УДК 621.318 doi:10.20998/2413-4295.2021.04.03

ЗАСТОСУВАННЯ ТА СХЕМИ ПОПЕРЕДНЬОГО ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ У МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ

Т. В. ГАВРИЛОВА, Є. О. ЧАПЛИГІН*, С. О. ШИНДЕРУК

кафедра фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, УКРАЇНА
** e-mail: chaplygin_e_a@gmail.com*

АНОТАЦІЯ *Виділено особливості процесів магнітно-імпульсної обробки металів у традиційних схемах технологічних процесів сучасного промислового виробництва. Робота є коротким описом стану, застосування, а також запропоновано схеми попереднього індукційного нагріву в промисловій магнітно-імпульсній обробці металів. Розглянуто спосіб підвищення ефективності виконання заданих виробничих операцій. Використання попереднього нагріву призводить до суттєвого підвищення якості виконання виробничих операцій при зниженні споживання енергії. Відзначено нові напрямки магнітно-імпульсної обробки металів, що передбачають перетворення природних сил відштовхування металу об'єкта, що обробляється, в сили магнітно-імпульсного тяжіння зі зменшенням робочих частот діючих полів. Істотне зниження робочих частот дозволяє як перейти від процесу відштовхування до тяжіння, а й перейти від роботи з феромагнітними металами до не феромагнітних. Наприклад, з'являється можливість тяжіння алюмінієвих заготовок. Наведено приклади використання індукційного нагрівання металевих заготовок у сучасній промисловості. Розглянуто різні пристрої, що застосовуються для даних операцій, які пропонуються на сучасному ринку, як вітчизняними, так і зарубіжними виробниками. Описано фізику тепловиділення Ленца-Джоуля, результатом якого є індукційне нагрівання провідників струмами Фуко у зовнішньому електромагнітному полі інструмента. Запропоновано схеми практичної реалізації попереднього індукційного нагріву при магнітно-імпульсній обробці металевих заготовок, що дозволяють використовувати як автономні пристрої для збудження вихрових струмів, так і стаціонарне підключення, з тією ж метою, від додаткового джерела електроенергії. Як результат роботи відзначається можливість підвищення коефіцієнта корисної дії за рахунок збільшення пластичності металу при нагріванні заготовки, а також можливі обмеження описаної технології, пов'язані зі збільшенням активного опору металів при підвищенні Ленц-Джоулева тепловиділення.*
Ключові слова: *листові метали; індукторні системи; магнітно-імпульсна обробка металів; індукційне нагрівання; електромагнітні процеси; попереднє індукційне нагрівання; пластичність металів*

APPLICATION AND SCHEMES OF INDUCTION PRELIMINARY HEATING IN MAGNETIC-PULSE TREATMENT OF METALS

T. V. GAVRYLOVA, E. O. CHAPLYGIN*, S. O. SHINDERUK

Department of Physics, Kharkiv national automobile and highway university, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT *The features of the processes of magnetic-pulse processing of metals in traditional schemes of technological processes of modern industrial production are highlighted. The work is a brief description of the state, application, and also proposed induction pre-heating schemes in industrial magnetic-pulse processing of metals. A method for increasing the efficiency of performing specified production operations is considered. The use of preheating leads to a significant improvement in the quality of production operations while reducing energy consumption. New directions of magnetic-pulse processing of metals are noted, implying the transformation of the natural repulsive forces of the metal of the processed object into the forces of magnetic-pulse attraction with a decrease in the operating frequencies of the acting fields. A significant decrease in operating frequencies makes it possible not only to go from repulsion to attraction, but also to go from working with ferromagnetic metals to non-ferromagnetic ones. For example, it becomes possible to attract aluminum blanks. Examples of the use of induction heating of metal blanks in modern industry are given. Various devices used for these operations, offered on the modern market, by both domestic and foreign manufacturers, are considered. The physics of Lenz-Joule heat release is described, the result of which is the induction heating of conductors by Foucault currents in the external electromagnetic field of the instrument. Schemes are proposed for the practical implementation of preliminary induction heating during magnetic-pulse processing of metal blanks, allowing the use of both autonomous devices for exciting eddy currents and a stationary connection, for the same purpose, of an additional source of electricity. As a result of the work, the possibility of increasing the efficiency by increasing the plasticity of the metal when heating the workpiece, as well as possible limitations of the described technology associated with an increase in the active resistance of metals with an increase in the Lenz-Joule heat release is noted.*
Keywords: *sheet metals; inductor systems; magnetic pulse processing of metals; induction heating; electromagnetic processes; induction preheating; plasticity of metals*

