

Х. АЛЬТЕНБАХ, Д. ЛАВІНСЬКИЙ, К. НАУМЕНКО

КОНТАКТНЕ ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДЕНОГО ІНДУКТОРА ІЗ ДОПОМІЖНИМ ЕКРАНОМ ПРИ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

У статті обговорюються питання розрахунків напружено деформованого стану складеного багатовиткового індуктора із допоміжним екраном, який призначено для притягнення тонкостінних заготовок за умов технологічних операцій МІОМ. Для розв'язання використовується чисельний метод, що засновано на методі скінчених елементів. Для врахування контактної взаємодії використано спосіб введення шарів контактних елементів. За результатами аналізу визначені раціональні значення деяких конструкційних параметрів.

Ключові слова: контактне деформування, напружено-деформований стан, метод скінчених елементів, електромагнітне поле, магнітно-імпульсна обробка.

В статье обсуждаются вопросы расчетов напряженно-деформированного состояния поставного многовиткового индуктора со вспомогательным экраном, который предназначен для притяжения тонкостенных заготовок в условиях технологических операций МИОМ. Для решения используется численный метод, основанный на методе конечных элементов. Для учета контактного взаимодействия использован способ введения слоев контактных элементов. По результатам анализа определены рациональные значения некоторых конструкционных параметров.

Ключевые слова: контактное деформирование, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, электромагнитное поле, магнитно-импульсная обработка.

The paper discusses issues concerning the deformation of a system of conductive bodies under the action of the electromagnetic field. Problem of nonlinear deformation of the compound coil with an assistant for electromagnetic forming of sheet workpieces is considered as a practical application. The problem is solved by the finite element method. Contact interaction is modeled by the introduction of special layers of contact finite elements. Spatial-temporal distributions of the main components of the electromagnetic field are obtained. The ability to review the problem of deformation in the quasi-stationary formulation is justified. The distribution of the main component of the stress-strain state is presented. The influence of the current magnitude at the maximum stresses is evaluated.

Keywords: contact deformation, stress-strain state, finite element method, electromagnetic field, electromagnetic forming.

Вступ. Одним із напрямів використання енергії електромагнітного поля (ЕМП) у технологічних процесах є магнітно-імпульсна обробка (МІОМ) тонкостінних елементів конструкцій. Дана технологічна операція може застосовуватись з метою виправлення різноманітних дефектів на корпусних елементах транспортних засобів. Певні проблеми виникають у разі, коли необхідно здійснити притягнення заготовки до інструменту технологічної операції – індуктора. У роботах [1-3] обґрунтована можливість застосування складених індукторів із допоміжними сталевими екранами для притягнення тонких заготовок із феромагнітних матеріалів.

Ключовим моментом при створенні технологічного оснащення для МІОМ є забезпечення працездатності та довговічності індуктора, як ключової складової частини інструменту. З іншого боку, велике значення має досягнення мети технологічної операції, що проявляється, у першому наближенні, у виникненні зон пластичних деформацій. Таким чином, аналіз пружно-пластичного деформування індукторів та заготовок під час технологічних операцій МІОМ є актуальною проблемою. Цей аналіз повинен спиратись на винайдені розподіли основних компонент напружено-деформованого стану (НДС). Складність геометрії та умов навантаження об'єктів, що розглядаються вимагає створення та застосування відповідних розрахункових методів, які повинні спиратись на чисельні методи механіки.

Постановка завдання. У роботі [4] було проведено аналіз просторово-часових розподілів основних векторних компонент ЕМП для випадку модельного варіанту складеного індуктора із допоміжним екраном. Було проведено порівняння деяких результатів із результатами експериментальних досліджень та аналітичних розрахунків інших авторів. Порівняння дозволили зробити висновки про можливість застосування використаного чисельного методу аналізу [5-7] до розрахунків ЕМП у подібних технологічних системах.

На другому етапі було проведено аналіз розподілу тензорних характеристик процесу пружно-пластичного деформування складеного одновиткового індуктора із допоміжним екраном разом із заготовкою із феромагнітної сталі. Проведений аналіз дозволив зробити висновок, що сили притягнення, які виникають при запропонованих величинах сили струму не є достатніми, для того, щоб у матеріалі заготовки виникали зони пластичних деформацій. При цьому рівні напружень безпосередньо в околі витка струмопроводу індуктора є достатньо великими, майже співставними із межею текучості матеріалу, що унеможливує збільшення амплітуди сили струму, бо це призведе не лише до збільшення рівнів напружень у заготовці, а й до збільшення напружень у елементах складеного індуктора, що негативно вплине на його працездатність та довговічність.

