

К. А. БАРБІН, Д. В. ЛАВІНСЬКИЙ

МАТЕМАТИЧНЕ ТА РОЗРАХУНКОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА МАГНІТО-ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ. ОГЛЯД

У статті розглянуто стан проблеми стосовно математичного та розрахункового моделювання процесів розповсюдження електромагнітного поля та викликаного їм деформування технологічних систем. Електромагнітне поле є невід'ємним чинником функціонування різноманітних технічних і технологічних систем. Дія електромагнітного поля на тіла та середовища відрізняється в залежності від їх властивостей. У разі дії на електропровідні тіла і середовища основну роль відіграє силовий вплив (завдяки виникаючим електромагнітним силам) та вплив на зміну температури (завдяки виникаючим розповсюдженими джерелам тепловиділення згідно до закону Джоуля-Ленца). Силовий вплив електромагнітного поля використовується у величезній кількості технологічних процесів. Можна відзначити процеси геологічної розвідки (завдяки імпульсам електромагнітного поля), металургійні процеси (тут електромагнітне поле застосовується, наприклад, для перемішування розплавів), обробні процеси. Великий клас обробних технологічних операцій, який має загальну назву електромагнітна обробка матеріалів, використовує електромагнітні сили для незворотної формозміни заготовок завдяки виникненню зон пластичних деформацій. У даному випадку силовій дії піддається як заготовка так і джерело електромагнітного поля – індуктор (соленоїд). При розробці технологічних операцій магнітно-імпульсної обробки вельми необхідно забезпечити як потрібний ступінь деформування заготовки так і працездатність індуктора, яка визначається його міцністю. Ці потреби викликають необхідність проведення математичного та розрахункового моделювання, що дозволяє визначити раціональні кількісні значення конструкційних та експлуатаційних параметрів. Подібне моделювання повинно ґрунтуватися на відповідних теоретичних моделях стосовно розповсюдження електромагнітного поля та викликаного ним пружно-пластичного деформування. У випадку розгляду технологічних систем електромагнітної обробки для опису розповсюдження електромагнітного поля припустимим є використання макроскопічного підходу, а опис процесів деформування може базуватись на принципах теорії електро-магніто-пружності. Сучасний підхід до математичного моделювання та розрахункового аналізу у системах електромагнітної обробки потребує використання чисельних методів, найбільш вживаним з яких є метод скінченних елементів завдяки своїй універсальності. Метод скінченних елементів у даному випадку дозволяє моделювати практично реальну геометрію системи та враховувати більшість конструкційних та експлуатаційних особливостей, пов'язаних із властивостями матеріалів, умовами контактної взаємодії тощо.

Ключові слова: математичне моделювання, розрахунковий аналіз, електромагнітне поле, електромагнітна обробка, електро-магніто-пружність, метод скінченних елементів.

К. BARBIN, D. LAVINSKY

MATHEMATICAL AND COMPUTATIONAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELD PROPAGATION AND MAGNETIC-ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS. A REVIEW

The article considers the state of the problem in relation to mathematical and computational modeling of the processes of electromagnetic field propagation and the deformation of technological systems caused by it. The electromagnetic field is an integral factor in the functioning of various technical and technological systems. The effect of the electromagnetic field on bodies and continuum differs depending on their properties. In the case of action on electrically conductive bodies and continuum, the main role is played by the force effect (due to the emerging electromagnetic forces) and the effect on temperature changes (due to the emerging common sources of heat dissipation according to the Joule-Lenz law). The force effect of the electromagnetic field is used in a huge number of technological processes. It is possible to note the processes of geological exploration (due to the pulses of the electromagnetic field), metallurgical processes (here the electromagnetic field is used, for example, for mixing melts), processing processes. A large class of machining technological operations, which has the general name electromagnetic forming, uses electromagnetic forces for irreversible shape change of workpieces due to the occurrence of zones of plastic deformation. In this case, both the workpiece and the source of the electromagnetic field - the inductor (solenoid) - are subjected to force action. When developing technological operations for electromagnetic forming, it is very necessary to ensure both the required degree of deformation of the workpiece and the performance of the inductor, which is determined by its strength. These needs necessitate mathematical and computational modeling, which allows you to determine rational quantitative values of design and operational parameters. Such modeling should be based on the relevant theoretical models regarding the propagation of the electromagnetic field and the elastic-plastic deformation caused by it. In the case of considering technological systems of electromagnetic forming, it is permissible to use a macroscopic approach to describe the propagation of the electromagnetic field, and the description of deformation processes can be based on the principles of the theory of electro-magneto-elasticity. The modern approach to mathematical modeling and computational analysis in electromagnetic forming systems requires the use of numerical methods, the most widely used of which is the finite element method due to its versatility. The finite element method in this case allows you to simulate the almost real geometry of the system and take into account most of the design and operational features associated with the properties of materials, contact interaction conditions, etc.

Keywords: mathematical modeling, computational analysis, electromagnetic field, electromagnetic forming, electro-magneto-elasticity, finite element method.

Вступ. Використання електромагнітного поля у техніці та технологіях. Електромагнітне поле (ЕМП) є невід'ємним чинником функціонування різноманітних технічних і технологічних систем. ЕМП впливає на функціонування, наприклад, різноманітних систем генерації, перетворення та передачі електричної енергії: генераторів, трансформаторів, приладів бездротового заряджання тощо [1-7]. Енергія ЕМП використовується

у різноманітних приладах, пов'язаних із геологічною розвідкою [8;9]. Високоінтенсивні ЕМП фіксуються при використанні систем нетрадиційної електроенергетики, наприклад таких, що використовують термоядерний синтез [10;11].

Вплив ЕМП на елементи технічних та технологічних систем є найрізноманітнішим, у випадку електропровідних матеріалів найбільш

відчутним стає силовий вплив (за рахунок виникнення електромагнітних сил [12;13]) і тепловий вплив (за рахунок виникнення у об'ємі електропровідного тіла розподілених джерел тепловиділення відповідно до закону Джоуля-Ленца [14]). Саме ці вказані властивості взаємодії ЕМП із електропровідними тілами є найбільш вживаними з точки зору застосування ЕМП у техніці та технологічних процесах.

Тепловиділення, яке відбувається при протіканні електричного струму у електропровідних тілах знайшло своє застосування у класі технологічних операцій, що можуть бути згруповані під загальною назвою «індукційний нагрів» [15-20]. Індукційний нагрів застосовується для досягнення найрізноманітніших технологічних результатів. Це може бути нагрівання з метою подальшого незворотного деформування, нагрівання з метою зняття залишкових напружень, нагрівання для подальшого якісного з'єднання (роз'єднання) різьб, підвищення температури до межі плавлення із подальшим з'єднанням («електромагнітне зварювання» [16]) тощо. Сучасні напрями розвитку технологій індукційного нагріву стосуються також полімерів та полімерних розчинів [17;19].

Окремий напрямок застосування ЕМП для нагріву розплавленого металу використовується у сучасній металургії [21-23]. Тут ЕМП можуть застосовуватись як для нагріву (підтримки температури) розплаву до необхідних значень, для керування процесом течії розплаву, для сепарації домішок, для оптимізації розмірів та форми кристалів.

Що стосується силового впливу ЕМП на електропровідні тіла, то він досягається при наявності, так званих, «сильних» ЕМП із напруженостями магнітного поля порядку $10^6 - 10^7$ А/м. Основи використання сильних ЕМП у техніці викладені у класичній фундаментальній роботі Ф. Херлаха [24].

Сучасний спектр застосувань силового впливу ЕМП у техніці є надзвичайно широким. Наприклад, це напрям створення і використання магнітних підшипників (підвісів) [25;26]. Застосування магнітних підшипників роторів машин різноманітного призначення має низку переваг перед використанням традиційних підшипників, головне з яких полягає у зменшенні зношування.

Велика кількість технологічних операцій, що використовує силову складову впливу ЕМП на електропровідні тіла згуртована під загальною назвою «Електромагнітна обробка матеріалів» або «Магнітно-імпульсна обробка матеріалів» (у англійській науковій літературі застосовується термін «Electromagnetic forming»). Спроцено, електромагнітна обробка матеріалів (ЕОМ) полягає в тому, що необхідно створити ЕМП з енергії, яка призведе до виникнення таких електромагнітних сил, які, в свою чергу, призведуть до незворотної (пластичної) формозміни заготовки. Перші розробки у галузі ЕОМ з'явилися ще у 50-х роках 20-го сторіччя і з тих пір технологічні процеси ЕОМ невпинно

розвиваються та застосовуються до різноманітних галузей машинобудування та матеріалознавства.

Перші фундаментальні відомості про технологічні операції ЕОМ викладені у класичній праці І. В. Білого, С. М. Фертіка, Л. Т. Хименка [27]. Розвиток методів ЕОМ представлено у роботі [28]. Слід відзначити, що попередні роки розвитку методи ЕОМ пройшли значну еволюцію. Якщо початкові методи переважним чином застосовувались до масивних заготовок. Оскільки «магнітний» тиск на заготовку є пропорційним різниці квадратів напруженості магнітного поля на поверхнях заготовки [27], то при значній її товщині силовий вплив буде максимальним. Із розвитком обладнання, що використовується для генерації ЕМП, можливим стало ефективне застосування ЕОМ й до обробки тонких заготовок, тут максимального силового ефекту можливо досягти за варіювання частотою струму у імпульсі поля, що дозволяє «зосереджувати» наведене ЕМП біля однієї поверхні заготовки.

Сучасні тенденції розвитку та існуючі технології ЕОМ достатньо повно висвітлені у оглядових роботах [29-32] та статтях [33-37]. Спираючись на інформацію, представлену у цих статтях, можна зробити висновки, що сучасні методи ЕОМ застосовуються до обробки різноманітних елементів конструкцій та деталей машин. Мова йде про товстостінні й тонкостінні елементи конструкцій: листові, трубчасті, коробчасті й інші, довгомірні й маломірні. ЕОМ застосовується до обробки як традиційних, так й порошкових матеріалів. ЕОМ використовується у автомобільній, авіаційній, енергетичній, радіотехнічній, електротехнічній, хіміко-технологічній та інших виробничих галузях.

Застосування ЕОМ надає багато переваг перед традиційними методами силової обробки матеріалів. Перш за все слід відзначити, що силовий вплив на заготовку в даному випадку передається безконтактним шляхом, що дає змогу не погіршувати якість вже обробленої поверхні (важливо для автомобільної галузі). Також в даному випадку до мінімуму зводиться можливість забруднення поверхні заготовки небажаними домішками (важливо при виготовленні виробів для хімічної техніки та медичної техніки). Ще одною перевагою при застосуванні процесів ЕОМ є можливість керуванням просторово-часовою конфігурацією електромагнітних сил, шляхом відповідної корекції параметрів ЕМП джерела.

Що стосується досліджень вітчизняних вчених, то тут можна відзначити роботи Ю.В. Батигіна, його колег та учнів [38-45]. У цих роботах вперше теоретично обґрунтовані засади для створення нових технологічних систем ЕОМ, призначених для рихтування вмістин на корпусних елементах транспортних засобів шляхом їх притягнення до інструменту. Цей напрям є новим в цілому для галузі ЕОМ, запропоновані рішення дозволяють проводити формозміну тонких заготовок за допомогою плоских індукторів.

При розробці нових технологічних операцій ЕОМ та вдосконаленні вже існуючих основними елементами, що беруться до уваги є заготовка та джерело ЕМП – індуктор (соленоїд). Представлені у відкритих джерелах дані дозволяють зробити висновок, що при застосуванні ЕОМ силовому впливу піддається не лише заготовка, а й джерело ЕМП – індуктор (соленоїд). Рівні електромагнітних сил можуть бути настільки великим, що призведуть до руйнування або незворотної формозміни індуктора, що не є припустимим. Зрозуміло, що технологічна операція може вважатись успішною, якщо заготовка приймає необхідну форму і, при цьому, індуктор залишається працездатним. Досягти умов, за яких технологічна операція буде успішною можна шляхом моделювання, причому, найбільш ефективним є поєднання математичного і розрахункового моделювання із подальшими натурними експериментами. Розрахункові дослідження дозволяють шляхом аналізу певних кількісних характеристик визначати раціональні значення ключових конструкційних та експлуатаційних параметрів. У випадку досліджень технологічних систем ЕОМ обов'язковим для моделювання та розрахункового аналізу є як задача розповсюдження ЕМП так і викликані задачі деформування (й, можливо, розповсюдження температурного поля). Подібний підхід є характерним й для інших технічних та технологічних систем, підданих дії ЕМП.

Математичні моделі та теорії розповсюдження електромагнітного поля та його впливу на електропровідні тіла. Розробка нових технологічних систем та вдосконалення вже існуючих, які піддані дії ЕМП, робить необхідним розробку уточнених математичних моделей та методів розрахунку кількісних характеристик ЕМП та електромагнітних сил, які діють на електропровідні тіла, ці методи мають бути орієнтованими на певний клас технологічних задач, для того, щоб знаходити раціональні параметри поля та режими його ефектної дії.

Аналізу електромагнітних процесів у електропровідних середовищах присвячено велику кількість робіт вітчизняних та закордонних вчених. Можна стверджувати, що основи закладено у фундаментальній роботі Дж. Максвелла [46], також тут можна відзначити роботи В. І. Партона, Б. О. Кудрявцева, Я. С. Підстригача, Я. Й. Бурака, А. Кравчука, Ж. Можана та інших [48-52].

Необхідність проведення відповідних розрахунків при проектуванні елементів нової техніки, яка піддані дії ЕМП викликали створення і розвинення спеціальних теорій, які описують ті чи інші конкретні прояви, серед яких можна відокремити:

- теорії п'єзоелектрики (п'єзомагнетизму і п'єзонапівпровідності) тіл завдяки широкому використанню електромеханічних перетворювачів енергії, зокрема, для контролю коливань елементів конструкцій [48;53-56];

- теорії магнітопружності, яка досліджує механічну поведінку електропровідного тіла в сильному магнітному полі [48;49];

- теорії поширення хвиль в деформівному тілі з урахуванням зв'язку між механічними і електромагнітними полями (для проблем геофізики і сейсмології, для розвитку неруйнівних методів контролю та інш.) [56-59];

- теорії індукційного нагріву тіл, за допомогою зовнішнього ЕМП високої та ультрависокої частоти [15].

Розвиток подібних теорій, потребував створення спеціальних моделей механіки зв'язаних полів. Теоретичну основу моделей механіки суцільного середовища, що враховують взаємодію полів різної фізичної природи (у тому числі й ЕМП) закладено у роботах вітчизняних та закордонних вчених: Я. С. Підстригача, Я. Й. Бурака, А. Ерингена, Л. І. Сєдова, Ж. Можана, К. Трасдела, Р. Тоупіна, К. Хаттера, А. Ван дер Вена, Л. Чу, Й. Пао та інших.

В рамках цих моделей [51-56], зовнішнє ЕМП впливає на термомеханічний стан електропровідного тіла, для опису чого в рівняннях руху враховуються складові, які відповідають електромагнітним силам, а в рівняннях теплопровідності з'являються джерела тепловиділення.