Вступ

На сучасному етапі розвитку науково-технічного прогресу все більшого розвитку та застосування отримують прогресивні обробні технології, засновані на використанні енергії електромагнітних полів. До пристроїв такого типу без перебільшення можна віднести установки силового впливу на оброблювані об'єкти (магнітний тиск), технічні системи нагріву об'єктів, що проводять

© Т. В. ГАВРИЛОВА, Є. О. ЧАПЛИГІН, С. О. ШИНДЕРУК, 2021

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

індукованими струмами, пристрої, де різного роду хімічні реакції ініціюються електричними полями та ін.

З погляду практичної значущості особливо виділяються технології безконтактної обробки провідних об'єктів силами магнітного тиску та створенням різних температурних режимів за рахунок індукційних ефектів. Умовно, способи силового впливу імпульсних електромагнітних полів на масивні об'єкти, що добре проводять, відносять до, так званої, традиційної магнітно-імпульсної обробки металів. Тут досягнуто певних успіхів у здійсненні таких виробничих операцій як плоске штампування, обтиск провідних труб, їх роздача і, нарешті, зварювання різнорідних металів. Остання операція є надзвичайно актуальною для сучасного промислового виробництва. Її здійснення вимагало створення умов, за яких досягаються досить високі швидкості зіткнення об'єктів, що зварюються. Має місце взаємне проникнення їх металів і, відповідно, утворення практично однорідного проміжного прикордонного шару, що забезпечує міцність з'єднання, що зварюється [1].

Останнім часом відзначається різке зростання інтересу до індукційного нагрівання в різних сферах людської діяльності. Особливо виділяються побутові потреби, і навіть різні ремонтні технології. Тут з успіхом розробляються виробничі операції з очищення лакофарбових покриттів, роз'єму болтових з'єднань, розм'якшення корпусних елементів металевих покриттів для відновлення пошкоджених поверхонь та ін. Ідею використання попереднього індукційного нагрівання в магнітно-імпульсній обробці металів було запропоновано Білим І. В., Горкіним Л. Д., Хименко Л. Т. ще 1984 г. Авторами пропозиції була розроблена і створена система, що ініціює протікання струму в обмотці робочого інструменту до моменту силового впливу. оброблювані об'єкти [2].

Мета роботи

Метою роботи є коротке висвітлення стану та застосування, а також пропозиція схем попереднього індукційного нагріву в сучасній магнітно-імпульсній обробці металів як способу підвищення ефективності здійснення заданих виробничих операцій, що проявляється у підвищенні якості їх виконання при зниженні необхідних енерговитрат.

Фізична сутність процесів, що протікають

В основі технологій обробки металів з використанням енергії імпульсних електромагнітних полів лежить явище їхньої природної силової взаємодії з провідними середовищами. Практично, ці технології реалізуються за допомогою так званих індукторних систем, що являють собою сукупність власне індуктора-інструменту (як правило, плоского або циліндричного соленоїда) та об'єкта, що підлягає силовому впливу. Слід наголосити на особливості роботи таких систем. Вона полягає в тому, що магнітний тиск здійснюється не будь-яким зовнішнім інструментом (наприклад, різцем у механічних способах), а є результатом взаємного відштовхування поля індуктора та поля струмів, індукованих у металі об'єкта, що обробляється. У спеціальній літературі також обґрунтовується фізика, згідно з якою за законом Ампера відштовхування обумовлено силовою взаємодією протилежно спрямованих збуджуючого струму індуктора і струму, що збуджується у об'єкті, що проводить.

