

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

ЛАВІНСЬКИЙ ДЕНИС ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 539.3:539.8

**РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНЕ
ДЕФОРМУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЛАДІВ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків–2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі теоретичної механіки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Морачковський Олег Костянтинович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри комп’ютерного моделювання процесів та систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Зайцев Борис Пилипович,
Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного, провідний науковий співробітник відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень;

доктор технічних наук, професор
Гриньов Володимир Борисович,
Харківський національний університет будівництва та архітектури, професор кафедри будівельної та теоретичної механіки;

доктор технічних наук, професор
Батигін Юрій Вікторович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри фізики.

Захист відбудеться **«29» вересня 2021 р.** о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, а також на сайті <http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/vrada/>

Автореферат розісланий **«27» серпня 2021 р.**

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Олексій ВОДКА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Велика кількість технічних об'єктів експлуатується в умовах дії інтенсивних електромагнітних полів (ЕМП). Тут можна відзначити системи перетворення, генерації та передачі енергії (трансформатори, генератори), системи захисту від блискавок, пристрої для геологічної розвідки, пристрої неруйнівного контролю і т. і. Також відома велика кількість технологічних операцій, які використовують енергію ЕМП. Технології використання ЕМП мають спрямування в залежності від типів матеріалів оброблюваних об'єктів (електропровідні матеріали, діелектрики, п'єзо матеріали). ЕМП призводить до різноманітних видів дії на матеріали: силовий вплив, тепловий, вплив на магнітні властивості. Найбільш важливим із точки зору технологічного застосування є силовий вплив, який виникає за рахунок виникнення значних за амплітудою електромагнітних сил, які розподіляються по об'єму провідника та викликають його рух або деформування. Силовий вплив на оброблювану заготовку використовується у класі технологічних операцій, які одержали назву магнітно-імпульсна обробка матеріалів (МІОМ).

МІОМ – це прогресивні технології, які характеризуються малою кількістю відходів, енергоємністю та екологічною чистотою. Інструменти МІОМ – матриці, пуанسونи та джерела ЕМП – індуктори деформуються разом із заготовками під дією ЕМП. Це призводить до виникнення високо інтенсивних полів напружень та деформацій, що призводить до зменшення довговічності інструмента. На сучасному етапі розвитку машинобудування МІОМ застосовується також для обробки пористих тіл, які виготовляють з порошкових матеріалів. У подібних технологічних операціях обладнання також піддане високо інтенсивному силовому та тепловому впливу, що може призвести до зменшення довговічності інструмента.

Складні умови роботи сучасної техніки та технологічних систем стимулювали створення і розробку теорії взаємозв'язаних полів у пружно-пластичних тілах. Взаємодія фізичних полів в деформованих тілах особливо значима при аналізі міцності і надійності елементів конструкцій, що функціонують при дії високих температур, тисків, сильних ЕМП. Це призвело до розвитку нової галузі теорії взаємозв'язаних фізичних полів, що об'єднує теорію пружно-пластичного деформування і теорію електромагнетизму – магніто-пружно-пластичності, на основі якої вирішуються завдання руху пружного і пластичного електропровідного тіла в магнітному полі. Викладені факти свідчать про необхідність застосування розрахункових методів кількісного аналізу ЕМП та напружено-деформованого стану (НДС) елементів технологічного обладнання на етапі проектування та доведення.

Таким чином, науково-прикладна проблема, яка полягає у створенні нових розрахункових методів оцінювання впливу ЕМП на пружно-пластичне деформування обладнання технологічних приладів з урахуванням зв'язаності процесів розповсюдження ЕМП та деформування, а також розрахункові дослідження за їх допомогою процесів розподілу ЕМП та деформування за умов конкретних

технологічних операцій є *актуальною* у науковому і практичному сенсі, що визначило напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі теоретичної механіки НТУ «ХП» в рамках виконання держбюджетних НДР МОН України: «Створення методів для чисельно-аналітичного аналізу повзучості та динаміки континуальних і дискретних механічних систем» (ДР № 0109U002374, 2009-2011 рр.); «Розробка теоретичних основ і методів рішення задач забезпечення міцності та надійності високонавантажених елементів машинобудівних конструкцій» (ДР № 0109U002382, 2012-2014 рр.) та «Розробка математичних моделей і методів рішення нелінійних задач динаміки та міцності елементів конструкцій при дії квазістатичних, динамічних та ударних навантажень» (ДР № 0115U000509, 2015-2017 рр.), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – розробка нового розрахункового методу аналізу дії електромагнітних полів на пружно-пластичне деформування складених тіл з урахуванням зв'язаності механічних, електромагнітних та теплових полів, та застосування цього методу для оцінювання конструкційної міцності елементів обладнання технологічних приладів, що знаходяться під дією високо інтенсивних ЕМП.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

- провести аналіз сучасного стану питань, щодо розрахунків ЕМП, теплового поля та пружно-пластичного деформування приладів та заготовок при МІОМ, визначити основні підходи та моделі, що використовуються;

- обґрунтувати постановку задач та розрахункові моделі щодо пружно-пластичного деформування електропровідних тіл при дії ЕМП, сформулювати систему рівнянь початково-крайових задач аналізу розповсюдження ЕМП, теплового поля та незворотного термопружно-пластичного деформування систем електропровідних тіл, навести варіаційну постановку задач;

- навести скінченноелементне формулювання ефективного методу розрахункового аналізу впливу ЕМП на пружно-пластичне деформування систем електропровідних тіл, провести тестові розрахунки для модельних задач по визначенню розподілу ЕМП, температури та НДС з метою виявлення границь застосування запропонованого розрахункового методу;

- розробити та обґрунтувати загальний підхід до визначення характеристик ЕМП і НДС у технологічних системах МІОМ, призначених для деформування тонких заготовок, провести дослідження розподілу кількісних характеристик ЕМП та НДС, порівняти окремі результати розподілу характеристик ЕМП із існуючими експериментальними та теоретичними результатами інших авторів з метою встановлення достовірності запропонованого методу та оцінювання можливостей його застосування для розрахункового аналізу подібного технологічного обладнання;

- на основі запропонованого загального підходу визначити розподіл кількісних характеристик ЕМП та НДС обладнання технологічних приладів МІОМ, призначених для виправлення дефектів на тонких металевих заготовках та провести оцінювання впливу ЕМП на деформування та сформулювати рекоменда-

ції щодо раціональних та ефективних конструкційних та експлуатаційних параметрів технологічних операцій;

– розрахунковим шляхом визначити розподіл кількісних характеристик ЕМП, теплового поля та НДС обладнання технологічних приладів для пресування нагрітих порошків тугоплавких сполук, визначити раціональні та ефективні конструкційні та експлуатаційні параметри, та оцінити вплив ЕМП при сумісному ізостатичному та електромагнітному пресуванні.

Об'єктом дослідження є пружно-пластичне деформування електропровідних тіл при дії електромагнітних полів.

Предмет дослідження – тензорно-векторні характеристики НДС, векторні характеристики ЕМП, показники теплового поля та їх розподіли у елементах технологічних приладів.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення дисертаційної роботи базуються на фундаментальних підходах та положеннях термодинаміки незворотних процесів, макроскопічної механіки деформування твердих тіл та електродинаміки, що дозволяє створювати математичні моделі досліджуваних процесів. Розрахункові методи кількісного аналізу, які прийняті в роботі, складають комплекс обчислювальних методів теорії пружності, пластичності (використовувався варіант неізотермічного пластичного плину), моделювання ЕМП та теплового поля на базі методу скінченних елементів (МСЕ) у тривимірній, вісесиметричній та плоскій постановках, явища контактної взаємодії враховувались шляхом введення спеціальних контактних скінченних елементів, все це дозволяє у рамках єдиної методології розробляти розрахункові схеми обладнання технологічних приладів та одержувати кількісні результати стосовно розподілу ЕМП, температури та тензорних характеристик процесу деформування для оцінювання конструкційної міцності та працездатності.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше встановлено наступне:

– отримали розвиток розрахункові методи оцінювання пружно-пластичного деформування за умов дії ЕМП, а також впливу ЕМП на механічні, теплові, електромагнітні процеси у матеріалах складених неоднорідних електропровідних тіл з урахуванням контактної взаємодії, що дозволило розробити ефективний підхід чисельного аналізу деформування систем електропровідних тіл;

– надані нові постановки задач та розрахункові моделі щодо аналізу деформування на основі комплексного використання підходів і методів теорії термомпружно-пластичності, електромагнетизму та теплопередачі, нові умови щодо контактної взаємодії складених тіл за умов дії ЕМП, що дозволило створити метод кількісного аналізу механічних, теплових та електромагнітних процесів у технологічних системах різного призначення;

– розроблені нові фізико-математичні моделі та розрахункові схеми технологічних операцій МІОМ, спрямованих на виправлення дефектів на плоских заготовках, на деформування кутових зон вигнутих тонких заготовок, на пресування виробів з нагрітих порошків тугоплавких сполук, які на відміну від існуючих дозволяють в рамках єдиної методології проводити розрахунки кількіс-

них характеристик ЕМП, теплового поля та НДС відповідного технологічного обладнання;

– вперше на основі запропонованого в роботі розрахункового методу аналізу проведено дослідження розподілу кількісних характеристик ЕМП, теплового поля та НДС у елементах технологічного обладнання МІОМ (складені індуктори для притягнення тонких заготовок з феромагнітних та неферомагнітних матеріалів, складені прес-форми для пресування порошків тугоплавких сполук), оцінено вплив зовнішнього ЕМП на процеси деформування, встановлені нові закономірності у розподілі характеристик НДС та теплового поля в залежності від експлуатаційних та конструкційних параметрів технологічних процесів, що дозволило зробити оцінювання конструкційної міцності та сформулювати конкретні рекомендації щодо вибору раціональних значень експлуатаційних та конструкційних характеристик, за яких досягається ефективність технологічної операції та зберігається працездатність обладнання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропонований розрахунковий метод кількісного аналізу ЕМП, теплових полів та НДС електропровідних тіл використовувався на етапі розробки різноманітних елементів нової техніки, яка функціонує в умовах дії високо інтенсивних ЕМП. Створені розрахункові схеми та алгоритми для розрахункових досліджень кількісних характеристик ЕМП, теплового поля та НДС можуть використовуватись при удосконаленні існуючих та створенні нових технологічних операцій МІОМ, спрямованих на деформування тонких плоских або вигнутих заготовок та на електромагнітне пресування порошків тугоплавких сполук.

Наукові розробки та практичні результати досліджень були використані при виконанні НДР з держбюджетної тематики кафедри теоретичної механіки і динаміки та міцності машин НТУ «ХП», при проведенні пошукових науководослідницьких робіт та навчального процесу кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, а також у Навчально-науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України при виконанні НДР за державною програмою. Впровадження підтверджується 5-ма актами, виданими НТУ «ХП», ХНАДУ та ННЦ «ХФТ».

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них розрахунковий метод кількісного аналізу пружно-пластичного деформування тіл при дії ЕМП; модель контактної взаємодії з урахуванням електромагнітних процесів та процесів теплопередачі. Розрахункові схеми приладів та заготовок для окремих технологічних операцій МІОМ, а також для пресування порошків тугоплавких сполук у складених матрицях розроблені автором особисто. Комплексний підхід до розрахункових досліджень складених приладів та заготовок при МІОМ, а також складених матриць для пресування порошків тугоплавких з'єднань розроблено автором особисто. Розрахункові дослідження кількісних характеристик ЕМП та НДС при пружно-пластичному деформуванні в рамках розробленого підходу проведені особисто автором. Узагальнюючі висновки щодо оцінок дії ЕМП на пружно-пластичне деформування технологічних пристроїв та заготовок при окремих операціях МІОМ та рекомендації стовно вибору раціональ-

них характеристик ЕМП та конструкційних параметрів приладів зроблені автором особисто.

У роботах, опублікованих зі співавторами особистий внесок вказано поруч з відповідною публікацією у *списку опублікованих праць за темою дисертації*.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на: XIX – XXVIII-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2011 р. – 2020 р.); IV-й Міжнародній конференції «Nonlinear dynamics» (м. Севастополь, 2013 р.); IV-й Міжнародній науково-технічній конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (м. Львів, 2014 р.); XIII-ій Міжнародній технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (м. Львів, 2014 р.); XII-му Міжнародному симпозиуму українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 2015 р.); XXII та XXIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Фізичні і комп'ютерні технології» (м. Харків, 2016, 2017 рр.); International scientific and practical conference «Economics, science, education: integration and synergy» (Bratislava, Slovak Republic, 2016 р.); II-й Міжнародній науково-практичній конференції «Весняні наукові читання» (м. Київ, 2016 р.); XV-й Міжнародній науковій конференції «Актуальные научные исследования в современном мире» (м. Переяслав-Хмельницький, 2016 р.); Міжнародній конференції «Современные проблемы естественных наук – Тараповские чтения» (м. Харків, 2016 р.); V-й Міжнародній конференції «Nonlinear dynamics» (м. Харків, 2016 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении» (м. Одеса, 2017, 2019 рр.); II-й Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми МСС та міцності конструкцій» (м. Дніпро, 2019 р.); II-й Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» (м. Харків, 2020 р.); III-й Міжнародній науково-практичній конференції «Priority directions of science and technology development» (м. Київ, 2020 р.).

Окремі частини дисертації доповідались на наукових семінарах під час стажувань здобувача у рамках програми DAAD «Східне партнерство» на семінарі інституту механіки машинобудівного факультету Магдебурзького університету ім. Отто фон Геріке (м. Магдебург, Німеччина, 2014, 2016 та 2017 рр.).

В повному обсязі дисертація була розглянута на розширених засіданнях кафедри теоретичної механіки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (2015, 2016, 2018 та 2021 рр.)

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 49 наукових працях: 25 – у наукових фахових виданнях України (4 – у наукометричній базі Scopus, 1 – у наукометричній базі Web of Science) та 24 – у матеріалах конференцій та збірниках наукових праць.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації та додатків. Повний обсяг дисертації складає 420 сторінок, з них основна частина складає 338 сторінок (11,9 авторських аркушів), 144 рисунка по

тексту, 27 рисунків на 17 окремих сторінках, 18 таблиць по тексту, 2 додатки на 14 сторінках і 370 найменувань використаних науково-технічних джерел інформації на 36 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

Перший розділ присвячено проблемному аналізу науково-технічної інформації щодо теми дисертаційної роботи. Зроблено висновок про те, що ЕМП є невід'ємною умовою функціонування багатьох технічних та технологічних систем. Найбільш ефективним у технологічних процесах є використання силового впливу ЕМП на оброблюваний об'єкт. Силовий вплив застосовується у прогресивних технологічних операціях магнітно-імпульсної обробки матеріалів (МІОМ).

Можливості проектування та застосування технічних та технологічних систем, що піддані дії ЕМП або використовують енергію ЕМП висвітлені у роботах багатьох вітчизняних та закордонних вчених С.А. Амбарцумяна, С. Аллесадроні, Г.Е. Багдасаряна, Ю.В. Батигіна, М.В. Белубекяна, І.В. Білого, П.Н. Дашука, Ф. Дель Ізолли, С.Л. Заєнца, В.С. Камелькова, В.Р. Карасика, Г. Кнопфеля, О.С. Лагутина, К. Ланге, А. Мамаліса, В.А. Миронова, В.М. Михайлова, Д. Монтгомери, Д. Паркінсона, С.О. Смирнова, Л.Т. Хименко, Ф. Херлаха, С.М. Фертика, Г.О. Шнеерсона та інших. Сучасні тенденції розвитку технологій із застосуванням енергії ЕМП свідчать про спрямування технологій на створення систем з деформування тонких заготовок, а також створення систем з електромагнітного пресування порошкових матеріалів.

