

К. А. БАРБІН, Д. В. ЛАВІНСЬКИЙ

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ РОЗРАХУНКАХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБРОБКИ. ЧАСТИНА I: РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

У статті розглянуто проблему чисельного моделювання при розрахунках розповсюдження електромагнітного поля у системах електромагнітної формовки. З проведеного аналізу відкритих інформаційних джерел випливає, що проблема чисельного моделювання при створенні нових технологічних операцій електромагнітної формовки або при удосконаленні вже існуючих є актуальною у науковому та практичному сенсі. Це пов'язано із необхідністю виконувати адекватний чисельне моделювання розрахунковий аналіз технологічних систем і технологічних операцій на етапі створення та удосконалення. Стосовно технологічних систем електромагнітної обробки розрахункові схеми і моделі повинні надавати змогу досліджувати розповсюдження нестационарного електромагнітного поля та досліджувати процеси нелінійного деформування технологічних елементів, яке викликано силовою взаємодією наведеного електромагнітного поля із полем джерела. Адекватне чисельне моделювання повинно спиратись на відповідні розрахункові процедури, основою для яких є чисельні методи. У статті обґрунтовано необхідність використання чисельних методів для проведення розрахункового аналізу, які дозволяють створювати розрахункові схеми наближені до реальності у більшій мірі у порівнянні із випадком використання аналітичних підходів та методів. Найбільш ефективним чисельним методом є метод скінченних елементів, який дозволяє проводити аналіз нестационарного електромагнітного поля та деформування в рамках однієї і тієї ж розрахункової схеми. У цьому випадку в рамках методу скінченних елементів можуть бути створені ітераційні схеми, що дозволяють враховувати нелінійні ефекти. Тут нелінійні ефекти можуть бути обумовлені залежністю механічних та електрофізичних властивостей матеріалу від температури, пластичним характером деформування, а також необхідністю обліку контактних явищ. Наведено результати з моделювання розповсюдження електромагнітного поля одновиткового індуктора.

Ключові слова: чисельне моделювання, розрахунковий аналіз, електромагнітне поле, деформування, електромагнітна формовка, метод скінченних елементів.

The article deals with the problem of numerical modeling when calculating electromagnetic field propagation in electromagnetic molding systems. From the analysis of open information sources, it follows that the problem of numerical modeling when creating new technological operations of electromagnetic molding or when improving existing ones is relevant in a scientific and practical sense. This is due to the need to perform adequate numerical modeling and computational analysis of technological systems and technological operations at the stage of creation and improvement. With regard to technological systems of electromagnetic processing, calculation schemes and models should make it possible to study the propagation of a non-stationary electromagnetic field and to study the processes of nonlinear deformation of technological elements, which is caused by the force interaction of the induced electromagnetic field with the field of the source. Adequate numerical modeling must be based on appropriate calculation procedures based on numerical methods. The article substantiates the need to use numerical methods for calculation analysis, which allow creating calculation schemes closer to reality to a greater extent compared to the case of using analytical approaches and methods. The most effective numerical method is the finite element method, which allows the analysis of the non-stationary electromagnetic field and deformation within the same calculation scheme. In this case, within the framework of the finite element method, iterative schemes can be created that allow taking into account nonlinear effects. Here, nonlinear effects can be caused by the dependence of the mechanical and electrophysical properties of the material on temperature, the plastic nature of the deformation, as well as the need to account for contact phenomena. The results of modeling the propagation of the electromagnetic field of a single-turn inductor are presented.

Keywords: numerical modeling, computational analysis, electromagnetic field, deformation, electromagnetic molding, finite element method.

Вступ. Електромагнітне поле (ЕМП) є невід'ємним чинником експлуатації та функціонування багатьох технічних та технологічних об'єктів. У технологічних процесах на сучасному етапі розвитку все більш охоплюючими стають операції електромагнітної обробки (ЕМО). ЕМО – це технологічний процес, у якому для зміни властивостей матеріалів або конструкцій використовують енергію ЕМП. ЕМО має широке застосування в різних галузях, таких як металургія, машинобудування, електроніка та інші.

