DOI https://doi.org/10.15589/znp2020.2(480).4
УДК 539.3

CALCULATIONS OF THERMODEFORMATION OF SYSTEMS OF ELECTROCONDUCTIVE BODIES UNDER THE ACTION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD

РОЗРАХУНКИ ТЕРМОДЕФОРМУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ТІЛ ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Denis V. Lavinsky
denis.lavinsky@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1380-3131

Oleg K. Morachkovsky
morachko@ukr.net
ORCID: 0000-0001-5466-5110

Д. В. Лавінський,
канд. техн. наук, доцент

О. К. Морачковський,
докт. техн. наук, професор

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Abstract. The work is devoted to the issues of computational analysis of deformation of systems of electrically conductive bodies under the action of electromagnetic field. The action of the electromagnetic field is manifested, in the case of influence on electrically conductive bodies, in the occurrence of distributed electromagnetic forces and distributed sources of heat. The forces of the electromagnetic field are used in the class of technological operations – electromagnetic forming. Development and improvement of electromagnetic forming technologies require complex computational research, including those aimed at assessing the structural strength of components. The paper uses the method of computational analysis, which is based on the schemes of the finite element method. The proposed calculation method is applied to the analysis of electromagnetic and temperature field propagation, and thermo-deformation of a press-mold for hybrid (isostatic and electromagnetic) compression of powders of high-strength compounds. A calculation scheme has been created, which contains all the main elements of the press-mold, as well as an external multi-turn spiral inductor. To take into account the contact interaction between the elements of the press-mold, a method of introducing contact layers is used, which are modeled using the appropriate special finite elements. The space-time distributions of the main characteristics of the electromagnetic field in the elements of the press-mold are obtained. The nature of the distribution of the electromagnetic field during the pulse allows to apply a quasi-stationary approach to the analysis of thermo-deformation in accordance with the time maximum of the field. The problem of non-stationary propagation of the temperature field due to the effects of heat release is also solved. The analysis of thermo-deformation allowed to find out the most loaded elements of the mold, comparison with the results of calculations for the case of isostatic pressing suggests that in the case of a hybrid scheme, the load of the mold is reduced, which increases the pressing pressure. The obtained results of calculations will allow to formulate specific recommendations on the choice of rational design and operational parameters of the technological operation. The methods, approaches and calculation scheme used can be applied to similar technical and technological systems with spiral multi-turn inductors.
Key words: electromagnetic field; temperature field; thermo-deformation; finite element method; structural strength.

Анотація. Роботу присвячено питанням розрахункового аналізу деформування систем електропровідних тіл за дії електромагнітного поля. Дія електромагнітного поля проявляється в разі впливу на електропровідні тіла, у виникненні розподілених електромагнітних сил та розподілених джерел тепловиділення. Силова дія електромагнітного поля використовується у класі технологічних операцій – магнітно-імпульсній обробці матеріалів. Розробка та вдосконалення технологій магнітно-імпульсної обробки потребують проведення комплексних розрахункових досліджень, зокрема й спрямованих на оцінювання конструкційної міцності складових елементів. У роботі використовується метод розрахункового аналізу, який спирається на схеми методу скінчених елементів. Запропонований розрахунковий метод застосовано до аналізу розповсюдження електромагнітного та температурного поля, термодеформування прес-форми для гібридного (ізостатичного й електромагнітного) пресування порошків високоміцних сполук. Створено розрахункову схему, яка містить усі основні елементи прес-форми, а також зовнішній багатовитковий спіральний індуктор. Для врахування контактної взаємодії еле-