Ефективність МІОМ обумовлена досягненням необхідного рівня формозміни заготовки, а також працездатністю та довговічністю технологічних приладів. Для дослідження вказаних факторів необхідно проводити розрахунковий аналіз розповсюдження ЕМП та пружно-пластичного деформування, який повинен спиратись на відповідні теоретичні положення та моделі пружно-пластичного деформування електропровідного тіла. Розвиток теорій та створення моделей розповсюдження взаємозв'язаних полів у пружно-пластичних тілах мотивовані наявністю складних умов роботи елементів сучасної техніки. Потреба у працездатних та довговічних конструкціях для машинобудування та технологічних процесів призвела до розвитку нової галузі теорії взаємозв'язаних фізичних полів, що об'єднує теорію пружно-пластичного деформування і теорію електромагнетизму. Аналізу електромагнітних процесів у провідних середовищах присвячено велику кількість робіт вітчизняних та закордонних вчених. Можна стверджувати, що основи закладено у фундаментальній роботі Дж. Максвелла, також відзначимо фундаментальні роботи Я.Й. Бурака, А. Кравчука, Б.О. Кудрявцева, Ж. Можана, В. Новацкого, В.І. Партона, Я.С. Підстригача та інших. Теоретичний базис моделей механіки суцільного середовища, що враховують взаємодію полів різної фізичної природи (у тому числі і ЕМП) закладено у роботах вітчизняних та закордонних вчених: С.А. Амбарцу-

мяна, Г.Є. Багдасаряна, М.В. Белубекяна, Я.Й. Бурака, А. Ван дер Вена, А. Ерингена, О.О. Ілюшина, Ж. Можана, В. Новацького, Й. Пао, Я.С. Підстригача, Л.І. Сєдова, Р. Тоупіна, К. Трасдела, К. Хаттера, Л. Чу та інших. Опис силової дії ЕМП на електропровідне тіло, яка є основною у багатьох технологічних процесах (в тому числі при МІОМ), базується на положеннях теорії магнітопружності. Основи цієї теорії було закладено у роботах вітчизняних та закордонних вчених: Д. Албласа, С.А. Амбрацумяна, Г.Е. Багдасаряна, М.В. Белубекяна, Я.Й. Бурака, А. Ван де Вена, Д. Данкіна, А. Ерингена, С. Каліскі, Л. Кнопоффа, В.Ф. Кондрата, Б.О. Кудрявцева, Ф. Муна, Й. Пао, В.З. Партонна, Д. Петикевича, Я.С. Підстригача, П. Чадвіка та інших.

Сучасні методи аналізу електромагнітних, теплових полів та пружно-пластичного деформування використовують чисельні методи розрахунку, серед яких найбільш поширеним є метод скінченних елементів (МСЕ). Результати застосування МСЕ до аналізу термомеханіки електропровідних тіл наведено у роботах Є.І. Байди, Ф. Баха, М. Бессонова, Дж. Вебера, С. Головащенко, Г.С. Дайсна, К. Карха, М. Кляйнера, Ф. Конроя, К. Морі, Д. Олівейри, К. Осакада, М.Г. Пантеліята, Д. Ріша, К. Ролла, С. Салона, Б. Свендсена, М. Уорсвіка, Дж.К. Фентона, М. Фліачі, Дж. Шнайдера та інших вітчизняних та закордонних вчених. МСЕ застосовується для аналізу розподілення кількісних характеристик ЕМП, теплових полів та пружно-пластичного деформування заготовок за умов МІОМ, при цьому деформування інструментів МІОМ – індукторів (соленоїдів) зазвичай залишається поза увагою.

Представлений аналіз сучасного стану проблеми в напрямі дисертаційного дослідження дозволив сформулювати мету даної дисертаційної роботи, яка полягає у розробці нового розрахункового методу оцінювання дії електромагнітних полів на пружно-пластичне деформування складених тіл з урахуванням зв'язаності механічних, електромагнітних та теплових полів, та застосування цього методу для дослідження заготовок та обладнання технологічних приладів, які знаходяться під дією імпульсного електромагнітного поля. Відзначимо, що перелічені питання на цей час не знайшли рішення, яке б у повній мірі задовольнило сучасну практику розробки технологічних систем, які використовують енергію ЕМП.

У **другому розділі** зроблено загальну постановку проблеми створення розрахункового методу оцінювання дії ЕМП на деформування систем електропровідних тіл. Розглянуті загальні балансові співвідношення (закон збереження маси, закон збереження кількості руху, закон збереження моменту кількості руху, рівняння балансу енергії та ентропії), які дозволяють зв'язати основні характеристики ЕМП, теплового поля та НДС, надають змогу сформулювати визначальні рівняння. Рівняння стану у загальному випадку одержані з розгляду нескінченно малої зміни потенціалу Гібса. Одержана модель щодо урахування впливу ЕМП на процес деформування тіла та розповсюдження теплового поля для випадку нехтування проявами п'єзоелектрики, п'єзомагнетизму, магнітоелектрики та електрично- і магнітно-тепловими ефектами. Остаточна система визначальних рівнянь містить співвідношення для векторних компонент ЕМП, температури та векторних і тензорних характеристик процесу деформування.

Для визначення характеристик ЕМП розглянуті фундаментальні рівняння Максвелла:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \epsilon_c \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}; \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_c \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0; \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon_c}; \quad (1)$$

тут $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \vec{e}_i, i = 1, 2, 3$, \vec{E}, \vec{H} – вектори напруженості електричного та магнітного полів, ϵ_c, μ_c – електрична та магнітна проникності матеріалу ізотропного тіла, \vec{j} – вектор густини сили струму, ρ_e – густина електричного заряду. Рівняння (1) поповнюються матеріальними співвідношеннями, законом збереження електричного заряду та законом Ома для густини струму:

$$\vec{D} = \epsilon_c \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu_c \vec{H}; \quad \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0, \quad \vec{j} = \gamma_c \vec{E} + \gamma_c [\vec{u} \times \vec{B}] + \rho_e \vec{u}; \quad (2)$$

тут \vec{D}, \vec{B} – індукція електричного поля та магнітна індукція, \vec{u} – швидкість електропровідного середовища, γ – електрична провідність матеріалу.

Розподіл температурного поля піддається рівнянню теплопровідності

$$\nabla^2(\hat{\Lambda}T) + Q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

тут $T = T(x_i, t), i = 1, 2, 3$ – функція розподілу температури, $\hat{\Lambda}$ – тензор коефіцієнтів теплопровідності, c – коефіцієнт теплоємності, ρ – густина матеріалу (яка приймається сталою для конкретного тіла), $Q = Q(x_i, t)$ – функція, що описує внутрішні розподілені джерела тепловиділення, t – час. Функцію розподілених внутрішніх джерел тепловиділення можна представити як суму:

$$Q = Q_{\text{тр}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{дж}}, \quad Q_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} |u_{\tau}| \sigma_{\tau}; \quad Q_{\text{пл}} = k_{\text{пл}} \hat{s} \cdot \hat{\epsilon}; \quad Q_{\text{дж}} = \frac{1}{\gamma} (\vec{\nabla} \times \vec{H})^2, \quad (4)$$

де $Q_{\text{тр}}, Q_{\text{пл}}, Q_{\text{дж}}$ – функції, що характеризують тепловиділення за рахунок тертя, пластичного деформування та протікання електричного струму відповідно, $k_{\text{тр}}, k_{\text{пл}}$ – коефіцієнти, які характеризують ефекти тепловиділення при терті на контактних поверхнях та пластичному деформуванні для відповідних матеріалів, $\vec{u}_{\tau} = \vec{u} \times \vec{n}$ – дотичні переміщення точок контактних поверхонь взаємодіючих тіл, $\sigma_{\tau} = |\vec{n} \cdot \hat{\sigma} \cdot \vec{\tau}|$ – дотичні напруження на границях контакту, $\vec{n}, \vec{\tau}$ – одиничні вектори нормалі та дотичної на контактних поверхнях, \hat{s} – девіатор тензору напружень ($\hat{s} = \hat{\sigma} - \sigma_0 \hat{I}, \sigma_0 = \frac{1}{3} \text{tr} \hat{\sigma}, \hat{I}$ – одиничний тензор), ($\hat{e} = \hat{\epsilon} - \epsilon_0 \hat{I}, \epsilon_0 = \frac{1}{3} \text{tr} \hat{\epsilon}$) – девіатор тензору деформацій.

Силкові характеристики процесу деформування піддані рівнянням рівноваги

$$\vec{\nabla} \cdot \hat{\sigma} + \rho \vec{f} = 0, \quad \vec{x} \in V, \quad \hat{\sigma} = \hat{\sigma}^T, \quad (5)$$

де $\hat{\sigma}$ – тензор напружень, $\rho\vec{f}$ – вектор об’ємних електромагнітних сил, за допомогою якого ми враховуємо силовий вплив ЕМП на процес деформування і який може визначатись

$$\rho\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} + \rho_e \vec{E}. \quad (6)$$

Також силовий вплив ЕМП на тіло може бути врахований шляхом введення тензору натягів Максвелла і рівняння рівноваги набудуть вигляду

$$\vec{\nabla} \cdot (\hat{\sigma} + \hat{\sigma}^{(M)}) = 0, \quad \vec{x} \in V, \quad \hat{\sigma} = \hat{\sigma}^T, \quad (7)$$

де компоненти тензору натягів Максвелла визначаються наступним чином

$$\sigma_{ij}^M = E_i D_j + B_i H_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{B} \cdot \vec{H}). \quad (8)$$

Кінематичні характеристики процесу деформування розглядаються відповідно до співвідношень Коші

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T]. \quad (9)$$

Рівняння (1,3,5,9) доповнюються початковими та граничними умовами. Початкові умови у загальному вигляді:

$$\vec{E}(0) = \vec{E}_0; \quad \vec{D}(0) = \vec{D}_0; \quad \vec{H}(0) = \vec{H}_0; \quad \vec{B}(0) = \vec{B}_0; \quad T(0) = T_0. \quad (10)$$

Граничні умови мають певні особливості при їх розгляді стосовно розповсюдження ЕМП, теплового поля та НДС. При формулюванні у загальному вигляді граничних умов для векторних характеристик ЕМП скористаємось умовами сполучення полів у тілі та у зовнішньому середовищі, які прийняті у макроскопічній електродинаміці:

$$\begin{aligned} (E_v - E_\Gamma) \times \vec{n} &= -\mu_c \dot{\vec{u}} \cdot \vec{n} (\vec{i} + (\vec{u} \times \vec{n}) \Xi), & (\vec{D}_v \cdot \vec{n} - \vec{D}_\Gamma \cdot \vec{n}) &= \Xi, \\ (\vec{H}_v - \vec{H}) \times \vec{n} &= \vec{i} + (\dot{\vec{u}} \times \vec{n}) \Xi, & (\vec{B}_v \cdot \vec{n} - \vec{B}_\Gamma \cdot \vec{n}) &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

тут \vec{E}_v, \vec{H}_v – вектори напруженості електричного та магнітного полів у зовнішньому до тіла середовищі, \vec{n} – вектор одиничної нормалі до границі тіла, \vec{i}, Ξ – густини поверхневих зарядів та струмів, індекс Γ означає приналежність векторних характеристик ЕМП у тілі до його границі.

У багатьох випадках при аналізі технологічних систем зовнішнє ЕМП є відсутнім, а у тілах системи воно генерується завдяки наявності деяких джерел ЕМП, наприклад індукторів (соленоїдів), у цьому випадку та у разі відсутності поверхневих зарядів та струмів, а також у разі нехтування можливим рухом тіла, граничні умови для векторних характеристик ЕМП стають однорідними:

$$\vec{E}_\Gamma \times \vec{n} = 0, \quad \vec{D}_\Gamma \cdot \vec{n} = 0, \quad \vec{H}_\Gamma \times \vec{n} = 0, \quad \vec{B}_\Gamma \cdot \vec{n} = 0. \quad (12)$$

При розрахунку теплового поля розглядаємо граничні умови наступного виду:

$$T|_{\Gamma_1} = T_1, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right|_{\Gamma_2} = -\frac{\vec{q}}{\lambda}, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right|_{\Gamma_3} = \frac{\alpha_k}{\lambda} [T|_{\Gamma_3} - T_\infty], \quad (13)$$

тут індекси $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ означають приналежність до границь, на яких задано розподіл температури, тепловий потік та конвекційний теплообмін відповідно, \vec{q} – тепловий потік через границю Γ_2 , α_k – коефіцієнт конвекційного теплообміну, T_∞ – температура зовнішнього середовища.

Граничні умови для переміщень та напружень на поверхні:

$$\vec{u}|_{\Gamma} = \vec{u}_*, \quad \vec{\sigma}_n = \vec{p}_n + \frac{\Xi}{2} \vec{E}_\Gamma + \frac{\mu_c}{2} (\Xi \dot{\vec{u}} \times \vec{n} + \vec{i}) \times \vec{H}_\Gamma, \quad (14)$$

тут \vec{u}_* – відомі переміщення точок поверхні тіла $\vec{\sigma}_n = \widehat{\sigma} \cdot \vec{n}$ – вектор напружень на границі тіла із нормаллю \vec{n} , \vec{p}_n – вектор поверхневих механічних сил.

У випадку пружного деформування для ізотропного тіла рівняння стану набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \widehat{\varepsilon} &= {}^{(4)}\widehat{S}^e \cdot \widehat{\sigma} + \widehat{\alpha}_T \Delta T; \\ {}^{(4)}\widehat{S}^e &= -\frac{\nu}{E} \widehat{I} \otimes \widehat{I} + \frac{1+\nu}{E} (e_k \otimes \widehat{I} \otimes e_k + e_i \otimes e_k \otimes e_i \otimes e_k), \quad \widehat{\alpha}_T = \alpha_T \widehat{I}, \end{aligned} \quad (15)$$

де E – модуль пружності, ν – коефіцієнт Пуассона, α_T – коефіцієнт лінійного температурного розширення ізотропного матеріалу.

У випадку пружно-пластичного деформування розглядаємо рівняння стану у інкрементальній формі відносно прирощень деформацій та напружень, представимо прирощення повної деформації $d\widehat{\varepsilon}$ як суму прирощень пружної $d\widehat{\varepsilon}^e$ та пластичної $d\widehat{\varepsilon}^p$ деформації:

$$d\widehat{\varepsilon} = d\widehat{\varepsilon}^e + d\widehat{\varepsilon}^p \Rightarrow d\widehat{\varepsilon} = \frac{1+\nu}{E} \left(d\widehat{\sigma} - \frac{3\nu}{1+\nu} d\sigma_0 \widehat{I} \right) + \frac{3}{2} d\varepsilon_i^p \frac{\bar{s}}{\sigma_i}, \quad (16)$$

де $d\varepsilon_i^p = \sqrt{\frac{3}{2} \text{tr}(d\varepsilon^p)^2}$ – прирощення інтенсивності пластичних деформацій, \bar{s} –

девіатор активних напружень ($\bar{s} = \widehat{s} - \widehat{\beta}$), $\widehat{\beta} = \frac{2}{3} \frac{EE_h}{E - E_h} \widehat{\varepsilon}^p$ – девіатор залишкових

напружень, E_h – модуль зміцнення, $\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2} \text{tr}(s^2)}$ – інтенсивність напружень.

Умову початку пластичності обираємо у вигляді

$$\sigma_i - \sigma_T = 0, \quad (17)$$

де σ_T – межа текучості матеріалу.

У випадку неізотермічного пластичного плину представляємо прирощення повної деформації в залежності від прирощень напружень та температури:

$$d\widehat{\varepsilon} = {}^{(4)}\widehat{S} \cdot d\widehat{\sigma} + \widehat{\phi} dT, \quad {}^{(4)}\widehat{S} = {}^{(4)}\widehat{S}^e + {}^{(4)}\widehat{S}^p, \quad {}^{(4)}\widehat{S}^p = \frac{3}{2\sigma_i} F_\sigma(\sigma_i, T) \bar{s} \otimes \bar{s}, \quad (18)$$

тут $F_\sigma(\sigma_i, T) = \frac{3}{2\sigma_i} \left(\frac{1}{E_h} - \frac{1}{E} \right)$ – функція, яка описую миттєву термомеханічну

поверхню у просторі напружень. Тензор впливу зміни температури на деформування представляємо наступним чином:

$$\begin{aligned}\widehat{\phi} &= \widehat{\phi}^e + \widehat{\phi}^p, \\ \widehat{\phi}^e &= \left(\frac{d\alpha_T}{dT} + \alpha_T \right) \widehat{I} - \frac{1}{E^2} \frac{dE}{dT} [(1+\nu)\widehat{\sigma} - 3\nu\sigma_0\widehat{I}] + \frac{1}{E} \frac{d\nu}{dT} (\widehat{\sigma} - 3\sigma_0\widehat{I}), \\ \widehat{\phi}^p &= -F(\sigma_i, T) \frac{\partial \sigma_T}{\partial T} \bar{s}.\end{aligned}\quad (19)$$

При аналізі обладнання технологічних операцій одним з ключових моментів є адекватне врахування умов контактної взаємодії поміж складовими частинами приладів. Умови механічного контакту для тіл m та $m+1$ сформульовані у загальному випадку так:

$$\begin{aligned}\sigma_n^{(i)} &= 0; \quad \sigma_\tau^{(i)} = 0; \quad (x, y) \notin \Omega, \quad \sigma_n^{(i)} = -p^*(x, y); \quad (x, y) \in \Omega, \\ \sigma_\tau^{(i)} &= f_n |\sigma_z^{(i)}|; \quad (x, y) \in \Omega, \quad u_n^{(m)} + u_n^{(m+1)} = \delta - \varphi_m(x, y) - \varphi_{m+1}(x, y); \quad (x, y) \in \Omega, \\ i &= m, m+1,\end{aligned}\quad (20)$$

тут Ω – область контакту, $\sigma_n^{(i)}$ – нормальні напруження у точках, що належать області контакту i -го тіла, $p^*(x, y)$ – контактний тиск, $\sigma_\tau^{(i)}$ – дотичні напруження у точках, що належать області контакту i -го тіла (обчислюються відповідно до закону Кулона), f_n – коефіцієнт тертя (залежить від матеріалу тіл, які контактують), $u_n^{(m)}, u_n^{(m+1)}$ – переміщення точок областей контакту тіл уздовж нормалі до контактної площадки, δ – зазор (натяг), $\varphi_m(x, y), \varphi_{m+1}(x, y)$ – функції поверхні тіл у межах області контакту. У багатьох випадках границі області контакту тіл є площинами, до того ж ми можемо з певним припущенням розглядати усю можливу область контакту як площину, тоді умови контактної взаємодії (20) спрощуються до вигляду:

$$\vec{n} \cdot \widehat{\sigma}^m \cdot \vec{n} = \vec{n} \cdot \widehat{\sigma}^{m+1} \cdot \vec{n} \leq 0; \quad \vec{u}^m \cdot \vec{n} + \vec{u}^{m+1} \cdot \vec{n} - \delta \leq 0.\quad (21)$$

При цьому дотичні напруження зв'язані із нормальними у рамках закону Кулона $|\vec{n} \cdot \widehat{\sigma}^m \cdot \vec{\tau}| = f \vec{n} \cdot \widehat{\sigma}^m \cdot \vec{n}$, тут $\vec{n}, \vec{\tau}$ – одиничні вектори спільної нормалі та спільної дотичної відповідно.