Опускаючи деталі принципової дієвості, можна вважати, що результатом взаємодії поля індуктора з провідником є збудження, так званих, сил Лоренца, фізичною сутністю яких є взаємодія електромагнітного поля з електричним зарядом, що рухається [3].

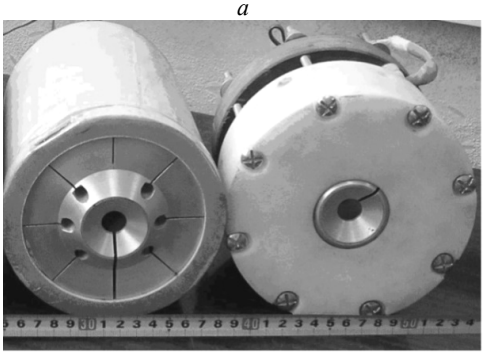
Повертаючись до конкретики польових технологій у промисловості, можна зазначити, що ці практично успішні досягнення магнітно-імпульсної обробки металів (МІОМ) відносяться переважно до традиційних реалізацій у період до 1980 р. Не повторюючись у сказаному вище, можна відзначити і сучасні роботи з удосконалення традиційних методів збудження сил магнітного тиску та їх впровадження в роботу автоматизованих ліній промислових виробництв авто- і літакобудування [1,4,5].

Нові можливі напрями розвитку магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів з відповідним фізичним обґрунтуванням кожного з них були представлені авторами публікацій [6–12]. Приклад такого обладнання наведено на рис. 1. Перше передбачає створення певного просторово-часового розподілу напруженості збуджуваного поля за товщиною об'єкта, що підлягає обробці. У цьому випадку нівелюється ослаблення сил магнітного тиску, що обумовлене ефектами проникнення діючих полів [6]. Друге можливе напрям полягає у трансформації природного відштовхування силами Лоренца в тяжіння рахунок зниження робочих частот діючих полів. Даного рішення виявляється достатньо для обробки феромагнетиків. Що стосується не феромагнетиків, то їх тяжіння здійснюється за рахунок введення в індукторну систему додаткового провідного елемента у вигляді плоского екрану. Принцип дії таких інструментів ґрунтується на збудженні протилежно спрямованих індукованих струмів в екрані та об'єкті обробки. Відповідно до закону Ампера у таких системах матиме місце їхнє взаємне тяжіння [7].

Третій можливий напрямок пропонує трансформацію відштовхування в тяжіння за допомогою двочастотних (НЧ та ВЧ) індукторних систем. За задумом високочастотні поля нівелюють відштовхування, низькочастотні – тяжіння [6,8]. Нарешті, останній можливий напрямок отримав назву «методу прямого пропускання струму». Його сутність полягає у наступному. Основний струмопровід індуктора електрично з'єднується з ділянкою металу,

що підлягає деформуванню, так, що провідники з'єднуються паралельні, а струми, що протікають по них, односпрямовані. Відповідно до закону Ампера ці провідники відчуватимуть тяжіння [9–13].

а



б

Рис. 1 – Типове обладнання для магнітно-імпульсних технологій обробки металів тиском, а – магнітно-імпульсна установка МІУ – джерело потужності 2,4 кДж; б – індуктори – інструменти силового тяжіння феромагнетиків

Загальним фактором причинності успіху виробничої операції, що виконується, незалежно від способу магнітно-імпульсного силового впливу є, в першу чергу, пластичність металу заданої ділянки оброблюваного об'єкта [2,3]. З феноменологічних міркувань, достовірність яких обґрунтована розрахунками та експериментами у роботах різних авторів, очевидно, що підвищення пластичності можливе за допомогою індукційного нагрівання струмами Фуко [14]. Специфіка зазначеного фізичного ефекту полягає у неоднорідному розподілі індукованих струмів за товщиною провідника. Проникнення магнітного поля призводить до їх витіснення в поверхневий шар (скін-шар), у результаті щільність вихрових струмів різко зростає, і цей шар металу інтенсивно розігрівається в першу чергу. Нижчерозташовані шари також прогріваються, але вже за рахунок теплопровідності. Як показали дослідження, у скін-шарі виділяється ~ 86,4 % від загальної кількості Ленц-Джоулевої теплоти. Крім того, величина скін-шару, а відповідно і нагрівання, також залежить від відносної магнітної проникності металу об'єкта, що обробляється [14,15].