ментів прес-форми застосовується спосіб введення контактних шарів, які дискретизуються за допомогою відповідних спеціальних скінчених елементів. Одержано просторово-часові розподіли основних характеристик електромагнітного поля в елементах прес-форми. Характер розподілу електромагнітного поля під час імпульсу дозволяє застосовувати для аналізу термодеформування квазістаціонарний підхід відповідно до часового максимуму поля. Розв'язано також задачу нестаціонарного розповсюдження температурного поля завдяки ефектам тепловиділення. Аналіз термодеформування дозволив з'ясувати найбільш навантажені елементи прес-форми, порівняння з результатами розрахунків для випадку ізостатичного пресування дозволяє стверджувати, що в разі гібридної схеми навантаження прес-форми знижується, що дозволяє збільшувати тиски пресування.
Одержані результати розрахунків дозволять сформулювати конкретні рекомендації щодо вибору раціональних конструкційних і експлуатаційних параметрів технологічної операції. Використані методи, підходи та розрахункова схема можуть застосовуватись до подібних технічних та технологічних систем зі спіральними багатовитковими індукторами.
Ключові слова: електромагнітне поле; температурне поле; термодеформування; метод скінчених елементів; конструкційна міцність.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Електромагнітне поле (далі – ЕМП) є невід'ємною складовою частиною експлуатації різноманітних технічних і технологічних систем. Великий клас технологій, який має загальну назву «магнітно-імпульсна обробка матеріалів» (далі – МІОМ), використовує енергію сильних ЕМП під час обробки електропровідних матеріалів. Зокрема, енергія ЕМП використовується під час обробки порошкових матеріалів (далі – ПМ). Дія ЕМП на електропровідне тіла проявляється у виникненні розподілених електромагнітних сил та розподілених джерел тепловиділення, які призводять до неоднорідного температурного поля. Унаслідок цього елементи технологічного оснащення зазнають інтенсивного силового випливу, який може призводити до втрати працездатності, тому розробка ефективних методів аналізу деформування систем електропровідних тіл за багатофакторної дії чинників ЕМП і проведення за їх допомогою відповідних розрахунків є актуальним науковим та практичним завданням.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Основи з розробки технологічних процесів та технологічного оснащення МІОМ досить повно висвітлені в роботі [1]. В оглядовій статті [2] висвітлено сучасний стан проблеми та представлені відповідні технологічні рішення. Що стосується використання ЕМП для обробки ПМ, то досить великий обсяг досліджень наведено у працях [3–10]. Зазначимо, що під час обробки ПМ широко використовуються гібридні методи, які поєднують, наприклад, ізостатичне пресування та використання енергії ЕМП [10; 11]. Сучасний погляд на проблему розробки технологічних операцій МІОМ потребує проведення різноманітних розрахункових досліджень (на основі аналітичних і чисельних методів), приклади яких наведені у [3–5; 12–14].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕ ВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Один із напрямів розвитку обробки ПМ передбачає пресування нових виробів із порошків тугоплавких сполук типу карбіду вольфраму, кобальту, нікелю. Ефективним процес пресування може бути тільки за підвищених температур. Так, за температури оброблюваного порошку ~ 1 800 ºС і питомих тисках 30–40 МПа пресування може проводиться в матрицях з тугоплавких матеріалів. Для підвищення щільності готових виробів необхідно інтенсифікувати процес пресування шляхом збільшення тиску пресування. За рівнів тиску 40–100 МПа можна використовувати для матриці вуглець-вуглецевий композиційний матеріал (далі – ВВКМ), який має високі механічні властивості за підвищених температур [15; 16]. Водночас є можливість використовувати гібридні способи обробки ПМ, на основі ізостатичного й електромагнітного пресування. Даний напрям потребує розробки відповідних розрахункових методів із метою визначення й обґрунтування раціональних конструкційних і експлуатаційних параметрів технологічної операції.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробка ефективного розрахункового методу аналізу деформування систем електропровідних тіл під дією ЕМП з урахуванням силової та температурної дії, застосування його до дослідження термодеформування складених тіл – елементів технологічного оснащення за гібридного пресування ПМ високоміцних сполук.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасний стан розвитку методів аналізу деформування електропровідних тіл за дії ЕМП передбачає використання чисельних процедур, найбільш ефективні з яких базуються на методі скінчених елементів (далі – МСЕ). Розрахункові методи на базі МСЕ дозволяють досліджувати розрахункову схему, максимально наближену до реального об'єкта як з погляду геометрії, так і з погляду особливостей поведінки матеріалу під навантаженням. Прикладом використання МСЕ до аналізу деформування електропровідних тіл можуть бути праці [17–20].

Об'єктом досліджень є деформування електропровідних тіл за дії ЕМП.