Розповсюдження ЕМП у вакуумі та в рухомому деформованому тілі з урахуванням його електромагнітних властивостей описується за допомогою фундаментальних рівнянь Максвелла. Вони зв'язують п'ять векторних та скалярних характеристик, що описують ЕМП: напруженість і індуктивність електричного і магнітного полів і густину поверхневих зарядів та струмів. Для твердого тіла вводяться додаткові характеристики, що описують електромагнітні властивості: електропровідність, поляризація і намагніченість [51;63;66].

Вказані кількісні характеристики ЕМП дозволяють розглядати динамічну постановку (з урахуванням сил інерції) або квазістатичне наближення для тіла, швидкість руху якого багато менше швидкості світла у вакуумі, що гарантує інваріантність рівнянь електродинаміки і механіки щодо перетворення Галілея [66-68]. Моделі механіки, що враховують намагніченість і поляризацію електропровідного твердого тіла є різними в залежності від виду рівнянь електродинаміки для рухомого тіла. Найбільш часто для рівнянь електродинаміки застосовують моделі Лоренца, Чу, та Максвелла-Мінковські [60;69-72]. Основна відмінність полягає у представленні характеристик намагнічування та поляризації. Ці рівняння є базовими для моделей представлення взаємодії ЕМП з електропровідним тілом [71].

Математичне моделювання та подальший розрахунковий аналіз силової дії ЕМП на електропровідне тіло, що є основною у багатьох технологічних процесах ЕОМ, базується на положеннях теорії магнітопружності. Основи цієї

теорії було закладено у роботах вітчизняних та закордонних вчених: Л. Кнопоффа, П. Чадвіка, С. Каліські, Д. Петикевича, Д. Данкіна, А. Ерингена, Ф. Муна, Й. Пао, А. Ван де Вена, Д. Албласа, Я. С. Підстригача, Я. Й. Бурака, В. Ф. Кондрата та інших. Одними з перших можна вважати роботи Л. Кнопоффа [56] і П. Чадвіка [57], у яких розглядалось поширення пружних хвиль з урахуванням магнітного поля Землі. У цих роботах наведено основні рівняння магнітопружності з урахуванням ефектів взаємодії механічних та електромагнітних полів в рухомому електропровідному тілі.

У роботах С. Каліські та Д. Петикевич [58], та Д. Данкіна та А. Ерингена [59] поставлені динамічні задачі магнітопружності за умов коливання тіл і поширення магнітопружних хвиль у них. Ф. Мун та Й. Пао, А. Ван де Вен, та інші [73-76] розглядали задачі аналізу стійкості електропровідних балок та тонких пластин за наявності ЕМП. У цих роботах також були запропоновані методи лінеаризації зв'язаної системи рівнянь магнітопружності.

Д. Алблас [77], Я. С. Підстригач, Я. Й. Бурак та В. Ф. Кондрат [78], розвивали загальну теорію магнітопружності. У роботі [78] не лише представлені різноманітні постановки задач магнітопружності, а й представлені розв'язання за допомогою асимптотичних методів для різних канонічних областей. У достатньо повному обсязі різноманітні постановки задач магнітопружності та способи їх розв'язання представлені в оглядовій роботі Ф. Муна [79].

На сучасному етапі В. Ф. Кондрат та О. Грицина продовжили розвиток і зробили великий внесок у теорію електро-магнітопружності. Наприклад, у своїх роботах [80-84] вони досліджували специфічні ефекти, що виникають у поляризованих тілах при дії ЕМП. Тут представлена повна система рівнянь електро-магніто-термомеханіки для електропровідного поляризованого середовища з використанням методів термодинаміки незворотних процесів. Специфікою цих досліджень є врахування ефекту локального зміщення маси. Показано, що для більш повного опису локального термодинамічного стану поляризованого середовища, необхідно ввести дві пари додаткових параметрів: наведену масу і енергетичну міру впливу зміщення маси на внутрішню енергію, і вектора зміщення маси та просторового градієнта вказаної енергетичної міри. Доведено, що введення цих додаткових параметрів поряд з традиційними, що описують поширення ЕМП в електропровідних середовищах, дозволяє враховувати приповерхневу спільну неоднорідність НДС та електричної поляризації. Також представлена повна система рівнянь локальної градієнтної теорії діелектриків. Ця система включає рівняння балансу імпульсу та ентропії, співвідношення, яке пов'язує питому густину наведеної маси з питомим вектором локального зміщення маси та рівняння Максвелла.

Наведену систему рівнянь доповнено лінійними рівняннями стану для ізотропного матеріалу.

Також слід відзначити роботи О. Р. Гачкевича, Р. С. Мусія та інших, у яких розроблено специфічний варіант теорії магнітопружності в разі дії імпульсного ЕМП. Так, наприклад у роботах [86-91] представлена математична модель процесу пружного деформування неферомагнітних електропровідних тіл за умов дії імпульсних ЕМП. Наведена модель враховує адіабатичний характер процесів нагрівання та деформування електропровідних тіл при дії імпульсного ЕМП. У цих роботах розглядаються також аспекти математичного та розрахункового моделювання багатопарових електропровідних тіл канонічної форми за дії одноразових та багаторазових електромагнітних імпульсів з модуляцією амплітуди, вивчаються питання стосовно оцінювання стійкості електропровідних тіл з точки зору механічної поведінки.

Таким чином, можна зробити висновок, що на даний момент часу теорії стосовно деформування електропровідних тіл за наявності ЕМП є розвиненими достатньо добре. Це є достатнім підґрунтям для проведення математичного моделювання та подальшого розрахункового аналізу різноманітних технічних та технологічних систем, елементи яких піддані дії ЕМП.

Підходи до математичного моделювання та розрахункового аналізу розповсюдження електромагнітного поля та деформування технологічних систем. Математичне моделювання та розрахунковий аналіз деформування електропровідних тіл при дії ЕМП містить два ключові питання: стосовно розповсюдження ЕМП та стосовно подальшого деформування за рахунок електромагнітних сил та, можливо, за рахунок термодеомацій внаслідок зміни температурного поля. До подібних процесів історично існує два загальні підходи: перший – базується на аналітичному моделюванні, другий – на чисельному моделюванні.

Яскравим прикладом застосування першого підходу стосовно розробок технологічних систем ЕОМ (МІОМ) є роботи Ю. В. Батигіна та інших [38-45]. У цих роботах для визначення просторово-часових розподілів векторних характеристик ЕМП використовується перетворення Лапласа. Величини визначених характеристик оцінюються з точки зору відомостей, отриманих з досвіду створення та використання технологічних систем ЕОМ (МІОМ). Також по визначеним характеристикам ЕМП знаходяться електромагнітні сили, що діють на заготовку, та проводиться оцінка того чи знаходяться максимуми цих сил у тій зоні заготовки, яка повинна оброблюватись. Даний підхід має як певні переваги так і недоліки. До переваг, перш за все, необхідно відносити те, що використовується відомий математичний апарат, який добре зарекомендований для розв'язання диференціальних рівнянь, подібних до тих, що описують розповсюдження ЕМП. До недоліків можна віднести, по-перше, значні

спрощення розрахункових схем у порівнянні із реальними об'єктами. Тут має місце і значне спрощення геометрії: задачі розглядаються одновимірними, розміри заготовки, як правило, є набагато більшими за розміри індуктора (априорі передбачається загасання ЕМП на віддаленні від робочої зони), не враховується реальна геометрія індуктора. Також у представлених розрахункових схемах та проведених розрахунках не враховується залежність властивостей матеріалу від величини характеристик ЕМП, що є важливим при розгляді феромагнітних матеріалів. Все це робить необхідним проведення коштовних натурних експериментів, які повинні підтверджувати або спростовувати достовірність отриманих аналітично розрахункових даних. Результати, отримані за допомогою подібних аналітичних підходів можуть використовуватись як оціночні при досліджуванні достовірності результатів, отриманих іншими методами для більш досконалих розрахункових схем.

Приклади застосування аналітичних підходів для аналізу деформування електропровідних тіл при дії ЕМП містяться також у наступних роботах [91;92]. Найбільш поширеними точними методами є методи інтегральних перетворень Фур'є, Лапласа та скінченних інтегральних перетворень для пониження розмірності вихідної задачі математичної фізики. Основним недоліком цих методів є те, що розв'язок комплексної, навіть одновимірної, задачі термомеханіки однорідних електропровідних тіл подається у вигляді багатократних функціональних рядів, які є погано збіжними при малих часах імпульсної електромагнітної дії.

Відомі окремі методи для аналітичного розрахункового моделювання гармонійних ЕМП, які використовують елементи гармонійного аналізу [93-95].

Велика кількість досліджень з визначення основних характеристик процесу розповсюдження ЕМП та НДС проведено О. Р. Гачквичем та Р. С. Мусієм. Так в роботах [85;87] пропонується методика наближеного розв'язку, яка базується на зведенні ключових функцій, що описують процес поширення ЕМП і процес деформування, до однорідних граничних умов і виконанню кубічної апроксимації по товщині електропровідного шару. Наведено результати дослідження несучої здатності неферомагнітних електропровідних пластин при дії електромагнітних імпульсів. Використовуються інтегральні перетворення Фур'є і Лапласа. Отримано вирази інтегральних характеристик ключових функцій при наявності довільного неоднорідного нестационарного ЕМП.

Також застосування аналітичних підходів викладено у роботі [96] представлений метод визначення напруженого стану гнучкої сферичної оболонки, виконаної з електропровідного ортотропного матеріалу. Представлені рівняння руху оболонки відносно інтегральних силових факторів, які введені електромагнітні сили Лоренца. Також

представлені геометрично нелінійні співвідношення для переміщень і деформацій, а також рівняння стану в межах пружності. Отримана роздільна система нелінійних диференціальних рівнянь відносно, переміщень, зусиль, а так-же напруженості електричного і індукції магнітного полів. Представлені вирази для електромагнітних сил враховують, крім всього, і швидкість деформування оболонки. Подано просторово-часові розподілу електромагнітних сил і прогинів оболонки. Показано, що просторове зміна електромагнітної сили якісно відповідає характеру розподілу прогину.

У статті [97] наведено рішення нелінійної задачі магнітопружності ортотропної кільцевої пластини з урахуванням ортотропної електропровідності. Представлена повна постановка задачі магнітопружності, котра включає: рівняння Максвелла, рівняння руху, нелінійні геометричні співвідношення, а також співвідношення пружності. Наводиться роздільна система нелінійних диференціальних рівнянь, яка описує НДС гнучких кільцевих пластин з ортотропної електропровідністю, які перебувають у силовому і магнітному полях. Наведено результати розрахунків для одного варіанта пластини. Представлені просторово-часові розподілу векторних характеристик ЕМП і тензорних характеристик процесу деформування.

У статті [98] розглядаються питання деформування циліндричної оболонки змінної жорсткості в магнітному полі. Наведено визначальні диференціальні рівняння магнітопружності щодо переміщень, інтегральних силових факторів оболонки, а також інтенсивності та індукції електричного і магнітного полів. Зв'язаність задач обумовлена введенням в розв'язують рівняння електромагнітних сил. Наведено вирази для компонент електромагнітних сил, котрі залежать від швидкості деформування оболонки. Наведено окремі результати розрахунків для просторового розподілу прогинів оболонки. Визначено граничні значення індукції магнітного поля, при яких величини прогинів відповідають наведеній постановці.

Результати аналітичних розрахунків дозволяють визначити основні характеристики ЕМП для спрощених розрахункових моделей, які містять джерело ЕМП – індуктор та електропровідне тіло (провідник). Розрахункові моделі для аналітичного підходу розглядають або плоско-паралельне, або все симетричне (плоско-меридіональне) розподілення основних компонентів ЕМП, причому провідник зазвичай розглядається нескінченних розмірів.

Підсумовуючи вище сказане можна зробити висновок, що аналітичні методи розрахунку мають обмежену область застосування і з точки зору геометрії тіл, які деформуються, і з точки зору властивостей матеріалу.

Відзначимо, що аналітичний підхід до розрахунків розподілу ЕМП має обмежену область застосування, може використовуватись лише для спрощених розрахункових моделей, а одержані за

його допомогою результати слід розглядати як оціночні. Також слід відзначити труднощі, які виникають при використанні цього методу стосовно визначення границь розрахункової області. Тут є у наявності штучне обмеження розрахункової області (із умови, що на її границі ЕМП загасає), що потребує розв'язання у кожному випадку спрощеної задачі для ідеально провідного матеріалу.

Таким чином, єдиним сучасним підходом для адекватного моделювання та розрахункового аналізу розповсюдження ЕМП та викликаного цим процесом деформування електропровідних тіл є застосування чисельних методів. Для успішного застосування чисельних методів для аналізу розповсюдження ЕМП необхідна процедура зменшення числа ключових диференціальних рівнянь. Це може бути проведено із застосуванням скалярного електричного та векторного магнітного потенціалів [99].

Взагалі достатньо повну інформацію про існуючі постановки задач розповсюдження ЕМП та застосування розрахункових методів аналізу дає робота О. Д. Подольцева та І. М. Кучерявої [100]. Тут наведені математичні моделі, теоретичні положення, чисельні методи (метод скінченних різниць, метод об'ємних інтегральних рівнянь, метод граничних елементів, комбінований метод) та алгоритми розрахунку силової та теплової дії імпульсних та імпульсно-періодичних ЕМП на багатошарові пластини, металічні частинки, рідкометалеve середовище. Розглянуті можливості застосування імпульсних ЕМП у різних технологічних операціях, наведені результати чисельного моделювання електромагнітних, теплових та гідродинамічних процесів у технологічних пристроях різного спрямування.

Метод скінченних різниць [100] доволі простий у реалізації у разі провідників простої конфігурації. Тут відносно легко можна враховувати нелінійні характеристики електропровідного тіла. Складнощі виникають у разі наявності відкритої області великого об'єму, яка оточує електропровідне тіло, та якщо електромагнітні процеси характеризуються різким скін-ефектом.

Метод об'ємних інтегральних рівнянь [101] використовує інтегральне рівняння відносно густини струму, при цьому дискретизується лише область, що занята провідником, яка представляється системою контурів із струмами. Цей метод дозволяє доволі легко визначати інтегральні характеристики процесу (ємності, індуктивності, інтегральні значення електромагнітної сили). Тут задовільна точність може бути досягнута навіть у разі невеликого розбиття провідної області. До недоліків методу слід віднести обчислювальні труднощі при розрахунку локальних характеристик поля. Якщо у провідника є в наявності магнітні властивості, то невідомими вторинними джерелами поля стають також поверхневі магнітні заряди, що доволі ускладнює задачу.

Метод граничних елементів [102;103] вимагає дискретизації лише поверхні провідників, його

доцільно застосовувати у разі матеріалів із лінійними характеристиками. Недоліками цього методу є громіздкість алгоритму та великий обсяг обчислень, що викликано необхідністю розв'язувати систему інтегральних рівнянь Вольтерра за часовою змінною; великий обсяг обчислень при розрахунку компонентів поля у внутрішніх точках провідника.