Розвитку теорії індукційного нагріву присвячено досить багато наукових публікацій. Не зупиняючись на їх докладному перерахуванні та коментарях отриманих результатів, як приклад напрямів досліджень, наведемо характерні роботи, де йдеться про вплив струморозподілу на інтегральну ефективність тепловиділення не тільки в металі об'єкта, що обробляється, але і в обмотці збуджуючого соленоїда [16,17]. Так, авторами [16] розраховано індукційне нагрівання провідника у внутрішній порожнині циліндричного соленоїда. Показано особливості, що відрізняють досліджувані процеси у випадках плоскої та криволінійної геометрії. Відзначено їхню обумовленість проникненням збуджуваних магнітних полів.

Робота [17] присвячена теоретичному дослідженню процесів аж до плавлення провідних заготовок з урахуванням розподілу щільності струму у витках індуктора-інструменту високочастотного індукційного нагріву.

З практичної точки зору цікаві останні пропозиції вчених Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) щодо підвищення інтенсивності Ленц-Джоулевого тепловиділення в металі об'єкта обробки [18,19]. Авторами [18] теоретично та експериментально обґрунтовано доцільність введення феромагнетиків у конструкції індукторних систем. Показано, що за наявності феритового заповнення має місце суттєве зростання амплітуд збуджуваних струмів та можливе збільшення інтенсивності індукційного процесу більш ніж у ~ 1,5 раза. На спосіб обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів із попереднім індукційним нагріванням отримано патент України [19].

Слід зазначити, що останнім часом відзначається різке зростання інтересу до індукційного нагрівання в технологіях ремонту транспортних засобів. Тут з успіхом розробляються виробничі операції зі знімання стекол, очищення лакофарбових покриттів, роз'єму болтових з'єднань, розм'якшення металевих покриттів кузовів перед рихтуванням вм'ятин та ін [20–22]. Ілюстрації відповідного типового обладнання, розробленого в ХНАДУ та інженерами концерну BETAG (Швейцарія) представлені нижче на рис. 2.

Попереднє індукційне нагрівання в МІОМ

Принципові схеми застосування індукційного нагріву листових металів у магнітно-імпульсних технологіях представлені на рис. 3.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Рис. 2 – Типове обладнання для локального індукційного нагріву в технологіях ремонту транспортних засобів, а – розробка ХНАДУ (Україна); б – розробка BETAG (Швейцарія)

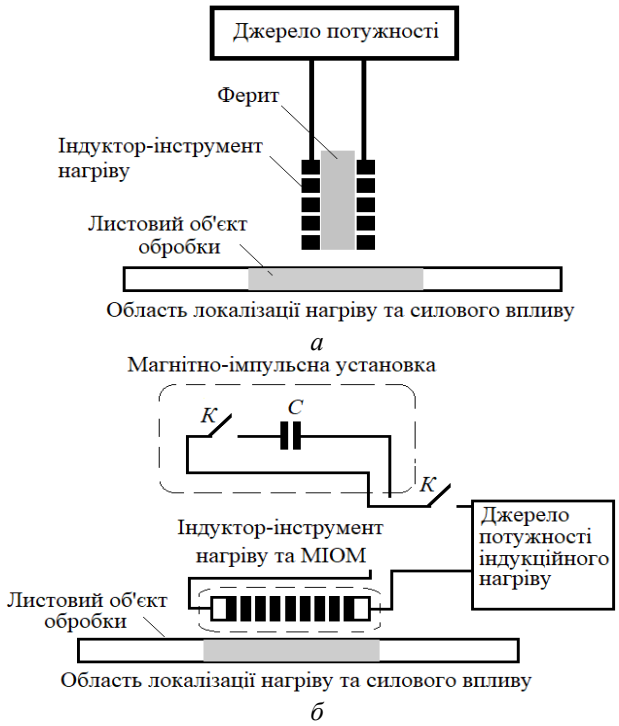


Рис. 3 – Схеми МІОМ з попереднім індукційним нагріванням об'єкта обробки при використанні виносного індуктора-інструменту МІОМ, а – автономна система індукційного нагріву; б – система індукційного нагріву із підключенням до обмотки індуктора-інструменту МІОМ

