

УДК 621.318.4

РЕТРОСПЕКТИВА ТЕХНОЛОГІЙ, ЩО ВІДНОВЛЮЮТЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

Ю.В. Батигін, проф., д.т.н., Є.О. Чаплигін, доц., к.т.н.,
С.О. Шиндерук, ст. викл., к.т.н., В.В. Мордік, студ., О.М. Лади́ка, студ.,
О.В. Оболя́нська, студ., ХНАДУ

Анотація. Простежено тенденцію розвитку технологій, що відновлюють на базі енергії електромагнітних полів. Відзначено новітні розробки в технології зовнішнього безконтактного магнітно-імпульсного рихтування та їх технологічні можливості. Розглянуто принципи дії їх основного обладнання та позначена область його застосування.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, низькочастотне поле, індуктор, масивний провідник, вихрові струми.

РЕТРОСПЕКТИВА ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Ю.В. Батыгин, проф., д.т.н., Е.А. Чаплыгин, доц., к.т.н.,
С.А. Шиндерук ст. пр., к.т.н.; В.В. Мордик, студ., А.М. Лады́ка, студ.,
Е.В. Оболя́нская, студ., ХНАДУ

Аннотация. Прослежена тенденция развития восстанавливающих технологий на базе энергии электромагнитных полей. Отмечены новейшие разработки в технологии внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки и их технологические возможности. Рассмотрены принципы действия их основного оборудования и обозначена область его применения.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, низкочастотное поле, индуктор, массивный проводник, вихревые токи.

RETROSPECTIVE RECOVER TECHNOLOGY WITH USING ENERGY OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

Yu.V. Batygin, professor, dr. eng. sc., E.A. Ghaplygin, assistant professor, cand. eng. sc.,
S.A. Shynderuk, senior lecturer, cand. eng. sc.,
V.V. Mordik, student, A.M. Ladyka student, O.V. Obolyanska student, KhNAHU

Abstract. The development trend of reducing technologies on the basis of electromagnetic field energy has been traces. The latest developments in technology of external magnetic pulse straightening and their technological possibilities have been noted. The principles of action of the main equipment and designated area of its application have been considered.

Key worlds: magnetic-pulse treatment of metals, low frequency field, inductor, solid conductor, eddy currents.

Вступ

Як показує практика, більше 50% пошкоджень є вм'ятини в зонах з утрудненням або

повністю закритим зворотним доступом. Це різні корпусні елементи, крила, фюзеляжі літаків, двері, капоти, дахи, пороги автомобілів і т.д. [1–4].

У зв'язку з цим особливий інтерес представляє устаткування, принцип дії якого заснований на використанні енергії імпульсних електромагнітних полів. Вони дозволяють проводити реставрацію ушкоджень (вм'ятин) на поверхні з зовнішньої сторони без розбирання корпусу або кузова і, по можливості, без порушення існуючого захисного покриття.

Достовірність вищесказаного не вимагає підтвердження спеціальними посиленнями на першоджерела. Доказом тому є добре відомі не тільки фахівцям розробки концерну «Boeing Company», впроваджені в авіапромисловість США протягом уже понад 40 років, а також і європейських фірм (з численними філіями по всьому світу), що спеціалізуються на ефективному устаткуванні для ремонту сучасних автомобілів.

Аналіз публікацій

В першу чергу, до найпростіших систем такого типу можна віднести, наприклад, розробки з «прямим пропусканням» струму крізь метал, що оброблюється. Так, автори патенту [5] описують спосіб, принцип дії якого заснований на взаємодії паралельних струмів (закон Ампера), відповідно до якого провідники з однаково спрямованими струмами притягуються один до одного. Саме це явище є в основі усунення деформацій (рис. 1).

Якщо говорити про механічні аналоги даного пристрою, то найбільш близьким до нього за результативністю являється рихтування за допомогою спотерів.