Також може розглядатись комбінований метод розрахунку ЕМП [103;104], який надає можливість використання свого чисельного методу у кожній частині (підобласті) розрахункової схеми. Наприклад, у випадку провідного тіла із нелінійними характеристиками можна використовувати метод скінченних різниць, а для визначення характеристик ЕМП у необмеженій області навколо тіла разом із індуктором можна використовувати метод граничних елементів.

Взагалі, з аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що для задач термомеханіки електропровідних тіл чисельні методи, які ґрунтуються на різницеvих схемах, методи диференціальних квадратур практично не використовуються, оскільки для задач з малим параметром вони не є настільки стійкими та гнучкими в програмуванні, як числові методи варіаційного типу: Рітца, Бубнова-Гальоркіна та метод скінченних елементів (МСЕ). Останній метод використовують найчастіше, так як він є найбільш зручним в програмуванні і має багато модифікацій з допомогою сплайн-інтерполяції.

Слід відзначити, що на даний момент існує багато робіт вітчизняних та закордонних вчених, які присвячені чисельному моделюванню та аналізу розповсюдження ЕМП у різноманітних технічних та технологічних системах.

У роботах О. Д. Подольцева та інших [105-108] розглядаються сучасні підходи до моделювання процесів різної фізичної природи, що одночасно протікають в електротехнічному пристрої та визначають його робочі характеристики, – мультифізичних процесів. Представлено класифікацію мультифізичних задач в електротехніці за двома ознаками - відповідно до характеру зв'язку між різними фізичними процесами (сильно зв'язані та слабо зв'язані) і з точки зору підходів до моделювання процесів (мультифізичні польові, мультифізичні ланцюгові та коло-польові задачі). Наведено приклади, що ілюструють побудову мультифізичних моделей та їх застосування для дослідження процесів у силових кабелях і кабельних лініях, силових трансформаторах, системах індукційного нагріву і біологічних системах.

Статті [109-117] представляють інформацію про конкретні випадки математичного та чисельного моделювання розповсюдження ЕМП. Тут розглядаються випадки розрахункової оцінки електромагнітних перехідних процесів у повітряних лініях електропередачі, спричинених близькими ударами блискавки [109]. Проводиться моделювання електрокінетичного ефекту, який викликає зв'язок між

сейсмічною та електромагнітною енергіями [110]. Моделюється тривимірне електромагнітне поле при електромагнітному змішуванні розплаву сталі [111]. За допомогою векторного МСЕ моделюється перехідне ЕМП у різних середовищах [112]. Із використанням МСЕ розроблено двовимірну обчислювальну модель, що поєднує кільцеве електромагнітне перемішування з макроскопічним аналізом тепла та потоку рідини в напівтвердому шламовому препараті алюмінієвих сплавів [113]. У статті [114] обґрунтовується застосування чисельного моделювання, як важливого методу дослідження, у з'ясуванні механізму та правил розподілу електромагнітних полів під час металургійних процесів та процесів підготовки матеріалів для прогнозування, аналізу та оптимізації металургійних процесів. У роботі [115] представлено послідовний ітераційний метод одночасної дискретизації рівнянь Максвелла та рівняння теплопровідності в слабо зв'язаних системах. Алгоритм є реалізацією методу скінченного інтегрування в поєднанні з явними та неявними схемами для аналізу перехідних процесів. У роботі [116] була розроблена тривимірна розрахункова схема для моделювання електромагнітного поля в безперервному литті круглого бляма з кінцевим електромагнітним перемішуванням, і модель була перевірена з використанням вимірних даних щільності магнітного потоку в центрі мішалки. Досліджено розподіл електромагнітних сил та вплив сили і частоти струму. У статті [117] чисельно за допомогою МСЕ аналізується процес електромагнітного вигинання плоскої листової заготовки.

Слід відзначити, що підходи до математичного моделювання та чисельного розрахункового аналізу розповсюдження ЕМП та подальшого деформування у елементах технологічних систем ЕОМ (МІОМ) пройшли етапи схожі із тими, які мали місце взагалі при розвитку розрахункових методів дослідження електропровідних тіл, підданих дії ЕМП. При створенні нових технологічних операцій традиційно велику увагу приділяють аналізу деформування заготовки, для цього використовувались експериментальні дослідження, аналітичні та чисельні підходи. Основи методології вимірювань були закладені у роботах Р. Кегга, К. Хавербека, Х. Ліпмана, Х. Шрайвера, В. Пойнтон, Д. Бауера [117-120] та знайшли своє продовження у роботах Ф. – В. Баха, Д. Ріша, М. Бадельта, К. Беєрвальда, Г. Дайєна, Д. Долана [121-126].

Відзначимо, що аналітичні розрахунки не дозволяють розглядати деформування заготовки та індуктора у рамках єдиної розрахункової моделі. Про взаємний вплив, що створює деформування заготовки та індуктора у рамках технологічної операції МІОМ вперше повідомили Г. Фентон та Г. Дайєн [127]. Оскільки деформування індуктора може значною мірою впливати на характер розподілу ЕМП у просторі, то виникає нагальна потреба

використовувати чисельні методи аналізу деформування як заготовки так і індуктора.

У роботі Н. Такацу зі співавторами [128] представлено перше повністю чисельне розв'язання задачі про розповсюдження ЕМП в елементах технологічної системи МІОМ та чисельне розв'язання задачі про деформування заготовки. У цій роботі розглядались зв'язані електромагнітні та механічні поля у певні моменти часу та враховувалась залежність від швидкості деформацій у рівняннях стану. Чисельні результати були звірені із результатами експериментальних вимірів, які були зроблені за допомогою фотографій, виконаних із високою швидкістю камери. Незважаючи на ряд припущень, порівнянням чисельних і експериментальних результатів добре узгоджуються.

Д. Олівейра та М. Уорсвік [129] при дослідженні формозміни тонких листових заготовок з алюмінію за умов МІОМ поєднували можливості різних програмних комплексів для визначення просторово-часових розподілів ЕМП та для моделювання процесу деформування.

Н. Бессонов та С. Головащенко [130] провели повністю зв'язане моделювання процесу формозміни за умов ЕОМ, яке містило: визначення ЕМП на основі квазістаціонарних рівнянь Максвелла; дослідження динаміки пружно-пластичного деформування на основі модифікованої моделі пластичної плинності та із використанням критерію Мізеса початку пластичності; тепловиділення, яке аналізувалось у випадку нестационарної теплопередачі на основі закону збереження енергії. При даному моделюванні індукторна система розглядалась як ідеалізований набір опорів, індуктивностей та ємностей.

К. Карх та К. Ролл [131] навели результати дослідження цілком нестационарного ЕМП та нестационарний аналіз деформування при обжиманні трубчастих заготовок. Тут так само при визначенні ЕМП та температурного поля розглядалась еквівалентна система опір – індуктивність – ємність.

Окремі труднощі обчислювального характеру виникають у разі тривимірного моделювання нестационарних процесів розповсюдження ЕМП та аналізу НДС за умов технологічних операцій ЕОМ. Це пов'язано із необхідністю розглядати у рамках єдиної розрахункової схеми не лише індуктор та заготовку, а й оточуюче середовище. Цей факт призводить до значного зростання кількості СЕ моделі, що утруднює процес розв'язання, зважаючи на необхідність розглядати задачу у часі. Одним із шляхів подолання даної проблеми є можливість використання нерівномірного СЕ-розбиття моделі із згущеннями у області індуктора та заготовки та розрядженням у області оточуючого середовища. Одними з перших провели тривимірне моделювання швидкої магнітно-механічної поведінки М. Шіннерл зі співавторами у роботі [132], де представлено прямий багатосітковий підхід.

М. Штімер, Б. Свендсен та співавтори у роботах [133-137] представили повністю нестационарний

підхід до моделювання процесів ЕОМ із врахуванням зв'язаності ЕМП та механічних полів, обґрунтовані термомеханічні моделі процесу, представлена загальна стратегія моделювання, проведені дослідження пластичної формозміни заготовок.

Ф. Конрой зі співавторами у роботі [138] навели метод аналізу у зв'язаній постановці для дослідження технологічної операції ЕОМ із обжимання тонкостінної труби. Запропонований чисельний метод у тривимірній постановці базується на МСЕ.

У статті [139] наводяться результати чисельного моделювання процесу видавлювання тонколистових заготовок силами ЕМП. Моделювання проводиться з використанням МСЕ засобами ПК ANSYS і складається з двох етапів: моделювання розповсюдження ЕМП у заготовці і її наступного пружно-пластичне деформування. СЕ-модель містить заготовку, плоский багатовитковий індуктор і навколишнє середовище (повітря). Наведені просторово-часові розподіли векторних компонент ЕМП та тензорних компонент процесу деформування. В роботі [140] автори представили метод чисельного аналізу розподілу компонент ЕМП і електромагнітних сил при магнітно-імпульсній формозміні листових металів. Задача вирішувалася у вісесиметричній постановці за допомогою МСЕ, засобами ПК ANSYS. Створена СЕ-модель плоского багатовиткового індуктора, заготовки та навколишнього середовища. Надано просторово-часові розподіли електромагнітних сил, діючих на заготовку. Показано особливості зовнішнього ЕМП, при яких сили притягнення до індуктора превалюють над силами відштовхування.

У роботах [141;142] представлені результати чисельних і експериментальних досліджень магнітно-імпульсної формозміни тонких пластин. Порівнюються два варіанти: вільна формозміна і формозміна з амортизатором. Проведено аналіз поширення ЕМП в пластині і аналіз НДС пластини. Чисельне розв'язання проведено за допомогою МСЕ. Наводяться розподіли компонент ЕМП, електромагнітних сил і тензорних характеристик процесу деформування. У роботі [143] розглядаються питання послідовного «двох крокового» магнітно-імпульсного формоутворення циліндричних оболонок. Представлена принципова схема технологічного процесу, яка передбачає переміщення індуктора по відношенню до заготовки. Чисельний аналіз проведено засобами МСЕ, наведені розподіли електромагнітних сил, що діють на оболонку. Проаналізовано вплив параметрів струму розряду на процес деформування. У роботі [144] з використанням МСЕ досліджується магнітно-імпульсне формоутворення пластини зі сплаву магнію і алюмінієвого «супутника». Аналізується вплив параметрів зовнішнього ЕМП на процес деформування.

Моделюванню процесів формоутворення та штампування заготовок присвячені [145;146], в яких, використовуючи МСЕ, метод граничних елементів,

висвітлено особливості вирішення зв'язаних задач магніто-термопружності з урахуванням високошвидкісного деформування.

В останні роки у науковій періодиці з'являється також велика кількість статей присвячених математичному моделюванню та чисельному аналізу за умов технологічних операцій ЕОМ. Наприклад, можна назвати роботи [147-168], у яких за допомогою скінченно-елементного моделювання та розрахункового аналізу досліджуються різноманітні технологічні схеми ЕОМ. Розглядаються різні заготовки з точки зору геометрії (листові, трубчасті, коробчасті), з точки зору властивостей матеріалу (із великою провідністю та малою провідністю). Розглядаються різні варіанти технологічного оснащення (спосіб закріплення заготовки, наявність допоміжних матриць). Варіюються параметри джерела ЕМП: кількість індукторів, їх показники тощо. Представлені різні постановки задач: квазістатичні, динамічні. Розглянуті питання стосовно ступеню зв'язаності ЕМП, механічних та температурних полів.

Висновки. Електромагнітне поле (ЕМП) є невід'ємним чинником функціонування багатьох технічних систем. Вплив ЕМП на різноманітні матеріали широко використовується у технологічних процесах. Силевий вплив (за рахунок виникнення електромагнітних сил) знайшов застосування у класі технологічних операцій електромагнітна обробка матеріалів (ЕОМ). За умов технологічних операцій ЕОМ силовому впливу піддається також разом із заготовкою і джерело поля – індуктор. Рівні інтенсивності ЕМП можуть бути настільки високими, що призводять до руйнування індуктора. Таким чином, проведення відповідного моделювання та розрахункового аналізу є необхідним для проектування технологічних систем ЕОМ.

На даний час існує велика кількість моделей, які описують розповсюдження ЕМП у різноманітних середовищах та вплив (силевий, термічний) на них. Для випадку моделювання силової взаємодії ЕМП та електропровідних тіл можна використовувати добре обґрунтовані теорії магнітопружності або термомагнітопружності.

Аналітичні підходи до моделювання та розрахунків розповсюдження ЕМП та деформування електропровідних тіл мають певні обмеження, оскільки особливостями реальних прикладних задач, де розглядається силова та теплова дія ЕМП на електропровідні тіла є:

- наявність невеликих за розмірами провідників та відкритої області, що оточує ці провідники;
- великі градієнти поля у провіднику;
- наявність багатовиткового індуктора, ЕМП якого зосереджене як у робочій зоні так і за її межами.

Дані особливості потребують використання чисельних методів аналізу для моделювання та розрахунків, серед яких на сучасному етапі найбільш універсальним та ефективним є метод скінченних елементів.