Частково або цілковито вирішити дані про проблеми можна, якщо розглянути багатовитковий індуктор із допоміжним екраном, який закриває струмопро-

від, і, відповідно, розташовується поміж ним та заготовкою. Ідея конструкції подібного складеного індуктора запропонована у роботах [8,9]. Як відомо, збільшення кількості витків струмопроводу призводить до значного збільшення величини сили вихоревих струмів і, відповідно, до збільшення величини електромагнітної сили. Вочевидь, струмопровід повинен бути розміщеним у масивному діелектричному бандажі, який повинен відігравати роль не лише ізоляції, а й підвищувати показники міцності конструкції. До діелектричного бандажу приєднано тонкий екран, який виконується із ферромагнітного матеріалу. Вихореві струми виникають одночасно і у екрані і у заготовці, причому вони мають одноковий напрям, що призведе до притягнення поміж екраном та заготовкою. Екран у даному випадку є суцільним, що виключає можливість відштовхування поміж витком та заготовкою. Відзначимо, що результати аналітичного дослідження із розподілу векторних компонент ЕМП, наведені у роботі [8,9], не надають змоги зробити остаточний висновок ні про досягнення мети технологічної операції, ні про те чи залишається індуктор працездатним.

Для того, щоб дати відповідь на ці запитання проведемо розрахункові дослідження пружно-пластичного деформування багатовиткового індуктора із діелектричним бандажем і допоміжним екраном та заготовки для розрахункової схеми, яка наведена на рис.1. Розрахункова схема створена з урахуванням досвіду аналогічних розрахунків складених одновиткових індукторів та містить усі основні елементи складеного індуктора, які є підданими силовому впливу: струмопровід, діелектричний бандаж та допоміжний екран.

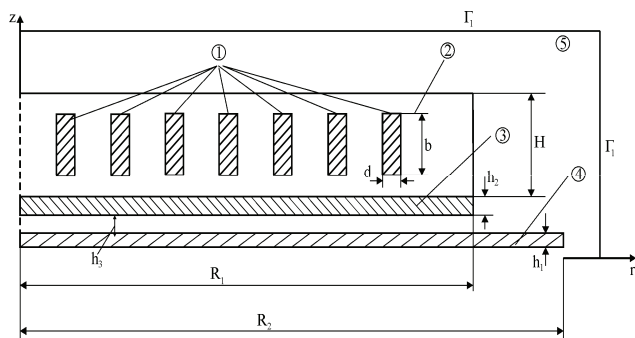


Рисунок 1 – Розрахункова схема складеного багатовиткового індуктора із допоміжним екраном та заготовки: 1 – багатовитковий струмопровід; 2 – допоміжний екран; 3 – діелектричний бандаж; 4 – заготовка; 5 – оточуюче середовище (повітря)

Задача розглядалась за таких геометричних розмірів: $R_1 = 70 \text{ mm}$; $R_2 = 100 \text{ mm}$; $H = 22 \text{ mm}$; $h_1 = 1 \text{ mm}$; $h_2 = 2 \text{ mm}$; $h_3 = 1 \text{ mm}$; $d = 1 \text{ mm}$, радіальна відстань поміж витків струмопроводу – 2 mm. Кількість витків струмопроводу – 11. Розміри оточуючого середовища варіювались з метою досягнення умови затухання ЕМП на віддаленні від джерела (індуктора). Фізико-механічні характеристики матеріалу елементів розрахункової схеми обирались наступними: струмопровід