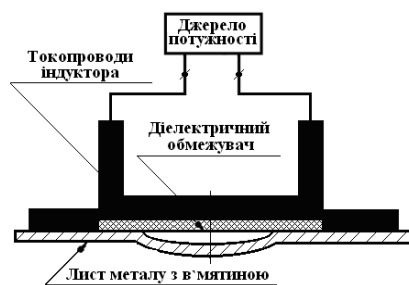


Рис. 1. – Індукторна система з прямим пропусканням струму крізь метал, що оброблюється

Вперше ідея використання енергії електричного і магнітного полів для виробничих цілей була висловлена радянським академіком, одним із засновників фізики сильних магнітних полів Петром Леонідовичем Капицею в

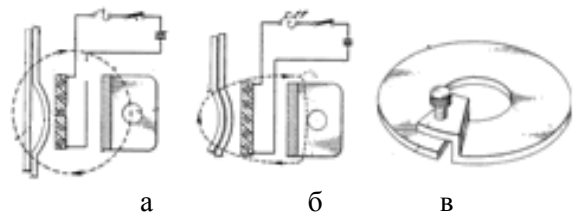
1920 р. Він звернув увагу на появу потужних електродинамічних сил в електротехнічних установках, які в той час використовувалися для досліджень фізичних властивостей матеріалів при впливі сильних електромагнітних полів [6].

Що стосується сучасних областей застосування сильних імпульсних магнітних полів, то до них, можна віднести: імпульсні прискорювачі плазми, сильноточні газорозрядні джерела світла, прискорювачі заряджених частинок для ядерних досліджень, високі електрофізичні технології, такі як магнітно-імпульсна обробка металів; практичне використання ефектів електричного вибуху провідників великими імпульсними струмами і інші [7].

Історично і хронологічно, «піонером» у галузі створення технічних систем для зовнішнього усунення вм'ятин в листових провідниках можна вважати США [8].

Одне з перших, і без перебільшення можна сказати основоположних, пропозицій по створенню пристроїв магнітно-імпульсного притягання металів було сформульовано в патенті Н. Furth [8].

Розглядалося два варіанти вирішення проблеми (рис. 2). Перший окрім основного багатovitкового соленоїда, передбачав введення додаткового розімкнутого витка (рис.2, в), розміщеного над вм'ятиною в тонкому металевому аркуші.



а – до перегорання плавкої вставки; б – після перегорання плавкої вставки; в – загальний вигляд вторинної котушки

Рис. 2. – Загальний вигляд схеми винаходу Н. Furth

За задумом автора, основним соленоїдом збуджується повільно наростаюче магнітне поле і при певній різниці потенціалів на межах розрізу в розімкнутому витку, повинен відбутися електричний пробій проміжку, після чого виток стає короткозамкненим.

Струм, що в ньому протікає збуджує швидко наростаюче магнітне поле, напрямком якого протилежний полю основною соленоїда. Поле витка і поле соленоїда взаємно знищуються. Поверх металу з вм'ятиною результуюча напруженість звертається в нуль. Поле основного соленоїда, що проникло і залишилося під оброблюваним металом, створює тиск, спрямований до індуктора. Під його дією відбувається вирівнювання деформованого металу [9].

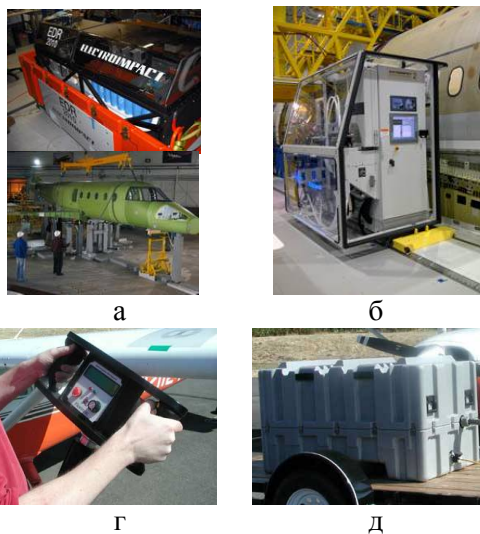
Фізична сутність даної пропозиції зводиться до збудження магнітних полів з різними часовими характеристиками. «Повільне» проникає крізь оброблюваний об'єкт – тонкий листовий провідник. «Швидке» не може проникнути, його призначення полягає в тому, щоб знищити поле над листом з вм'ятиною. В результаті «повільне» магнітне поле реалізує магнітно-імпульсне притягання металу, що оброблюється до індуктора.