Список літератури

1. Erber, Thomas. "High-energy electromagnetic conversion processes in intense magnetic fields." *Reviews of Modern Physics* 38.4 (1966): 626. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.38.626>
2. Xiong, Han, et al. "Design and analysis of an electromagnetic energy conversion device." *Sensors and Actuators A: Physical* 366 (2024): 114972. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114972>
3. Razek, Adel. "Coupled models in electromagnetic and energy conversion systems from smart theories paradigm to that of complex events: A review." *Applied Sciences* 12.9 (2022): 4675. <https://doi.org/10.3390/app12094675>
4. Yoshikawa, K., T. Noma, and Y. Yamamoto. "Direct-energy conversion from high-energy ions through interaction with electromagnetic fields." *Fusion Technology* 19.3P2A (1991): 870-875. <https://doi.org/10.13182/FST91-A29454>
5. Joshi, Narahari V. "Energy conversion from the vacuum field to electromagnetic fields." *Physics Essays* 26.1 (2013). <https://doi.org/10.4006/0836-1398-26.1.61>
6. Song, Mingzhao, et al. "Wireless power transfer based on novel physical concepts." *Nature Electronics* 4.10 (2021): 707-716. <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00658-x>
7. Xue, Guoqiang, et al. "A review of electrical and electromagnetic methods for coal mine exploration in China." *Ieee Access* 7 (2019): 177332-177341. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951774>
8. Börner, Jana H., Matthias Bär, and Klaus Spitzer. "Electromagnetic methods for exploration and monitoring of enhanced geothermal systems—a virtual experiment." *Geothermics* 55 (2015): 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.01.011>
9. Buddo, Igor, et al. "Electromagnetic surveys for petroleum exploration: challenges and prospects." *Energies* 15.24 (2022): 9646. <https://doi.org/10.3390/en15249646>
10. Logie, H. J. "Zeta: A source of thermo-nuclear power." *South African Journal of Science* 54.11 (1958): 281-287. Available at: https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA00382353_585
11. Winterberg, F. "Initiation of thermonuclear reactions by high-current electron beams." *Nuclear Fusion* 12.3 (1972): 353.. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/12/3/010>
12. Brebbia, Carlos A., ed. *Electromagnetic Applications*. Vol. 6. Springer Science & Business Media, 2012. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=2LTtCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Electromagnetic+Applications&ots=swChUafDA1&sig=vsIUYSINrkylRUjkoWT0nLKf1vk&redir_esc=y#v=onepage&q=Electromagnetic%20Applications&f=false
13. Trimarco, Carmine. "Material electromagnetic fields and material forces." *Archive of Applied Mechanics* 77 (2007): 177-184. <https://doi.org/10.1007/s00419-006-0056-2>
14. Olszewski, Stanisław. "Electrodynamics of the Joule-Lenz Law Applied to the Energy Emission Done by a Free Electron or Harmonically-Oscillating Microparticle." *Journal of Quantum Information Science* 8.3 (2018): 121-130. <https://doi.org/10.4236/jqis.2018.83008>
15. Rudnev, Valery, Don Loveless, and Raymond L. Cook. *Handbook of induction heating*. CRC press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315117485>
16. Lucia, Oscar, et al. "Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges." *IEEE Transactions on industrial electronics* 61.5 (2013): 2509-2520. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>
17. García, Álvaro, et al. "A simple model to define induction heating in asphalt mastic." *Construction and Building Materials* 31 (2012): 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.046>
18. Sadeghipour, K., J. A. Dopkin, and K. Li. "A computer aided finite element/experimental analysis of induction heating process of steel." *Computers in industry* 28.3 (1996): 195-205. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0166-3615(95)00072-0)
19. Mariani, Alberto, and Giulio Malucelli. "Insights into induction heating processes for polymeric materials: An overview of the mechanisms and current applications." *Energies* 16.11 (2023): 4535. <https://doi.org/10.3390/en16114535>
20. Bay, François, et al. "A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics." *International journal for numerical methods in engineering* 58.6 (2003): 839-867. <https://doi.org/10.1002/nme.796>
21. Ren, Zhongming, et al. "New study and development on electromagnetic field technology in metallurgical processes." *Acta Metall Sin* 56.4 (2020): 583-600. <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2019.00373>
22. Li, Jiale, et al. "Application of electromagnetic metallurgy in continuous casting: A review." *Progress in Natural Science: Materials International* 34.1 (2024): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2024.01.016>
23. Gerbeth, Gunter, Kerstin Eckert, and Stefan Odenbach. "Electromagnetic flow control in metallurgy, crystal growth and electrochemistry." *The European Physical Journal Special Topics* 220 (2013): 1-8. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01792-4>
24. Herlach, Fritz. *Strong and ultrastrong magnetic fields and their applications*. Vol. 57. 1985. <https://doi.org/10.1007/3-540-13504-9>
25. Schweitzer, Gerhard. "Introduction and survey." *Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. 1-26.
26. Bleuler, Hannes, et al. *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*. Springer Science & Business Media, 2009. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=IKyg5dWYBasC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Magnetic+bearings:+theory,+design,+and+application+to+rotating+machinery&ots=0fzGtDNHfv&sig=dc1RYcMjdwAyLYzXCQAIxEajSw&redir_esc=y#v=onepage&q=Magnetic+bearings%3A+theory,+design,+and+application+to+rotating+machinery&f=false
27. Belyi, I., S. Fertik, and L. Chimenko. "Reference book on magnetic-pulsed stamping." *Charkov, USSR* (1976).
28. Livshiz, Yuri, and Oren Gafri. "Technology and equipment for industrial use of pulse magnetic fields." *Digest of Technical Papers. 12th IEEE International Pulsed Power Conference*. (Cat. No. 99CH36358). Vol. 1. IEEE, 1999. <https://doi.org/10.1109/PPC.1999.825514>
29. Psyk, Verena, et al. "Electromagnetic forming—a review." *Journal of Materials Processing Technology* 211.5 (2011): 787-829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
30. El-Azab, Anter, Mark Garnich, and Ashish Kapoor. "Modeling of the electromagnetic forming of sheet metals: state-of-the-art and future needs." *Journal of Materials Processing Technology* 142.3 (2003): 744-754. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00615-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00615-0)
31. Mamalis and, A. G., et al. "Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments." *Appl. Mech. Rev.* 57.4 (2004): 299-324. <https://doi.org/10.1115/1.1760766>
32. Elsayed, Awab, and Mohammed Elamin. "Review of the Innovative Design of Coils for Electromagnetic Forming Process." *Int. J. Res. Eng. Sci. Manag* 3 (2020): 36-39. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Mohammed-Elamin-3/publication/345681562_Review_of_the_Innovative_Design_of_Coils_for_Electromagnetic_Forming_Process/links/5faaa4ba92851cd8c632f9c3/Review-of-the-Innovative-Design-of-Coils-for-Electromagnetic-Forming-Process.pdf
33. Du, Zhihao, et al. "Investigation of electromagnetic incremental forming of single-curvature thin-walled aluminum alloy skins." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 121.5 (2022): 3323-3335. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09490-9>
34. Feng, Fei, et al. "Multi-point die electromagnetic incremental forming for large-sized sheet metals." *Journal of Manufacturing Processes* 62 (2021): 458-470. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.022>
35. Du, Zhihao, et al. "Springback control and large skin manufacturing by high-speed vibration using electromagnetic forming." *Journal of Materials Processing Technology* 299 (2022): 117340. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117340>
36. Zhu, Chengxi, et al. "Hybrid forming process combining electromagnetic and quasi-static forming of ultra-thin titanium sheets: formability and mechanism." *International journal of machine tools and manufacture* 180 (2022): 103929. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103929>
37. Haratmeh, Hossein Ebrahimi, Alireza Fallahi Arezoodar, and Mohammad Farzin. "Numerical and experimental investigation of inward tube electromagnetic forming." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88 (2017): 1175-1185. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8826-7>
38. Batygin, Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, and Andrey V. Gnatov. "Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals—fundamentals and perspective applications." *Journal of*

- Materials Processing Technology* 213.3 (2013): 444-452. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003>
39. Batygin, Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, and Andrey V. Gnatov. "Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals." *Journal of Materials Processing Technology* 214.2 (2014): 390-401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018>
 40. Batygin, Yu. V., et al. "Analytical relations for fields and currents in magnetic-pulsed «expansion» of tubular conductors of small diameter." *Electrical Engineering & Electromechanics* 6 (2024): 67-71. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.09>
 41. Batygin, Yu. V., et al. "The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review." *Electrical Engineering & Electromechanics* 3 (2018): 43-52. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.3.06>
 42. Batygin, Yu. V., et al. "The mutual influence of exciting and induced currents in the circular solenoid-massive conductor system." *Electrical Engineering & Electromechanics* 6 (2023): 67-71. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.6.12>
 43. Batygin, Yuriy Victor. "Experimental test of the tool for the external EMF removing dents on a car body." *Int. J. Energy Power Eng* 3.4 (2014): 204-208. <https://doi.org/10.11648/j.ijeepe.20140304.14>
 44. Batygin, Yu. V., et al. "Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 2: high electrical conductance metals." *Electrical Engineering & Electromechanics* 6 (2019): 39-43. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.05>
 45. Batygin, Yu. V., E. A. Chaplygin, and S. A. Shinderuk. "An analysis of the electromagnetic processes in the inductor system--tool of the straightening of car bodies." *Electrical Engineering & Electromechanics* 2 (2015): 53-56. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.2.10>
 46. Maxwell, James Clerk. *A treatise on electricity and magnetism*. Vol. 1. Clarendon press, 1873. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=92QSAIAIAAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=A+treatise+on+electricity+and+magnetism&ots=SpVNdqkLb&sig=fK4Q5SJtNTGS90lkmQ4EfazzCtM&redir_esc=y#v=onepage&q=A%20treatise%20on%20electricity%20and%20magnetism&f=false
 47. Nefyodov, Eugene I., et al. "Boundary conditions, integral and complex forms of electrodynamics equations, classification of electromagnetic phenomena." *Electromagnetic Fields and Waves: Microwave and mmWave Engineering with Generalized Macroscopic Electrodynamics* (2019): 29-48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90847-2_2
 48. Stam, Mike, and Greg Carman. "Electrothermoelastic behavior of piezoelectric coupled cylinders." *AIChE journal* 34.8 (1996): 1612-1618. <https://doi.org/10.2514/3.13279>
 49. Pidstryhach, Ya S., et al. "Thermoelasticity of Electrically Conducting Bodies." (1977).
 50. Krawczyk, Andrzej, and John A Tegopoulos. *Numerical modelling of eddy currents*. Oxford University Press, 1993. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198593829.001.0001>
 51. Maugin, Gérard A. *Continuum mechanics of electromagnetic solids*. Elsevier, 2013. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=bgQhBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Continuum+mechanics+of+electromagnetic+solids&ots=ZE2Fp27yhs&sig=k2kTcgOayb5_JoG87A07cI3j5U0&redir_esc=y#v=onepage&q=Continuum%20mechanics%20of%20electromagnetic%20solids&f=false
 52. Moon, Francis C., and S. Chattopadhyay. "Magneto-solid mechanics." *Journal of Applied Mechanics* 53.2 (1986): 478. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1986JAM....53..478M/doi:10.1115/1.3171795
 53. Toupin, R. A. The elastic dielectric. *Journal of Rational Mechanics and Analysis* 5.6 (1956): 849-915. Available at: <http://www.jstor.org/stable/24900192>
 54. Toupin, RA153286. "A dynamical theory of elastic dielectrics." *International Journal of Engineering Science* 1.1 (1963): 101-126. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(63\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0020-7225(63)90027-2)
 55. Maugin, G. A. "Deformable dielectrics I. Field equations for a dielectric made of several molecular species." *Arch. Mech. (Poland)* 28 (1976): 676-682. Available at: https://rcin.org.pl/Content/123596/PDF/WA727_92210_P.262b-Maugin-Deformable.pdf
 56. Knopoff, L. "The interaction between elastic wave motions and a magnetic field in electrical conductors." *Journal of Geophysical Research* 60.4 (1955): 441-456. <https://doi.org/10.1029/JZ060i004p00441>
 57. Chadwick, P. "Elastic wave propagation in a magnetic field." *Proceedings of the 9th international congress of applied mechanics*. Vol. 7. 1957.
 58. Kaliski, S., and J. Petykiewicz. "Dynamical equations of motion coupled with the field of temperatures and resolving functions for elastic and inelastic anisotropic bodies in the magnetic field." *Proc. Vibr. Probl.* Vol. 1. No. 3. 1960.
 59. Dunkin, J. W., and Eringen A. C. "On the propagation of waves in an electromagnetic elastic solid." *International Journal of Engineering Science* 1.4 (1963): 461-495. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(63\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0020-7225(63)90004-1)
 60. Truesdell, Clifford, and Richard Toupin. *The classical field theories*. Springer Berlin Heidelberg, 1960. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45943-6_2
 61. Keyes, Robert W. "The effects of elastic deformation on the electrical conductivity of semiconductors." *Solid state physics*. Vol. 11. Academic Press, 1960. 149-221. [https://doi.org/10.1016/S0081-1947\(08\)60168-X](https://doi.org/10.1016/S0081-1947(08)60168-X)
 62. Michel, B. "Eringen, A. C., Mechanics of Continua. Huntington, New York, Robert E. Krieger Publ. Co. 1980. <https://doi.org/10.1002/zamm.19840640315>
 63. Freund, L. B. "The mechanics of electronic materials." *International Journal of Solids and Structures* 37.1-2 (2000): 185-196. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00087-6)
 64. Maugin, G. A. "Electromagnetic internal variables in electromagnetic continua." *Archives of Mechanics* 33.6 (1981): 927-935.
 65. Eringen, A. Cemal, and Gérard A. Maugin. *Electrodynamics of continua I: foundations and solid media*. Springer Science & Business Media, 2012. Available at: <https://books.google.com.ua/books?id=JfzUBWAAQBAJ>
 66. Hutter, Kolumban, and Alphons AF Van de Ven. "Field matter interactions in thermoelastic solids." (1978). Available at: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL7930128221>
 67. Grot, Richard A., and A. Cemal Eringen. "Relativistic continuum mechanics part I—mechanics and thermodynamics." *International Journal of Engineering Science* 4.6 (1966): 611-638. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(66\)90008-5](https://doi.org/10.1016/0020-7225(66)90008-5)
 68. Rohit, Gaurang R., Jagdish M. Prajapati, and Vikram B. Patel. "Coupling of finite element and meshfree method for structure mechanics application: A review." *International Journal of Computational Methods* 17.04 (2020): 1850151. <https://doi.org/10.1142/S0219876218501517>
 69. Moon, Parry Hiram, and Domina Eberle Spencer. *Foundations of electrodynamics*. Courier Corporation, 2013. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=9dz7AAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Foundations+of+electrodynamics&ots=2ueklGaxIx&sig=hpcDOZFsvOvcUyxix93hrypDg8&redir_esc=y#v=onepage&q=Foundations%20of%20electrodynamics&f=false
 70. Chu, Lan Jen, Hermann A. Haus, and P. Penfield. "The force density in polarizable and magnetizable fluids." *Proceedings of the IEEE* 54.7 (1966): 920-935. <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4938>
 71. Pao, Y.-H. "Electromagnetic forces in deformable continua." *In: Mechanics today. Volume 4. (A78-35706 14-70) New York* 4 (1978): 209-305.
 72. Penfield, Jr., Paul L., L. J. Chu, and Hermann A. Haus. *Electrodynamics of moving media*. Research Laboratory of Electronics (RLE) at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1963. Available at: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/53884/RLE_QPR_07_0_X.pdf
 73. Moon, Francis C., and Yih-Hsing Pao. "Magnetoelastic buckling of a thin plate." (1968): 53-58. <https://doi.org/10.1115/1.3601173>
 74. Van De Ven, A. A. F. "Magnetoelastic buckling of thin plates in a uniform transverse magnetic field." *Journal of Elasticity* 8.3 (1978): 297-312. <https://doi.org/10.1007/BF00130468>