Застосування ЕМО має декілька глобальних напрямків: дія на матеріал з метою зміни його структури (зменшення внутрішніх напружень, підвищення міцності та пластичності); вплив на електрофізичні характеристики; комбінована дія – поєднання впливу ЕМП із традиційними методами обробки для досягнення комплексного ефекту. ЕМО має низку переваг порівняно із іншими методами обробки. Тут слід відзначити: безконтактність (немає безпосереднього контакту інструмента з матеріалом, що зменшує зношування та пошкодження); точність (контрольованість параметрів ЕМП дозволяє прецизійно регулювати процес); енергоефективність.

Одним з прикладів ЕМО, де застосовується силовий вплив ЕМП є електромагнітне формування (магнітно-імпульсна обробка металів, магнітно-імпульсна штамповка), яка використовується для безконтактного формування металів або інших провідних матеріалів шляхом взаємодії ЕМП джерела (індуктора) із індукованим ЕМП у заготовці.

Чисельне моделювання при розробці нових операцій електромагнітного формування (ЕМФ) або при удосконаленні вже існуючих має велике значення в сучасній інженерії. Актуальність цього підходу пояснюється низкою причин, пов'язаних з особливостями ЕМФ та складністю процесів, які важко передбачити за допомогою традиційних методів аналізу.

Серед причин актуальності чисельного моделювання при ЕМФ можна виділити наступні: складність фізичних процесів, можливість оптимізації вибору технологічних параметрів, зниження витрат на натурні експерименти, можливість прогнозувати якість готових виробів та інше.

Таким чином, чисельне моделювання при розрахунках технологічних систем ЕМО є актуальною науково-практичною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундамент з використання енергії сильних та надсильних ЕМП, в тому числі й у системах ЕМО, викладені у роботах [1-4]. Теоретичні засади створення технологічних операцій ЕМФ викладені у класичній праці [5]. Сучасний стан справ у розробці технологічних систем ЕМФ висвітлено у роботах [6-8].

Спираючись на аналіз представлених інформаційних джерел можна зробити висновок, що ЕМФ поєднує декілька взаємопов'язаних фізичних явищ: електромагнітні поля, індукційні струми, пластична деформація матеріалу, динамічні напруження. Аналітичні методи розрахунку не можуть точно описати ці процеси. Натомість чисельне моделювання дозволяє відтворити всі етапи взаємодії магнітного поля з матеріалом, що включає взаємодію індуктованих струмів з металом, розвиток механічних напружень та їх розподіл під впливом сили Лоренца.

Докладний аналіз щодо застосування і особливостей використання чисельних методів для дослідження розповсюдження ЕМП наведено у монографії [9].

У тому випадку, коли виникає необхідність вивчення процесу деформування технологічних систем ЕМО, найбільш ефективним є використання методу скінченних елементів (МСЕ), оскільки він не накладає практично ніяких обмежень на можливість побудови розрахункових моделей найбільш наближених до реальності. Також відзначимо, що МСЕ дозволяє враховувати різноманітні нелінійні явища (залежність електро-фізико-механічних властивостей матеріалів від температури, великі деформації, непружне деформування, контактні явища) за рахунок побудови відповідних ітераційних процедур. Застосування та особливості використання МСЕ для аналізу деформування за умов технологічних операцій ЕМФ представлено у роботах [10,11].

Мета статті. На сучасному етапі розвитку техніки знаходять застосування нові технологічні процеси ЕМФ, наприклад, спрямовані на притягнення тонких заготовок з різних матеріалів. Практичне застосування технологій даного спрямування пов'язане із проведенням ремонтних робіт корпусних елементів транспортних засобів [12,13]. Важливою науковою задачею є проведення чисельного моделювання при аналізі технологічних систем ЕМФ з метою визначення раціональних експлуатаційних та конструкційних параметрів. Першим етапом такого моделювання є дослідження розповсюдження ЕМП у елементах систем.