Предметом досліджень є конструкційна міцність елементів технологічного оснащення за гібридного (ізостатичне та електромагнітне пресування) ПМ високоміцних сполук.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Розрахунковий метод аналізу повинен ґрунтуватись на відповідній математичній моделі. Повна математична постановка задачі термопружного деформування систем електропровідних тіл надана у статті [21]. У статті [22] представлено варіаційну постановку задачі й одержані основні розв'язувальні рівняння відповідно до МСЕ щодо змінних, що характеризують розповсюдження ЕМП, температурного поля та процес деформування. Особливості контактної взаємодії елементів конструкції враховуються за допомогою введення шарів спеціальних контактних скінчених елементів. Особливості врахування умов контактної взаємодії наведені в роботі [23]. Далі розглянемо застосування запропонованого методу до комплексного аналізу деформування елементів пресформи за гібридного пресування ПМ. У роботі [24] представлено розрахункову схему складеної прес-форми для ізостатичного пресування, представлені результати розрахунків. Доповнимо розрахункову схему зовнішнім спіральним багатовитковим індуктором і подальші розрахунки проводимо для схеми (рис. 1). Фізико-механічні характеристики елементів прес-форми розглядаємо такими ж, що й у [24], струмопровід індуктора приймаємо мідним, із відповідними характеристиками, ізоляція – з азбесту (межа міцності – 700 МПа).

На першому етапі розв'язувалась задача аналізу розподілу векторних ЕМП. Граничні умови для векторного магнітного потенціалу задаються на межах Г1, Г2 і Г3, описують затухання ЕМП на віддаленні від його джерела, тобто тут окружна компонента векторного магнітного потенціалу дорівнює нулю. Як джерело поля приймався струм, рівномірно розподілений за перетином витка струмопроводу. Густина струму приймалася змінною згідно із законом: $j(t) = j_m e^{-2\pi f t} \cdot \sin(2\pi f t)$, де амплітуда густини сили струму j_m обчислюється залежно від амплітуди сили струму Im: $j_m = I_m/d^2$. Розв'язання проводилось за таких значень: I_m = 30кА, частота f = 2 кГц, відносний коефіцієнт загасання δ = 0,3 .

Отримані просторово-часові розподіли основних компонент ЕМП, які потім використовувалися для визначення вузлових значень електромагнітних сил та інтенсивності джерел тепловиділення. Після цього розв'язувалась задача нестаціонарної теплопровідності. Далі задача аналізу термодеформування розглядалась у квазістаціонарному наближенні, тому що в даному разі впливом нестаціонарності ЕМП можна знехтувати. Дане твердження ґрунтується на особливостях геометрії конструктивних елементів прес-форми, заготовки й індуктора, усі вони є досить масивними, а отже, малосхильними до можливості виникнення коливальних процесів.

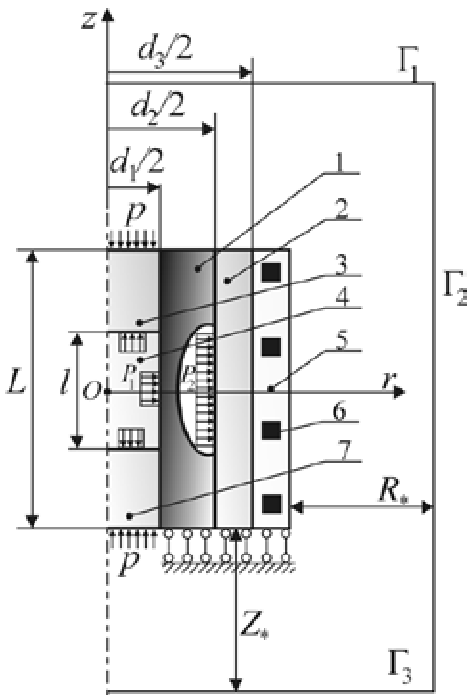

Рис. 1. Розрахункова схема пристрою з індуктором для пресування порожнистих виробів із порошків: 1 – вкладиш; 2 – матриця; 3, 7 – пуансони; 4 – брикет із порошку; 5 – ізоляція індуктора; 6 – струмопровід індуктора