(мідь), $\mu_r = 1$; $\gamma = 7 \times 10^7 \text{ (}\Omega\text{m)}^{-1}$; $E = 180 \text{ ГПа}$; $\nu = 0,33$; $\sigma_T = 180 \text{ ГПа}$; допоміжний екран (сталь), $\mu_r = 1$; $\gamma = 0,2 \times 10^7 \text{ (}\Omega\text{m)}^{-1}$; $E = 215 \text{ ГПа}$; $\nu = 0,27$; $\sigma_T = 270 \text{ ГПа}$; заготовка (сталь), $\mu_r = 1$; $\gamma = 0,2 \times 10^7 \text{ (}\Omega\text{m)}^{-1}$; $E = 200 \text{ ГПа}$; $\nu = 0,29$; $\sigma_T = 220 \text{ ГПа}$; ізоляція (капролон), $\mu_r = 1$; $\gamma = 0 \text{ (}\Omega\text{m)}^{-1}$; $E = 2,5 \text{ ГПа}$; $\nu = 0,3$; $\sigma_+ = 70 \text{ ГПа}$; $\sigma_- = 90 \text{ ГПа}$; оточуюче середовище (повітря), $\mu_r = 1$; $\gamma = 0 \text{ (}\Omega\text{m)}^{-1}$. Тут μ_r – відносна магнітна проникність, γ – електрична провідність, E – модуль пружності, ν – коефіцієнт Пуассона, σ_T – межа текучості, σ_+ – межа міцності на розтяг, σ_- – межа міцності на стиск. Джерелом ЕМП обирався струм, що був рівномірно розподіленим по перерізу витків струмопроводу, у часі густина струму змінювалась за законом: $j(t) = I_m e^{-\delta 2\pi ft} \cdot \sin(2\pi ft)$, де амплітуда сили струму $I_m = 40 \text{ kA}$, частота $f = 2 \text{ кГц}$, відносний коефіцієнт затухання $\delta = 0,3$.

Граничні умови, за допомогою яких моделюємо затухання ЕМП на віддаленні від джерела поля, а також закріплення торців індуктора та заготовки, розглядалися у вигляді: $A_{|_{\Gamma_1}} = 0$; $u_r|_{\Gamma_2} = 0$; $u_z|_{\Gamma_2} = 0$.

Повна математична постановка задачі розподілу компонентів ЕМП та аналізу пружно-пластичного деформування систем електропровідних тіл наведено у [5, 6]. Як видно з розрахункової схеми, індуктор є суттєво неоднорідною конструкцією, отже одним із важливих кроків при розв'язанні є врахування контактної взаємодії, у роботах [6, 10] наведені математичні формулювання умов контактної взаємодії з точки зору розповсюдження ЕМП та деформування.

Задача розв'язувалась методом скінчених елементів (МСЕ) із застосуванням вісесиметричного скінченого елемента із білінійною апроксимацією окружної компоненти векторного магнітного потенціалу та переміщень. Для адекватного моделювання контактної взаємодії використовувалось введення спеціальних контактних шарів, які потім дискретизувались за допомогою контактних скінчених елементів. Властивості матеріалу контактних шарів враховують можливість виникнення ефектів сухого тертя поміж складовими (коефіцієнти тертя у парах: «мідь – капролон» – 0,2; «капролон – сталь» – 0,18) та наявність натягу поміж складовими частинами індуктора.

Аналіз результатів. На першому етапі було віднайдено розподіл компонент ЕМП. Було проведено низку розрахунків, у яких варіювались розміри оточуючого середовища, при першому розрахунку розмір розрахункової області уздовж осі z дорівнював $1,5 H$, уздовж осі r – $1,3 R_2$, при другому, відповідно, $2 H$ та $1,6 R_2$, при третьому – $2,5 H$ та $1,9 R_2$. Оцінка проводилась відносно максимальних значень дотичної компоненти напруженості магнітного поля на поверхні заготовки. Різниця поміж результатами другого та першого розв'язків складала приблизно 9 %, поміж результатами третього та другого – приблизно 1,3 %, отже розміри оточуючого середовища, що відповідають другому розрахунку, були прийняті остаточно і використовувались у подальших дослідженнях. Окремі результати з розподілу компонентів ЕМП порівнюва-

лись із результатами аналітичних досліджень, які наведено у [9]. Порівняння показали високій ступінь збігу чисельних та аналітичних результатів.

На другому етапі проводились розрахунки НДС. Задача будемо розглядалась у квазістаціонарній постановці для моменту часу 0,001 с, що відповідає максимальним значенням компонентів ЕМП, які викликають максимальні значення виникаючих електромагнітних сил, за яких індуктор буде найбільш навантаженим. Відзначимо, що максимальні значення електромагнітних сил діють в даному випадку в околі центру індуктора.