Другий варіант з фізичної суті не відрізняється від першого запропонованого. Різниця полягає в способі отримання «повільного» і «швидкого» полів. Тут автор пропонує використовувати два окремих джерела потужності (батареї імпульсних конденсаторів) з різними часовими характеристиками струмів, що генеруються. Взаємодія полів, що збуджуються в зоні обробки приводить до переваги сил магнітного тиску на метал знизу над тиском зверху. Об'єкт обробки притягається до індуктора.

Працездатність можливих технічних реалізацій за пропозиціями Н.Furth вельми сумнівна. Як наслідок, його патент не знайшов свого практичного втілення, хоча автори наступних більш пізніх і більш вдалих проєктів посилаються на нього, як на перше джерело в напрямку розвитку систем для магнітно-імпульсного притягання.

До таких належать, наприклад, винаходи інженерів «Boeing Company» К.Hansen, I.Hendrickson, P.Zieve і ін. Слід підкреслити, що фізична сутність цитованих розробок принципово не відрізняється від фізичної сутності заявки Н.Furth. Тут також йдеться про суперпозиції «повільного» і «швидкого» полів. Але тепер уже автори говорять про накладення низькочастотного і високочастотного сигналів в обмотці інструмента-індуктора.

Двочастотні системи для магнітно-імпульсного притягання знайшли практичні застосування в роботах з реставрації корпусів літаків (рис. 3).



а, б, в – розробки фірми «Electroimpact»;
г, д – обладнання компанії «Fluxtronic»

Рис. 3. – Системи магнітно-імпульсного усунення вм'ятин в елементах літальних апаратів

Загальними недоліками систем магнітно-імпульсного притягання, заснованих на суперпозиції низьких і високих частот (як струмів, так і полів), є:

- наявність двох джерел енергії (магнітно-імпульсних установок),
- складність необхідної потужнострумової електроніки,
- великі витрати на необхідні комплектуючі (як мінімум в 2 рази більше в порівнянні з традиційними магнітно-імпульсними системами),
- низька надійність в експлуатації плюс досить висока собівартість кінцевого продукту.

Для практики зовнішнього усунення вм'ятин в автомобільних кузовах з феромагнітних сплавів, значно цікавішою представляється пропозиція концерну «Betag Innovation», названа як «Магнітне пристосування для видалення вм'ятин» (в оригіналі – «Magnetic Dent Remover») [10].

В цілому, цей пристрій для видалення вм'ятин в листових феромагнетиках, що містить ємнісні накопичувачі енергії, робочий інструмент (виносний індуктор) і, так звані, адаптерні пристрої, призначені для фіксації робочого інструменту над вм'ятиною, що видаляється (рис. 4).



Рис. 4. – Магнітний пристрій для видалення вм'ятин концерну «Betag Innovation»

Мета і постановка задачі

Мета роботи – Простежити тенденцію розвитку технологій, що відновлюють на базі енергії електромагнітних полів.

Аналіз сучасних електромагнітних способів рихтування

Суттєвою практичною новизною тут мають лише спосіб виготовлення багатоговиткової робочої котушки інструменту-індуктора і адаптерні пристосування.

Виносний індуктор – це мобільний інструмент, приєднаний до джерела потужності гнучким кабелем, був описаний в патенті [11].

Принцип магнітно-імпульсного притягання тонкостінних листових металів в патенті R. Meichtry, I. Kouba запозичений з робіт, частина з яких була виконана на замовлення концерну «Betag Innovation» в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» в 2002–2003рр. [12].

Головним фактором, що забезпечує трансформацію відомого ефекту відштовхування об'єкта, що оброблюється в ефект притягання, тобто, що забезпечує працездатність систем, названих в цитованих патентах як «Магнітний пристрій для видалення вм'ятин», є вибір робочих частот чинного поля. Ефект притягання можливий тільки в низькочастотному режимі, коли

$$\omega \ll \frac{1}{\mu \cdot \gamma \cdot d}, \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; f – робоча частота;

μ_0 – магнітна проникність вакууму; γ – питома електропровідність металу, d – товщина металу.