Рис. 3, *а* показано застосування будь-якої автономної системи індукційного нагріву (наприклад, рис. 2). Алгоритм реалізації виробничої операції передбачає початкове розміщення в галузі обробки індуктора-інструменту індукційного нагріву і власне нагрівання до так званих кольорів втечі. Після чого живлення системи відключається, а індуктор-інструмент індукційного нагріву забирається. На його місце міститься виносний індуктор-інструмент магнітно-імпульсного силового впливу [23]. Вмикання струму від МІУ збуджує сильне магнітне поле у робочій зоні інструменту. Його вплив деформує задану область листового об'єкта, що обробляється, пластичність якої підвищена попереднім нагріванням.

Істотною перевагою цієї схеми є можливість застосування індукторів з феритовими вставками, що істотно підвищують інтенсивність Ленц-Джоулевого тепловиділення.

Рис. 3, *б* показана схема, де джерело сигналу для індукційного нагріву підключається безпосередньо до обмотування індуктора-інструменту МІОМ. Алгоритм реалізації виробничої операції передбачає початкове включення джерела потужності попереднього індукційного нагріву заданої області силового впливу. Після цього це джерело потужності відключається. Підключається струм від магнітно-імпульсної установки. Пондермоторні сили, що збуджуються, деформують задану область об'єкта обробки. Загальний вигляд інструменту МІОМ з можливим підключенням попереднього індукційного нагрівання листового об'єкта обробки представлено на рис. 4.

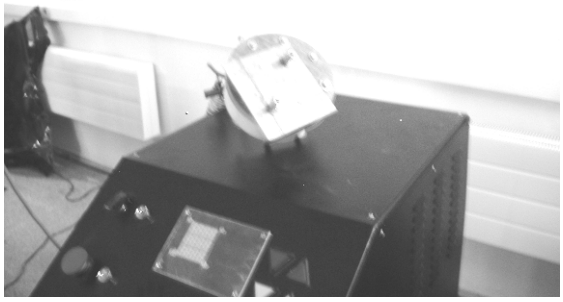


Рис. 4 – Загальний вигляд інструменту МІОМ з можливим підключенням попереднього індукційного нагрівання листового об'єкта обробки

Слід зазначити, що у цій схемі неможливе включення феритових вставок у конструкції індукторів-інструментів МІОМ. Крім того, виникають проблеми у відповідності до активно-індуктивного навантаження (власне індуктор) і схеми джерела потужності для індукційного нагріву.

Висновки

Коротко висвітлено стан та застосування індукційного нагріву в сучасній магнітно-імпульсній

обробці металів, як способу підвищення якості її виконання.

Запропоновано схеми практичної реалізації попереднього індукційного нагріву, що дозволяють використання як автономних пристроїв для збудження вихрових струмів, так і стаціонарне підключення з метою додаткового джерела електричної потужності.

Відзначено можливість підвищення ефективності рахунок збільшення пластичності металу при нагріванні, і навіть вказані можливі її обмеження, пов'язані зі зростанням активного опору металів у разі зростання Ленц-Джоулевого тепловиділення.