Стосовно розповсюдження ЕМП на границі розділу двох тіл повинні виконуватись наступні умови (при нехтуванні можливим поверхневим електричним опором, наявністю поверхневих зарядів та струмів):

$$\left(\vec{E}_m - \vec{E}_{m+1} \right) \times \vec{n} = 0, \quad \left(\vec{D}_m - \vec{D}_{m+1} \right) \cdot \vec{n} = 0; \quad \left(\vec{H}_m - \vec{H}_{m+1} \right) \times \vec{n} = 0, \quad \left(\vec{B}_m - \vec{B}_{m+1} \right) \cdot \vec{n} = 0, \quad (22)$$

Щодо розповсюдження температурного поля – приймаємо умови ідеального теплового контакту (також нехтуючи деякими специфічними ефектами, які можуть мати місце при контакті):

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial \vec{n}} = \lambda_{m+1} \frac{\partial T_{m+1}}{\partial \vec{n}}; \quad T_m = T_{m+1}. \quad (23)$$

При використанні чисельних процедур МСЕ на етапі визначення просторо-часових розподілів векторних характеристик ЕМП для зменшення кількості відповідних рівнянь введені поняття векторного магнітного \vec{A} та скалярного електричного φ потенціалів:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}; \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0; \quad \vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} \varphi. \quad (24)$$

Для потенціалів формулюються початкові умови та граничні умови (однорідні та неоднорідні):

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i} \right|_{\Gamma} &= -E_{\Gamma i}, \quad i = 1, 2, 3; \\ \vec{A}(0) = 0; \quad \varphi(0) = 0. \quad \vec{A} \Big|_{\infty} &= 0; \quad \varphi \Big|_{\infty} = 0. \end{aligned} \quad (25)$$

$$\left(\frac{\partial A_i}{\partial x_j} - \frac{\partial A_j}{\partial x_i} \right) \Big|_{\Gamma} = B_{\Gamma k}, \quad i \neq j \neq k = 1, 2, 3.$$

При такому підході для опису нестационарного розповсюдження ЕМП достатньо розгляду системи двох рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \dot{\vec{u}} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) + \frac{1}{\gamma} \vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu_c} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) + \vec{\nabla} \varphi = \vec{J}; \\ \vec{\nabla} \cdot \left[\gamma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) - \vec{\nabla} \varphi + \dot{\vec{u}} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) \right] = \rho_e. \end{cases} \quad (26)$$

Для розв'язання сформульованої системи диференціальних рівнянь використовується чисельний підхід на базі МСЕ, для чого зроблені відповідні варіаційні формулювання. На базі принципу стаціонарності повної енергії системи зроблено варіаційне формулювання задачі для випадку пружного деформування та квазістаціонарного розповсюдження ЕМП. Показано, що у випадку, коли зв'язаність механічного поля та ЕМП проявляється лише у наявності електромагнітних сил, то можливе послідовне розв'язання задач визначення компонентів ЕМП та НДС. Для загального випадку розповсюдження ЕМП, нестационарного теплового поля та пружного деформування наведено варіаційну постановку. Поширено варіаційну постановку на випадок пластичного деформування за теорією плинину, з урахуванням залежності основних характеристик від температури. Розглянуто застосування створеного розрахункового методу кількісного аналізу до низки модельних задач (взаємодія циліндричного індуктора із довгою заготовкою, магнітопружне деформування нескінченного тіла із порожниною, індукційний нагрів циліндричного тіла за допомогою багатовиткового індуктора), у яких було відшукано розподілення компонентів ЕМП, НДС та температури. Порівняння окремих результатів чисельного розв'язання із аналітичними дозволили зробити висновок про доцільність застосування запропонованого

розрахункового методу для аналізу розповсюдження ЕМП, теплового поля та НДС у системах електропровідних тіл із метою оцінювання впливу ЕМП на процес деформування.

У **третьому розділі** запропоновано та обґрунтовано загальний підхід до визначення характеристик ЕМП та НДС у технологічних системах МІОМ, згідно до якого передбачається використання запропонованого розрахункового методу кількісного аналізу для розрахункових схем, які мають містити індуктор та заготовку.

Проведено розв'язання із визначення просторово-часових розподілів основних характеристик ЕМП за умов технологічної операції МІОМ по притягненню тонких заготовок із феромагнітних матеріалів за допомогою одновиткового індуктора із конічним отвором. На рис. 1 та 2 представлені геометрична модель індуктора та розрахункова схема задачі у вісесиметричній постановці.

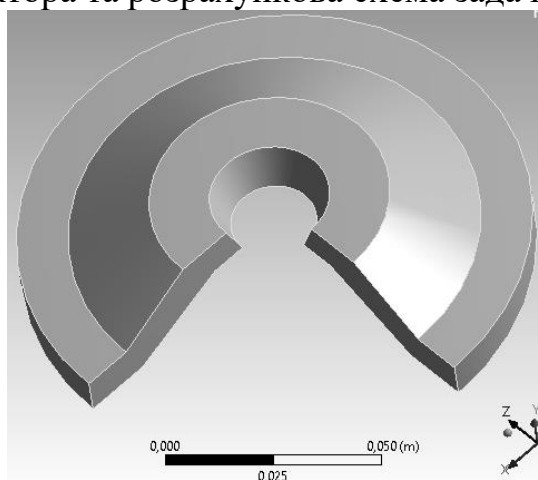


Рисунок 1 – Геометрична модель індуктора

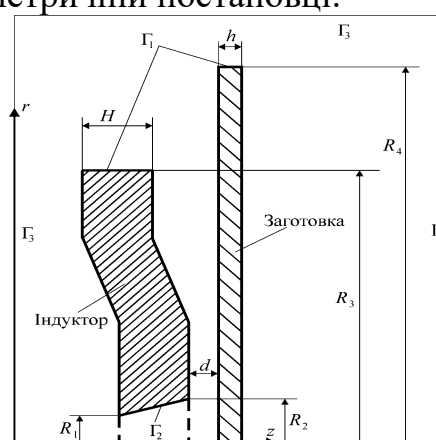


Рисунок 2 – Розрахункова схема для чисельного розв'язання (меридіональний переріз індуктора та заготовки)

Розв'язання було проведено для наступних геометричних параметрів: $R_1 = 0,0075$ м, $R_2 = 0,02$ м, $R_3 = 0,05$ м, $R_4 = 0,1$ м, $H = 0,0144$ м, $h = 0,0005$ м, $d = 0,0005$ м. Розміри повітряного середовища, що оточує систему, варіювалися з метою визначення таких, при яких компоненти ЕМП згасають 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 компонента вектору густини струму змінювалась у часі за законом: $j(t) = j_m e^{-\delta\omega t} \sin(2\pi\nu t)$, тут $j_m = \frac{I_m}{A_{\text{отв}}}$ – амплітуда густини струму;

му; $A_{\text{отв}} = \pi \frac{R_2^2 - R_1^2}{\cos \beta} = 0,0022(\text{м}^2)$ – площа бічної поверхні конічного отвору індуктора; $I_m = 50(\text{кА})$ – амплітуда сили струму у імпульсі, таким чином, амплітуда густини струму складає $j_m = 23,162 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{кА}}{\text{м}^2} \right)$; $\nu = 1,33$ кГц – частота струму в імпульсі; $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота; $\delta = 0,3$ – коефіцієнт згасання.

Розв'язання проводилось для нульових початкових умов для одного імпульсу струму, у часовому діапазоні від 0 до 0,3 с, що гарантувало повне загасання

струму в імпульсі. На рис. 3 наведені порівняння стосовно розрахункових значень напруженості магнітного поля на поверхні заготовки в околі робочої зони. Найбільше відхилення фіксується біля центру робочого отвору та на його краю, кількісно різниця між чисельними та експериментальними результатами не перевищує 18%. Даний факт надає змоги стверджувати, що застосування створеного методу розрахункового аналізу та запропонованої розрахункової схеми до дослідження розподілу компонентів ЕМП у подібних технологічних системах є обґрунтованим.

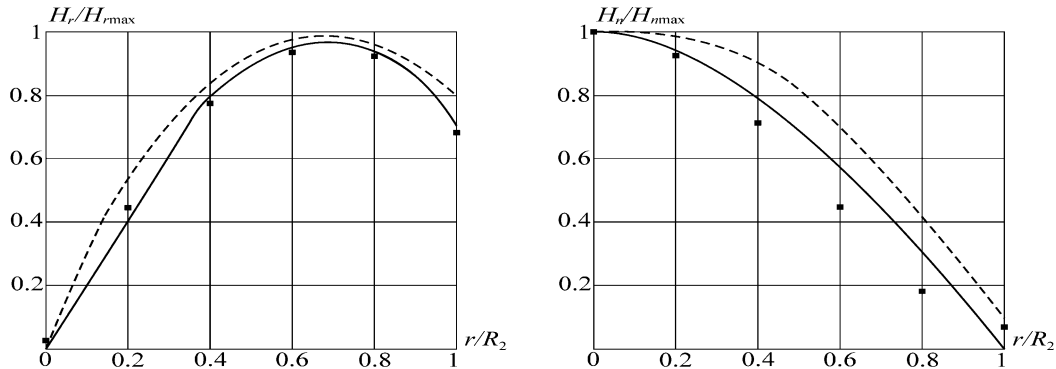


Рисунок 3 – Розподіл компонент напруженості магнітного поля (суцільна лінія – розв’язок МСЕ, дотична лінія – аналітичний розв’язок, точки – результати експериментів)

Також проведено аналіз розподілу у технологічних системах, які містять одновитковий складений індуктор із допоміжним металевим екраном, призначений для притягнення тонких ферромагнітних заготовок (розрахункова схема задачі – рис. 4). Проведений аналіз розподілу компонент ЕМП дозволив порівняти деякі розрахункові результати (рис. 5) із результатами аналітичних розв’язків інших дослідників, порівняння свідчать про достатньо високій ступінь узгодження із результатами аналітичних розв’язків. Проте, створений розрахунковий метод має переваги у порівнянні із аналітичними підходами. Наприклад, він дозволяє визначати характеристики ЕМП у всій розрахунковій області. На рис. 6 наведене порівняння у розподілі електромагнітної сили по поверхні заготовки. Аналітичний розв’язок дозволяє визначати силу лише «до» та «після» витка, проте її максимум спостерігається безпосередньо під витком.

На базі проведених розрахунків з розподілу основних характеристик ЕМП були проведені розрахункові дослідження розподілу основних компонент НДС у індукторі та заготовці, що дозволило оцінити вплив ЕМП на процес їх пружно-пластичного деформування. Розрахунки виконані у квазістаціонарному наближенні при значеннях характеристик ЕМП, що відповідали часовому максимуму. Встановлено, що розглянута технологічна система із одновитковим індуктором не задовольняє умовам технологічної операції, оскільки при заданих експлуатаційних характеристиках не досягається умова про виникнення зон пластичних деформацій у заготовці. При варіюванні сили струму у індукторі встановлено, що у заготовці з’являються зони пластичних деформацій, проте і індуктор стає навантаженим настільки, що може втратити працездатність.

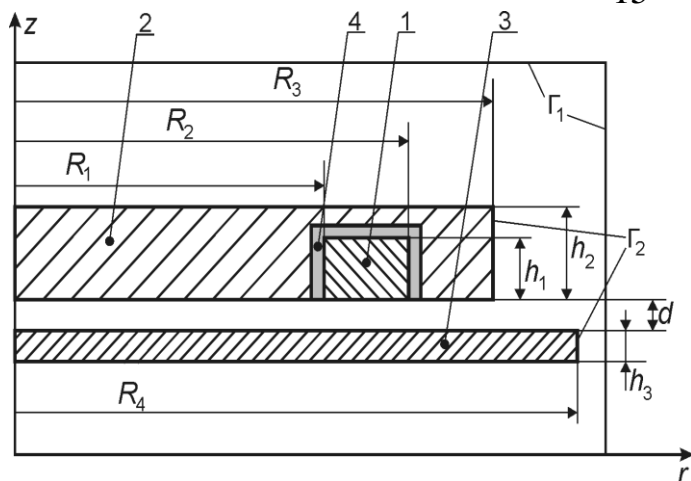


Рисунок 4 – Розрахункова схема індуктора разом із заготовкою: 1 – струмопровід; 2 – допоміжний екран; 3 – заготовка; 4 – ізоляція струмопроводу

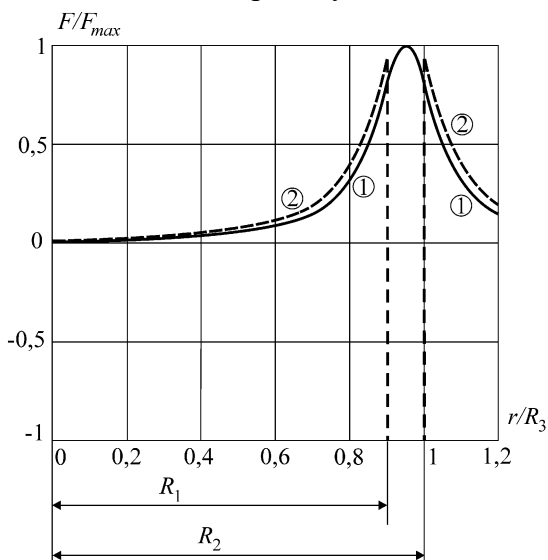


Рисунок 6 – Порівняння розподілу модуля електромагнітної сили уздовж поверхні заготовки: 1 – чисельний розв'язок, 2 – аналітичний розв'язок

Розрахунковий аналіз ЕМП у даному випадку проводився у плоскопаралельній постановці, аналіз НДС – у рамках задачі плоскої деформації. Проведені порівняння деяких компонент ЕМП, визначених розрахунковим шляхом, із відомими результатами експериментальних досліджень. Максимальна різниця для дотичних компонент напруженості магнітного поля не перевищує 8%.

Знайдені розподіли компонентів ЕМП дозволили провести подальший аналіз деформування елементів системи. Досліджено вплив конструкційних та експлуатаційних параметрів технологічної системи на ефективність технологічної операції. Визначено, що за розглянутих конструкційних параметрах індуктор залишається працездатним до амплітуди сили струму 30 кА (струмопровід – мідь, $\sigma_T = 380$ МПа, ізоляція – капролон, $\sigma_B^+ = 70$ МПа), при цьому у заготовці (АМГ-6, $\sigma_T = 190$ МПа) виникають зони пластичних деформацій. При подальшому збільшенні сили струму можливе руйнування ізоляції. Оскільки матеріал ізоляції має різні граничні значення при розтягу та стиску, для оцінювання ви-

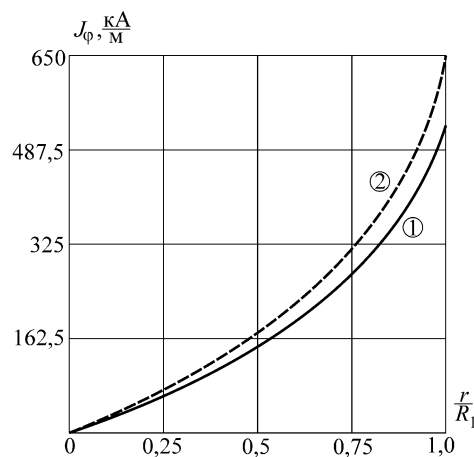


Рисунок 5 – Розподіл окружної компоненти густини вихрового струму уздовж поверхні заготовки: 1 – чисельний розв'язок, 2 – аналітичний розв'язок

Також із використанням створеного у даній роботі методу проведено аналіз ЕМП та НДС технологічних систем та тонкостінних вигнутих заготовок за умов технологічної операції «заповнення кутів». Розглянуто декілька варіантів розрахункових схем, з'ясовано, що для досягнення мети технологічної операції необхідно застосовувати діелектричну матрицю, на яку вільно спирається заготовка (приклад розрахункової схеми – рис. 7).