75. Popelar, C. H. "Postbuckling analysis of a magnetoelastic beam." (1972): 207-211. <https://doi.org/10.1115/1.3422614>
76. Wallerstein, David Vandermere, and Milton Oliver Peach. "Magnetoelastic buckling of beams and thin plates of magnetically soft material." (1972): 451-455. <https://doi.org/10.1115/1.3422699>
77. Alblas, J. B. "Electro-magneto-elasticity." *Topics in Applied Continuum Mechanics: Symposium Vienna, March 1-2, 1974*. Vienna: Springer Vienna, 1974. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-4188-5_5
78. Podstrigach, Ya. S., Ya I. Burak, and V. F. Kondrat. "Magnetothermoelasticity of Electrically Conducting Bodies." (1982).
79. Moon, Francis C. "Problems in magneto-solid mechanics." In: *Mechanics today. Volume 4. (A78-35706 14-70) New York 4* (1978): 307-390. Available at: <https://1978meto....4..307M>
80. Hrytsyna, Olha, Yuriy Tokovyy, and Maryan Hrytsyna. "Local gradient theory of dielectrics incorporating polarization inertia and flexodynamic effect." *Continuum Mechanics and Thermodynamics* 35.6 (2023): 2125-2144. <https://doi.org/10.1007/s00161-023-01229-5>
81. Hrytsyna, Olha, and Vasyi Kondrat. *Local gradient theory for dielectrics: fundamentals and applications*. Jenny Stanford Publishing, 2019. <https://doi.org/10.1201/9781003006862>
82. Burak, Ya. I., V. F. Kondrat, and O. R. Hrytsyna. "Subsurface mechanoelectromagnetic phenomena in thermoelastic polarized bodies in the case of local displacements of mass." *Materials Science* 43 (2007): 449-463. <https://doi.org/10.1007/s11003-007-0054-8>
83. Kondrat, V. F., and O. R. Hrytsyna. "Mechanoelectromagnetic interaction in isotropic dielectrics with regard for the local displacement of mass." *Journal of Mathematical Sciences* 168 (2010): 688-698. <https://doi.org/10.1007/s10958-010-0019-6>
84. Hrytsyna, Olha, Yuriy Tokovyy, and Maryan Hrytsyna. "Non-classical theory of electro-thermo-elasticity incorporating local mass displacement and nonlocal heat conduction." *Mathematics and Mechanics of Solids* 29.3 (2024): 539-559. <https://doi.org/10.1177/10812865231201132>
85. Musij, R., Kh Drohomyska, and O. Oryshchyn. "Solutions of coupled problem of thermomechanics for electroconductive hollow cylinder under non-stationary electromagnetic actions." *Mathematical modeling and computing* 4, Num. 1 (2017): 69-77. Available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASPmeta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=mmc_2017_4_1_10
86. Musij, Roman. "Thermostressed Condition and Load-carrying Capacity of Non-ferromagnetic Electric Plates under the Action of Electromagnetic Pulses." *Computational problems of electrical engineering* 2, № 2 (2012): 69-78. Available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASPmeta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=CPoe_2012_2_2_14
87. Hachkevych, O. R., R. S. Musij, and N. B. Melnyk. "Mathematical Modeling of Thermoelastic Behavior of Multilayer Electroconductive Cylindrical Bodies Under Electromagnetic Pulses." *International Applied Mechanics* (2025): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10778-025-01308-x>
88. Hachkevych, Oleksandr, Roman Musij, and Nataliya Melnyk. "Problems of thermomechanics of multilayered electroconductive bodies under the action of the pulsed electromagnetic fields with modulation of amplitude." *Advances in Mechanics: Current Research Results of the NAS of Ukraine*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. 185-206. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37313-8_11
89. Hachkevych, Oleksandr, et al. "Selected Aspects of Thermomechanics of Ferrite Bodies Under Electromagnetic Actions." *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. 221-232. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54063-9_16
90. Hachkevych, O. R., R. S. Musij, and N. B. Melnyk. "Mathematical Modeling of Thermoelastic Behavior of Multilayer Electroconductive Cylindrical Bodies Under Electromagnetic Pulses." *International Applied Mechanics* (2025): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10778-025-01308-x>
91. Hachkevych, O., and R. Musij. "Mathematical modeling in thermomechanics of electroconductive bodies under the action of the pulsed electromagnetic fields with modulation of amplitude." *Mathematical modeling and computing* 6, Num. 1 (2019): 30-36. Available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASPmeta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=mmc_2019_6_1_6
92. Lotfy, Kh. "Transient disturbance in a half-space under generalized magneto-thermoelasticity with a stable internal heat source under three theories." *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* 7.1 (2011): 73-90. <https://doi.org/10.1108/15736101111141458>
93. Yarymbash, Dmytro, et al. "A new simulation approach of the electromagnetic fields in electrical machines." *2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/DT.2017.8024332>
94. Papageorgiou, C., and E. Freeman. "Electromagnetic field solution for a coil of arbitrary shape moving relative to a set of ferromagnetic layers." *IEEE Transactions on Magnetics* 17.6 (2003): 2583-2585. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1981.1061555>
95. Tegopoulos, John A., and Epameinondas E. Kriezis. "Eddy currents in linear conducting media." *Studies in electrical and electronic engineering* 16 (1985). Available at: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=8879726>
96. Mol'chenko, L. V., and I. I. Loos. "The stress state of a flexible orthotropic spherical shell subject to external current and mechanical force in a magnetic field." *International Applied Mechanics* 49.5 (2013): 528-534. Available at: <https://link.gale.com/apps/doc/A353212380/AONE?u=anon-clc7ad&sid=googleScholar&xid=d1449897>
97. Mol'chenko, L. V., and I. I. Loos. "Axisymmetric Magnetoelastic Deformation of Flexible Orthotropic Shells of Revolution with Orthotropic Conductivity." *International Applied Mechanics* 51 (2015): 434-442. <https://doi.org/10.1007/s10778-015-0704-8>
98. Mol'chenko, L. V., and I. I. Loos. "Deformation of a circular cylinder of variable stiffness in a magnetic field: Geometrically nonlinear problem formulation." *Mat. Meth. Fiz.-Mekh. Polya* 51.3 (2008): 133-138.
99. Tozoni, O. V., and I. Mayergoyz. "Calculation of three-dimensional electromagnetic fields." *Tekhnika*, Kiev (1974).
100. Подольцев, А. Д., та І. М. Кучерява. "Елементи теорії та чисельного розрахунку електромагнітних процесів у провідних середовищах." *К.: Інститут електродинаміки НАНУ* (1999).
101. Zhyltsov, Andrii, et al. "The Secondary Sources Method." *Systems, Decision and Control in Energy VI: Volume II: Power Engineering and Environmental Safety* 2 (2024): 205. Available at: <https://books.google.com/books?id=Sj4jEQAAQBAJ>
102. Zhao, Qian, et al. "Numerical approach for the sensitivity of a high-frequency magnetic induction tomography system based on boundary elements and perturbation method." *Measurement Science and Technology* 24.7 (2013): 074004. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/7/074004>
103. Pichon, L., and Adel Razek. "Hybrid finite-element method and boundary-element method using time-stepping for eddy-current calculation in axisymmetric problems." *IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation)* 136.4 (1989): 217-222. <https://doi.org/10.1049/ip-a-2.1989.0037>
104. Salon, S. J., and J. Schneider. "A hybrid finite element-boundary integral formulation of Poisson's equation." *IEEE Transactions on Magnetics* 17.6 (2003): 2574-2576. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1981.1061622>
105. Подольцев, А. Д., та І. Н. Кучерява. "Мультифізичне моделювання у електротехніці. Київ." (2015). Available at: http://library.kpi.kharkov.ua/files/new_postupleniya/mulfm.pdf
106. Podoltsev, O. D., and I. M. Kucheriava. "Multiphysics modeling of electrotechnical devices." *Technical Electrodynamics/Tekhnichna Elektrodynamika* 2 (2015): 3-15. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/136997>
107. Podoltsev, O. D., V. B. Pavlov, and O. P. Zapadynchuk. "Analysis Of The Efficiency Of Electric Power Transmission In The System

- Of Wireless Charging Of The Electric Vehicle's Battery." *Технічна електродинаміка* 4 (2021): 63-69.
108. Ramezani, Ali, and Mehdi Narimani. "Optimal design of fully integrated magnetic structure for wireless charging of electric vehicles." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 7.4 (2021): 2114-2127. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3067875>
 109. Paolone, Mario, et al. "Lightning electromagnetic field coupling to overhead lines: Theory, numerical simulations, and experimental validation." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 51.3 (2009): 532-547. <https://doi.org/10.1109/TEM.2009.2025958>
 110. Ren, Hengxin, Xiaofei Chen, and Qinghua Huang. "Numerical simulation of coseismic electromagnetic fields associated with seismic waves due to finite faulting in porous media." *Geophysical Journal International* 188.3 (2012): 925-944. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05309.x>
 111. Wang, B. X., et al. "Coupled numerical simulation on electromagnetic field and flow field in the round billet mould with electromagnetic stirring." *Ironmaking & Steelmaking* 42.1 (2015): 63-69. doi:10.1179/1743281214Y.0000000201
 112. Li, J. H., et al. "3D numerical simulation for the transient electromagnetic field excited by the central loop based on the vector finite-element method." *Journal of Geophysics and Engineering* 8.4 (2011): 560-567. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/8/4/008>
 113. Zhang, Zhifeng, et al. "Numerical simulation on electromagnetic field, flow field and temperature field in semisolid slurry preparation by A-EMS." *Rare Metals* 29 (2010): 635-641. <https://doi.org/10.1007/s12598-010-0184-2>
 114. Clemens, M., et al. "Numerical simulation of coupled transient thermal and electromagnetic fields with the finite integration method." *IEEE Transactions on Magnetics* 36.4 (2000): 1448-1452. <https://doi.org/10.1109/20.877711>
 115. Ren, Bingzhi, et al. "Numerical simulation of electromagnetic field in round bloom continuous casting with final electromagnetic stirring." *Metals* 8.11 (2018): 903. <https://doi.org/10.3390/met8110903>
 116. Cui, Xiaohui, et al. "Numerical simulation of electromagnetic sheet bulging based on FEM." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57 (2011): 127-134. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3273-y>
 117. Kegg, R. L., and K. Haverbeck. "Effect of process variables in electric discharge forming." *Annals of the CIRP* 11.3 (1962): 131-137.
 118. Lippmann, Horst Joachim, and Horst Schreiner. "Zur Physik der Metallumformung mit hohen Magnetfeldimpulsen." *International Journal of Materials Research* 55.12 (1964): 737-740. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1964-551203>
 119. Poynton, W. A., F. W. Travis, and W. Johnson. "The free radial expansion of thin cylindrical brass tubes using explosive gas mixtures." *International Journal of Mechanical Sciences* 10.5 (1968): 385-401. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(68\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0020-7403(68)90004-0)
 120. Bauer, D. "Messung der Umformkraft und der Formänderung bei der Hochgeschwindigkeitsumformung rohrförmiger Werkstücke durch magnetische Kräfte." *Bänder Bleche Rohre* 6.10 (1965): 575-577.
 121. Bach, F., et al. "Verhalten von Aluminiumwerkstoffen bei der elektromagnetischen Blechumformung." *Proc. 2. Kolloq. Elektromagnetische Umformung*. Vol. 28. 2003: 11-18.
 122. Risch, D., et al. "On the significance of the die design for electromagnetic sheet metal forming." *Proc. of the ICHSF* (2004): 191-200. Available at: <https://d-nb.info/111181015X/34#page=201>
 123. Badelt, M., et al. "Process analysis of electromagnetic sheet metal forming by online-measurement and finite element simulation." *Proceedings of the 6th International ESAFORM Conference on Material Forming*, 28.-30. April 2003, Italy. 2003: 123-126.
 124. Beerwald, C., et al. "New aspects of electromagnetic forming." *Proceedings of the 6th International Conference on the Technology of Plasticity*. Vol. 3. 1999: 2471-2476. <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.2005468>
 125. Johnson, Jason R., et al. "Coupling experiment and simulation in electromagnetic forming using photon doppler velocimetry." *steel research international* 80.5 (2009): 359-365. <https://doi.org/10.2374/SRI08SP160>
 126. Dolan, Daniel H. "Foundations of VISAR analysis." (2006). Available at: <https://www.osti.gov/biblio/886901>
 127. Fenton, Gregg K., and Glenn S. Daehn. "Modeling of electromagnetically formed sheet metal." *Journal of Materials Processing Technology* 75.1-3 (1998): 6-16. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00287-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00287-2)
 128. Takatsu, Nobuo, et al. "High-speed forming of metal sheets by electromagnetic force." *JSME international journal. Ser. 3, Vibration, control engineering, engineering for industry* 31.1 (1988): 142-148. <https://doi.org/10.1299/jsmec1988.31.142>
 129. Oliveira, D. A., and M. Worswick. "Electromagnetic forming of aluminium alloy sheet." *Journal de Physique IV (Proceedings)*. Vol. 110. EDP sciences, 2003: 293-298. <https://doi.org/10.1051/jp4:20020709>
 130. Bessonov, N., and S. Golovashchenko. "Numerical simulation of pulsed electromagnetic stamping processes." *1st International Conference on High Speed Forming, March 31, April 1, 2004, Dortmund, Germany*. Institut für Umformtechnik-Technische Universität Dortmund, 2004: 83-91. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/43057066>
 131. Karch, C., and Karl Roll. "Transient simulation of electromagnetic forming of aluminium tubes." *Advanced Materials Research* 6 (2005): 639-648. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.639>
 132. Schinnerl, M., et al. "Multigrid methods for the three-dimensional simulation of nonlinear magnetomechanical systems." *IEEE transactions on magnetics* 38.3 (2002): 1497-1511. <https://doi.org/10.1109/20.999123>
 133. Stiemer, Marcus, et al. "Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming." *International journal for numerical methods in engineering* 68.13 (2006): 1301-1328. <https://doi.org/10.1002/nme.1738>
 134. Unger, J., et al. "Multifield modeling of electromagnetic metal forming processes." *Journal of Materials Processing Technology* 177.1-3 (2006): 270-273. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.190>
 135. Stiemer, M., et al. "An arbitrary Lagrangian Eulerian approach to the three-dimensional simulation of electromagnetic forming." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 198.17-20 (2009): 1535-1547. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2009.01.014>
 136. Unger, J., et al. "Strategies for 3D simulation of electromagnetic forming processes." *Journal of materials processing technology* 199.1-3 (2008): 341-362. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.028>
 137. Svendsen, B., and T. Chanda. "Continuum thermodynamic modeling and simulation of electromagnetic metal forming." *Technische Mechanik-European Journal of Engineering Mechanics* 23.2-4 (2003): 103-112. Available at: <https://journals.ub.ovgu.de/index.php/techmech/article/view/998>
 138. Conraux, Ph, et al. "3D finite element modeling of electromagnetic forming processes." (2006): 73-82. Available at: <https://d-nb.info/110449129X/34>
 139. Cui, Xiaohui, et al. "Numerical simulation of electromagnetic sheet bulging based on FEM." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57 (2011): 127-134. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3273-y>
 140. Deng, Jianghua, et al. "Numerical simulation of magnetic flux and force in electromagnetic forming with attractive force." *Journal of materials processing technology* 184.1-3 (2007): 190-194. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.021>
 141. Liu, Xianlong, Liang Huang, and Jianjun Li. "An experiment and simulation study of the rebound effect in electromagnetic forming process." *6th International Conference on High Speed Forming, March 27th-29th 2014, Daejeon, Korea*. 2014: 131-140. Available at: <https://eldorado.tu-dortmund.de/server/api/core/bitstreams/80bb48e3-5640-4f10-96fd-243e59440291/content>
 142. Khan, Zarak, et al. "Numerical and experimental investigation of the effect of process parameters on sheet deformation during the electromagnetic forming of AA6061-T6 alloy." *Mechanical Sciences* 11.2 (2020): 329-347. <https://doi.org/10.5194/ms-11-329-2020>