Одним з критеріїв працездатності багатовиткового індуктора із допоміжним екраном, як складеної конструкції, є його цілісність. Мається на увазі, що у процесі експлуатації поміж окремих складових індуктора (струмопровід, бандаж та допоміжний екран) може частково або цілковито порушитись взаємодія. Це є неприпустимим. Відзначимо, що при цьому напруження у складових індуктора можуть і не досягати небезпечних рівнів.

Натяг, який виникає внаслідок особливостей з'єднання екрану та бандажу, задавався для шару контактних скінчених елементів (КСЕ), що розташовувався у безпосередній близькості від місця розташування гвинтового з'єднання. Розглядалися наступні значення величини натягу: 0,1 мм, 0,2 мм та 0,3 мм. Натяг поміж витками струмопроводу та бандажем задавався у вертикальних шарах КСЕ, розглядалися такі значення: 0,001 мм, 0,002 мм, 0,003 мм та 0,006 мм.

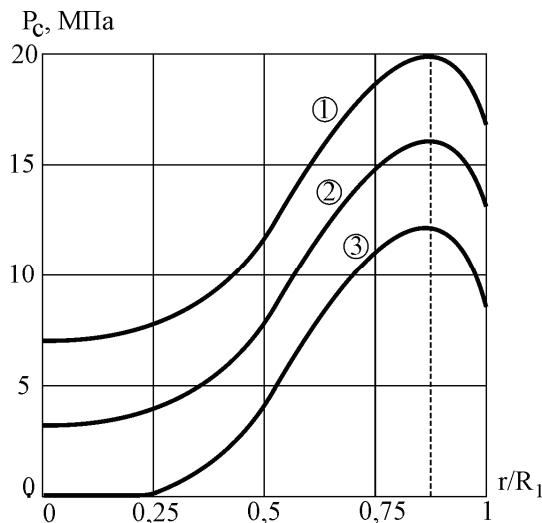


Рисунок 2 – Розподіл контактної тиску поміж допоміжним екраном та бандажем при різних значеннях величини натягу: 1 – 0,3 мм; 2 – 0,2 мм; 3 – 0,1 мм

На рис. 2 наведено просторові розподіли контактної тиску уздовж границі розділу поміж екраном та бандажем при різних значеннях величини натягу. В усіх випадках можна стверджувати про неоднорідність у розподілі контактної тиску – має місце яскраво виражений максимум у зоні, де екран прикріплюється до бандажу. На віддаленні від зони кріплення величина контактної тиску значно (в околі центру індуктора більш ніж удвічі) зменшується. Факт змен-

шення величини контактної тиску може бути пояснений тим, що поміж екраном та струмопроводом є наявними ефекти відштовхування (взаємодіючі струми протікають у різних напрямках), а максимальні значення електромагнітних сил спостерігаються у зоні, що безпосередньо знаходиться в околі центру індуктора. Як видно з рисунку, при найменшому значенні величини натягу (0,1 мм) в околі центру індуктора (приблизно в області 25 % величини радіусу допоміжного екрану) спостерігаються нульові значення контактної тиску – це означає, що у цій зоні екран відходить від бандажу. Тобто, порушується цілісність індуктора, що із загальних міркувань є неприпустимим. Відповідно, можна очікувати, що при збільшенні величини сили струму у індукторі (а це традиційний підхід, який використовується для збільшення силового впливу на заготовку) збільшуватимуться і розміри області, у межах якої екран може відходити від бандажу.

Для того, щоб оцінити наскільки порушення цілісності за розглянутих експлуатаційних умов є суттєвим, необхідно проаналізувати розподіл переміщень уздовж лінії розмежування поміж екраном та бандажем. Розглянемо різницю переміщень точок, що належать бандажу та екрану, уздовж границі розмежування. З точки зору чисельної процедури ця величина являє собою різницю поміж переміщеннями вузлів КСЕ, які зв'язані із вузлами СЕ сітки бандажу та екрану, відповідно. На рис. 3 наведено графік різниці значень переміщень точок, які належать екрану та бандажу, у межах області, де порушується цілісність.

