

УДК 539.3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ТРУБЧАСТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ЇХ МАГНІТОІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ

Роман Мусій, Наталія Мельник, Стефан Моринь, Адріан Торський

*Національний університет «Львівська політехніка»,
Політехніка Опольська,
Комплекс загальноосвітніх шкіл № 1 у Сендзейовіцах (Польща),
Інститут прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача НАН України*

roman.s.musii@lpnu.ua, nataliia.b.melnyk@lpnu.ua,
s.moryn@po.edu.pl, adrian.r.torskyi@lpnu.ua

Електропровідні трубчасті елементи мають широке застосування у енергетичному та атомному машинобудуванні, в авіаційній та космічній техніці, суднобудуванні. Ці елементи в процесі їх експлуатації перебувають в складних умовах динамічного навантаження під дією екстремальних температур, високих тисків, сильних електромагнітних полів (ЕМП) та радіації. Для їх попередньої технологічної обробки з метою покращення функціональних параметрів часто використовують магнітоімпульсну обробку (дією електромагнітних імпульсів) [1, 2]. У літературі [3, 4] відомі дослідження термонапруженого стану трубчастих елементів за нестационарних силових і теплових дій. Термопружний стан електропровідних тіл при індукційному нагріві усталеними і квазіусталеними електромагнітними полями розглянуто у монографіях [5, 6]. Дослідженню термомеханічної поведінки електропровідної пластини за дії електромагнітних імпульсів різної тривалості присвячена праця [7]. Однак закономірності термомеханічної поведінки трубчастих елементів за дії імпульсних ЕМП вивчені недостатньо. Тому для оптимізації режимів магнітоімпульсної обробки (МІО) [8] електропровідних трубчастих елементів має важливе значення прогнозування їх термомеханічної поведінки за дії імпульсних ЕМП з метою покращення технологічних параметрів.

У даній роботі запропонована фізико-математична модель для дослідження термомеханічного поведінки та працездатності електропровідних трубчастих виробів, як конструктивних елементів, при їх технологічній обробці за допомогою електромагнітних імпульсів. Сформульована початково-крайова задача термомеханіки для довгого порожнистого електропровідного циліндра, як базового модельного елемента. За ключові функції вибрані осе-

симетрична компонента вектора напруженості магнітного поля, температура і радіальна компонента вектора переміщення. Для визначення цих функцій записані системи вихідних рівнянь і співвідношень. Для побудови розв'язків сформульованих початково-крайових задач для визначення параметрів електромагнітного поля, температури і напружень використано кубічну апроксимацію розподілів за радіальною змінною всіх ключових функцій: осьової компоненти вектора напруженості магнітного поля, температури та радіальної компоненти вектора переміщень.

У результаті вихідні початково-крайові задачі на ключові функції зведено до задач Коші на інтегральні за радіальною змінною характеристики цих функцій. З використанням інтегрального перетворення Лапласа за часом і заданих початкових умов записано вирази всіх ключових функцій за однорідної нестационарної електромагнітної дії. Чисельно проаналізовано термомеханічну поведінку розглядуваного трубчастого елемента при його обробці електромагнітними імпульсами мікро- та мілісекундної тривалості. Встановлено граничні значення параметрів електромагнітних імпульсів, за яких трубчастий елемент зберігає працездатність як конструктивний елемент.

1. *Herlach F.* Pulsed Magnets // Rep. Prog. Phys. – **62(6)**. – 1989. – P. 859–920.
2. *Shneerson G.A., Dolotenko M.I., Kryvosheev S.I.* Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation. – De Gruyter, 2010.
3. *Timoshenko S.P., Goodier J.N.* Theory of elasticity. – Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha Ltd, 1970. – 567 p.
4. *Подстригач Я.С., Коляно Ю.М.* Обобщенная термомеханика. - Киев: Наук. думка, 1976. – 311 с.
5. *Подстригач Я.С., Буряк Я.И., Гачкевич А.Р., Чернявская Л.В.* Термоупругость электропроводных тел. – К.: Наук. думка, 1977. – 248 с.
6. *Гачкевич А.Р.* Термомеханика электропроводных тел при воздействии квазистационарившихся электромагнитных полей. – К.: Наук. думка, 1992. – 192 с.
7. *Hachkevych O.R., Musii R.S., Melnyk N.B., Dmytruk V.A.* Dynamic thermoelastic processes in a conductive plate under the action of electromagnetic pulses of microsecond and nanosecond durations // Journal of Thermal Stresses. – 2019. – Vol. 42, iss. 9. – P. 1110–1122.
8. *Asai S.* Electromagnetic Processing of Materials. – Springer, Netherlands, 2012.

MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMAL STRESS STATE OF ELECTROCONDUCTIVE TUBULAR ELEMENTS DURING THEIR MAGNETO-IMPULSE PROCESSING

A physical and mathematical model is proposed to study the thermomechanical behavior and performance of electrically conductive tubular products as structural elements during their technological processing using electromagnetic impulses. The thermomechanical behavior of the tubular element under consideration is numerically analyzed during its processing by electromagnetic impulses of micro- and millisecond duration. The limit values of the parameters of electromagnetic impulses, at which the tubular element retains its efficiency as a structural element, are established.