користувалось еквівалентне напруження згідно до критерію Кулона-Мора

$$\sigma_{Mo} = \sigma_1 - \frac{\sigma_B^+}{\sigma_B^-} \sigma_3, \text{ де } \sigma_1, \sigma_3 - \text{ головні напруження, } \sigma_B^+, \sigma_B^- - \text{ межі на розтяг та}$$

стиск. Також розрахунковим шляхом визначено, що радіус скругління заготовки не повинен перевищувати більш ніж на 20% радіус витка струмопроводу.

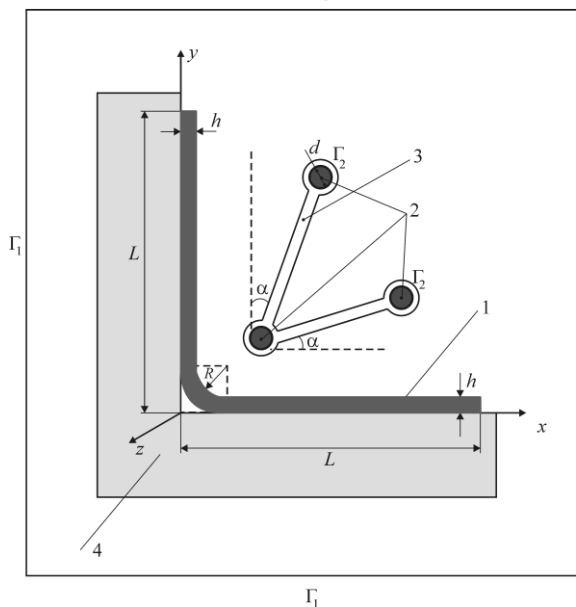


Рисунок 7 – Розрахункова схема вигнутої заготовки разом із двовитковим індуктором та діелектричною матрицею: 1 – заготовка; 2 – витки струмопроводу індуктора; 3 – ізоляція індуктора; 4 – діелектрична матриця

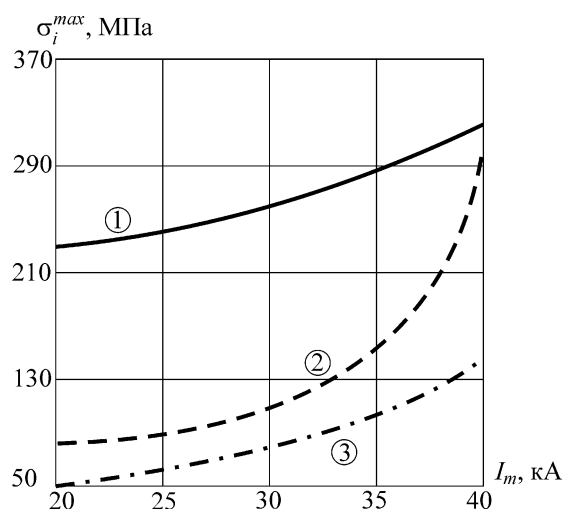


Рисунок 8 – Залежність еквівалентних напружень від величини амплітуди сили струму: 1 – у заготовці (інтенсивність напружень); 2 – у витку індуктора (інтенсивність напружень); 3 – у ізоляції (еквівалентне напруження за критерієм Мора)

Відзначимо, що для усіх розглянутих систем досліджувався вплив розмірів розрахункової області на збіжність результатів стосовно компонент ЕМП. Виявилось, що розміри розрахункової області повинні бути співставними із максимальним характерним розміром технологічної системи. Також точність розв'язків відстежувалась при зміні кількості скінченних елементів розрахункової моделі.

Четвертий розділ присвячено комплексному дослідженню розподілу ЕМП та пружно-пластичного деформування технологічних приладів, призначених для виправлення дефектів (вм'ятин) на тонких плоских заготовках. Розрахункові схеми містили індуктор (джерело ЕМП) та заготовку. Визначення компонентів НДС індукторів та заготовок проводилось у квазістаціонарному наближенні для максимальних значень компонент ЕМП у часовому проміжку. Критерієм ефективності технологічної операції є поява зон пластичності у заготовці. Критерієм працездатності індуктора є його пружне деформування та цілісність ізоляції.

Розглянуто деформування одновиткового індуктора із кінчною робочою зоною, при цьому розрахунки проводились для двох варіантів схем. Перший варіант відповідав розрахунковій схемі, наведеній на рис. 2. Виявилось, що у даному випадку виникнення зон пластичності у заготовці (сталь, $\sigma_T = 300$ МПа) супроводжується виникненням зони пластичності у індукторі (мідь, $\sigma_T = 200$

МПа), тобто індуктор стає не працездатним. Також зрозуміло, що індуктор не може використовуватись без ізоляції, яка може виконувати функції бандажу.

Тому було розглянуто наступну розрахункову схему (рис. 9), яка містила діелектричний бандаж (капролон, $\sigma_B^+ = 70$ МПа). Геометричні параметри системи: $R_1 = 0,0075$ м, $R_2 = 0,02$ м, $H = 0,01$ м, $h = 0,0005$ м; зовнішній діаметр бандажа – 130 мм; товщина бандажа – 45 мм; максимальна глибина вм'ятини – 10 мм.

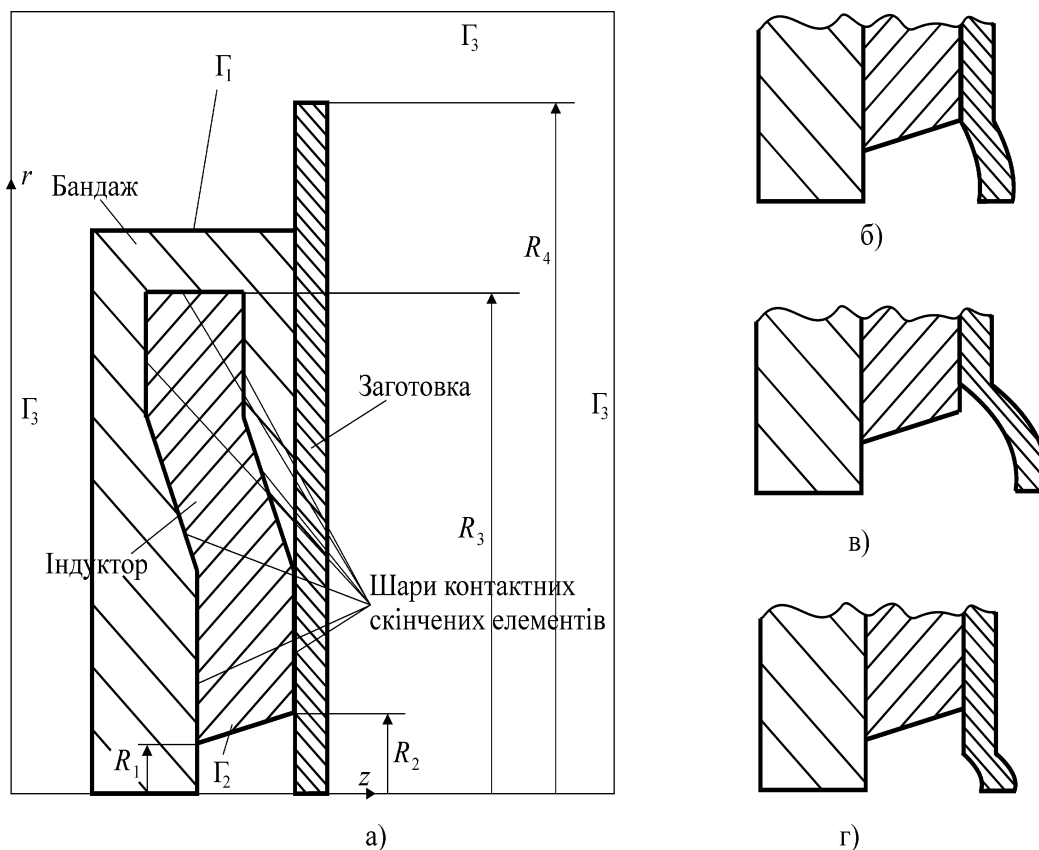


Рисунок 9 – Розрахункова схема індуктора разом із діелектричним бандажем та заготовки із різними варіантами вм'ятини

Поміж складовими частинами розрахункової схеми для адекватного моделювання умов контактної взаємодії вводились шари контактних скінчених елементів (КСЕ). Шар КСЕ уздовж границі розділу Γ_4 повинен враховувати попередній натяг, також на усіх контактних границях враховувались ефекти тертя із коефіцієнтом тертя: у парах «індуктор – бандаж» та «заготовка – бандаж» – 0,2; «індуктор – заготовка» – 0,1. Було проведено серію розрахунків, у яких варіювались конструкційні та експлуатаційні параметри системи, окремі результати наведені на рис. 10–13.

Встановлено, що наявність бандажу знижує навантаженість індуктора, що дозволяє збільшувати експлуатаційні характеристики технологічного процесу без втрати працездатності індуктора, наприклад натяг 0,04 мм дозволяє підвищувати величину сили струму у 2 рази до номінальної величини (з 40 кА до 80 кА).

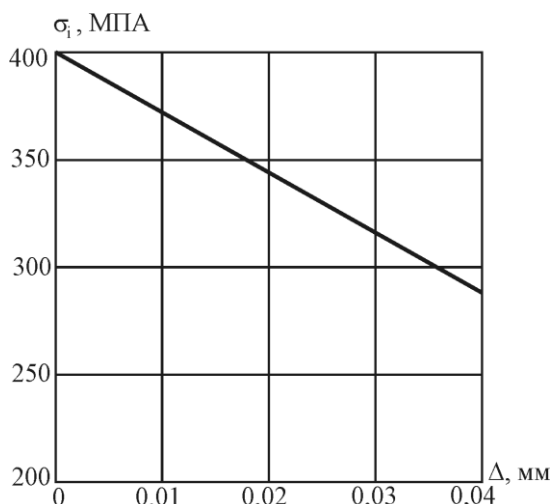


Рисунок 10 – Залежність максимальної інтенсивності напружень у індукторі від величини натягу

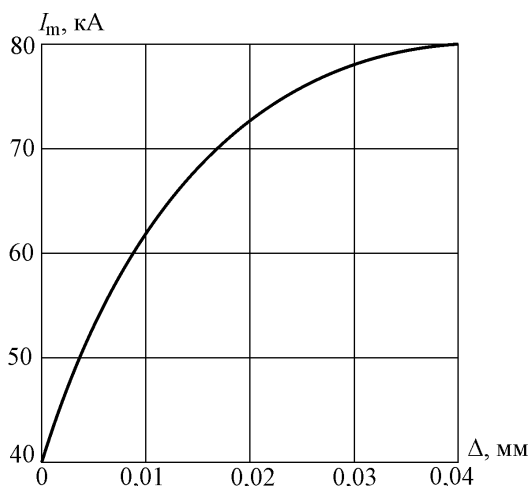


Рисунок 11 – Залежність максимальних амплітуд сили струму, за яких індуктор залишається працездатним, від величини натягу

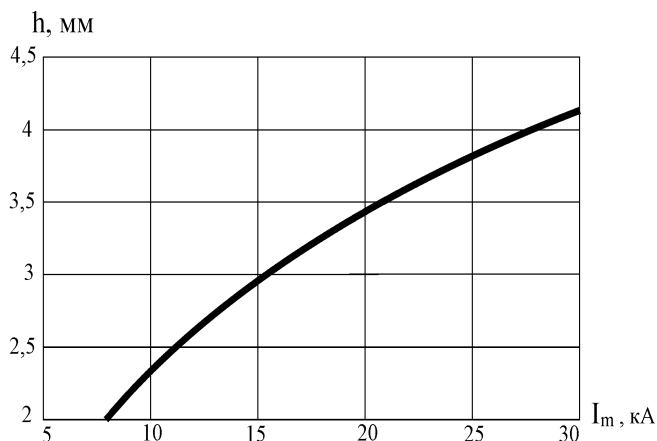


Рисунок 12 – Графік, що ілюструє за яких величин амплітуди сили струму у заготовці різної товщини досягається межа текучості

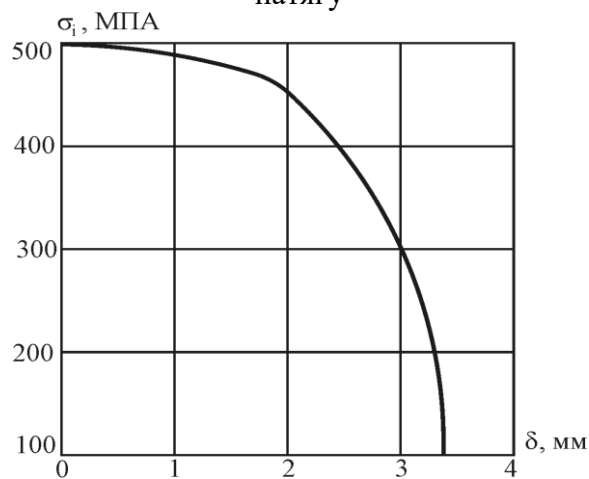


Рисунок 13 – Залежність максимальної інтенсивності напружень у заготовці від глибини вм'ятини

Також у розділі проведено дослідження пружно-пластичного деформування заготовки та складеного багатовиткового індуктора із урахуванням контактної взаємодії, розрахункова схема наведена на рис. 14.

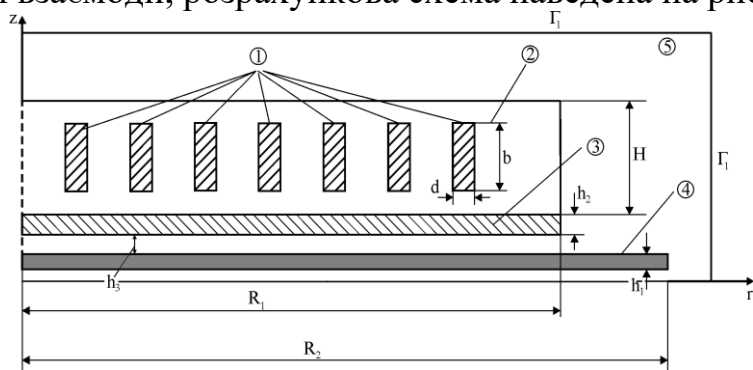


Рисунок 14 – Складений багатовитковий індуктор із допоміжним екраном та заготовка: 1 – струмопровід; 2 – допоміжний екран; 3 – діелектричний бандаж; 4 – заготовка; 5 - повітря

Розміри елементів системи: $R_1 = 70$ мм, $R_2 = 100$ мм, $H = 22$ мм, $h_1 = 1$ мм, $h_2 = 2$ мм, $h_3 = 1$ мм, $d = 1$ мм, радіальна відстань між витків струмопроводу – 2 мм, кількість витків струмопроводу – 11.

Аналіз просторово-часового розподілу характеристик ЕМП дозволив

встановити, що упродовж імпульсу максимум електромагнітної сили «зміщується» уздовж поверхні заготовки – рис. 15. Тобто індуктор даного типу може використовуватись для виправлення дефектів, розташованих будь-де відносно його центру.

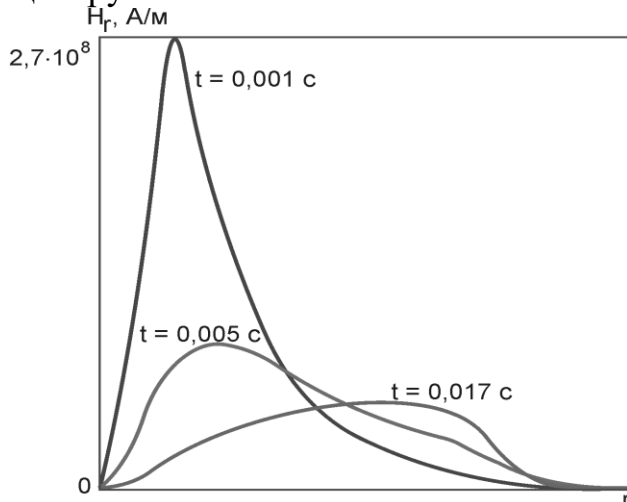


Рисунок 15 – Розподіл дотичної компоненти напруженості магнітного поля по поверхні заготовки у різні моменти часу

Подальший аналіз НДС індуктора та заготовки дозволив визначити граничні значення експлуатаційних та конструкційних параметрів, за яких індуктор залишається цілісним та працездатним.