Список літератури

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A. E. & Kleiner M. Electromagnetic Forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology.* 2011. 211. P. 787–829. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
2. Белый И. В., Горкин Л. Д., Хименко Л. Т. Деформирование металлов импульсным электромагнитным полем с предварительным индукционным нагревом заготовок. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1984. №7. С. 6–8.
3. Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т. *Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей редакцией д.т.н., проф. Батыгина Ю.В.* Харьков: Изд. МОСТ – Торнадо, 2003. 284 с.
4. Batygin Yu. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V., Chaplygin E. A. Pulsed Electromagnetic Attraction Processes for Sheet Metal Components. *6th International Conference on High Speed Forming (27–29 March 2014).* Daejeon, Korea. P. 253-260. doi: 10.17877/DE290R-945.
5. Decat G., Deckx L., Meynen G., De Graef E. & Jonlet F. Magnetic Fields of Induction Heaters in the Framework of Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics.* 2015. 12:2. P. 169-176. doi: 10.1080/10803548.2006.11076678.
6. Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов. *Электротехника и электромеханика*. 2004. № 2. С. 80–84.
7. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Adavnced Processing Technologies.* Springer International Publishing AG. 2018. 99 p.
8. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics*. 2018. №3. P. 43–52. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.10.
9. Batygin Yu. V., Yeryomina O. F., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A., Chaplygin E. O. Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with “direct passage of current”. *Вісник НТУ «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях.* 2020. 4(6). P. 3–13. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.
10. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 1: low electrical conductance metals. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics.* 2019. №5. P. 40–44. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07.
11. Ouyang Sh., Li Ch., Du L., Li X., Lai Zh., Peng T., Han X., Cao Q., Li L. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet metal utilizing a low-frequency discharge: A new method for attractive forming, *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. no. 291. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.117001.
12. Bay F. Jeanson A-C., Zapata J. Electromagnetic forming processes: material behaviour and computational modelling, *Procedia Engineering.* 2014. no. 81. P. 793-800. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.078.
13. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. Numerical estimates of currents and forces in a linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 2: High specific electrical conductivity metals. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics*. 2019. №6. P. 39–43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.05.
14. Batygin Yu. V., Sabokar O. S., Strelnikova V. A. Induction heating. History and development. Application in modern transport repairing technologies. *Автомобільний транспорт.* 2017. Вип. 40. С. 75–79.
15. Батигін Ю. В., Сабокар О. С., Стрельнікова В. А. Індукційний нагрів тонкої феромагнітної пластини в полі плоского кругового соленоїда. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. Вип. 6. С. 135–140.
16. Батыгин Ю. В., Чаплыгин Е. А., Сабокарь О. С. Стрельникова В. А. Индукционный нагрев во внутренней полости цилиндрического соленоида. Основные соотношения протекающих процессов. *Вісник Хмельницького національного університету.* 2017. Вип. 6. С. 32–36.
17. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Исследование процессов высокочастотного индукционного нагрева и плавления проводящих заготовок с учетом распределения плотности тока в витках индуктора. *Праці ІЕД НАНУ.* 2015. 41. С.132-139.
18. Стрельнікова В. А. Особенности индукционного нагрева массивных металлических заготовок индукторами с ферромагнитными сердечниками. *Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів*. 2018. № 32 (1308). С. 99–104. doi: 10.20998/2079-3944.2018.32.17.
19. Батигін Ю. В., Чаплигін Є. О., Сабокар О. С., Стрельнікова В. А. Спосіб обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів з попереднім нагрівом. Патент України № 121597, 2017.
20. Стрельнікова В. А. Сучасні технології ремонту автомобілів з використанням електромагнітної формовки металів. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика. Тези доповідей III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, спеціалістів та аспірантів. (11-12 травня 2017 р., м. Маріуполь).* Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. С. 70–72.
21. Батыгин Ю. В., Стрельникова В. А. *Индукционный нагрев и магнитно-импульсное притяжение для промышленных технологий современности: монография.* Харьков: Лидер, 2019. 162 с.
22. BETAG Innovation URL: https://www.betaginnovation.com/medium-panel-repair/ (дата звернення 15.11.2021).
23. Батыгин Ю. В., Горкин Л. Д., Горкин А. Л., Лысенко И.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

M. *Магнитно-импульсная установка с выносным индуктором*. № 8480, 1989.
24. Beneson W., Harris J. W., Stoker H., Lutz H. *Handbook of Physics*. *1 st ed. 2002. Corr. 2nd printing 2006*. Berlin: Springer, 2006. 1186 p.