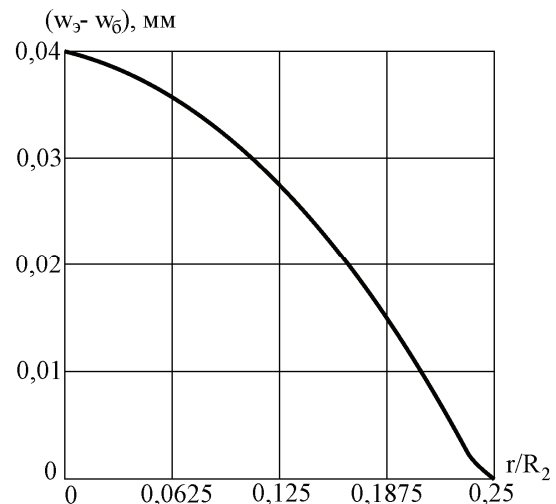


Рисунок 3 – Різниця переміщень точок екрану та бандажу в області відходу при натягу 0,1 мм

Максимальна різниця дорівнює 0,04 мм і спостерігається безпосередньо у центрі індуктора. Відзначимо, що повітряний прошарок таких розмірів, який з'являється внаслідок відходу частини екрану від бандажу не повинен оказувати значний вплив на розподіл основних характеристик ЕМП та процесу пружно-пластичного деформування індуктора та заготовки. Це пояснюється зокрема тим, що за розглянутих умов максимальна інтенсивність напружень у матеріалі екрану не перевищує межу текучості (для розглянутого

варіанту максимальна інтенсивність напружень у матеріалі екрану складає приблизно 280 МПа), отже зони незворотних деформацій не виникають, а значить при зменшенні параметрів ЕМП (це відбувається навіть під час імпульсу) буде зменшуватись силовий вплив на екран і зазор поміж ним та бандажем також буде зменшуватись.

Отже за розглянутих конструкційних параметрах елементів індуктору та експлуатаційних параметрах зовнішнього впливу цілісність індуктора буде забезпечена у разі величини натягу поміж екраном та бандажем більшої за 0,1 мм. При цьому слід відзначити, що з огляду на величини контактного тиску (див. рис. 2) елементи індуктору будуть найбільш навантажені при величині натягу 0,3 мм, тобто цей випадок є найбільш небезпечним з точки зору забезпечення працездатності та довговічності індуктора. Тому подальші розрахунки будемо проводити саме при цьому значенні величини натягу. Далі оцінимо вплив, який здійснює натяг поміж витками струмопроводу та бандажем на розподіл компонентів НДС. Для цього було проведено серію розрахунків, у яких варіювалась величина цього натягу, розглядалися випадки за відсутності натягу, а також за наявності натягу із величинами, які було вказано раніше. Найбільші значення інтенсивності напружень у струмопроводі спостерігаються у витках, які розташовані найближче до центру індуктора. Величина максимальної інтенсивності напружень збільшуються із збільшенням величини натягу, проте, за розглянутих значень натягу вона не досягає межі текучості, тобто не стає небезпечною.

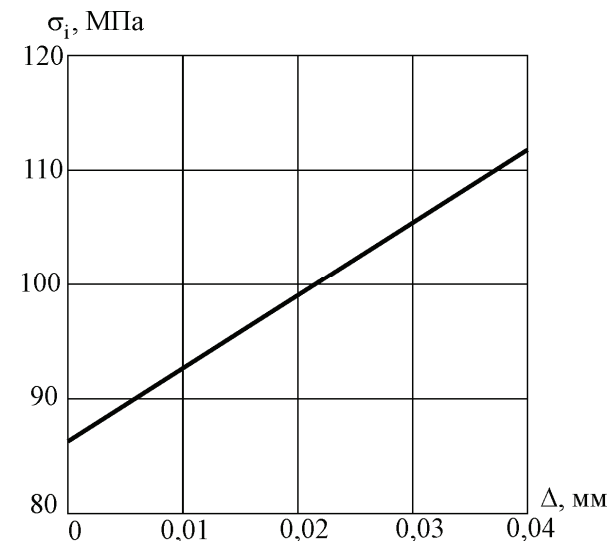


Рисунок 4 – Залежність максимальної інтенсивності напружень у витках струмопроводу від величини натягу поміж витків та діелектричним бандажем

Особливості поведінки матеріалу бандажу під час деформування потребує розгляду інших характеристик напруженого стану з метою визначення безпечних та раціональних конструкційних та технологічних умов. Тому розглядалися розподіли максимальних позитивних нормальних напружень в залежності від величини натягу. Виявилось, що максимальні нормальні напруження (окружні) виникають у матеріалі ба-