Аналіз результатів. У статті [12] запропоновано використання одновиткового індуктора із конічною робочою зоною. Він виконується з немагнітних матеріалів, призначений він для притягнення плоских феромагнітних заготовок з метою подальшого деформування.

У роботах [14,15] представлено повну математичну постановку задачі аналізу нестационарного ЕМП та пружно-пластичного

деформування систем провідних тіл, що може використовуватись для чисельного моделювання технологічних систем ЕМФ. Там же наведені підходи до чисельного розрахункового аналізу. Вони були застосовані для дослідження розповсюдження нестационарного ЕМП у системі, що містить одновитковий індуктор та тонку заготовку. Геометрія, особливості навантаження та закріплення дозволяють розглядати задачу у віссиметричній постановці. На рис. 1 представлена розрахункова схема задачі, а на рис. 2 – геометрична та скінченно-елементна модель індуктора.

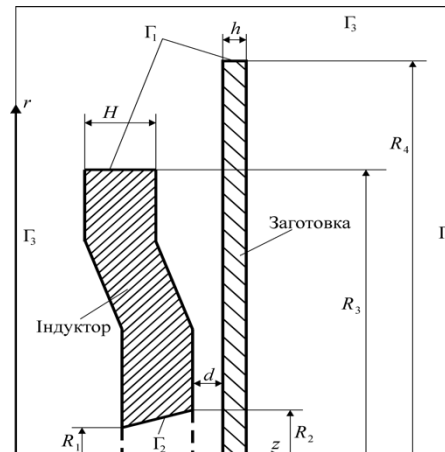


Рис. 1 – Розрахункова схема розрахункова схема складеного одновиткового індуктора та плоскої заготовки

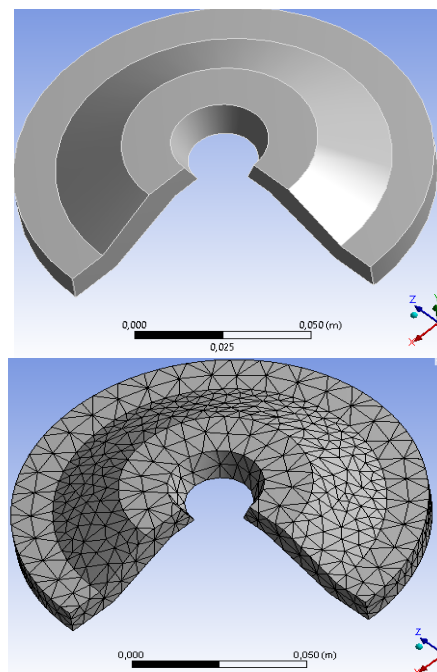


Рис. 2 – Геометрична та скінченно-елементна модель індуктора

Розв'язання було проведено для наступних геометричних параметрів:

$$R_1 = 0,0075 \text{ м ,}$$

$$R_2 = 0,02 \text{ м ,}$$

$$R_3 = 0,05 \text{ м ,}$$

$$R_4 = 0,1 \text{ м ,}$$

$$H = 0,0144 \text{ м ,}$$

$$h = 0,0005 \text{ м ,}$$

$$d = 0,0005 \text{ м .}$$

Розміри повітряного середовища, що оточує систему, варіювалися з метою визначення таких, при яких компоненти ЕМП затухають на віддаленні від джерела ЕМП (індуктора).