Було проведено серію розрахунків, у яких варіювалась величина амплітуди сили струму індуктора та величини натягу поміж екраном та бандажем. Визначено, що при натягу 0,3 мм ні за яких

розглянутих умов екран не відходить від бандажу; при натягу 0,2 мм лише при амплітуді 55 кА спостерігається відхід екрану у межах області, розміри якої складають приблизно 18,8% величини радіусу допоміжного екрану; у разі натягу 0,1 мм область відходу збільшується з 25% (при 40 кА) до 33,5% (при 55 кА). 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. Індуктор, який має розглянуті розміри залишається працездатним у діапазоні амплітуд сили струму від 40 кА до 55 кА.

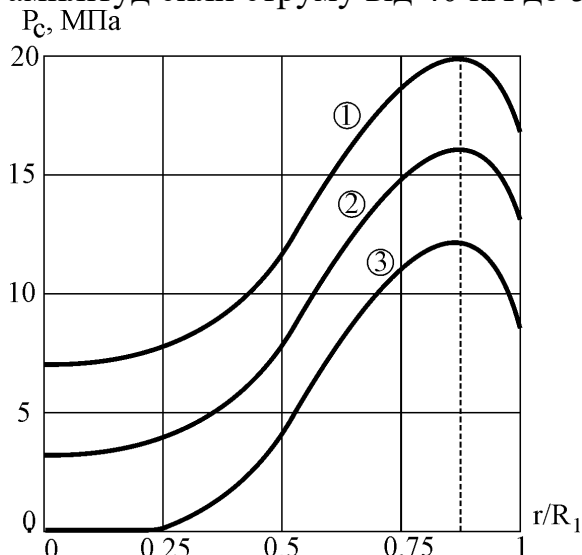


Рисунок 16 – Розподіл контактної тиску поміж допоміжним екраном та бандажем при різних значення величини натягу: 1 – 0,3 мм; 2 – 0,2 мм; 3 – 0,1 мм

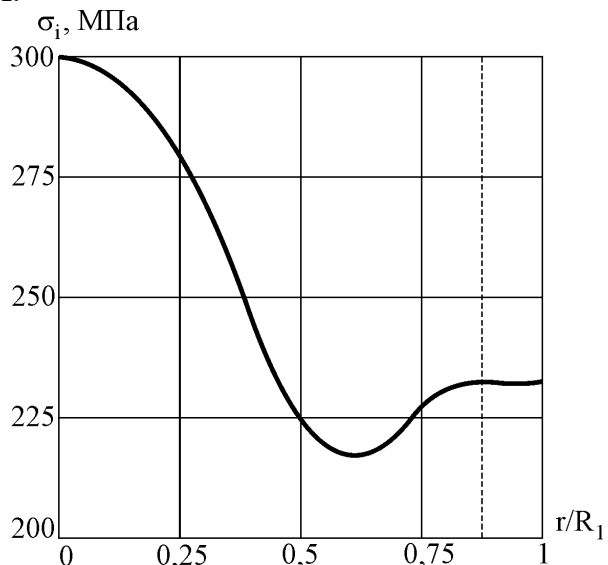


Рисунок 17 – Розподіл інтенсивності напружень уздовж поверхні екрану при величині натягу поміж екраном та бандажем 0,3 мм

Далі було розглянуто уточнену розрахункову схему (рис. 18), яка містила заготовку із вм'ятиною, розташованою відповідно до максимумів (рис. 15).

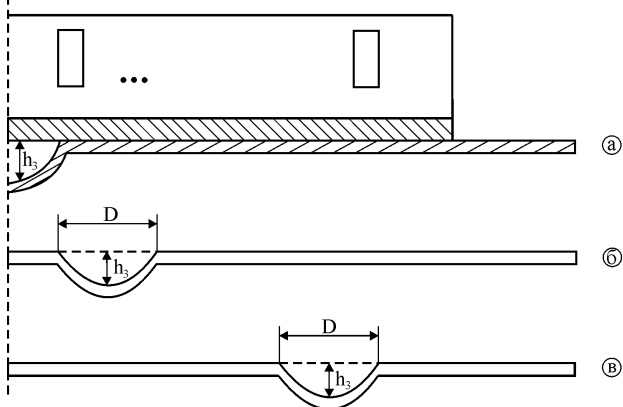


Рисунок 18 – Уточнена розрахункова схема

Розподіл інтенсивності напружень, наведений на рис. 19 свідчить, що найбільш навантаженою є дійсно зона вм'ятини на заготовці, тобто саме тут слід очікувати появу деформацій пластичності (цей ефект спостерігається при усіх варіантах розташування вм'ятини). Аналіз результатів проведених серій розрахунків дозволив визначити раціональні конструкційні та експлуатаційні характеристики системи.

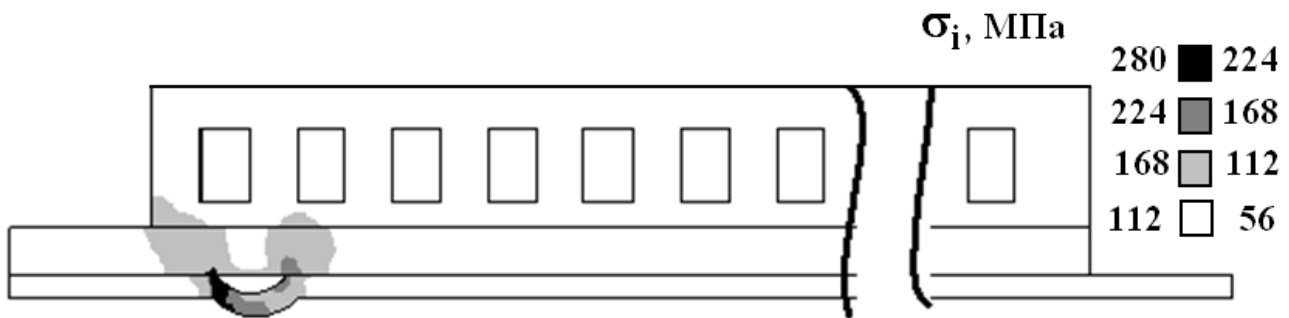


Рисунок 19 – Розподіл інтенсивності напружень у системі

Виявилось, що у випадку, коли вм'ятина розташована безпосередньо під зоною «максимуму ЕМП», то максимальна глибина, за якої будуть виникати пластичні деформації складає: 15 мм (1-й варіант розташування вм'ятини, момент часу 0,001 с); 14,9 мм (2-й варіант, 0,005 с); 13,3 мм (3-й варіант, 0,017 с). Для випадків, коли вм'ятина розташована на найбільшій відстані від «максимуму ЕМП» результати наступні: 12,9 мм (3-й варіант, 0,001 с); 12,7 (2-й варіант, 0,005 с); 12,5 (1-й варіант, 0,017 с).

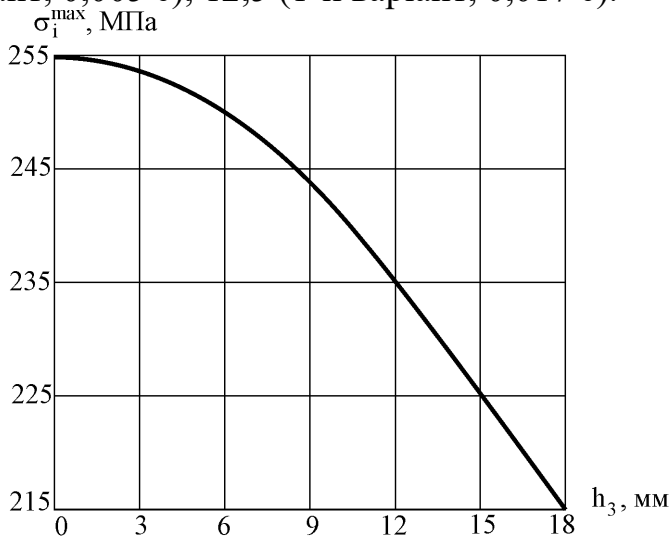


Рисунок 20 – Залежність максимальної інтенсивності напружень у заготовці від глибини вм'ятини

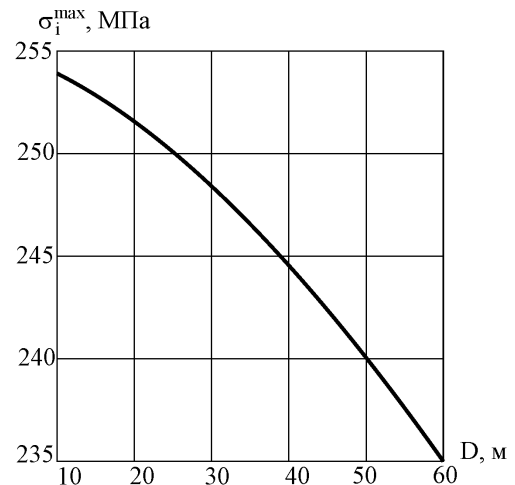


Рисунок 21 – Залежність максимальної інтенсивності напружень у заготовці від діаметру вм'ятини при максимальній глибині 3 мм

Таким чином, спираючись на результати розрахунків (рис. 20 та 21) і на зроблені на їх основі оцінки, можна стверджувати, що багатовиткові індуктори із допоміжними екранами, конструкційні та експлуатаційні характеристики яких ідентичні розглянутим, можна використовувати для пластичного деформування тонких заготовок із вм'ятинами, які можуть розташовуватись будь-де в межах робочої області. Якщо вм'ятина розташована безпосередньо у зоні виникнення максимальних за величиною значень компонент ЕМП, то за допомогою індукторів даного типу є можливість викликати пластичні деформації в околі вм'ятини при її глибині до 15 мм. Якщо не має змоги точно розташовувати вм'ятину у зоні дії «максимуму ЕМП», то у цьому випадку є можливість викликати пластичні деформації в околі вм'ятини при її глибині до 12,5 мм включно, при цьому індуктор залишається працездатним.

У п'ятому розділі проведено аналіз деформування складених матриць прес-форм з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів (ВВКМ) (межа міцності на розтяг 100 МПа, на стиск – 110 МПа), призначених для пресування нагрітих порошків тугоплавких сполук. На рис. 22 та 23 наведено розрахункові схеми пристроїв для пресування порожнистих та суцільних виробів з порошкових матеріалів (ПМ).

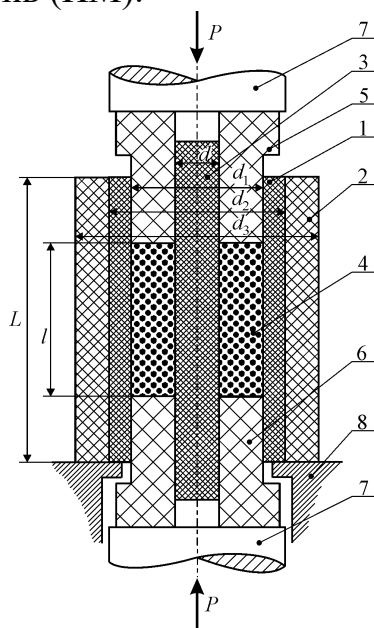


Рисунок 22 – Пристрій для пресування порожнистих виробів з порошків:

- 1 – вкладиш; 2 – матриця; 3 – центральний стержень; 4 – брикет з порошку; 5, 6 – пуансони; 7 – поршні преса; 8 – несуча рама

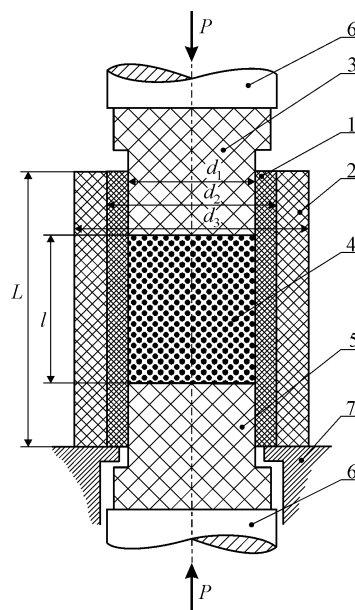


Рисунок 23 – Пристрій для пресування суцільних виробів з порошків:

- 1 – вкладиш; 2 – матриця; 3 – центральний стержень; 4 – брикет з порошку; 5, 6 – пуансони; 7 – поршні преса; 8 – несуча рама

Прес-форма має такі розміри: $d_1 = 340$ мм, $d_3 = 440$ мм, $L = 380$ мм. Вироби можуть мати різну висоту (l), яка задається відносно висоти прес-форми (L). Розглядаються наступні варіанти: $l/L = 0,250; 0,315; 0,395; 0,470; 0,550$. Очевидно, що навантаженість вкладиша і матриці залежить від співвідношення їх товстінностей, які можна визначити відношенням зовнішнього діаметра вкладиша (d_2) до зовнішнього діаметра матриці (d_3) при фіксованому діаметрі пресованого виробу (d_1). Розглядаються наступні варіанти: $d_2/d_3 = 0,723; 0,787;$

0,850. При аналізі деформування прес-форм для виготовлення порожнистих виробів варіювався діаметр центрального стержня (d) в залежності від висоти прес-форми (L): $d/L = 0,15; 0,2; 0,25$.

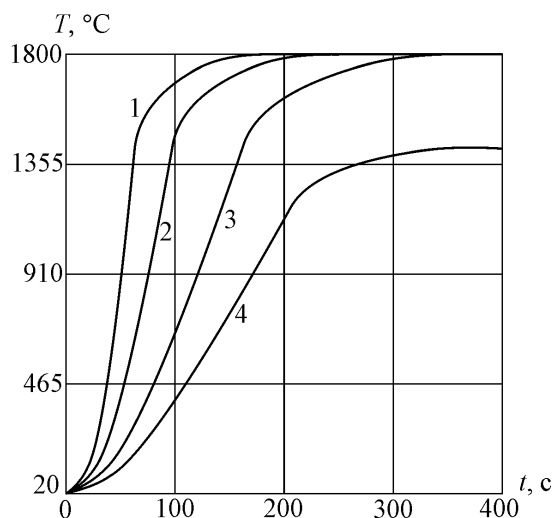


Рисунок 24 – Залежність від часу температури в різних точках прес-форми: 1 – внутрішня межа вкладиша; 2 – внутрішня межа матриці; 3 – зовнішня межа матриці ($z = L/2$); 4 – зовнішня межа матриці ($z = L$)

справедливі для обох типів прес-форм. Найбільш навантаженими є елементи прес-форм, які безпосередньо контактують із заготовкою, а також область матриці, що контактує із вкладишем. Найбільші значення еквівалентних напружень (за критерієм Мора) σ_{Mo} спостерігаються в околі верхнього торця матриці – характерна картина розподілу наведена на рис. 25. При розглянутій величині зовнішнього тиску (30 МПа) максимальні значення σ_{Mo} у елементах прес-форми, що виконані з ВВКМ (пуансони та матриця), дорівнюють приблизно 77 МПа у центральній зоні та приблизно 100 МПа в околі верхнього торця матриці. Таким чином, за розглянутих умов навантаження та конструкційних параметрах максимальні еквівалентні напруження σ_{Mo} не перебільшують межі міцності на розтяг для ВВКМ, і можна стверджувати, що пуансони та зовнішня матриця залишаються працездатними.

На рис. 26 наведено графіки розподілу еквівалентних напружень σ_{Mo} уздовж внутрішньої поверхні матриці. Якісний розподіл в обох випадках є ідентичним. Кількісно спостерігаються деякі відмінності, проте вони не перевищують 3%.

Була проведена серія розрахунків з метою з'ясування впливу висоти виробу на напружений стан матриці. На рис. 27 представлені графіки, які ілюструють розподіл σ_{Mo} вздовж внутрішньої поверхні матриці для двох випадків: $l/L = 0,250$ та $l/L = 0,550$. Як видно, при пресуванні виробу більшої висоти мають місце більші приблизно на 20% значення σ_{Mo} . При зменшенні висоти пресованого виробу, σ_{Mo} знижуються в середньому на 4% при кожному наступному розмірі максимальні напруження.

На першому етапі проведене розв'язання задач теплопровідності у нестационарній та стаціонарній постановках. Виявилось, що за приблизно 400 с (рис. 24) усі елементи прес-форми набувають сталих значень температури. Подальший аналіз термопружного деформування показав, що прес-форма є найбільш навантаженою при сталому розподілі температури, для якого проводились усі подальші розрахунки.