ндажу поміж першим та другим витком від центру індуктора. На рис. 5 наведена залежність максимальних окружних напружень у матеріалі бандажу від величини натягу. З наведених даних видно, що вже при мінімальних значеннях величини натягу максимальні окружні напруження перевищують межу міцності при розтягу, тобто стають небезпечними. Одержані значення величин окружних напружень дозволяють прогнозувати можливість руйнування діелектричного бандажу у проміжку поміж витків струмопроводу. Дана можлива ситуація може призвести до втрати ізоляційної здатності бандажу, що призведе до втрати працездатності індуктора. Таким чином, за розглянутих конструкційних та експлуатаційних параметрах індуктора наявність натягу поміж витками струмопроводу та бандажем є неприпустимою.

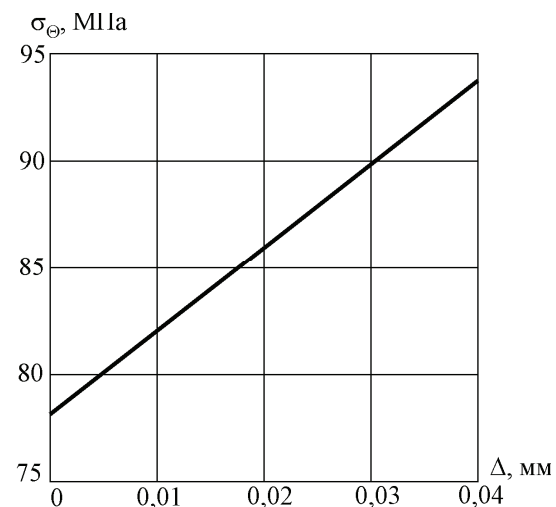


Рисунок 5 – Залежність максимальної величини окружних напружень у діелектричному бандажі від величини натягу поміж витків та діелектричним бандажем

Висновки. Розглянуто проблему деформування складеного багатовиткового індуктора із допоміжним екраном для притягнення неферомагнітних тонких заготовок. При розв'язанні враховані ефекти контактної взаємодії поміж складовими елементами індуктора. На базі аналізу розподілу компонент напружено-деформованого стану визначені раціональні значення деяких конструкційних параметрів.

Список літератури:

1. *Batygin Y.V.* Pulsed electromagnetic attraction of non-magnetic sheet metals / *Y.V. Batygin, S.F. Golovashchenko, A.V. Gnatov* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Vol. 214 (2). – P. 390-401.
2. *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 Technologies*. – 2013. – Vol. 213 (3). – P. 444-452.
3. *Batygin Y.V.* Experimental Test of the Tool for the External EMF Removing Dents on a Car Body / *Y.V. Batygin* // *International Journal of Energy and Power Engineering*. – 2014. – Vol. 214 (2). – P. 204-208.
4. *Лавінський Д.В.* Пружно-пластичне деформування складених конструкцій при дії електромагнітного поля / *Д.В. Лавінський, О.К. Морачковський* // *Вібрації в техніці та тех-*

нологіях. – 2016. – № 3 (83). – С. 103-108.

5. *Altenbach H.* Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields / *H. Altenbach, O. Morachkovsky, K. Naumenko, D. Lavinsky* // Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2016. – Vol. 28 (5). – P. 1421-1433.

6. *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.

7. *Лавінський Д.В.* Пружно-пластичне деформування систем тіл при дії електромагнітних полів / *Д.В. Лавінський, О.К. Морачковський* // Вісник Запорізького національного університету : зб. наук. ст. Фізико-математичні науки. – Запоріжжя: ЗНУ, 2015. – № 2. – С. 125-135.

8. *Чаплыгин Е.А.* Анализ процессов в индукторной системе с притягивающим экраном, возбуждаемой внешним круговым соленоидом / *Е.А. Чаплыгин* // Электротехника і Електромеханіка. – 2015. – № 6. – С. 53-55.

9. *Batygin Yu.V.* Magnetic-pulse car body panels flattening. Theoretical aspects and practical results / *Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin, O.S. Sabokar* // Electrical engineering & electromechanics. – 2016. – No.4. – P. 54-57. – DOI: 10.20998/2074-272X.2016.4.07.

10. *Bondar' S.V.* Study of thermoelastoplastic contact deformation of production tooling mixed structures / *S.V. Bondar', D.V. Lavinskii* // Strength of Materials. – 2011. – Vol. 43, № 4. – P. 447-454.