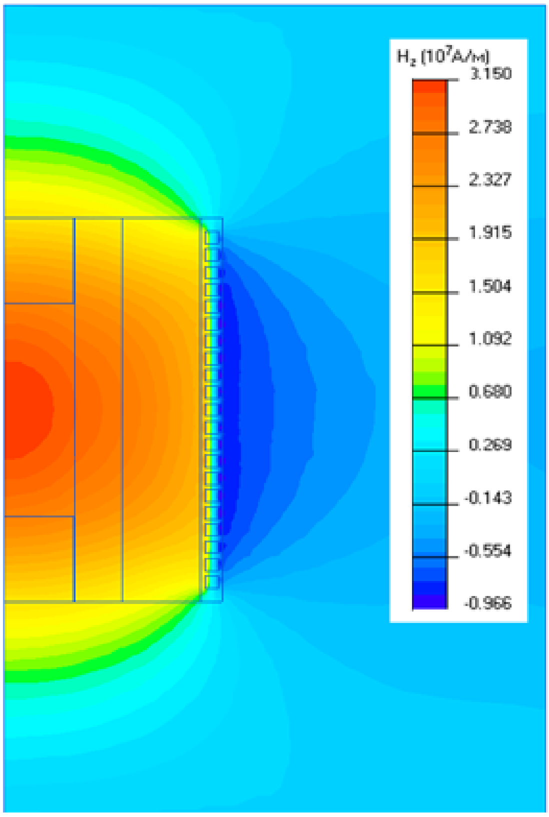

Рис. 2. Розподіл дотичної компоненти напруженості ЕМП

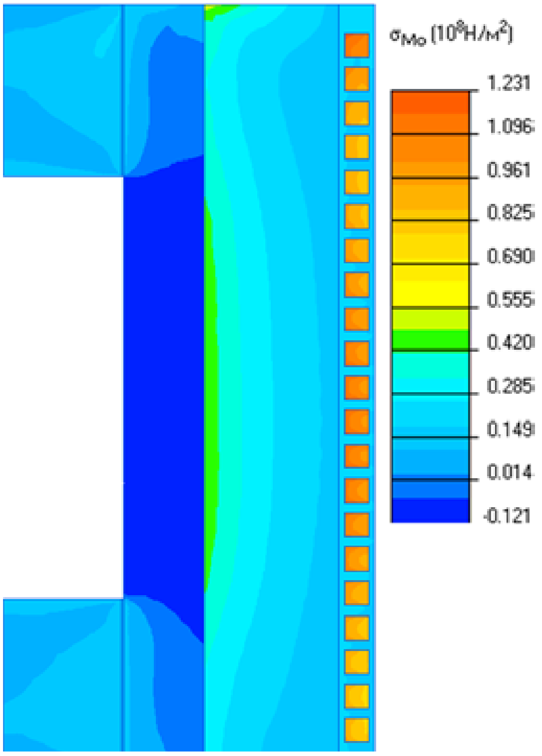

Рис. 3. Розподіл еквівалентних напружень згідно із критерієм Кулона – Мора

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Аналіз термодеформування свідчить, що в разі ізостатичного пресування [24] найбільш навантаженим елементом є матриця, також значною мірою навантажується струмопровід індуктора, проте за розглянутого (робочий) режиму еквівалентні напруження не досягають критичних значень, тобто працездатність матриці разом з індуктором забезпечується. Також відзначаємо, що використання гібридної схеми пресування дозволяє зменшити завантаженість основних елементів прес-форми порівняно з випадком ізостатичного пресування.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто задачу аналізу термодеформування систем електропровідних тіл на прикладі технологічної системи для гібридного пресування порошків високоміцних сполук. Використано ефективний розрахунковий метод, що базується на схемах методу скінчених елементів, який дозволяє проводити комплексний аналіз розповсюдження електромагнітного та теплового поля, а також термодеформування. Одержані результати дозволяють робити рекомендації з розрахунків подібних технічних і технологічних систем.

REFERENCES

[1] Belyi, I.V., Fertik, S.M., Khimenko, L.T. (1977). Spravochnik po magnitno-impul’snoy obrabotke metallov [Magnetic pulse processing of metals]. Kharkov: Vyscha shkola. [in Russian]

[2] Psyk, V., Risch, D., Kinsey, B.L., Tekkaya, A.E., & Kleiner, M. (2011). Electromagnetic forming – a review. Journal of Materials Processing Technology, 211 (5), 787–829.

[3] Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Kladas, A.G., Koumoutsos, A.K. Electro-magnetic tooling for metal forming and powder compaction: numerical simulation. High Speed Forming: Proceedings of the 1st International Conference. 2004, 143–154.

[4] Mamalis, A.G., Vottea, I.N., & Manolakos, D.E. (2001). On the modelling of the compaction mechanism of shock compacted powders. Journal of Materials Processing Technology, 108 (2), 165–178.

[5] Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Kladas, A.G., & Koumoutsos, A.K. (2006). Electromagnetic forming tools and processing conditions: numerical simulation. Materials and Manufacturing Processes, 21 (4), 411–423.

[6] Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Kladas, A.G., & Koumoutsos, A.K. (2004). Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments. Appl. Mech. Rev., 57 (4), 299–324.