Умова низькочастотного режиму у вигляді процитованої нерівності виписано з роботи [13], що була опублікована в 2004 р. Ця ж формула, яка регламентує вибір частотного діапазону діючих полів фігурує в патентах R.Meichtry і I.Kouba.

В даний час «Магнітний пристрій для видалення вм'ятин» так само, як і широкий перелік механічних пристроїв, пропонуються авто-ремонтним компаніям концерном «Betag Innovation» на сторінках їх фірмового сайту [10].

До переваг магнітно-імпульсних розробок концерну «Betag Innovation» в порівнянні з реальними аналогами, пропонуваними американськими виробниками «Boeing Company», «Electroimpact» і «Fluxtronic» (США), слід віднести:

- наявність одного джерела потужності замість двох,
- відсутність складної потужнострумкової електроніки, необхідної для синхронізації у разі використання двох джерел,
- істотно менший перелік комплектуючих і значно менша собівартість готового виробу.

До основних недоліків обладнання «Магнітний пристрій для видалення вм'ятин» концерну «Betag Innovation» слід віднести:

- застосування в якості інструменту багатоговиткової котушки, яка, судячи з опису в цитованих патентах, досить складна у виготовленні і, як показав весь практичний досвід МІОМ (Магнітно-імпульсної обробки металів), вельми недовговічна в експлуатації,
- можливість роботи тільки з феромагнетиками (окремі сталеві композиції), і неможливість усунення вм'ятин в немагнітних металах (алюмінієві сплави і ін.),
- принцип дії заснований на застарілих до теперішнього часу висновках перших науково-дослідних пошукових робіт 2003-2004рр., які не дозволяють в достатній мірі реалізувати всі позитивні можливості магнітно-імпульсного притягання (надалі будуть висвітлені більш ефективні пропозиції – сліdstва авторських досліджень електрофізичної природи електромагнітних процесів, що протікають).

Проблема притягання заданих ділянок листових металів за допомогою силового впливу з боку електромагнітних полів може бути вирішена і з використанням інших технічних пропозицій, висунутих в різний час різними авторами. Так, наприклад, в роботі [13] запропонована схема роздачі порожніх труб зовнішнім магнітним полем, тимчасова конфігурація якого передбачає змінну дію електродинамічних зусиль, що стискають і розширюють. В середині труби розміщується жорстка оправка, що механічно перешкоджає її стиску. Ступені свободи в розширенні призводять, в кінцевому підсумку, до роздачі порожнистої труби відповідно до виробничого завдання.

Щонайменше, пізнавальний інтерес представляють різні варіації способу, що описаний в монографії Г.А. Шнеерсона [14], і який полягає в створенні повільно наростаючого магнітного поля, різко переривається при досягненні заданого рівня напруженості. В результаті над об'єктом, що оброблюється поля немає, а під ним є (проникле). Виникаючі електродинамічні зусилля притягують до індуктора задану ділянку металу, викликаючи його деформування. Незважаючи на гадану «прозорість» даної пропозиції, інформація про будь-які його практичних реалізації в науковій періодиці відсутня.

Слід зазначити, що фізична сутність повільного наростання з наступним перериванням діючого магнітного поля зводиться до принципу дії двочастотних магнітно-імпульсних систем, що запропоновані і що створюються до теперішнього часу американськими виробниками відповідної апаратури.

Роботи зі створення обладнання та інструментів для магнітно-імпульсного притягання, заснованих на інших фізичних концепціях, були розпочаті в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут». В даний час ці роботи продовжені і ведуться також в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті, де при кафедрі фізики створена спеціалізована науково-дослідна Лабораторія електромагнітних технологій [1, 15, 16, 7].