143. Li, Hong-wei, et al. "Analysis of forming defects in electromagnetic incremental forming of a large-size thin-walled ellipsoid surface part of aluminum alloy." *Journal of Materials Processing Technology* 255 (2018): 703-715. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.01.024>
144. Doley, J., and S. Kore. "FEM study on electromagnetic formability of AZ31B magnesium alloy." *6th International Conference on High Speed Forming*. 2014: 273–280.
145. Вовк А., Кляйнер М. та ін. Математичне моделювання процесів імпульсного формоутворення із застосуванням різних джерел енергії та середовищ передавання // *Proceedings of the 2nd International Conference on High Speed Forming*. – 20–21 березня 2006 р., Дортмунд, Німеччина. – С. 95–101. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/.../Proceedings-of-the-2nd-international-conference-on-high-speed-forming-March-20th-21st-2006-Dortmund-Germany.pdf#page=109>
146. L'Eplattenier, Pierre, et al. "Introduction of an electromagnetism module in LS-DYNA for coupled mechanical-thermal-electromagnetic simulations." *Steel research international* 80.5 (2009): 351-358. <https://doi.org/10.2374/SRI08SP152>
147. El-Azab, Anter, Mark Garnich, and Ashish Kapoor. "Modeling of the electromagnetic forming of sheet metals: state-of-the-art and future needs." *Journal of Materials Processing Technology* 142.3 (2003): 744-754. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00615-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00615-0)
148. Oliveira, Dino A., M. J. Worswick, and M. Finn. "Simulation of electromagnetic forming of aluminum alloy sheet." *SAE transactions* (2001): 687-695. <http://www.jstor.org/stable/44699826>
149. Siddiqui, M. A., et al. "A numerical model to simulate electromagnetic sheet metal forming process." *International Journal of Material Forming* 1 (2008): 1387-1390. <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0123-z>
150. Siddiqui, M. A., et al. "A numerical model to simulate electromagnetic sheet metal forming process." *International Journal of Material Forming* 1 (2008): 1387-1390. <https://doi.org/10.3233/JAE-131653>
151. Zapata, Jose R. Alves, and François Bay. "Modeling and analysis of electromagnetic in magnetic forming processes." *IEEE Transactions on Magnetics* 52.5 (2015): 1-11. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2501758>
152. Shin, Chansun, et al. "Expansion of a low conductive metal tube by an electromagnetic forming process: finite element modeling." *Metals and Materials International* 14 (2008): 91-97. <https://doi.org/10.3365/met.mat.2008.02.091>
153. Li, Fenqiang, et al. "3D Numerical simulation method of electromagnetic forming for low conductive metals with a driver." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64 (2013): 1575-1585. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4124-1>
154. Cui, X. H., et al. "Electromagnetic incremental forming (EMIF): a novel aluminum alloy sheet and tube forming technology." *Journal of Materials Processing Technology* 214.2 (2014): 409-427. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.05.024>
155. Cao, Quanliang, et al. "Dynamic analysis of electromagnetic sheet metal forming process using finite element method." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74 (2014): 361-368. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5939-8>
156. Haratmeh, Hossein Ebrahimi, Alireza Fallahi Arezoodar, and Mohmoud Farzin. "Numerical and experimental investigation of inward tube electromagnetic forming." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88 (2017): 1175-1185. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8826-7>
157. Savadkoohian, Hossein, Alireza Fallahi Arezoodar, and Behrooz Arezoo. "Analytical and experimental study of wrinkling in electromagnetic tube compression." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93 (2017): 901-914. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0571-z>
158. Dond, Shantaram, et al. "Analysis of the variation of the discharge circuit parameters during electromagnetic forming processes." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 20 (2019): 375-382. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00029-9>
159. Cui, Xiaohui, et al. "Numerical simulation of electromagnetic sheet bulging based on FEM." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57 (2011): 127-134. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3273-y>
160. Noh, Hak-Gon, et al. "Inverse parameter estimation of the Cowper-Symonds material model for electromagnetic free bulge forming." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 17 (2016): 1483-1492. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0174-x>
161. Satonkar, Nilesh, Gopalan Venkatachalam, and Shenbaga Velu Pitchumani. "Finite element analysis of electromagnetic forming process and optimization of process parameters using RSM." *Mathematics* 12.11 (2024): 1622. <https://doi.org/10.3390/math12111622>
162. Asati, Ruchi, and S. K. Pradhan. "Two-stage Finite Element simulation to predict deformation and stresses in Electromagnetic Formed component." *Procedia Manufacturing* 12 (2017): 42-58. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.007>
163. Satonkar, Nilesh, and Venkatachalam Gopalan. "Simulation of electromagnetic forming process and optimization of geometric parameters of perforated Al sheet using RSM." *Mathematics* 11.9 (2023): 1983. <https://doi.org/10.3390/math11091983>
164. Long, Anlin, et al. "3D modeling strategies for simulating electromagnetic superposed forming processes." *International Journal of Mechanical Sciences* 138 (2018): 409-426. <https://doi.org/10.1016/j.ijsmecsci.2018.02.021>
165. Nouri, Hossein. "Development of One-Dimensional Semi-Coupled Field Electromagnetic-Thermal Model on Electromagnetic Tube Forming." *Process Integration and Optimization for Sustainability* 6.2 (2022): 471-482. <https://doi.org/10.1007/s41660-022-00225-7>
166. Li, She, and Xiangyang Cui. "Combined "mesh flow" and "re-meshing" technique for coupled magnetic-mechanical problem on electromagnetic forming process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106 (2020): 5111-5127. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04980-0>
167. Alves, José, et al. "Advancements in the Simulation of Magnetic Pulse Forming Processes with FORGE®." *Forming the Future: Proceedings of the 13th International Conference on the Technology of Plasticity*. Springer International Publishing, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75381-8_101
168. Chetry, Avinash, and Arup Nandy. "Development of coupled finite element model to investigate electromagnetic forming and simultaneous multi-point perforations of Aluminium tube." *International Journal of Material Forming* 18.1 (2025): 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12289-024-01871-7>

References (transliterated)

1. Erber, Thomas. "High-energy electromagnetic conversion processes in intense magnetic fields." *Reviews of Modern Physics* 38.4 (1966): 626. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.38.626>
2. Xiong, Han, et al. "Design and analysis of an electromagnetic energy conversion device." *Sensors and Actuators A: Physical* 366 (2024): 114972. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114972>
3. Razeq, Adel. "Coupled models in electromagnetic and energy conversion systems from smart theories paradigm to that of complex events: A review." *Applied Sciences* 12.9 (2022): 4675. <https://doi.org/10.3390/app12094675>
4. Yoshikawa, K., T. Noma, and Y. Yamamoto. "Direct-energy conversion from high-energy ions through interaction with electromagnetic fields." *Fusion Technology* 19.3P2A (1991): 870-875. <https://doi.org/10.13182/FST91-A29454>
5. Joshi, Narahari V. "Energy conversion from the vacuum field to electromagnetic fields." *Physics Essays* 26.1 (2013). <https://doi.org/10.4006/0836-1398-26.1.61>
6. Song, Mingzhao, et al. "Wireless power transfer based on novel physical concepts." *Nature Electronics* 4.10 (2021): 707-716. <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00658-x>
7. Xue, Guoqiang, et al. "A review of electrical and electromagnetic methods for coal mine exploration in China." *Ieee Access* 7 (2019): 177332-177341. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951774>
8. Börner, Jana H., Matthias Bär, and Klaus Spitzer. "Electromagnetic methods for exploration and monitoring of enhanced geothermal systems—a virtual experiment." *Geothermics* 55 (2015): 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.01.011>

9. Buddo, Igor, et al. "Electromagnetic surveys for petroleum exploration: challenges and prospects." *Energies* 15.24 (2022): 9646. <https://doi.org/10.3390/en15249646>
10. Logie, H. J. "Zeta: A source of thermo-nuclear power." *South African Journal of Science* 54.11 (1958): 281-287. Available at: https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA00382353_585
11. Winterberg, F. "Initiation of thermonuclear reactions by high-current electron beams." *Nuclear Fusion* 12.3 (1972): 353.. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/12/3/010>
12. Brebbia, Carlos A., ed. *Electromagnetic Applications*. Vol. 6. Springer Science & Business Media, 2012. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=2LTtCAAQAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Electromagnetic+Applications&ots=swChUafDA1&sig=vsIUYSINrkyLRUjkoWT0nLKflvk&redir_esc=y#v=onepage&q=Electromagnetic%20Applications&f=false
13. Trimarco, Carmine. "Material electromagnetic fields and material forces." *Archive of Applied Mechanics* 77 (2007): 177-184. <https://doi.org/10.1007/s00419-006-0056-2>
14. Olszewski, Stanisław. "Electrodynamics of the Joule-Lenz Law Applied to the Energy Emission Done by a Free Electron or Harmonically-Oscillating Microparticle." *Journal of Quantum Information Science* 8.3 (2018): 121-130. <https://doi.org/10.4236/jqis.2018.83008>
15. Rudnev, Valery, Don Lovelless, and Raymond L. Cook. *Handbook of induction heating*. CRC press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315117485>
16. Lucia, Oscar, et al. "Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges." *IEEE Transactions on industrial electronics* 61.5 (2013): 2509-2520. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>
17. Garcia, Álvaro, et al. "A simple model to define induction heating in asphalt mastic." *Construction and Building Materials* 31 (2012): 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.046>
18. Sadeghipour, K., J. A. Dopkin, and K. Li. "A computer aided finite element/experimental analysis of induction heating process of steel." *Computers in industry* 28.3 (1996): 195-205. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0166-3615(95)00072-0)
19. Mariani, Alberto, and Giulio Malucelli. "Insights into induction heating processes for polymeric materials: An overview of the mechanisms and current applications." *Energies* 16.11 (2023): 4535. <https://doi.org/10.3390/en16114535>
20. Bay, François, et al. "A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics." *International journal for numerical methods in engineering* 58.6 (2003): 839-867. <https://doi.org/10.1002/nme.796>
21. Ren, Zhongming, et al. "New study and development on electromagnetic field technology in metallurgical processes." *Acta Metall Sin* 56.4 (2020): 583-600. <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2019.00373>
22. Li, Jiale, et al. "Application of electromagnetic metallurgy in continuous casting: A review." *Progress in Natural Science: Materials International* 34.1 (2024): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2024.01.016>
23. Gerbeth, Gunter, Kerstin Eckert, and Stefan Odenbach. "Electromagnetic flow control in metallurgy, crystal growth and electrochemistry." *The European Physical Journal Special Topics* 220 (2013): 1-8. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01792-4>
24. Herlach, Fritz. *Strong and ultrastrong magnetic fields and their applications*. Vol. 57. 1985. <https://doi.org/10.1007/3-540-13504-9>
25. Schweitzer, Gerhard. "Introduction and survey." *Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. 1-26.
26. Bleuler, Hannes, et al. *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*. Springer Science & Business Media, 2009. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=1Kvg5dWvBasC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Magnetic+bearings:+theory,+design,+and+application+to+rotating+machinery&ots=0fzGtDNHfv&sig=dc1_RYcMjdWAvLYzXCQAIXEajSw&redir_esc=y#v=onepage&q=Magnetic%20bearings%3A%20theory%2C%20design%2C%20and%20applicati on%20to%20rotating%20machinery&f=false
27. Belyi, I., S. Fertik, and L. Chimenko. "Reference book on magnetic-pulsed stamping." *Charkov, USSR* (1976).
28. Livshiz, Yuri, and Oren Gafri. "Technology and equipment for industrial use of pulse magnetic fields." *Digest of Technical Papers. 12th IEEE International Pulsed Power Conference*. (Cat. No. 99CH36358). Vol. 1. IEEE, 1999. <https://doi.org/10.1109/PPC.1999.825514>
29. Psyk, Verena, et al. "Electromagnetic forming—a review." *Journal of Materials Processing Technology* 211.5 (2011): 787-829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
30. El-Azab, Anter, Mark Garnich, and Ashish Kapoor. "Modeling of the electromagnetic forming of sheet metals: state-of-the-art and future needs." *Journal of Materials Processing Technology* 142.3 (2003): 744-754. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00615-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00615-0)
31. Mamalis and, A. G., et al. "Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments." *Appl. Mech. Rev.* 57.4 (2004): 299-324. <https://doi.org/10.1115/1.1760766>
32. Elsayed, Awab, and Mohammed Elamin. "Review of the Innovative Design of Coils for Electromagnetic Forming Process." *Int. J. Res. Eng. Sci. Manag* 3 (2020): 36-39. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Mohammed-Elamin-3/publication/345681562_Review_of_the_Innovative_Design_of_Coils_for_Electromagnetic_Forming_Process/links/5faaa4ba92851cd8c632f9c3/Review-of-the-Innovative-Design-of-Coils-for-Electromagnetic-Forming-Process.pdf
33. Du, Zhihao, et al. "Investigation of electromagnetic incremental forming of single-curvature thin-walled aluminum alloy skins." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 121.5 (2022): 3323-3335. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09490-9>
34. Feng, Fei, et al. "Multi-point die electromagnetic incremental forming for large-sized sheet metals." *Journal of Manufacturing Processes* 62 (2021): 458-470. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.022>
35. Du, Zhihao, et al. "Springback control and large skin manufacturing by high-speed vibration using electromagnetic forming." *Journal of Materials Processing Technology* 299 (2022): 117340. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117340>
36. Zhu, Chengxi, et al. "Hybrid forming process combining electromagnetic and quasi-static forming of ultra-thin titanium sheets: formability and mechanism." *International journal of machine tools and manufacture* 180 (2022): 103929. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103929>
37. Haratmeh, Hossein Ebrahimi, Alireza Fallahi Arezoodar, and Mohmoud Farzin. "Numerical and experimental investigation of inward tube electromagnetic forming." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88 (2017): 1175-1185. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8826-7>
38. Batygin, Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, and Andrey V. Gnatov. "Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals—fundamentals and perspective applications." *Journal of Materials Processing Technology* 213.3 (2013): 444-452. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003>
39. Batygin, Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, and Andrey V. Gnatov. "Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals." *Journal of Materials Processing Technology* 214.2 (2014): 390-401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018>
40. Batygin, Yu. V., et al. "Analytical relations for fields and currents in magnetic-pulsed «expansion» of tubular conductors of small diameter." *Electrical Engineering & Electromechanics* 6 (2024): 67-71. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.09>
41. Batygin, Yu. V., et al. "The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review." *Electrical Engineering & Electromechanics* 3 (2018): 43-52. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.3.06>
42. Batygin, Yu. V., et al. "The mutual influence of exciting and induced currents in the circular solenoid–massive conductor system." *Electrical Engineering & Electromechanics* 6 (2023): 67-71. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.6.12>
43. Batygin, Yuriy Victor. "Experimental test of the tool for the external EMF removing dents on a car body." *Int. J. Energy Power Eng* 3.4 (2014): 204-208. <https://doi.org/10.11648/j.ijepe.20140304.14>
44. Batygin, Yu. V., et al. "Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 2: high electrical conductance metals." *Electrical Engineering & Electromechanics* 6 (2019): 39-43. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.05>