В якості джерела ЕМП розглядався електричний струм, рівномірно розподілений по внутрішній похилій поверхні отвору індуктора (поверхня Γ_2). Окружна (нетривіальна) компонента вектору густини струму змінювалась у часі за законом:

$$j(t) = I_m e^{-\delta 2\pi f t} \cdot \sin(2\pi f t),$$

де амплітуда сили струму

$$I_m = 30 \text{ кА ,}$$

частота

$$f = 2 \text{ кГц ,}$$

відносний коефіцієнт загасання

$$\delta = 0,3.$$

Граничні умови задавались на поверхнях, які обмежують розрахункову область, заповнену повітрям, такими, що моделюють затухання ЕМП на віддаленні від його джерела, для ненульової компоненти векторного магнітного потенціалу

$$A_0 = A$$

вони мають вигляд:

$$A|_{\Gamma_3} = 0.$$

Таблиця 1 – Електрофізичні параметри елементів системи

	індуктор, мідь	заготовка, сталь	повітря
$\mu_r \mu_r$	1	1,3	1
$\gamma, (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	$7 \cdot 10^7$	$0,2 \cdot 10^7$	0

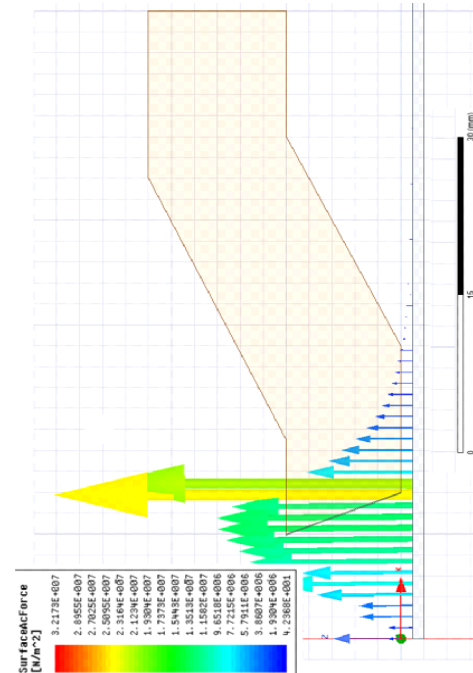


Рис. 3 – Розподіл електромагнітного тиску уздовж поверхні заготовки

Достовірність результатів чисельного розв'язання на першому етапі встановлювалась шляхом зміни кількості СЕ індуктора та заготовки та порівняння максимальних значень напруженості магнітного поля. При кожному розрахунку кількість СЕ збільшувалась удвічі – відповідна інформація наведена у табл. 2, звідки видно, що вже у випадку подвоєння кількості СЕ результат, що перевіряється залишився сталим, і саме така кількість СЕ розглядалась при подальших розрахунках. Також необхідно відзначити, що максимальне відхилення результатів в залежності від кількості СЕ спостерігалось у зонах, де фіксуються максимальні значення компонент напруженості магнітного поля.

Таблиця 2 – Вплив кількості СЕ моделі на значення напруженості магнітного поля

Кількість СЕ, шт.	640	1280	1280	2560
Максимальне відхилення, %	≈ 8		≈ 2,25	
Кількість СЕ, шт.	2560	6120	6120	12240
Максимальне відхилення, %	≈ 1,35		≈ 1	

Також відслідковувалось, який вплив здійснює величина кроку за часом на результати розв'язання, були проведені розрахунки, у яких крок обирався рівним: 0,0003 с; 0,00003 с та 0,000075 с. Виявилось, що при зменшенні кроку у десять разів результати змінюються на 4,3%, при подальшому зменшенні у 5 разів результати змінюються лише приблизно на 0,1%. Таким чином, з'ясовано, що для подібних розрахункових схем крок по часу, який становить 0,01 від часового інтервалу є таким, що забезпечує достатню точність результатів.