Перші розробки пристроїв магнітно-імпульсного притягання були основані на створенні просторово-часового розподілу діючих полів в індукторній системі, що за-

безпечує нуль магнітного потоку у просторі між тонкостінними листовими металами. Інструменти такого принципу дії були названі авторами пропозиції «складними індукторними системами». Сутність пропозиції полягає в наступному. Між двома джерелами магнітного поля (наприклад, плоскими соленоїдами) розміщуються два листових метала. Варіювання амплітуд зовнішніх полів відповідно до електрофізичних характеристик металів дозволяє отримати нуль магнітного потоку в просторі між ними. За рахунок сил тиску, що діють з боку соленоїда, листові метали відчують взаємне притягання.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень електромагнітних процесів в «складних індукторних системах» описані в публікаціях [13].

Резюмуючи перші спроби трансформувати природне магнітно-імпульсне відштовхування в «штучне» притягання за допомогою «складних індукторних систем», слід зазначити, що, як інструменти для притягання, вони не знайшли практичного застосування. Їх використання виявилось доцільним для штампування малюнка друкованих плат в електротехнічних пристроях і для холодного зварювання металевих елементів збірних конструкцій (при зустрічному русі швидкість зіткнення зростає майже в 2 рази) [13].

Більш перспективними для магнітно-імпульсного притягання тонкостінних листових металів слід вважати розробки, що були розпочаті в 2002 р. і, що проводяться до теперішнього часу [1, 7, 13, 15-17].

Наступним етапом в появі нових можливостей для створення пристроїв по зовнішньому усуненню вм'ятин в кузовах легкових автомобілів стало явище, експериментально виявлене в 2004р. професорами Національного Технічного Університету "Харківський політехнічний інститут" Батигінім Ю.В., Лавінським В.І., Хименко Л.Т. [12]. Його суть полягає в тому, що при частотах діючих полів нижче 2 кГц мало місце притягання з утворенням вм'ятини тонкої сталеві пластини до робочої поверхні індуктора-інструменту. При збільшенні частоти до 7 кГц і вище зразок відштовхувався з утворенням опуклості згідно з традиційними уявленнями про процеси при магнітно-імпульсній обробці металів (в аббревіатурі – МІОМ).

Виявлене явище на підставі загальних фізичних міркувань і розуміння процесів, що відбуваються на рівні того часу дозволило запатентувати «Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів» [18], що відрізнявся від відомих аналогів тим, що для притягання заготовки до індуктора при використанні одного джерела імпульсного поля частота поля, що діє вибирається з умови низькочастотності (1). Тут же була зафіксована геометрія можливих форм індуктора-інструмента. Це міг бути мас вибухобезпечний одновиткового соленоїд звичайної циліндричної геометрії, а міг бути і масивний одновитковий соленоїд з внутрішнім отвором у вигляді усіченого конуса. Розміри внутрішнього вікна соленоїда визначали розміри ділянки листової заготовки, що притягується.

В цей же час авторами роботи [12] були сформульовані фізичні основи перспективних напрямків розвитку магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів і запатентовано інше рішення по магнітно-імпульсному притягненню, принцип дії якого заснований на силовій взаємодії провідників з однаково спрямованими струмами (закон Ампера) [5]

Надалі, запатентований в [5] «Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів», як перша пропозиція подібного роду, ліг в основу створення «індукційних індукторних систем» (це перша авторська назва), в абревіатурі – ІС, різного конструктивного виконання [19].

Дослідження в цьому напрямку для вирішення питань пов'язаних з особливостями протікання електромагнітних процесів в інструментах магнітно-імпульсної рихтування листових феромагнетиків має вагоме як теоретичне так і практичне значення. Оскільки дозволяє визначитися з необхідними електрофізичними і магнітними характеристиками інструментів рихтування, що, в свою чергу, дозволяє як задаватися даними параметрами при розробці так і виготовленні цього типу інструментів.

Висновки

1. Проведено аналіз етапів розвитку сучасних електромагнітних технологій рихтування, який показує все зростаючу актуальність нового наукового напрямку – технології кузовного ремонту автомобілів з використанням

енергії імпульсних магнітних полів.

2. Наведено основні ідеї рихтування вм'ятин альтернативними методами (щодо прогресивних механічних), і розкриті їх особливості принципу дії застосування в ремонтних технологіях автотранспортної техніки.