45. Batygin, Yu. V., E. A. Chaplygin, and S. A. Shinderuk. "An analysis of the electromagnetic processes in the inductor system--tool of the straightening of car bodies." *Electrical Engineering & Electromechanics* 2 (2015): 53-56. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.2.10>
46. Maxwell, James Clerk. *A treatise on electricity and magnetism*. Vol. 1. Clarendon press, 1873. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=92QSAIAAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=A+treatise+on+electricity+and+magnetism+&ots=SpVNdqkLb&sig=Fk4Q5SJtNTGS90lkmQ4EfazzCtM&redir_esc=y#v=onepage&q=A%20treatise%20on%20electricity%20and%20magnetism&f=false
47. Nefyodov, Eugene I., et al. "Boundary conditions, integral and complex forms of electrodynamics equations, classification of electromagnetic phenomena." *Electromagnetic Fields and Waves: Microwave and mmWave Engineering with Generalized Macroscopic Electrodynamics* (2019): 29-48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90847-2_2
48. Stam, Mike, and Greg Carman. "Electrothermoelastic behavior of piezoelectric coupled cylinders." *AIAA journal* 34.8 (1996): 1612-1618. <https://doi.org/10.2514/3.13279>
49. Pidstryhach, Ya S., et al. "Thermoelasticity of Electrically Conducting Bodies." (1977).
50. Krawczyk, Andrzej, and John A. Tegopoulos. *Numerical modelling of eddy currents*. Oxford University Press, 1993. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198593829.001.0001>
51. Maugin, Gérard A. *Continuum mechanics of electromagnetic solids*. Elsevier, 2013. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=bgQhBQAQB&oi=fnd&pg=PP1&dq=Continuum+mechanics+of+electromagnetic+solids&ots=ZE2Fp27yhs&sig=k2kTcgOayb5_JoG87A07cI3j5U0&redir_esc=y#v=onepage&q=Continuum%20mechanics%20of%20electromagnetic%20solids&f=false
52. Moon, Francis C., and S. Chattopadhyay. "Magneto-solid mechanics." *Journal of Applied Mechanics* 53.2 (1986): 478. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1986JAM....53..478M/doi:10.1115/1.3171795
53. Toupin, R. A. The elastic dielectric. *Journal of Rational Mechanics and Analysis* 5.6 (1956): 849-915. Available at: <http://www.jstor.org/stable/24900192>
54. Toupin, RA153286. "A dynamical theory of elastic dielectrics." *International Journal of Engineering Science* 1.1 (1963): 101-126. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(63\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0020-7225(63)90027-2)
55. Maugin, G. A. "Deformable dielectrics I. Field equations for a dielectric made of several molecular species." *Arch. Mech. (Poland)* 28 (1976): 676-682. Available at: https://rcin.org.pl/Content/123596/PDF/WA727_92210_P.262b-Maugin-Deformable.pdf
56. Knopoff, L. "The interaction between elastic wave motions and a magnetic field in electrical conductors." *Journal of Geophysical Research* 60.4 (1955): 441-456. <https://doi.org/10.1029/JZ060i004p00441>
57. Chadwick, P. "Elastic wave propagation in a magnetic field." *Proceedings of the 9th international congress of applied mechanics*. Vol. 7. 1957.
58. Kaliski, S., and J. Petykiewicz. "Dynamical equations of motion coupled with the field of temperatures and resolving functions for elastic and inelastic anisotropic bodies in the magnetic field." *Proc. Vib. Probl.* Vol. 1. No. 3. 1960.
59. Dunkin, J. W., and Eringen A. C. "On the propagation of waves in an electromagnetic elastic solid." *International Journal of Engineering Science* 1.4 (1963): 461-495. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(63\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0020-7225(63)90004-1)
60. Truesdell, Clifford, and Richard Toupin. *The classical field theories*. Springer Berlin Heidelberg, 1960. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45943-6_2
61. Keyes, Robert W. "The effects of elastic deformation on the electrical conductivity of semiconductors." *Solid state physics*. Vol. 11. Academic Press, 1960. 149-221. [https://doi.org/10.1016/S0081-1947\(08\)60168-X](https://doi.org/10.1016/S0081-1947(08)60168-X)
62. Michel, B. "Eringen, A. C., Mechanics of Continua. Huntington, New York, Robert E. Krieger Publ. Co. 1980. <https://doi.org/10.1002/zamm.19840640315>
63. Freund, L. B. "The mechanics of electronic materials." *International Journal of Solids and Structures* 37.1-2 (2000): 185-196. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00087-6)
64. Maugin, G. A. "Electromagnetic internal variables in electromagnetic continua." *Archives of Mechanics* 33.6 (1981): 927-935.
65. Eringen, A. Cemal, and Gérard A. Maugin. *Electrodynamics of continua I: foundations and solid media*. Springer Science & Business Media, 2012. Available at: <https://books.google.com.ua/books?id=JfzUBWAAQBAJ>
66. Hutter, Kolumban, and Alphons A. F. Van de Ven. "Field matter interactions in thermoelastic solids." (1978). Available at: http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL_AL7930128221
67. Grot, Richard A., and A. Cemal Eringen. "Relativistic continuum mechanics part I—mechanics and thermodynamics." *International Journal of Engineering Science* 4.6 (1966): 611-638. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(66\)90008-5](https://doi.org/10.1016/0020-7225(66)90008-5)
68. Rohit, Gaurang R., Jagdish M. Prajapati, and Vikram B. Patel "Coupling of finite element and meshfree method for structure mechanics application: A review." *International Journal of Computational Methods* 17.04 (2020): 1850151. <https://doi.org/10.1142/S0219876218501517>
69. Moon, Parry Hiram, and Domina Eberle Spencer. *Foundations of electrodynamics*. Courier Corporation, 2013. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=9dz7AAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Foundations+of+electrodynamics&ots=2ueklGaxIx&sig=hpcDOZFsvovcUyxix93hrypDg8&redir_esc=y#v=onepage&q=Foundations%20of%20electrodynamics&f=false
70. Chu, Lan Jen, Hermann A. Haus, and P. Penfield. "The force density in polarizable and magnetizable fluids." *Proceedings of the IEEE* 54.7 (1966): 920-935. <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.4938>
71. Pao, Y.-H. "Electromagnetic forces in deformable continua." In: *Mechanics today. Volume 4. (A78-35706 14-70) New York* 4 (1978): 209-305.
72. Penfield Jr, Paul L., L. J. Chu, and Hermann A. Haus. *Electrodynamics of moving media*. Research Laboratory of Electronics (RLE) at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1963. Available at: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/53884/RLE_QPR_07_0_X.pdf?
73. Moon, Francis C., and Yih-Hsing Pao. "Magnetoelastic buckling of a thin plate." (1968): 53-58. <https://doi.org/10.1115/1.3601173>
74. Van De Ven, A. A. F. "Magnetoelastic buckling of thin plates in a uniform transverse magnetic field." *Journal of Elasticity* 8.3 (1978): 297-312. <https://doi.org/10.1007/BF00130468>
75. Popelar, C. H. "Postbuckling analysis of a magnetoelastic beam." (1972): 207-211. <https://doi.org/10.1115/1.3422614>
76. Wallerstein, David Vandermere, and Milton Oliver Peach. "Magnetoelastic buckling of beams and thin plates of magnetically soft material." (1972): 451-455. <https://doi.org/10.1115/1.3422699>
77. Alblas, J. B. "Electro-magneto-elasticity." *Topics in Applied Continuum Mechanics: Symposium Vienna, March 1-2, 1974*. Vienna: Springer Vienna, 1974. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-4188-5_5
78. Podstrigach, Ya. S., Ya I. Burak, and V. F. Kondrat. "Magnetoelastothermoelasticity of Electrically Conducting Bodies." (1982).
79. Moon, Francis C. "Problems in magneto-solid mechanics." In: *Mechanics today. Volume 4. (A78-35706 14-70) New York* 4 (1978): 307-390. Available at: <https://1978meto....4..307M>
80. Hrytsyna, Olha, Yuriy Tokovyy, and Maryan Hrytsyna. "Local gradient theory of dielectrics incorporating polarization inertia and flexodynamic effect." *Continuum Mechanics and Thermodynamics* 35.6 (2023): 2125-2144. <https://doi.org/10.1007/s00161-023-01229-5>
81. Hrytsyna, Olha, and Vasyl Kondrat. *Local gradient theory for dielectrics: fundamentals and applications*. Jenny Stanford Publishing, 2019. <https://doi.org/10.1201/9781003006862>
82. Burak, Ya. I., V. F. Kondrat, and O. R. Hrytsyna. "Subsurface mechano-electromagnetic phenomena in thermoelastic polarized bodies in the case of local displacements of mass." *Materials*

- Science* 43 (2007): 449-463. <https://doi.org/10.1007/s11003-007-0054-8>
83. Kondrat, V. F., and O. R. Hrytsyna. "Mechanoelectromagnetic interaction in isotropic dielectrics with regard for the local displacement of mass." *Journal of Mathematical Sciences* 168 (2010): 688-698. <https://doi.org/10.1007/s10958-010-0019-6>
 84. Hrytsyna, Olha, Yuriy Tokovy, and Maryan Hrytsyna. "Non-classical theory of electro-thermo-elasticity incorporating local mass displacement and nonlocal heat conduction." *Mathematics and Mechanics of Solids* 29.3 (2024): 539-559. <https://doi.org/10.1177/10812865231201132>
 85. Musij, R., Kh. Drohomyska, and O. Oryshchyn. "Solutions of coupled problem of thermomechanics for electroconductive hollow cylinder under non-stationary electromagnetic actions." *Mathematical modeling and computing* 4, Num. 1 (2017): 69-77. Available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASPmeta&C21COM=S&S21P03=FILE=&S21STR=mmc_2017_4_1_10
 86. Musiy, Roman. "Thermostressed Condition and Load-carrying Capacity of Non-ferromagnetic Electric Plates under the Action of Electromagnetic Pulses." *Computational problems of electrical engineering* 2, № 2 (2012): 69-78. Available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASPmeta&C21COM=S&S21P03=FILE=&S21STR=CPoe_2012_2_2_14
 87. Hachkevych, O. R., R. S. Musii, and N. B. Melnyk. "Mathematical Modeling of Thermoelastic Behavior of Multilayer Electroconductive Cylindrical Bodies Under Electromagnetic Pulses." *International Applied Mechanics* (2025): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10778-025-01308-x>
 88. Hachkevych, Oleksandr, Roman Musii, and Nataliya Melnyk. "Problems of thermomechanics of multilayered electroconductive bodies under the action of the pulsed electromagnetic fields with modulation of amplitude." *Advances in Mechanics: Current Research Results of the NAS of Ukraine*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. 185-206. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37313-8_11
 89. Hachkevych, Oleksandr, et al. "Selected Aspects of Thermomechanics of Ferrite Bodies Under Electromagnetic Actions." *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. 221-232. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54063-9_16
 90. Hachkevych, O. R., R. S. Musii, and N. B. Melnyk. "Mathematical Modeling of Thermoelastic Behavior of Multilayer Electroconductive Cylindrical Bodies Under Electromagnetic Pulses." *International Applied Mechanics* (2025): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10778-025-01308-x>
 91. Hachkevych, O., and R. Musij. "Mathematical modeling in thermomechanics of electroconductive bodies under the action of the pulsed electromagnetic fields with modulation of amplitude." *Mathematical modeling and computing* 6, Num. 1 (2019): 30-36. Available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASPmeta&C21COM=S&S21P03=FILE=&S21STR=mmc_2019_6_1_6
 92. Lotfy, Kh. "Transient disturbance in a half-space under generalized magneto-thermoelasticity with a stable internal heat source under three theories." *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* 7.1 (2011): 73-90. <https://doi.org/10.1108/15736101111141458>
 93. Yarymbash, Dmytro, et al. "A new simulation approach of the electromagnetic fields in electrical machines." *2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/DT.2017.8024332>
 94. Papageorgiou, C., and E. Freeman. "Electromagnetic field solution for a coil of arbitrary shape moving relative to a set of ferromagnetic layers." *IEEE Transactions on Magnetics* 17.6 (2003): 2583-2585. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1981.1061555>
 95. Tegopoulos, John A., and Epameinondas E. Kriezis. "Eddy currents in linear conducting media." *Studies in electrical and electronic engineering* 16 (1985). Available at: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=8879726>
 96. Mol'chenko, L. V., and I. I. Loos. "The stress state of a flexible orthotropic spherical shell subject to external current and mechanical force in a magnetic field." *International Applied Mechanics* 49.5 (2013): 528-534. Available at: <https://link.gale.com/apps/doc/A353212380/AONE?u=anon~c1c7ad&sid=googleScholar&id=d1449897>
 97. Mol'chenko, L. V., and I. I. Loos. "Axisymmetric Magnetoelastic Deformation of Flexible Orthotropic Shells of Revolution with Orthotropic Conductivity." *International Applied Mechanics* 51 (2015): 434-442. <https://doi.org/10.1007/s10778-015-0704-8>
 98. Mol'chenko, L. V., and I. I. Loos. "Deformation of a circular cylinder of variable stiffness in a magnetic field: Geometrically nonlinear problem formulation." *Mat. Meth. Fiz.-Mekh. Polya* 51.3 (2008): 133-138.
 99. Tozoni, O. V., and I. Mayergoyz. "Calculation of three-dimensional electromagnetic fields." *Tekhnika, Kiev* (1974).
 100. Podol'cev A. D., Kucheryava I. M. Elementy teorii i chislenogo analiza elektromagnitnykh processov v provodyaschikh sredakh [Elements of the theory and numerical calculation of electromagnetic processes in conducting media]. K: Instytut elektrodynamiky NANU (1999).
 101. Zhytsov, Andrii, et al. "The Secondary Sources Method." *Systems, Decision and Control in Energy VI: Volume II: Power Engineering and Environmental Safety* 2 (2024): 205. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=Sj4jEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA205&dq=The+method+of+secondary+sources+in+electrical+engineering&ots=aiWwZIJYLX&sig=W7PSs6KOikIYcCSPYLBKB_Ru97Q&redir_esc=y#v=onepage&q=The%20method%20of%20secondary%20sources%20in%20electrical%20engineering&f=false
 102. Zhao, Qian, et al. "Numerical approach for the sensitivity of a high-frequency magnetic induction tomography system based on boundary elements and perturbation method." *Measurement Science and Technology* 24.7 (2013): 074004. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/7/074004>
 103. Pichon, L., and Adel Razek. "Hybrid finite-element method and boundary-element method using time-stepping for eddy-current calculation in axisymmetric problems." *IEEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation)* 136.4 (1989): 217-222. <https://doi.org/10.1049/ip-a-2.1989.0037>
 104. Salon, S. J., and J. Schneider. "A hybrid finite element-boundary integral formulation of Poisson's equation." *IEEE Transactions on Magnetics* 17.6 (2003): 2574-2576. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1981.1061622>
 105. Podol'cev, A. D., I. M. Kucheryava. "Mul'tyfizychnye modelyuvannya u elektrotekhnici [Multiphysics modeling in electrical engineering]. Kyiv." (2015). Available at: http://library.kpi.kharkov.ua/files/new_postupleniya/mul'fmo.pdf
 106. Podoltsev, O. D., and I. M. Kucheriava. "Multiphysics modeling of electrotechnical devices." *Technical Electrodynamics/Tekhnichna Elektrodynamika* 2 (2015): 3-15. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/136997>
 107. Podoltsev, O. D., V. B. Pavlov, and O. P. Zapadnychuk. "Analysis Of The Efficiency Of Electric Power Transmission In The System Of Wireless Charging Of The Electric Vehicle's Battery." *Technical Electrodynamics/Tekhnichna Elektrodynamika* 4 (2021): 63-69.
 108. Ramezani, Ali, and Mehdi Narimani. "Optimal design of fully integrated magnetic structure for wireless charging of electric vehicles." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 7.4 (2021): 2114-2127. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3067875>
 109. Paolone, Mario, et al. "Lightning electromagnetic field coupling to overhead lines: Theory, numerical simulations, and experimental validation." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 51.3 (2009): 532-547. <https://doi.org/10.1109/TEM.2009.2025958>
 110. Ren, Hengxin, Xiaofei Chen, and Qinghua Huang. "Numerical simulation of coseismic electromagnetic fields associated with seismic waves due to finite faulting in porous media." *Geophysical Journal International* 188.3 (2012): 925-944. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05309.x>
 111. Wang, B. X., et al. "Coupled numerical simulation on electromagnetic field and flow field in the round billet mould with