Дослідження НДС дозволяють сформулювати загальні закономірності деформування прес-форм, які справедливі при різних співвідношеннях геометричних розмірів елементів і також

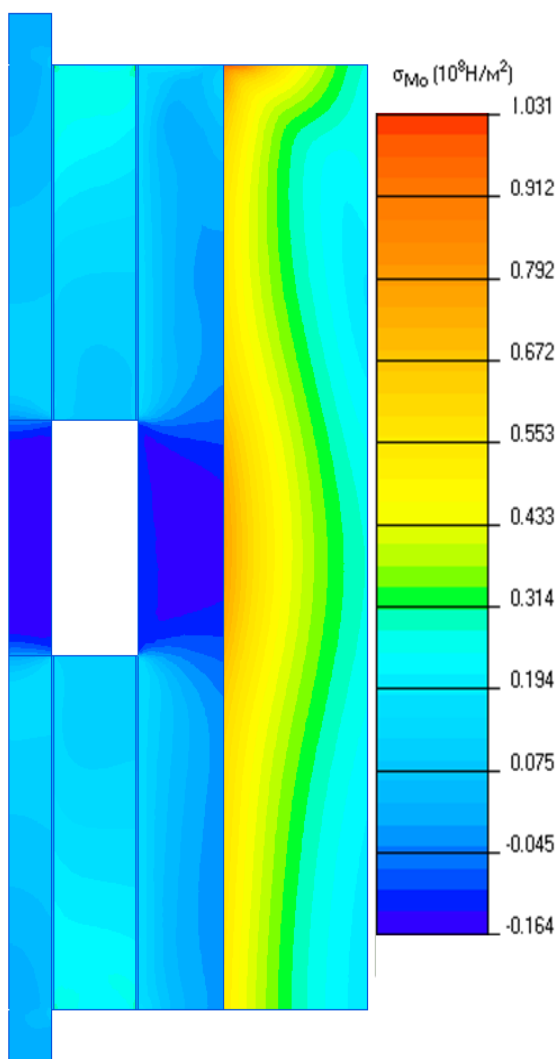


Рисунок 25 – Розподіл еквівалентних напружень за теорією Кулона-Мора (пресування порожнистих виробів)

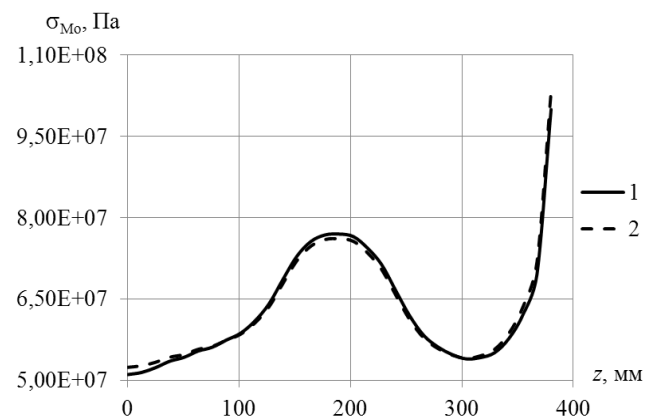


Рисунок 26 – Розподіл еквівалентних напружень згідно критерію Кулона-Мора вздовж внутрішньої поверхні матриці: 1 – пресування суцільних виробів, 2 – пресування порожнистих виробів; ($l/L = 0,250$)

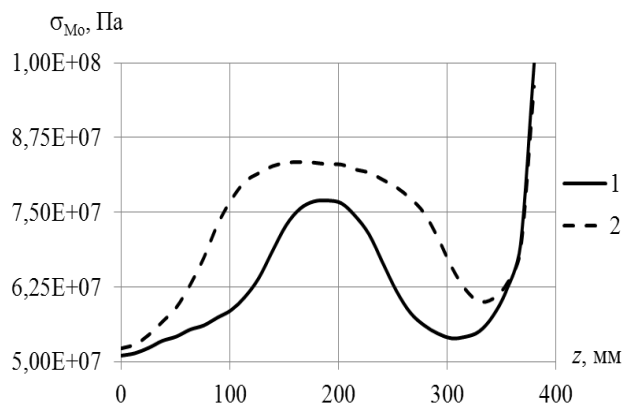


Рисунок 27 – Розподіл еквівалентних напружень згідно критерію Кулона-Мора вздовж внутрішньої поверхні матриці при різних розмірах пресованого виробу: 1 – $l/L = 0,250$; 2 – $l/L = 0,550$

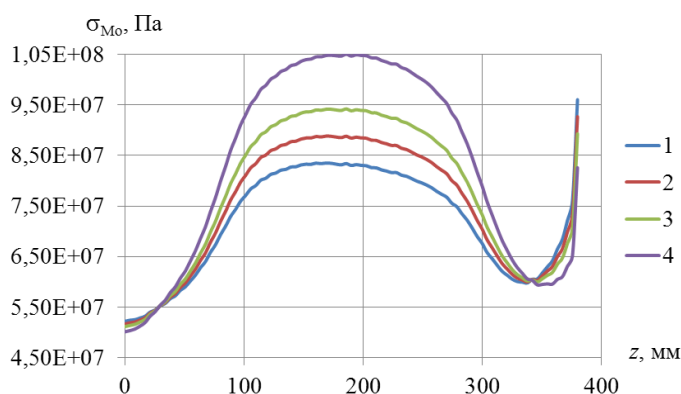


Рисунок 28 – Розподіл еквівалентних напружень за критерієм Мора вздовж внутрішньої поверхні матриці при різних величинах тиску пресування

Для випадку пресування заготовки найбільшої висоти із «тонким вкладишем» було проведено серію розрахунків, у яких варіювалась величина тиску пресування. Розглядались значення тиску: 30 МПа, 35 МПа, 40 МПа, 60 МПа. На рис. 28 наведені розподіли σ_{Mo} уздовж внутрішньої поверхні матриці при різних величинах тиску пресування.

Спільним для усіх розглянутих випадків є те, що при збільшенні тиску σ_{Mo} у центральній зоні матриці зростає, а значення σ_{Mo} в околі торцю залишається сталим. При 60 МПа максимальне значення σ_{Mo} у матриці (приблизно 105

МПа) перевищує межу міцності на розтяг для ВВКМ (100 МПа), можна очікувати руйнування матриці і, відповідно, втрату працездатності прес-форми в цілому.

З метою можливого підвищення значень тиску пресування запропоновано перспективну схему, яка поєднує процес традиційного пресування і електромагнітного пресування. Розрахункова схема системи представлена на рис. 29. На першому етапі було визначено просторово-часовий розподіл ЕМП розрахунків було проведено комплексний аналіз деформування системи «складена прес-форма – індуктор – заготовка». На рис. 30 наведено просторовий розподіл σ_{Mo} . Кількісний аналіз свідчить, що матриця стає навантаженою у значно меншому ступені. Рівні σ_{Mo} в матриці знижуються в порівнянні з ізостатичним пресуванням приблизно у 1,84 рази у центральній зоні та приблизно у 1,2 разу в околі верхнього торцю (рис. 33). Слід відзначити, що найбільші значення σ_{Mo} спостерігаються у витках індуктора, де вони досягають приблизно 120 МПа. Мідь є матеріалом, який однаково деформується при розтягу та при стиску, отже еквівалентні напруження σ_{Mo} фактично є значенням максимального дотичного напруження, яке також може використовуватись для оцінок початку текучості. При розглянутих конструкційних та експлуатаційних параметрах струмопровід деформується пружно.

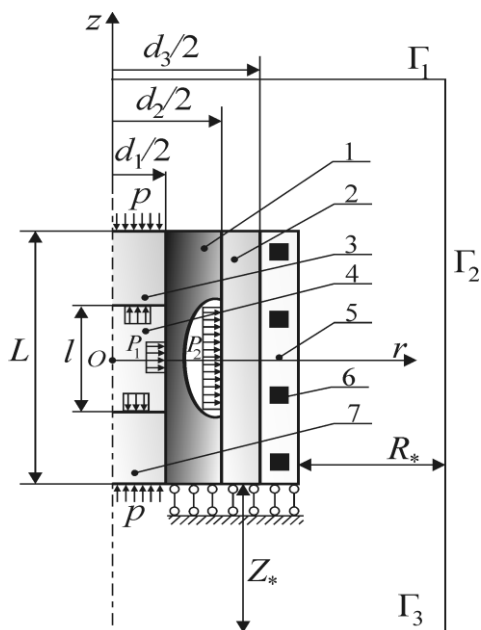


Рисунок 29 – Розрахункова схема пристрою з індуктором для пресування порожнистих виробів з порошків: 1 – вкладиш; 2 – матриця; 3,7 – пуансоны; 4 – брикет з порошку; 5 – ізоляція індуктора; 6 – струмопровід

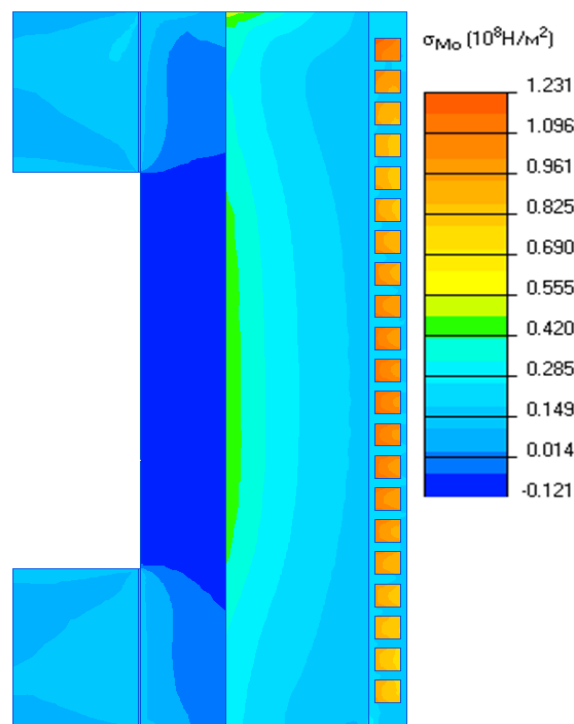


Рисунок 30 – Розподіл еквівалентних напружень згідно до критерію Кулона-Мора

Для складання кількісних оцінок впливу величини сили струму на навантаженість матриці була проведена серія розрахунків, в яких варіювалося значення амплітуди сили струму, що діє в індукторі. Оцінювались значення напружень, що виникають у центральній частині внутрішньої поверхні матриці.

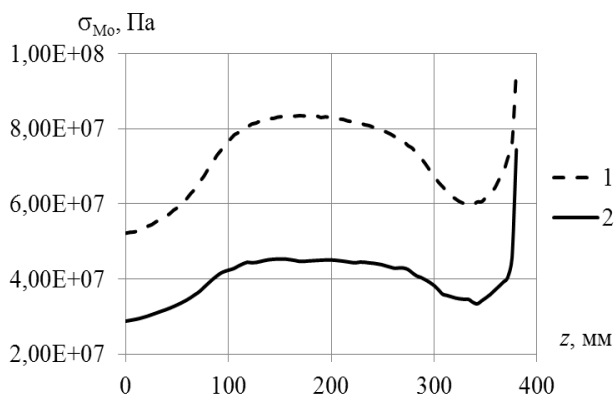


Рисунок 31 – Порівняння σ_{Mo} , розподілених уздовж внутрішньої поверхні матриці; 1 – ізостатичне пресування, 2 – сумісне пресування

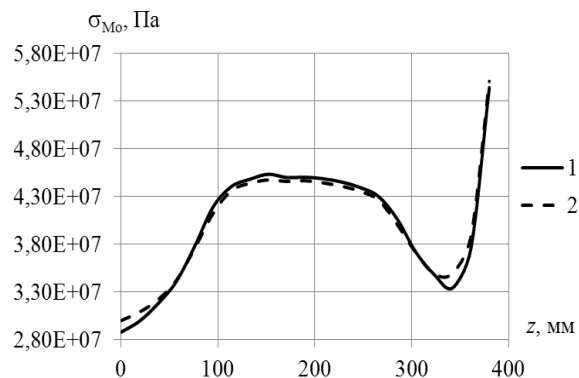


Рисунок 32 – Розподіл σ_{Mo} при сумісному пресуванні згідно критерію вздовж внутрішньої поверхні матриці; 1 – пресування суцільних виробів, 2 – пресування порожнистих виробів

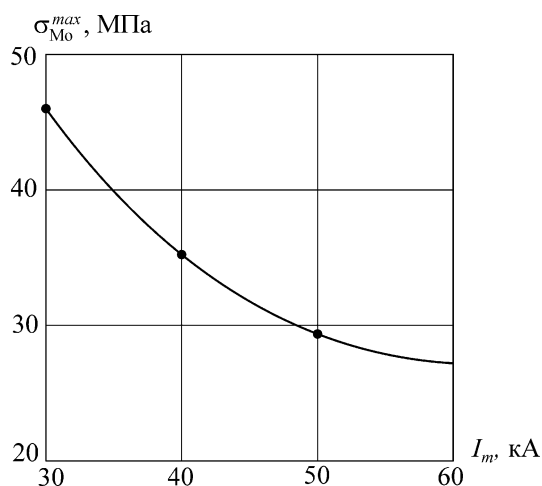


Рисунок 33 – Залежність максимальних σ_{Mo} в матриці від амплітуди сили струму

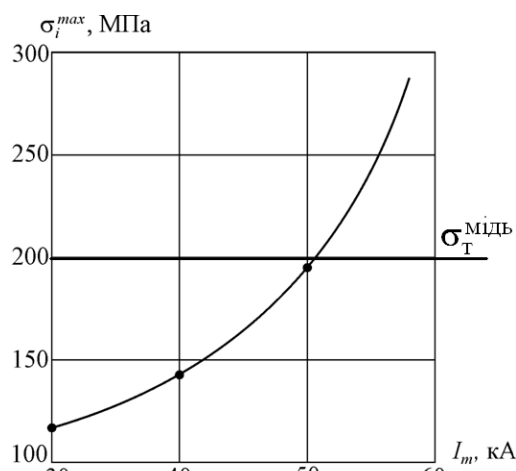


Рисунок 34 – Залежність максимальної інтенсивності напружень в струмопроводі від амплітуди сили струму

Виявилось, що при збільшенні амплітуди відбувається значне зниження максимальних значень σ_{Mo} в матриці (рис. 33). Так, при збільшенні сили струму з 30 до 40 кА, максимальне значення σ_{Mo} в матриці знижується приблизно на 29%, така ж тенденція зберігається і при подальшому збільшенні сили струму. Однак, збільшення сили струму призводить також до збільшення електромагнітних сил, що діють на струмопровід індуктора (рис. 34). З'ясовано, що при збільшенні амплітуди сили струму з 30 до 40 кА максимальна інтенсивність напружень зростає приблизно на 30%. При перевищенні силою струму величини 50 кА інтенсивність напружень перевищує межу текучості міді і в матеріалі струмопроводу з'являються зони пластичних деформацій.

У додатках наведено список публікацій за темою дисертаційної роботи та акти впровадження наукових розробок та практичних результатів досліджень у НДР з держбюджетної тематики кафедр теоретичної механіки та динаміки та міцності машин НТУ «ХП» – 3 акти (2011 р., 2014 р. та 2016 р.), у НДР за державною програмою у ННЦ «ХФТІ» – 1 акт (2017 р.), а також у пошукові науко-

во-дослідницькі роботи та навчальний процес кафедри автомобільної електроніки ХНАДУ – 1 акт (2018 р.).

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему, яка стосується створення розрахункових методів оцінювання дії електромагнітних полів (ЕМП) на пружно-пластичне деформування обладнання технологічних приладів на основі аналізу розподілу кількісних характеристик ЕМП, теплового поля та пружно-пластичного деформування.

Одержані наукові та практичні результати дозволяють сформулювати наступні узагальнюючі висновки:

1. Проведений аналіз сучасного стану питань щодо розрахунків електромагнітного та теплового поля і пружно-пластичного деформування приладів та заготовок при магнітно-імпульсній обробці матеріалів (МІОМ) дозволив встановити, що проблема розрахункового оцінювання дії ЕМП на пружно-пластичне деформування є актуальною і потребує подальшого розвитку шляхом створення відповідних методів кількісного аналізу.