Bibliography (transliterated):

1. *Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V.* Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214 (2). PP. 390-401.

2. *Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V.* Pulsed Electromagnetic Attraction of Sheet Metals – Fundamentals and Perspective Applications. Journal of Materials Process-

ing Technologies. 2013. Vol. 213 (3). PP. 444-452.

3. *Batygin Y.V.* Experimental Test of the Tool for the External EMF Removing Dents on a Car Body. International Journal of Energy and Power Engineering. 2014. Vol. 214 (2). PP. 204-208.

4. *Lavinsky D.V., Morachkovsky O.K.* Pruzhno-plastyczne deformuvannya skladykh konstrukcii pry dii elektromagnitnoho polva. Vibracii v tekhnici ta tehnologiyakh. 2016. No 3 (83). PP. 103-108.

5. *Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Lavinsky D.* Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2016. Vol. 28 (5). PP. 1421-1433.

6. *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.

7. *Lavinsky D.V., Morachkovsky O.K.* Pruzhno-plastyczne deformuvannya system til pry dii elektromagnitnykh poliv. Visnyk Zaporiz'kogo nacional'nogo universitetu: zb.nauk. st. phizyko-matematychni nauky. Zaporizhzhya: ZNU, 2015. No 2. PP. 125-135.

8. *Chaplygin E.A.* Analiz processov v induktornoj sisteme s prityagivayuschim ekranom, возбуждаемой внешним круговым соленоидом. Electrotechnika і Electromechanika. 2015. No 6. PP. 53-55.

9. *Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S.* Magnetic-pulse car body panels flattening. Theoretical aspects and practical results. Electrical engineering & electromechanics. 2016. No.4. PP. 54-57. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.4.07.

10. *Bondar' S.V., Lavinskii D.V.* Study of thermoelastoplastic contact deformation of production tooling mixed structures. Strength of Materials. 2011. Vol. 43, No 4. PP. 447-454.

Поступила (received) 24.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Контактне деформування складеного індуктора із допоміжним екраном при дії електромагнітного поля / Х. Альтенбах, Д. Лавінський, К. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 40 (1262). – С. 5–9. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9130.

Контактное деформирование составного индуктора со вспомогательным экраном при действии электромагнитного поля / Х. Альтенбах, Д. Лавинский, К. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 40 (1262). – С. 5–9. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9130.

Contact deformation of the compound coil with an assistant screen under the action of electromagnetic field / H. Altenbach, D. Lavinsky, K. Naumenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 40 (1262). – P. 5–9. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2078-9130.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Альтенбах Хольм – доктор технічних наук; професор; Магдебурзький університет ім. Отто фон Геріке; м. Магдебург; Німеччина; e-mail: holm.altenbach@ovgu.de

Альтенбах Хольм – доктор технических наук; профессор; Магдебургский университет им. Отто фон Герике; г. Магдебург; Германия; e-mail: holm.altenbach@ovgu.de

Altenbach Holm – Prof. Dr.-Ing.habil.Dr.h.c.mult; Otto-von-Guericke University of Magdeburg; Magdeburg; Germany; e-mail: holm.altenbach@ovgu.de

Лавінський Денис – кандидат технічних наук; доцент; кафедра теоретичної механіки; НТУ «ХПІ»; тел.: (057)-707-63-73; e-mail: denis.lavinsky@ukr.net

Лавинский Денис – кандидат технических наук; доцент; кафедра теоретической механики; НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-63-73, e-mail: denis.lavinsky@ukr.net

Lavinsky Denis – Candidate of Technical Sciences; Associate Professor; Department of Theoretical Mechanics; NTU «KhPI»; tel.: (057)-707-63-73; e-mail: denis.lavinsky@ukr.net

Науменко Костянтин – доктор технічних наук; професор; Магдебурзький університет ім. Отто фон Геріке; м. Магдебург; Німеччина; e-mail: konstantin.naumenko@ovgu.de

Науменко Константин – доктор технических наук; профессор; Магдебургский университет им. Отто фон Герике; г. Магдебург; Германия; e-mail: konstantin.naumenko@ovgu.de

Naumenko Konstantin – Prof. Dr.-Ing.habil.; Otto-von-Guericke University of Magdeburg; Magdeburg; Germany; e-mail: konstantin.naumenko@ovgu.de