Далі розглянемо деякі результати розв'язку. Максимальні значення основних кількісних характеристик ЕМП, у тому числі й напруженості магнітного поля на поверхні заготовки, фіксуються безпосередньо у її центрі

$$r = R_2/2.$$

Відзначимо, що якісно зміна напруженості у часі подібна до зміни у часі густини сили струму джерела, вона має яскраво виражений максимум на початку імпульсу (приблизно 0,00015 с) та швидко загасає у часі. Взагалі, подібна залежність від часу в даному випадку є справедливою для усіх основних характеристик ЕМП, і це надає нам можливість у подальшому при розрахунковому аналізі пружно-пластичного деформування користуватись квазістаціонарним наближенням і враховувати електромагнітні сили, що відповідають максимальним значенням у часі компонент ЕМП. Що стосується просторового розподілу, то максимальні значення нормальної компоненти напруженості магнітного поля на поверхні заготовки виникають безпосередньо навпроти центру індуктору, а дотична компонента навпаки тут дорівнює нулю і набуває максимальних значень приблизно в околі точки із радіальною координатою. Так само і максимальні значення електромагнітного тиску виникають на поверхні заготовки безпосередньо навпроти робочого отвору індуктора (рис. 3).

Висновки. У роботі розглянуті питання чисельного моделювання та розрахункового аналізу при дослідженні технологічних операцій електромагнітної формовки. Запропонована загальна розрахункова стратегія, яка передбачає використання методу скінченних елементів для послідовного розв'язання задач з визначення розподілу електромагнітного поля та аналізу пружно-пластичного деформування. Наведені розрахункові результати з розподілу електромагнітного поля для технологічної системи із одновитковим індуктором та заготовкою. Дані результати у подальшому будуть використані для дослідження нелінійного деформування.

Список літератури

1. *Lange K.* Handbook of metal forming / *K. Lange, K. Pöhlant* // New York et al.: McGraw-hill. – London. – 1985. – Vol. 8. – 900 p.
2. *Herlach F.* Strong and ultrastrong magnetic fields and their applications / *Herlach F.* // Berlin. – 1985. – Vol. 57. – 367 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-13504-9>
3. *Mamalis A. G.* Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments / *A. G. Mamalis, D. E. Manolakas, A. G. Kladas, A. K. Koumoutsos* // *Applied Mechanics Reviews*. 2004. Vol. 57, No. 4. P. 299–324. <https://doi.org/10.1115/1.1760766>
4. *Rudnev V.* Handbook of induction heating / *V. Rudnev, D. Loveless, R. L. Cook* // New York. – 2017. – 772p. <https://doi.org/10.1201/9781315117485>
5. *Белый И. В.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / *И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко* // Харьков. – 1977. – 188 с.
6. *Psyk V.* Electromagnetic forming – a review / *V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya, M. Kleiner* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – vol. 211. – no. 5. – P. 787–829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
7. *Thomas J. D.* On electromagnetic forming processes in finitely strained solids: Theory and examples / *J. D. Thomas, N. Triantafyllidis* // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009. No. 57(8). P. 139–1416. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2009.04.004>
8. *Mamalis A. G.* Electromagnetic forming tools and processing conditions: numerical simulation / *A. G. Mamalis, D. E. Manolakas, A. G. Kladas, A. K. Koumoutsos* // *Materials and Manufacturing Processes*. 2006. No. 21(4). P. 411–423. <https://doi.org/10.1080/10426910500411785>
9. *Подольцев А. Д.* Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в проводящих средах / *А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая* // Киев. – 1999. – 362 с.
10. *Stiemer M.* Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming / *M. Stiemer, J. Unger, B. Svendsen, H. Blum* // *International journal for numerical methods in engineering*. – 2006. – no. 68 (13). – P. 1301–1328. <https://doi.org/10.1002/nme.1738>
11. *Stiemer M.* An arbitrary Lagrangian Eulerian approach to the three-dimensional simulation of electromagnetic forming / *M. Stiemer, J. Unger, B. Svendsen, H. Blum* // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2009. No. 198 (17–20). P. 1535–1547. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2009.01.014>
12. *Batygin Y. V.* Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications / *Y. V. Batygin, S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – vol. 213. – no. 3. – P. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003>
13. *Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V.* Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / *Y. V. Batygin, S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – vol. 214. – no. 2. – P. 390–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018>
14. *Altenbach H.* Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields / *H. Altenbach, O. Morachkovsky, K. Naumenko, D. Lavinsky* // *Continuum Mechanics and Thermodynamic*. – 2016. – vol. 28. – no. 5. – P. 1421–1433. <https://doi.org/10.1007/s00161-015-0484-8>
15. *Lavinskii D. V.* Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field/ *D. V. Lavinskii, O. K. Morachkovskii* // *Strength of Materials*. – 2016. – vol. 48. – No. 6. – P. 760–767. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9822-3>