[7] Mironov, V.A. (1974) Progressivnye sposoby proizvodstva detalei mashin i priborov iz poroshkovykh materialov [Progressive methods of production of machine parts and devices from powder materials]. Riga: Zinatne. [in Russian]

[8] Mironov, V.A. (1980) Magnitno-impul’snoe pressovanie poroshokov [Magnetic pulse pressing of powders]. Riga: Zinatne. [in Russian]

[9] Mironov, V.A. (2018). Tekhnologicheskie processy magnitno-impul’snoi obrabotki v poroshkovoi metallurgii [Technological processes of magnetic pulse processing in powder metallurgy]. Poroshkovaya metallurgiya v Belarusi. Vyzovy vremeni, 337. [in Russian]

[10] Mironov, V., Stankevich, P., Beljaeva, I., & Glushenkov, V. (2016). Static-dynamic powder material compaction methods. Eng Rural Dev, 15, 1128–32.

[11] Taebi, F., Demir, O. K., Stiemer, M., Psyk, V., Kwiatkowski, L., Brosius, A., & Tekkaya, A.E. (2012). Dynamic forming limits and numerical optimization of combined quasi-static and impulse metal forming. Computational Materials Science, 54, 293–302.

[12] Demir, O.K., Psyk, V., & Tekkaya, A.E. (2010). Simulation of tube wrinkling in electromagnetic compression. Production Engineering, 4 (4), 421–426.

[13] Podol’cev, A.D., & Kucheryavaya, I.N. (1999). Elementy teorii I chislennogo rascheta electromagnitnykh processov v provodyaschikh sredakh [Elements of the theory and numerical calculation of electromagnetic processes in conductive media]. Kiev: Izd. Instituta electrodinamiki NANU. [in Russian]

[14] Batygin, Yu.V., & Lavinsky, V.I. (2002). Magnitno-impul’snaya obrabotka tonkostennykh metallov [Magnetic-pulse processing of thin-walled metals]. Khar’kov: Izd. “MOST-Tornado”. [in Russian]

[15] Bushuev, Yu.G., Persin, M.I., & Sokolov, V.A. (1994). Uglerod-uglerodnye kompozicionnye materialy [Carbon-carbon composite materials]. M.: Metallurgiya. [in Russian]

[16] Nagornyi, V.G., Kotosonov, A.S., & Ostrovsky, V.S. (1975). Svojstva konstrukcionnykh materialov na osnove ugleroda [Properties of carbon-based construction materials: A handbook]. Metallurgiya [in Russian].

[17] Stiemer, M., Unger, J., Svendsen, B., & Blum, H. (2006). Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic inelastic continuum models for electromagnetic metal forming. International journal for numerical methods in engineering, 68 (13), 1301–1328.

[18] Unger, J., Stiemer, M., Brosius, A., Svendsen, B., Blum, H., & Kleiner, M. (2008). Inverse error propagation and model identification for coupled dynamic problems with application to electromagnetic metal forming. International Journal of Solids and Structures, 45 (2), 442–459.

[19] Svendsen, B., & Chanda, T. (2003). Continuum thermodynamic modeling and simulation of electromagnetic metal forming. Technische Mechanik. Scientific Journal for Fundamentals and Applications of Engineering Mechanics, 23 (2–4), 103–112.

[20] Stiemer, M., Unger, J., Blum, H., & Svendsen, B. (2006, December). ALE-based 3D FE simulation of electromagnetic forming. In PAMM: Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics (Vol. 6, № 1, pp. 459–460). Berlin: WILEY-VCH Verlag.

[21] Altenbach, H., Morachkovsky, O., Naumenko, K., & Lavinsky, D. (2016). Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 28 (5), 1421–1433.

[22] Altenbach, H., Naumenko, K., Lavinsky, D., & Konkin, V. (2019). Variacijna postanovka zadach termodeformuvannya electroprovidnykh til u electromagnitnomu poli. [Variational formulation of problems of thermodeformation of electrically conductive bodies in an electromagnetic field]. Visnyk Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu "KhPI". Seriya: Dinamika ta micnist' mashin, 1 (1), 3–6. [in Ukrainian]

[23] Lavinskii, D.V., & Morachkovskii, O.K. (2016). Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field. Strength of materials, 48 (6), 760–767.