3. Розглянуто новітні розробки в технології зовнішньої безконтактної магнітно-імпульсної рихтування та показані їх технологічні можливості. Визначено, що технології кузовного ремонту з використанням енергії імпульсних магнітних полів являються найбільш перспективними і актуальними.

Література

1. Гнатов А. В. Анализ электродинамических процессов в цилиндрических индукторных системах-инструментах магнитно-импульсной рихтовки : монография / А. В. Гнатов. – Харьков : ХНАДУ, 2013. – 292 с.
2. Синельников А. Ф. Кузова легковых автомобилей: обслуживание и ремонт / Синельников А. Ф., Штоль Ю. Л., Скрипников С. А. – М.: Транспорт, 1995. – 256 с.
3. Ремонт и окраска кузовов автомобилей : [подготовка к покраске, сварка, рихтовка и многое другое. Практическое руководство] ; под ред. С. Афонина. – Ростов-на-Дону : «ПОНЧИК». 2003. – 140 с.
4. Electromagnetic Dent Removal: onsite repairs in minutes // [Электронный ресурс] – 2015. – Режим доступа: http://www.boeing.com/commercial/aviation-services/brochures/34241_ElectDentRemoval04-05.pdf.
5. Пат. 74909 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно – імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю. В., Лавінський В. І., Хавін В. Л.; заявитель и патентообладатель ХПИ. – № 2004010542 ; заявл. 26.01.04; опубл. 15.02.06, Бюл. № 2.
6. Баранов М. И. Петр Леонидович Капица – основоположник техники сильных импульсных магнитных полей / М. И. Баранов // Электротехника і електромеханіка. – 2005. – № 3. – С. 5–8.
7. Чаплыгин Е. А. Разработка цилиндрических индукционных индукторных систем для магнитно-импульсного притяжения тонких металлических листов: дисс. кандидата техн. наук : 05.09.13

- /Чаплыгин Евгений Александрович. – Харьков, 2009. – 169 с.
8. Пат. 3,196,649 USA (США), Devices for metal-forming by magnetic tension / Harold P. Furth; заявитель и патентообладатель Advanced Kinetiks, Inc., Costa Mesa, California. – № 173, 680 ; заявл. 16.02.1962; опубл. 27.07.1965.
 9. Батыгин Ю. В. Исторические аспекты возникновения магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов МИОМ / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов // *Електротехніка і електромеханіка*. – Х., 2011. – № 4. – С. 10–12.
 10. Welcome to BETAG Innovation // [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: <http://www.betaginnovation.com>. – Название с экрана.
 11. Пат. 4,135,379 USA (США), B21D 26/02. Portable head for electromagnetic pulling / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; заявитель и патентообладатель Boeing Commercial Airplane Company, Seattle, Wash. – № 726,872; заявл. 27.09.1976; опубл. 23.01.1979.
 12. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field : proceedings of the 1-st International Conference [«High Speed Metal Forming»], (Dortmund, March 31/April 1, 2004) / Yu. V. Batygin, V. I. Lavinsky, L. T. Khimenko. – Dortmund, Germany. 2004. – P. 157–160.
 13. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т. – Т. 1.; под ред. проф. Ю.В. Батыгина. – [2-е изд.] – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
 14. Шнеерсон Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов / Г. А. Шнеерсон. – [2 – е изд.] – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 200с.
 15. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями : монография / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 240 с.
 16. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография / А.В. Гнатов, Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 с.
 17. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Батыгин Ю. В., Лавинский В. И. – Т.2: Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. – Харьков МОСТ–Торнадо, 2002. – 288 с.
 18. Пат. 75676 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю. В., Лавінський В. І., Хименко Л. Т.; заявитель и патентообладатель ХПИ. – № 2004010512 ; заявл. 23.01.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.
 19. Batygin Yuri V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // *Journal of Materials Processing Technology*. – Elsevier. – 2014. – № 214 (2). – P. 390–401.
- Рецензент: А.В. Гнатов, д.т.н., проф., ХНАДУ.
- Стаття поступила в редакцію 2 травня 2017 р.