2. Зроблено обґрунтовану загальну постановку проблеми створення розрахункового методу оцінювання дії ЕМП на деформування систем електропровідних тіл. Розглянуті визначальні співвідношення для кількісного опису електромагнітних процесів, теплопровідності та деформування на основі співвідношень термодинаміки незворотних процесів, макроскопічної механіки деформування твердих тіл та електродинаміки. Обґрунтовано модель взаємодії, яка передбачає, що вплив ЕМП на процес деформування та розповсюдження теплового поля здійснюється за рахунок розподілених електромагнітних сил та джерел тепловиділення. Сформульовано повну систему диференціальних рівнянь початково-крайової задачі пружно-пластичного деформування систем електропровідних тіл при дії ЕМП та наявності теплового поля. Надано варіаційні постановки задачі: для випадку пружного деформування та квазістаціонарного ЕМП – на базі принципу стаціонарності повної енергії системи, для випадку нестаціонарного електромагнітного поля, нестаціонарного теплового поля та пружно-пластичного деформування наведено варіаційну постановку, яка призводить до розв'язку з умови стаціонарності відповідних функціоналів відносно шуканих функцій

3. Наведено скінченноелементне формулювання ефективного методу розрахункового аналізу з метою оцінювання впливу ЕМП на пружно-пластичне деформування. Розглянуто застосування створеного розрахункового методу до низки модельних задач, у яких було відшукано розподілення кількісних характеристик ЕМП, температури та напружено-деформованого стану (НДС). Порівняння окремих результатів чисельного розв'язання із результатами аналітичних розв'язків дозволило зробити висновок про доцільність застосування запропонованого розрахункового методу для систем електропровідних тіл із метою оцінювання впливу ЕМП на процес деформування.

4. Розроблено загальний підхід до визначення характеристик ЕМП і НДС у приладах технологічних операцій МІОМ, який спирається на розрахунковий метод аналізу, запропонований у даній роботі. Створено уточнені розрахункові схеми (які містили індуктор та заготовку) та проведено розрахунки з визначення просторово-часових розподілів кількісних характеристик ЕМП у системі «індуктор – заготовка» для випадків одновиткового індуктора із конічною робочою зоною, одновиткового складеного індуктора із допоміжним екраном та системи, призначеної для деформування кутів вигнутих тонких заготовок. Порівняння чисельних результатів для окремих випадків із результатами експериментальних досліджень та аналітичних розрахунків інших авторів показали переваги запропонованого методу. Так для одновиткового індуктора із конічною робочою зоною найбільше відхилення у розподілах напруженості магнітного поля не перевищує 18%. Для складеного одновиткового індуктора із допоміжним екраном проведено співставлення відомими аналітичними розв'язками для окружної компоненти густини сили струму, який виникає на поверхні заготовки, максимальна розбіжність не перебільшує 16%.

Було проведено низку розрахунків, у яких варіювались конструкційні параметри індукторів, з метою визначення їх раціональних значень, за яких на заготовку діють найбільші за величиною електромагнітні сили. Проведені розрахункові дослідження розподілу компонент НДС у індукторі та заготовці. Встановлено, що розглянута технологічна система із одновитковим індуктором не задовольняє умовам технологічної операції. При варіюванні сили струму у індукторі встановлено, що у заготовці з'являються зони пластичних деформацій, проте і індуктор стає навантаженим настільки, що може втратити працездатність.

Проведені розрахунки просторово-часових розподілів кількісних характеристик ЕМП при деформуванні тонкостінних вигнутих заготовок за умов магнітно-імпульсного «заповнення кутів». Проведене порівняння із відомими експериментальними результатами, які показали, що максимальна розбіжність результатів (стосовно напруженості магнітного поля) не перевищує 8%, та спостерігається у зонах, що знаходяться навпроти струмопроводів індуктора. Дослідження деформування заготовки надали змогу рекомендувати використовувати у подібних технологічних операціях матрицю, на яку вільно спирається заготовка. Визначено, що технологічні операції МІОМ з метою «заповнення кутів» при розглянутих умовах будуть ефективними у тому випадку, коли радіус витка струмопроводу індуктора буде не меншим 20% від радіусу скругління заготовки. Також визначено, що за розглянутих конструкційних параметрах індуктор залишається працездатним до амплітуди сили струму 30 кА, при цьому максимальне значення інтенсивності напружень у заготовці становить 227 МПа, що є більшим за межу текучості сплаву АМГ-6, таким чином можна стверджувати, що технологічна операція є ефективною.

5. Створені нові фізико-математичні моделі та розрахункові схеми технологічних операцій МІОМ, спрямованих на виправлення дефектів на тонких заготовках (одновитковий індуктор із бандажем та складений багатовитковий індуктор із допоміжним екраном, які розглядалися разом із заготовками).

Проведено розрахункове визначення розподілу кількісних характеристик ЕМП та НДС індукторів і заготовок. Зроблені оцінки впливу ЕМП на процеси деформування, які дозволили сформулювати конкретні рекомендації стосовно експлуатаційних та конструкційних параметрів технологічних операцій.

На базі проведених досліджень для одновиткового індуктора із кінечною робочою зоною встановлено:

- без бандажу у індукторі спостерігаються зони виникнення деформацій пластичності із перебільшенням амплітудою сили струму номінального значення (40 кА);

- наявність бандажу, який використовується із натягом, дозволяє підіймати амплітуду сили струму майже у 2 рази (до 80 кА) порівняно із номінальним значенням, при цьому індуктор і бандаж деформується пружно, у заготовці виникають зони деформацій пластичності.

Дослідження розподілу ЕМП у випадку багатовиткового індуктора із допоміжним екраном, дозволили визначити, що у рамках одного імпульсу електромагнітна сила «зміщується» уздовж поверхні заготовки від центру індуктора, визначено, що індуктор даного типу є ефективним не залежно від того, де розташована вм'ятинна на заготовці у межах його діаметру. Проведено серію розрахунків, у яких варіювались величини амплітуди сили струму, натягу поміж екраном та ізоляцією індуктора, товщина заготовки, розміри та розташування вм'ятини. Зроблені оцінки дозволили сформулювати наступне:

- стосовно цілісності індуктору: при натягу 0,3 мм ні за яких розглянутих умов екран не відходить від бандажу; при натягу 0,2 мм лише при амплітуді 55 кА спостерігається відхід екрану у межах області, розміри якої складають приблизно 18,8% величини радіусу допоміжного екрану; у разі натягу 0,1 мм область відходу збільшується з 25% (при 40 кА) до 33,5% (при 55 кА), отже, цілісність індуктора буде забезпечена у разі величини натягу поміж екраном та бандажем більший за 0,1 мм;

- індуктор, який має розглянуті розміри залишається працездатним у діапазоні амплітуд сили струму від 40 кА до 55 кА;

- за розглянутих конструкційних та експлуатаційних параметрах багатовитковий індуктор із допоміжним екраном може ефективно застосовуватись для виправлення вм'ятин (глибиною до 12,5 мм) на тонкостінних заготовках, товщиною до 4 мм.

6. Створені нові фізико-математичні моделі та розрахункові схеми технологічних операцій електромагнітного пресування суцільних та порожнистих виробів з нагрітих порошків тугоплавких сполук у складених матрицях з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів (ВВКМ).

Для прес-форм із матрицями з ВВКМ на базі одержаних результатів аналізу теплового поля встановлено, що найбільш навантаженими елементи прес-форми стають у випадку сталого нагріву. При номінальному зовнішньому тиску 30 МПа максимальні значення $\sigma_{\text{мо}}$ у елементах прес-форми дорівнюють приблизно 77 МПа у центральній зоні та приблизно 100 МПа в околі верхнього торця матриці. Таким чином, за розглянутих умов навантаження та конструкційних

параметрах максимальні еквівалентні напруження згідно критерію Кулона-Мора не перебільшують межі міцності на розтяг для ВВКМ, і прес-форма залишається працездатною. Проведено серію розрахунків, у яких варіювались розміри елементів прес-форм та величини тиску пресування у діапазоні від 30 до 60 МПа, для обох типів прес-форм. Встановлено, що при збільшенні тиску значення еквівалентного напруження σ_{Mo} у центральній зоні матриці зростає, а значення σ_{Mo} в околі торцю залишається сталим. При 60 МПа максимальне значення σ_{Mo} у матриці (приблизно 105 МПа) перевищує межу міцності на розтяг для ВВКМ (100 МПа), можна очікувати руйнування матриці і втрату працездатності прес-форми в цілому;

Запропоновано перспективну схему, яка поєднує ізостатичне пресування та електромагнітне пресування. Проведені розрахунки, дозволили зробити оцінки дії ЕМП на деформування основних елементів прес-форми. Встановлено:

– збільшення кількості витків струмопроводу з 9 до 21 призводить до зростання амплітуди дотичної компоненти напруженості ЕМП приблизно на 110 % (при цьому абсолютні значення напруженості $\sim 10^7$);

– матриця стає навантаженою у значно меншому ступені, рівні еквівалентних напружень в матриці знижуються в порівнянні з традиційним пресуванням приблизно у 1,84 рази у центральній зоні та приблизно у 1,2 разу в околі верхнього торцю;

– при збільшенні сили струму з 30 до 40 кА, максимальне значення еквівалентних напружень σ_{Mo} в матриці знижується приблизно на 29%, при цьому максимальна інтенсивність напружень у індукторі зростає приблизно на 30%. При перевищенні силою струму величини 50 кА в матеріалі струмопроводу з'являються зони пластичних деформацій.

7. Результати наукових досліджень впроваджено в наукову діяльність НТУ «ХП» (3 акти впровадження – 2011, 2016, 2016 рр.), у практику НДР за державною програмою у ННЦ «ХФТІ» – 1 акт (2017 р.), у пошукові науково-дослідницькі роботи та навчальний процес кафедри автомобільної електроніки ХНАДУ – 1 акт (2018 р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лавинский Д. В. Статический анализ прочности конструктивных элементов пресс-форм для прессования изделий из порошков / Д. В. Лавинский, О. В. Бирюков, В. В. Колосенко, С. Ю. Саенко, О. К. Морачковский, В. Н. Соболев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2006. – № 32. – С. 28–32.

Здобувачу належить постановка задачі термодформування складених прес-форм в рамках вісесиметричної моделі та чисельний метод аналізу

2. Лавинский Д. В. Анализ прочности элементов пресс-форм из углерод-углеродных материалов для псевдоизостатического прессования / Д. В. Лавинский, В. П. Ашихмин, О. В. Бирюков, В. А. Гурин, Б. Б. Затолока, В. В. Колосенко, С. Ю. Саенко, О. К. Морачковский // Вопросы атомной науки и техники.

Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2007. – № 6 (91). – С. 120–123. (**WEB of SCIENCE**)

Здобувачу належить розроблена розрахункова модель прес-форми в рамках вісесиметричної постановки та чисельний метод аналізу процесів термодеформування

3. Лавинский Д. В. Расчеты на прочность и жесткость трубчатой стенки из углерод-углеродного композитного материала для вакуумной камеры / Д. В. Лавинский, О. В. Бирюков, В. В. Колосенко, С. Ю. Саенко, Е. И. Корнилов, О. Ф. Ковпик, О. К. Морачковский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 47. – С. 19–25.

Здобувачу належить постановка задачі, розроблена розрахункова модель трубчастой стінки, а також чисельний метод аналізу деформування

4. Лавинский Д. В. Анализ упруго-пластического деформирования при моделировании операции "заполнения углов". Часть 1 / Д. В. Лавинский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 37. С. 100–104.

5. Лавинский Д. В. Анализ упруго-пластического деформирования при моделировании операции «заполнения углов». Часть 2 / Д. В. Лавинский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 63. – С. 59–63.

6. Лавінський Д. Задачі пружно-пластичного деформування тіл при магнітно-імпульсному навантаженні / Д. Лавінський // Машинознавство. – 2011. – № 7–8. – С. 48–51.

7. Lavinskii D. V. Study of thermoelastoplastic contact deformation of production tooling mixed structures / D. V. Lavinskii, S. V. Bondar' // Strength of materials. – 2011. – Vol. 43, No. 4. – P. 447–454. (**SCOPUS**)

Здобувачу належить постановка задачі, метод чисельного розв'язання, що дозволяє проводити розрахунки пружно-пластичного деформування складених конструкцій при термосиловому навантаженні

8. Лавинский Д. В. Моделирование и анализ импульсных электромагнитных полей в системах для обработки материалов / Д. В. Лавинский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 67(973). – С. 61–67.

9. Лавинский Д. В. Анализ напряженно-деформированного состояния систем для обработки материалов силами импульсных электромагнитных полей / Д. В. Лавинский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 58 (1031). – С. 92–98.

10. Лавинский Д. В. Один из подходов к оценке конструкционной прочности устройств для обработки материалов силами импульсных электромагнитных полей / Д. В. Лавинский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 63 (1036). – С. 64–69.

11. Лавінський Д. В. Нестационарне деформування елементів конструкцій під дією електромагнітного поля / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Всеукр. наук-техн. журнал «Вібрації в техніці та технологіях». – Вінниця: ВДАУ, 2014. – № 4 (76). С. 19–23.

Здобувачу належить постановка задачі нестационарного деформування електропровідних тіл, чисельний метод аналізу та результати розрахунків

12. Лавинский Д. В. Моделирование и анализ деформирования системы тел при действии электромагнитного поля / Д. В. Лавинский // Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології. – Харків: ХНАДУ, 2014. – № 6. С. 101–105.

13. Лавинский Д. В. Анализ электромагнитных и механических полей в составных конструкциях / Д. В. Лавинский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 57 (1099). – С. 31–36.

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

Здобувачу належить постановка задачі пружно-пластичного деформування систем електропровідних тіл, розроблена розрахункова схема складеного індуктора, чисельний метод аналізу та результати розрахунків

15. Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. / D. Lavinsky, H. Altenbach, O. Morachkovsky, K. Naumenko // Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2016. – Vol. 28, No. 5. – P. 1421–1433. (SCOPUS)

Здобувачу належить постановка задачі пружно-пластичного деформування систем електропровідних тіл, метод чисельного аналізу та розроблена розрахункова модель одновиткового індуктора разом із заготовкою, що дозволяє в рамках єдиної розрахункової моделі аналізувати електромагнітні процеси та процеси деформування

16. Лавинский Д. В. Анализ деформирования составных конструкций при электромагнитном прессовании / Д. В. Лавинский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 26 (1198). – С. 60–63.

17. Лавінський Д. В. Пружно-пластичне деформування складених конструкцій при дії електромагнітного поля / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Всеукр. наук-техн. журнал «Вібрації в техніці та технологіях». – Вінниця: ВНАУ, 2016. – № 3 (83). С. 103–108.

Здобувачу належить постановка задачі пружно-пластичного деформування електропровідних тіл із врахуванням контакту, розроблена розрахункова схема складеного одновиткового індуктору у рамках вісесиметричної моделі, чисельний метод аналізу та результати розрахунків

18. Лавінський Д. В. Магнітопружне деформування тіла із порожниною / Д. В. Лавінський // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 46 (1218). – С. 35–38.

19. 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. (SCOPUS)

Здобувачу належить постановка задачі пружно-пластичного деформування систем контактної взаємодіючих електропровідних тіл та метод чисельного аналізу

20. Лавінський Д. В. Деформування складених індукторів із допоміжним екраном при магнітно-імпульсній обробці / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Всеукр. наук-техн. журнал «Вібрації в техніці та технологіях». – Вінниця: ВНАУ, 2017. – № 4 (87). – С. 29–33.

Здобувачу належить розроблена розрахункова схема складеного індуктора із допоміжним екраном, чисельний метод аналізу та результати розрахунків

21. Lavinsky D. V. The nonlinear deformation of the compound structures under electromagnetic forming / D. V. Lavinsky // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 39 (1261). – С. 95–98.

22. Лавинский Д. Контактне деформування складеного індуктора із допоміжним екраном при дії електромагнітного поля / Д. Лавинский, Х. Альтенбах, К. Науменко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 40 (1262). – С. 5–9.

Здобувачу належить розроблена розрахункова схема складеного індуктора із допоміжним екраном в рамках вісесиметричної постановки, результати розрахунків з розповсюдження електромагнітного поля та процесу деформування

23. Лавінський Д. В. Розрахункове оцінювання пружно-пластичного деформування систем тіл при дії електромагнітного поля / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Всеукр. наук-техн. журнал «Вібрації в техніці та технологіях». – Вінниця: ВНАУ, 2018. – № 2 (89). С. 29–33.

Здобувачу належить розроблена розрахункова схема багатovitкового складеного індуктора, розрахунковий метод аналізу та одержані результати

24. Lavinsky D. Deformation analysis of conductive metallic components under the action of electromagnetic fields | [Verformungsanalyse elektrisch leitender metallischer Bauteile bei Magnetimpulsbearbeitung] / D. Lavinsky, H. Altenbach, V. Konkin, O. Morachkovsky, K. Naumenko // Forschung im Ingenieurwesen / Engineering Research. – 2018. – No. 4 (82). – P. 371-377. (SCOPUS)

Здобувачу належить розроблена розрахункова схема складеного одновиткового індуктора разом із заготовкою, чисельний метод розрахункового аналізу та одержані результати

25. Лавінський Д. В. Аналіз деформування конструкцій для пресування порошків при дії електромагнітного поля / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Вчені записки таврійського національного університету імені В. І. Вер-

надського. Серія: Технічні науки. – Херсон: 2018. – Т. 29 (68). – № 2. – С. 52–54.