[24] Ashikhmin, V.P., Biryukov, O.V., Gurin, V.A., Zatoloka, B.B., Kolosenko, V.V., Saenko, S.Yu., & Morachkovsky, O.K. (2007). Analiz prochnosti elementov press-form iz uglerod-uglerodnykh materialov dlya psevdoizostaticheskogo pressovaniya [Analysis of the strength of mold elements made of carbon-carbon materials for pseudoisostatic pressing]. Voprosy atomnoj nauki i techniki. Seriya: Phizika radiacionnykh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie, 6 (91), 120–123. [in Russian]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков : Вища школа, 1977.

[2] Добровольський В.В. Екологічна безпека і ризик: деякі понятійно-категоріальні уточнення. Екологічна безпека. 2011. № 1 (11). С. 17–20.

[3] Electromagnetic forming – a review / V. Psyk et al. Journal of Materials Processing Technology. 2011. № 211 (5). P. 787–829.

[4] Electro-magnetic tooling for metal forming and powder compaction: numerical simulation / A.G. Mamalis et al. High Speed Forming : Proceedings of the 1st International Conference. 2004. P. 143–154.

[5] Mamalis A.G., Vottea I.N., Manolakos D.E. On the modelling of the compaction mechanism of shock compacted powders. Journal of Materials Processing Technology. 2001. № 108 (2). P. 165–178.

[6] Electromagnetic forming tools and processing conditions: numerical simulation / A.G. Mamalis et al. Materials and Manufacturing Processes. 2006. № 21 (4). P. 411–423.

[7] Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments / A.G. Mamalis et al. Appl. Mech. Rev. 2004. № 57 (4). P. 299–324.

[8] Миронов В.А. Прогрессивные способы производства деталей машин и приборов из порошковых материалов. Рига : Зинатне, 1974.

[9] Миронов В.А. Магнитно-импульсное прессование порошков. Рига : Зинатне, 1980.

[10] Миронов В.А. Технологические процессы магнитно-импульсной обработки в порошковой металлургии. Порошковая металлургия в Беларуси. Вызовы времени. 2018. 337 с.

[11] Static-dynamic powder material compaction methods / V.A. Mironov et al. Eng Rural Dev. 2016. № 15. P. 1128–1132.

[12] Dynamic forming limits and numerical optimization of combined quasi-static and impulse metal forming / F. Taebi et al. Computational Materials Science. 2012. № 54. P. 293–302.

[13] Demir O.K., Psyk V., Tekkaya A.E. Simulation of tube wrinkling in electromagnetic compression. Production Engineering. 2010. № 4 (4). P. 421–426.

[14] Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в проводящих средах. Киев : Изд. Института электродинамики НАНУ, 1999.

[15] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. Харьков : Изд. «Мост-Торнадо», 2002. 284 с.

[16] Бушуев Ю.Г., Персин М.И., Соколов В.А. Углерод-углеродные композиционные материалы. Москва : Металлургия, 1994.

[17] Нагорный В.Г., Котосонов А.С., Островский В.С. Свойства конструкционных материалов на основе углерода : справочник. Металлургия. 1975. 335 с.

[18] Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming / M. Stiemer et al. International journal for numerical methods in engineering. 2006. № 68 (13). P. 1301–1328.

[19] Inverse error propagation and model identification for coupled dynamic problems with application to electromagnetic metal forming / J. Unger et al. International Journal of Solids and Structures. 2008. № 45 (2). P. 442–459.

[20] Svendsen B., Chanda T. Continuum thermodynamic modeling and simulation of electromagnetic metal forming. Technische Mechanik. Scientific Journal for Fundamentals and Applications of Engineering Mechanics. 2003. № 23 (2–4). P. 103–112.

[21] ALE-based 3D FE simulation of electromagnetic forming / M. Stiemer et al. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics. 2006. Vol. 6. № 1. P. 459–460.

[22] Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields / H. Altenbach et al. Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2016. № 28 (5). P. 1421–1433.

[23] Варіаційна постановка задач термодеформування електропровідних тіл у електромагнітному полі / H. Altenbach et al. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Динаміка та міцність машин». 2019. № 1 (1). С. 3–6.

[24] Lavinskii D.V., Morachkovskii O.K. Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field. Strength of materials. 2016. № 48 (6). P. 760–767.

[25] Анализ прочности элементов пресс-форм из углерод-углеродных материалов для псевдоизостатического прессования / В.П. Ашихмин и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». 2007. № 6 (91). С. 120–123.

Дата надходження статті до редакції: 12.06.2020
Дата затвердження статті до друку: 10.07.2020