References (transliterated)

1. Lange K., Pöhlant K. (Eds.). *Handbook of metal forming*. New York et al.: McGraw-hill. London, 1985. Vol. 8. 900 p.
2. Herlach F. *Strong and ultrastrong magnetic fields and their applications*. Berlin, 1985. Vol. 57. 367 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-13504-9>
3. Mamalis A. G., Manolakas D. E., Kladas A. G., Koumoutsos A. K. Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments. *Applied Mechanics Reviews*. 2004, vol. 57, no. 4, pp. 299–324. <https://doi.org/10.1115/1.1760766>
4. Rudnev V., Loveless D., Cook R. L. *Handbook of induction heating*. New York, 2017. 772 p. <https://doi.org/10.1201/9781315117485>
5. Belyy I. V., Fertik S. M., Khimenko L. T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoy obrabotke metallov*. [Handbook on magnetic-pulse processing of metals.] Kharkov, 1977. 188 p.
6. Psyk V., Risch D., Kinsey B. L., Tekkaya A. E., Kleiner M. Electromagnetic forming – a review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, no. 5, pp. 787–829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
7. Thomas J. D., Triantafyllidis N. On electromagnetic forming processes in finitely strained solids: Theory and examples. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009, no. 57(8), pp. 139–1416. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2009.04.004>
8. Mamalis A. G., Manolakas D. E., Kladas A. G., Koumoutsos A. K. Electromagnetic forming tools and processing conditions: numerical simulation. *Materials and Manufacturing Processes*. – 2006. – no. 21(4). – pp. 411–423. <https://doi.org/10.1080/10426910500411785>

9. Podol'cev A. D., Kucheryavaya I. N. Elementy teorii i chislennogo analiza electromagnitnykh processov v provodyaschikh sredakh [Elements of the theory and numerical calculation of electromagnetic processes in conducting media]. Kiev, 1999. 362 p.
10. Stiemer M., Unger J., Svendsen B., Blum H. Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming. *International journal for numerical methods in engineering*. 2006, no. 68 (13), pp. 1301–1328. <https://doi.org/10.1002/nme.1738>
11. Stiemer M., Unger J., Svendsen B., Blum H. An arbitrary Lagrangian Eulerian approach to the three-dimensional simulation of electromagnetic forming. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2009. – no. 198 (17–20). – pp. 1535–1547. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2009.01.014>
12. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals—fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, vol. 213, no. 3, pp. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003>
13. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, no. 2, pp. 390–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018>
14. Altenbach H., Morachkovskiy O., Naumenko K., Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamic*. 2016, vol. 28, no. 5, pp. 1421–1433. <https://doi.org/10.1007/s00161-015-0484-8>
15. Lavinskii D. V., Morachkovskii O. K. Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field. *Strength of Materials*. 2016, vol. 48, no. 6, pp. 760–767. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9822-3>

Надійшла (received) 31.10.2024

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Барбін Костянтин Андрійович (Barbin Kostiantyn Andriyovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; e-mail: kostiantyn.barbin@infiz.khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0001-7320-0925

Лавінський Денис Володимирович (Lavinsky Denys Volodymyrovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів; тел.: (050) 566-42-92; e-mail: Denys.Lavinskiy@khpi.edu.ua. ORCID: 0000-0002-1380-3131