Здобувачу належить узагальнена розрахункова модель сумісного іза статичного та електромагнітного пресування порошків надміцних матеріалів у складених матрицях, метод чисельного розрахунку та одержані результати

26. Лавінський Д. В. Розрахунки НДС при створенні технологічної операції «заповнення кутів». / Д. В. Лавінський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I, 15-17 травня 2011 р., Харків. – Харків: НТУ «ХП». – 2011. – С. 54.

27. Лавінський Д. В. Постановка задачі пружно-пластичного деформування при дії електромагнітного поля / Д. В. Лавінський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I, 15-17 травня 2012 р., Харків. – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – С. 62.

28. Лавінський Д. В. Аналіз НДС складених тіл при дії імпульсних електромагнітних полів / Д. В. Лавінський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI Міжнар. наук.-практ. конференції. Ч. I, 29-31 травня 2013 р. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – С. 41.

29. Lavinsky D. V. Nonlinear dynamics of a thin plate in a nonstationary electromagnetic field of the inductor / O. K. Morachkovsky, D. V. Lavinsky // Proceedings of the 4th Intern. Conference “Nonlinear Dynamics-2013” June 19-22, 2013, Sevastopol. – Kharkiv: “Tochka. – 2013. – P. 299–304.

Здобувачу належить постановка задачі нелінійного деформування систем електропровідних тіл, розрахункова схема індуктора та заготовки, одержані результати розрахунків

30. Лавінський Д. В. Розрахунки електромагнітних та механічних полів при розробці перспективних індукторних систем / Д. В. Лавінський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I, 15-17 жовтня 2014 р., Харків. – Харків: НТУ «ХП». – 2014. – С. 56.

31. Лавінський Д. В. Аналіз конструкційної міцності складених тіл за наявності електромагнітного поля / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2014. – С. 32–33.

Здобувачу належить загальна постановка задачі аналізу конструкційної міцності систем електропровідних тіл та запропонований метод розрахункового аналізу пружно-пластичного деформування

32. Лавінський Д. В. Аналіз деформування складених індукторів для магнітно-імпульсної обробки / Д. В. Лавінський // Дванадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2015. – С. 86–87.

33. Лавінський Д. В. Пружно-пластичне деформування електропровідних тіл / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Інформаційні технології: наука,

техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII міжнар. наук.-практичної конф., 20–22 травня 2015 р., Харків. – Ч.1. – Харків: НТУ «ХП». – 2015. – С. 51.

Здобувачу належить загальна математична постановка задачі та запропонований метод розрахункового аналізу пружно-пластичного деформування

34. Лавинский Д. В. Деформирование составных конструкций для пресования порошков силами электромагнитного поля / Д. В. Лавинский // Весняні наукові читання: зб. ст. 2-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 28 квітня 2016 р. – Київ: Центр наукових публікацій, 2016. – Ч. 2. – С. 52–55.

35. Лавинский Д. В. Анализ температурного деформирования составных пресс-форм для обработки порошковых материалов / Д. В. Лавинский // Актуальные научные исследования в современном мире: XV Междунар. научн. конф., 21-22 июля 2016 г, Переяслав-Хмельницкий. // Сб. научных трудов – Переяслав-Хмельницкий, 2016. – Вып. 7(15), ч.1. – С. 95–101.

36. Lavinsky D. V. The Nonlinear Deformation of the Body System Under Electromagnetic Field Action. / O. K. Morachkovsky, D. V. Lavinsky // Nonlinear Dynamics–2016 (ND-KhPI2016) : proceedings of 5th International Conference, dedicated to the 90th anniversary of Academician V.L. Rvachev, September 27-30, 2016 – Нелінійна динаміка–2016 : тези доп. 5-ї Міжнар. конф., 27-30 вересня 2016 р. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – P. 350–355.

Здобувачу належить загальна математична постановка задачі, розроблена розрахункова модель складеного індуктора та запропонований метод розрахункового аналізу

37. Лавінський Д. В. Аналіз ЕМП і НДС складених конструкцій при електромагнітному пресуванні порошкових матеріалів / Д. В. Лавінський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І, 18-20 травня 2016р., Харків. – Харків, НТУ «ХП». – 2016. – С. 59.

38. Лавинский Д. В. (2016). Прочность конструкций для пресования порошков при действии электромагнитного поля / Д. В. Лавинский // Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы естественных наук «Тараповские чтения – 2016, Харьков, 1 – 4 марта 2016 г. – Харків: «Цифрова друкарня N1». – 2016. – С. 90–91.

39. Lavinsky D. V. Structural analysis of the technological systems under electromagnetic field action / D. V. Lavinsky // Economics, science, education: integration and synergy : international scientific and practical conference, 18-21 January 2016, Bratislava, Slovak Republic. – Bratislava: Publishing outfit "Center of educational literature", 2016. – Vol. 3. – P. 99–100.

40. Лавінський Д. В. Аналіз пружно-пластичного деформування складеного індуктора при магнітно-імпульсній обробці матеріалів/ Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, 20–22 сентября 2017 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2017. – С. 81–84.

Здобувачу належить розроблена розрахункова модель багатовиткового складеного індуктора та чисельний метод аналізу пружно-пластичного деформування

41. Лавінський Д. В. Пружно-пластичне деформування систем електропровідних тіл при дії електромагнітного поля / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017, Ч.І, 17–19 травня 2017р., Харків. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – С. 70.

Здобувачу належить загальна постановка задачі пружно-пластичного деформування складених електропровідних тіл та метод чисельного аналізу

42. Лавінський Д. В. Деформування складеного індуктора із допоміжним екраном разом із заготовкою/ Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Фізичні та комп'ютерні технології : матеріали 23-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 21-22 грудня 2017 р. – Одеса: ОНПУ, 2018. – С. 150–153.

Здобувачу належить розроблена розрахункова модель складеного індуктора та тонкостінної заготовки, що дозволяє врахувати контактну взаємодію, а також чисельний метод аналізу розподілу електромагнітного поля та пружно-пластичного деформування

43. Лавінський Д. В. Пружно-пластичне деформування вигнутих тонкостінних заготовок при магнітно-імпульсній обробці/ Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018, Ч.І, 17–19 травня 2018р., Харків. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – С. 65.

Здобувачу належить метод чисельного аналізу пружно-пластичного деформування вигнутих тонкостінних заготовок та одержані розрахункові результати

44. Лавінський Д. В. Розрахунки електромагнітних та теплових полів у технологічних системах електромагнітної обробки / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы междунар. науч.-техн. конф., 16-18 мая 2019 г. – Одесса : ОНПУ, 2019. – С. 87–89.

Здобувачу належить розрахункова схема індукторної системи та метод розрахункового аналізу розповсюдження електромагнітних та теплових полів

45. Лавінський Д. В. Напружено-деформований стан складених тіл при дії електромагнітного поля / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Актуальні проблеми МСС та міцності конструкцій: матеріали другої міжнар. наук.-техн. конф., 10-12 жовтня 2019 р. – Дніпро: ДНУ ім. Олесья Гончара, 2019. – С. 50–51.

Здобувачу належить загальна постановка задачі пружно-пластичного деформування складених електропровідних тіл та метод чисельного аналізу

46. Лавінський Д. В. Деформування складених прес-форм при електромагнітному пресуванні нагрітих порошків надміцних матеріалів/ Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія,

освіта, здоров'я: Тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019, Ч.І, 15–17 травня 2019р., Харків. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – С. 69.

Здобувачу належить загальна постановка задачі пружно-пластичного деформування складених електропровідних тіл та метод чисельного аналізу

47. Лавінський Д. В. Розрахункові дослідження термодформування електропровідних тіл при дії електромагнітного поля / О. К. Морачковський, Д. В. Лавінський, С. В. Конкін // Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні: Тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, 5–6 жовтня 2020р., Харків. – 2020. – С. 92–95.

Здобувачу належить загальна постановка задачі термодформування електропровідних тіл з урахуванням впливу електромагнітного поля та метод чисельного аналізу

48. Лавінський Д. В. Вплив тепловиділення на деформування пристроїв магнітно-імпульсної обробки / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXVIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2020, Ч.І, 15–17 травня 2020р., Харків. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2020. – С. 77.

Здобувачу належить розробка розрахункової моделі складеного індуктора для магнітно-імпульсної обробки та одержані результати чисельного моделювання

49. Лавінський Д.В. Розрахунки термодформування елементів технологічних систем магнітно-імпульсної обробки / Д. В. Лавінський // The 3rd International scientific and practical conference – Priority directions of science and technology development, November 22-24, 2020, Kyiv, Ukraine. – Kyiv: SPC–Sci-conf.com.ua. – 2020. – P. 332–336.

АНОТАЦІЇ

Лавінський Д. В. Розрахунковий метод оцінювання впливу електромагнітних полів на пружно-пластичне деформування обладнання технологічних приладів. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2021 р.

Дисертаційну роботу присвячено розробці нового розрахункового методу оцінювання впливу електромагнітних полів (ЕМП) на пружно-пластичне деформування складених тіл з урахуванням зв'язаності механічних, електромагнітних та теплових полів, та застосуванню цього методу для дослідження деформування обладнання технологічних приладів, які знаходяться під дією імпульсного ЕМП.

Представлено загальну постановку проблеми створення розрахункового методу оцінювання дії ЕМП на деформування систем електропровідних тіл. Ро-

зглянуті загальні балансові співвідношення, які зв'язують основні характеристики ЕМП, теплового поля та напружено-деформованого стану (НДС), і надають змогу сформулювати визначальні рівняння. Сформульовано повну систему диференціальних рівнянь початково-крайової задачі пружно-пластичного деформування систем електропровідних тіл при дії ЕМП та наявності теплового поля. Чисельна реалізація методу спирається на метод скінчених елементів (МСЕ). Явище контактної взаємодії запропоновано враховувати шляхом введення спеціального контактного шару, властивості якого обираються так, щоб коректно моделювати реальні умови взаємодії.

Запропоновано та обґрунтовано загальний підхід до визначення характеристик ЕМП та НДС у технологічних системах магнітно-імпульсної обробки матеріалів (МІОМ), згідно до якого передбачається використання запропонованого розрахункового методу для розрахункової схеми, яка має містити індуктор та заготовку. Проведені розрахунки ЕМП та НДС обладнання технологічних систем МІОМ, за результатами яких визначені раціональні експлуатаційні та конструкційні параметри технологічних операцій.

Ключові слова: пружно-пластичне деформування, електромагнітне поле, метод скінчених елементів, контактна взаємодія, електромагнітні сили, магнітно-імпульсна обробка матеріалів.

Лавинский Д. В. Расчетный метод оценивания влияния электромагнитных полей на упруго-пластическое деформирование оборудования технологических приборов. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, 2021 г.

Диссертационная работа посвящена разработке нового расчетного метода оценивания влияния электромагнитных полей (ЭМП) на упруго-пластическое деформирование составных тел с учетом связанности механических, электромагнитных и тепловых полей, и использованию этого метода для исследования деформирования оборудования технологических приборов, которые находятся под действием импульсного ЭМП.

Представлена общая постановка проблемы создания расчетного метода оценивания действия ЭМП на деформирование систем электропроводных тел. Рассмотрены общие балансовые соотношения, которые связывают основные характеристики ЭМП, теплового поля и напряженно-деформированного состояния (НДС), и дают возможность сформулировать определяющие соотношения. Сформулирована полная система дифференциальных уравнений начально-краевой задачи упруго-пластического деформирования систем электропроводных тел при действии ЭМП и наличии теплового поля. Численная реализация метода опирается на метод конечных элементов (МКЭ). Явление контактного взаимодействия предложено учитывать путем введения специального контактного слоя, свойства которого выбираются так, чтобы корректно моделировать реальные условия взаимодействия.

Предложен и обоснован общий подход к определению количественных характеристик ЭМП и НДС в технологических системах магнитно-импульсной обработки материалов (МИОМ), в соответствии с которым предполагается использование предложенного расчетного метода для расчетной схемы, которая должна содержать индуктор и заготовку. Проведены расчеты ЭМП и НДС оборудования технологических систем МИОМ, по результатам которых определены рациональные эксплуатационные и конструкционные параметры технологических операций

Ключевые слова: упруго-пластическое деформирование, электромагнитное поле, метод конечных элементов, контактное взаимодействие, электромагнитные силы, магнитно-импульсная обработка материалов.

Lavinsky D. V. Estimated method for evaluating the effect of electromagnetic fields on elastic-plastic deformation of equipment of technological devices. Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Doctor of Technical sciences in specialty 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines. – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, 2021.

The thesis is devoted to the development of a new calculation method for evaluating the effect of electromagnetic fields on elastic-plastic deformation of composite bodies, taking into account the relationship between mechanical, electromagnetic and thermal fields, and the application of this method to study the deformation of blanks and equipment of technological devices that are under the action of a pulsed electromagnetic field.

A large number of technical and technological facilities are exploited under conditions of intense electromagnetic fields (EMF). Technologies that use EMF, cause a variety of power, thermal effects on materials, influence on magnetic properties, and so on. The most important is the power effect that occurs when the EMF acts on the conductive body and causes its movement or deformation. Force influence is used in the class of technological operations, called magnetic-pulsed material processing (MPMP). The scientific and applied problem, which consists in the creation of new calculation methods for evaluating the EMF's effect on elastic-plastic deformation of workpieces and equipment, taking into account the association of EMF propagation and deformation processes, as well as calculation investigations of the processes of EMF distribution and deformation under the conditions of specific technological operations is relevant, which determines the direction of the dissertation research.

A general statement of the problem of creating a calculation method for the evaluation of the EMF on the deformation of electrically conducting bodies is made. The general balance relations, which connect the main characteristics of the EMF, the thermal field and the stress strain state (SSS), are considered, and allow to formulate the defining equations and state equations. The model for taking into account the influence of EMF on the process of body deformation and the propagation of the thermal field for the case of neglecting the manifestations of piezoelectric, magnetic-electric, thermoelectric and thermomagnetic effects is considered. It is assumed that the characteristics of the material may depend on temperature, and the magnetic per-

meability for some materials is a function of the magnetic field strength. This model is grounded and applied to specific processes and materials. A complete system of differential equations for the initial boundary value problem of elastic-plastic deformation of electrically conducting bodies systems under the influence of EMF and the presence of a thermal field is formulated. The ratio for the main characteristics of EMF is taken within the framework of macroscopic electrodynamics, the ratio of plastic deformation taken in accordance with the associated theory of flow. The phenomenon of contact interaction is proposed to be taken into account by introducing a special contact layer, the properties of which are selected so as to correctly model the real conditions of interaction. The variational formulation of the problem for the case of elastic deformation and quasi-stationary EMF propagation is made on the basis of the principle of stationary power of the whole system. It is shown that in the case when the connection between the mechanical field and the EMF occurs only in the presence of electromagnetic forces, a consistent solution of the problems of determination of EMF components and SSS is possible. For the general case of propagation of EMF, non-stationary thermal field and elastic deformation, variational formulation is presented. The variational formulation in the case of plastic deformation according to the theory of flow is widely used, taking into account the dependence of the main characteristics on temperature. A finite-element implementation was proposed, as the basic one, an eight-node isoparametric finite element was selected with a bilinear approximation of the desired functions. The thesis proposes and substantiates the general approach to the definition of characteristics of EMF and SSS in MPMP technological systems, which provides for the use of the proposed calculation method for the calculation scheme, which should include the inductor and the workpiece. The solution of the problem of determining the spatial-temporal distributions of the main characteristics of EMF in the conditions of the technological operation of MPMP by drawing thin blanks from ferromagnetic materials is carried out.

Using the proposed calculation method based on the spatial-temporal distributions of the EMF component, a study of elastic-plastic deformation of the workpiece and a composite single- and multiturn inductors, taking into account the contact interaction, was carried out. The ranges of values of the operating and structural parameters of the inductor are determined, in which it remains operational. The analysis of elastic-plastic deformation of the inductor together with the workpiece allowed to determine the limits of its application and to determine the rational values of some structural and operational parameters.

Key words: elastic-plastic deformation, electromagnetic field, finite element method, contact interaction, electromagnetic forces, magnetic pulse processing of materials.

Автор висловлює щирю подяку науковому консультантові Морачковському Олегу Костянтиновичу, доктору технічних наук, професору, професору кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем НТУ «ХПІ» за надані консультації при створенні і розвитку наукового напрямку за темою роботи та корисні поради при написанні роботи.



*Підписано до друку 26 серпня 2021р.
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.
Друк-цифровий. Умовн. друк. арк. 1,6. Тираж 100 прим. Зам. № 0704202101*

*Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. +38-067-91-93-922
www.modelist.in.ua*