- electromagnetic stirring." *Ironmaking & Steelmaking* 42.1 (2015): 63-69. doi:[10.1179/1743281214Y.0000000201](https://doi.org/10.1179/1743281214Y.0000000201)
112. Li, J. H., et al. "3D numerical simulation for the transient electromagnetic field excited by the central loop based on the vector finite-element method." *Journal of Geophysics and Engineering* 8.4 (2011): 560-567. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/8/4/008>
 113. Zhang, Zhifeng, et al. "Numerical simulation on electromagnetic field, flow field and temperature field in semisolid slurry preparation by A-EMS." *Rare Metals* 29 (2010): 635-641. <https://doi.org/10.1007/s12598-010-0184-2>
 114. Clemens, M., et al. "Numerical simulation of coupled transient thermal and electromagnetic fields with the finite integration method." *IEEE Transactions on Magnetics* 36.4 (2000): 1448-1452. <https://doi.org/10.1109/20.877711>
 115. Ren, Bingzhi, et al. "Numerical simulation of electromagnetic field in round bloom continuous casting with final electromagnetic stirring." *Metals* 8.11 (2018): 903. <https://doi.org/10.3390/met8110903>
 116. Cui, Xiaohui, et al. "Numerical simulation of electromagnetic sheet bulging based on FEM." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57 (2011): 127-134. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3273-y>
 117. Kegg, R. L., and K. Haverbeck. "Effect of process variables in electric discharge forming." *Annals of the CIRP* 11.3 (1962): 131-137.
 118. Lippmann, Horst Joachim, and Horst Schreiner. "Zur Physik der Metallumformung mit hohen Magnetfeldimpulsen." *International Journal of Materials Research* 55.12 (1964): 737-740. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1964-551203>
 119. Poynton, W. A., F. W. Travis, and W. Johnson. "The free radial expansion of thin cylindrical brass tubes using explosive gas mixtures." *International Journal of Mechanical Sciences* 10.5 (1968): 385-401. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(68\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0020-7403(68)90004-0)
 120. Bauer, D. "Messung der Umformkraft und der Formänderung bei der Hochgeschwindigkeitsumformung rohrförmiger Werkstücke durch magnetische Kräfte." *Bänder Bleche Rohre* 6.10 (1965): 575-577.
 121. Bach, F., et al. "Verhalten von Aluminiumwerkstoffen bei der elektromagnetischen Blechumformung." *Proc. 2. Kolloq. Elektromagnetische Umformung*. Vol. 28. 2003: 11-18.
 122. Risch, D., et al. "On the significance of the die design for electromagnetic sheet metal forming." *Proc. of the ICHSF* (2004): 191-200. Available at: <https://d-nb.info/111181015X/34#page=201>
 123. Badelt, M., et al. "Process analysis of electromagnetic sheet metal forming by online-measurement and finite element simulation." *Proceedings of the 6th International ESAFORM Conference on Material Forming*, 28.-30. April 2003, Italy. 2003: 123-126.
 124. Beerwald, C., et al. "New aspects of electromagnetic forming." *Proceedings of the 6th International Conference on the Technology of Plasticity*. Vol. 3. 1999: 2471-2476. <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.2005468>
 125. Johnson, Jason R., et al. "Coupling experiment and simulation in electromagnetic forming using photon doppler velocimetry." *steel research international* 80.5 (2009): 359-365. <https://doi.org/10.2374/SRI08SP160>
 126. Dolan, Daniel H. "Foundations of VISAR analysis." (2006). Available at: <https://www.osti.gov/biblio/886901>
 127. Fenton, Gregg K., and Glenn S. Daehn. "Modeling of electromagnetically formed sheet metal." *Journal of Materials Processing Technology* 75.1-3 (1998): 6-16. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00287-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00287-2)
 128. Takatsu, Nobuo, et al. "High-speed forming of metal sheets by electromagnetic force." *JSME international journal. Ser. 3, Vibration, control engineering, engineering for industry* 31.1 (1988): 142-148. <https://doi.org/10.1299/jsmec1988.31.142>
 129. Oliveira, D. A., and M. Worswick. "Electromagnetic forming of aluminium alloy sheet." *Journal of Physique IV (Proceedings)*. Vol. 110. EDP sciences, 2003: 293-298. <https://doi.org/10.1051/jp4:20020709>
 130. Bessonov, N., and S. Golovashchenko. "Numerical simulation of pulsed electromagnetic stamping processes." *1st International Conference on High Speed Forming, March 31, April 1, 2004, Dortmund, Germany*. Institut für Umformtechnik-Technische Universität Dortmund, 2004: 83-91. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/43057066>
 131. Karch, C., and Karl Roll. "Transient simulation of electromagnetic forming of aluminium tubes." *Advanced Materials Research* 6 (2005): 639-648. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.639>
 132. Schinnerl, M., et al. "Multigrid methods for the three-dimensional simulation of nonlinear magnetomechanical systems." *IEEE transactions on magnetics* 38.3 (2002): 1497-1511. <https://doi.org/10.1109/20.999123>
 133. Stieme, Marcus, et al. "Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming." *International journal for numerical methods in engineering* 68.13 (2006): 1301-1328. <https://doi.org/10.1002/nme.1738>
 134. Unger, J., et al. "Multifield modeling of electromagnetic metal forming processes." *Journal of Materials Processing Technology* 177.1-3 (2006): 270-273. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.190>
 135. Stieme, M., et al. "An arbitrary Lagrangian Eulerian approach to the three-dimensional simulation of electromagnetic forming." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 198.17-20 (2009): 1535-1547. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2009.01.014>
 136. Unger, J., et al. "Strategies for 3D simulation of electromagnetic forming processes." *Journal of materials processing technology* 199.1-3 (2008): 341-362. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.028>
 137. Svendsen, B., and T. Chanda. "Continuum thermodynamic modeling and simulation of electromagnetic metal forming." *Technische Mechanik-European Journal of Engineering Mechanics* 23.2-4 (2003): 103-112. Available at: <https://journals.ub.ovgu.de/index.php/techmech/article/view/998>
 138. Conraux, Ph, et al. "3D finite element modeling of electromagnetic forming processes." (2006): 73-82. Available at: <https://d-nb.info/110449129X/34>
 139. Cui, Xiaohui, et al. "Numerical simulation of electromagnetic sheet bulging based on FEM." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57 (2011): 127-134. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3273-y>
 140. Deng, Jianghua, et al. "Numerical simulation of magnetic flux and force in electromagnetic forming with attractive force." *Journal of materials processing technology* 184.1-3 (2007): 190-194. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.021>
 141. Liu, Xianlong, Liang Huang, and Jianjun Li. "An experiment and simulation study of the rebound effect in electromagnetic forming process." *6th International Conference on High Speed Forming, March 27th-29th 2014, Daejeon, Korea*. 2014: 131-140. Available at: <https://eldorado.tu-dortmund.de/server/api/core/bitstreams/80bb48e3-5640-4f10-96fd-243e59440291/content>
 142. Khan, Zarak, et al. "Numerical and experimental investigation of the effect of process parameters on sheet deformation during the electromagnetic forming of AA6061-T6 alloy." *Mechanical Sciences* 11.2 (2020): 329-347. <https://doi.org/10.5194/ms-11-329-2020>
 143. Li, Hong-wei, et al. "Analysis of forming defects in electromagnetic incremental forming of a large-size thin-walled ellipsoid surface part of aluminum alloy." *Journal of Materials Processing Technology* 255 (2018): 703-715. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.01.024>
 144. Doley, J., and S. Kore. "FEM study on electromagnetic formability of AZ31B magnesium alloy." *6th International Conference on High Speed Forming*. 2014: 273-280.
 145. Vovk, A., et al. "Mathematical modeling of impulsive forming processes using various energy sources and transmitting medium." (2006): 95-101. Available at: <https://www.researchgate.net/.../Proceedings-of-the-2nd-international-conference-on-high-speed-forming-March-20th-21st-2006-Dortmund-Germany.pdf#page=109>
 146. L'Eplattenier, Pierre, et al. "Introduction of an electromagnetism module in LS-DYNA for coupled mechanical-thermal-electromagnetic simulations." *Steel research international* 80.5 (2009): 351-358. <https://doi.org/10.2374/SRI08SP152>

- 147.El-Azab, Anter, Mark Garnich, and Ashish Kapoor. "Modeling of the electromagnetic forming of sheet metals: state-of-the-art and future needs." *Journal of Materials Processing Technology* 142.3 (2003): 744-754. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00615-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00615-0)
- 148.Oliveira, Dino A., M. J. Worswick, and M. Finn. "Simulation of electromagnetic forming of aluminum alloy sheet." *SAE transactions* (2001): 687-695. <http://www.jstor.org/stable/44699826>
- 149.Siddiqui, M. A., et al. "A numerical model to simulate electromagnetic sheet metal forming process." *International Journal of Material Forming* 1 (2008): 1387-1390. <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0123-z>
- 150.Siddiqui, M. A., et al. "A numerical model to simulate electromagnetic sheet metal forming process." *International Journal of Material Forming* 1 (2008): 1387-1390. <https://doi.org/10.3233/JAE-131653>
- 151.Zapata, Jose R. Alves, and François Bay. "Modeling and analysis of electromagnetic forming processes." *IEEE Transactions on Magnetics* 52.5 (2015): 1-11. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2501758>
- 152.Shin, Chansun, et al. "Expansion of a low conductive metal tube by an electromagnetic forming process: finite element modeling." *Metals and Materials International* 14 (2008): 91-97. <https://doi.org/10.3365/met.mat.2008.02.091>
- 153.Li, Fenqiang, et al. "3D Numerical simulation method of electromagnetic forming for low conductive metals with a driver." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64 (2013): 1575-1585. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4124-1>
- 154.Cui, X. H., et al. "Electromagnetic incremental forming (EMIF): a novel aluminum alloy sheet and tube forming technology." *Journal of Materials Processing Technology* 214.2 (2014): 409-427. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.05.024>
- 155.Cao, Quanliang, et al. "Dynamic analysis of electromagnetic sheet metal forming process using finite element method." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74 (2014): 361-368. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5939-8>
- 156.Haratmeh, Hossein Ebrahimi, Alireza Fallahi Arezoodar, and Mahmoud Farzin. "Numerical and experimental investigation of inward tube electromagnetic forming." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88 (2017): 1175-1185. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8826-7>
- 157.Savadkoohian, Hossein, Alireza Fallahi Arezoodar, and Behrooz Arezoo. "Analytical and experimental study of wrinkling in electromagnetic tube compression." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93 (2017): 901-914. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0571-z>
- 158.Dond, Shantaram, et al. "Analysis of the variation of the discharge circuit parameters during electromagnetic forming processes." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 20 (2019): 375-382. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00029-9>
- 159.Cui, Xiaohui, et al. "Numerical simulation of electromagnetic sheet bulging based on FEM." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57 (2011): 127-134. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3273-y>
- 160.Noh, Hak-Gon, et al. "Inverse parameter estimation of the Cowper-Symonds material model for electromagnetic free bulge forming." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 17 (2016): 1483-1492. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0174-x>
- 161.Satonkar, Nilesh, Gopalan Venkatachalam, and Shenbaga Velu Pitchumani. "Finite element analysis of electromagnetic forming process and optimization of process parameters using RSM." *Mathematics* 12.11 (2024): 1622. <https://doi.org/10.3390/math12111622>
- 162.Asati, Ruchi, and S. K. Pradhan. "Two-stage Finite Element simulation to predict deformation and stresses in Electromagnetic Formed component." *Procedia Manufacturing* 12 (2017): 42-58. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.007>
- 163.Satonkar, Nilesh, and Venkatachalam Gopalan. "Simulation of electromagnetic forming process and optimization of geometric parameters of perforated Al sheet using RSM." *Mathematics* 11.9 (2023): 1983. <https://doi.org/10.3390/math11091983>
- 164.Long, Anlin, et al. "3D modeling strategies for simulating electromagnetic superposed forming processes." *International Journal of Mechanical Sciences* 138 (2018): 409-426. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.02.021>
- 165.Nouri, Hossein. "Development of One-Dimensional Semi-Coupled Field Electromagnetic-Thermal Model on Electromagnetic Tube Forming." *Process Integration and Optimization for Sustainability* 6.2 (2022): 471-482. <https://doi.org/10.1007/s41660-022-00225-7>
- 166.Li, She, and Xiangyang Cui. "Combined "mesh flow" and "remeshing" technique for coupled magnetic-mechanical problem on electromagnetic forming process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106 (2020): 5111-5127. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04980-0>
- 167.Alves, José, et al. "Advancements in the Simulation of Magnetic Pulse Forming Processes with FORGE®." *Forming the Future: Proceedings of the 13th International Conference on the Technology of Plasticity*. Springer International Publishing, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75381-8_101
- 168.Chetry, Avinash, and Arup Nandy. "Development of coupled finite element model to investigate electromagnetic forming and simultaneous multi-point perforations of Aluminium tube." *International Journal of Material Forming* 18.1 (2025): 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12289-024-01871-7>

Надійшла (received) 17.05.2025

Прийнята до друку (accepted) 01.09.2025

Опублікована (published) 03.09.2025

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Барбін Костянтин Андрійович (Barbin Kostiantyn) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; м. Харків, Україна; тел.: (057)707-68-79; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1152-4950>; e-mail: kostiantyn.barbin@infiz.khpi.edu.ua

Лавінський Денис Володимирович (Lavinsky Denys) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теоретична механіка та опір матеріалів»; м. Харків, Україна; тел. +380 (50) 5664292; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-3131>; e-mail: Denys.Lavinskyi@khpi.edu.ua