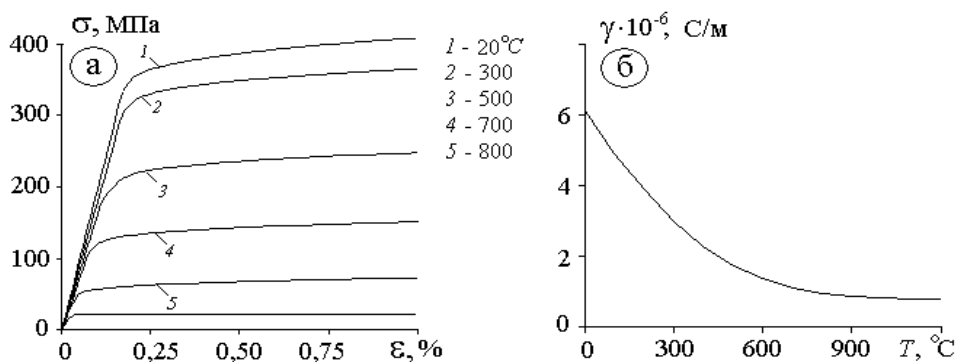


Рис. 1. Температурна залежність кривих деформування (а) та електропровідності (б) маловуглецевої конструкційної сталі

При розгляді феромагнітних матеріалів виникає ще одна математичну трудність – адекватного врахування складної нелінійної залежності індукцій електричного і магнітного

полів від відповідних напруженостей і температури (див. рис. 2). При цьому поведінку магнітотвердих матеріалів у гармонічному ЕМП характеризує динамічна петля гістерезису (рис. 2б), 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).

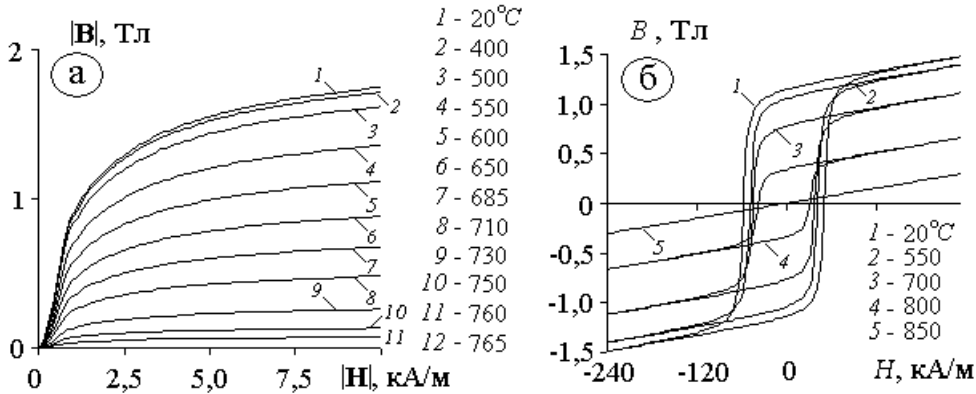


Рис. 2. Температурна залежність кривих намагнічування магнітном'яких (а) та магнітотвердих (б) феромагнітних тіл

Розглянуто математичну модель кількісного опису термомеханічних процесів в електропровідних тілах за квазіусталених електромагнітних навантажень з урахуванням зазначених вище чинників [1]. Модель базується на теорії взаємодії ЕМП та матеріального континууму (в якій вплив поля на процеси деформування й теплопереносу враховано через пондеромоторні сили та тепловиділення, а матеріальні зв'язки враховують нелінійні залежності між параметрами ЕМП внаслідок різних електропровідностей та здатностей до намагнічування й поляризації), теплопровідності й неізотермічної термопружно-пластичності.

Методику числового моделювання взаємозв'язаних процесів електро-, теплопровідності й деформування в електропровідних тілах побудовано з використанням методу скінченних елементів та однокрокових багатих параметричних різницевого алгоритмів. При цьому для апроксимації температурно-залежних властивостей матеріалів, кривих деформування, намагнічування та поляризації запропоновано інтерполяційні сплайни, побудовані за точками кривих, які описують поведінку матеріалів в широкому температурному діапазоні за дії ЕМП (такий підхід дає можливість окреслювати наявні експериментальні криві практично довільної складності). Покроковий підхід до розв'язування розглядуваної задачі дозволяє сумістити чисельний аналіз трьох полів різної фізичної природи. При цьому запропоновано алгоритм вибору різних за величиною кроків числового інтегрування за часом рівнянь, що описують в запропонованій математичній моделі електромагнітні, теплові та механічні процеси. Ефективність запропонованої методики проілюстрована на прикладах визначення раціональних режимів високотемпературної індукційної обробки деталей циліндричної та складної геометричної форми.

1. Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра. У 5-и т. Т. 4: Термомеханіка намагнечуваних електропровідних термочутливих тіл / О.Р. Гачкевич, Б.Д. Дробенко. – Львів: СПОЛОМ, 2010. – 256 с.