References (transliterated)

1. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A. E. & Kleiner M. Electromagnetic Forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology,* 2011, 211, pp.787–829, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
2. Belyj I. V., Gorkin L. D., Himenko L. T. Deformirovanie metallov impul'snym jelektromagnitnym polem s predvaritel'nym indukcionnym nagrevom zagotovok. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo,* 1984, 7, pp. 6-8.
3. Batygin Ju. V., Lavinskij V. I., Himenko L. T. *Impul'snye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij*. *Tom 1. Izdanie vtoroe, pererabotannoe i dopolnennoe. Pod obshhej redakciej d.t.n., prof. Batygina Ju.V*. Har'kov. Izd. MOST – Tornado, 2003. 284 s.
4. Batygin Yu. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V., Chaplygin E. A. Pulsed Electromagnetic Attraction Processes for Sheet Metal Components. *6th International Conference on High Speed Forming (27–29 March 2014).* Daejeon, Korea, p. 253-260, doi: 10.17877/DE290R-945.
5. Decat G., Deckx L., Meynen G., De Graef E. & Jonlet F. Magnetic Fields of Induction Heaters in the Framework of Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2015, 12:2, pp. 169-176, doi: 10.1080/10803548.2006.11076678.
6. Batygin Ju. V., Lavinskij V. I., Himenko L. T. Fizicheskie osnovy vozmozhnyh napravlenij razvitija magnitno-impul'snoj obrabotki tonkostennyh metallov. *Jelektrotehnika i jelektromehanika,* 2004, 2, pp. 80–84.
7. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Adavnced Processing Technologies.* Springer International Publishing AG. 2018. 99 p.
8. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics,* 2018, 3, pp. 43–52, doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.10.
9. Batygin Yu. V., Yeryomina O. F., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A., Chaplygin E. O. Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with “direct passage of current”. *Вісник НТУ «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях,* 2020, 4(6), pp. 3–13, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.
10. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 1: low electrical conductance metals. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics,* 2019, 5, pp. 40–44, doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07.
11. Ouyang Sh., Li Ch., Du L., Li X., Lai Zh., Peng T., Han X., Cao Q., Li L. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet metal utilizing a low-frequency discharge: A new method for attractive forming, *Journal of Materials Processing Technology,* 2021, no. 291, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.117001.
12. Bay F. Jeanson A-C., Zapata J. Electromagnetic forming processes: material behaviour and computational modelling, *Procedia Engineering,* 2014, no. 81, pp. 793-800, doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.078.
13. Batygin Yu. V., Chaplygin E. A., Shinderuk S. O., Strelnikova V. A. Numerical estimates of currents and forces in a linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 2: High specific electrical conductivity metals. *Electrical Engineering & Electrical Mechanics,* 2019, 6, pp. 39–43, doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.05.
14. Batygin Yu. V., Sabokar O. S., Strelnikova V. A. Induction heating. History and development. Application in modern transport repairing technologies. *Автомобільний транспорт,* 2017, Вип. 40, С. 75–79.
15. Batigin Ju. V., Sabokar O. S., Strel'nikova V. A. Indukcijnij nagriv tonkoї feromagnitnoї plastini v poli ploskogo krugovogo solenoїda. *Visnik Vinnic'kogo politehnichnogo institutu,* 2017, Vip. 6, pp. 135–140.
16. Batygin Ju. V., Chaplygin E. A., Sabokar' O. S. Strel'nikova V. A. Indukcionnyj nagrev vo vnutrennej polosti cilindricheskogo solenoida. Osnovnye sootnoshenija protekajushhih processov. *Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu*, 2017, Vip. 6, pp. 32–36.
17. Shherba A. A., Podol'cev A. D., Kucherjavaja I. N. Issledovanie processov vysokochastotnogo indukcionnogo nagreva i plavlenija provodjashhih zagotovok s uchetom raspredelenija plotnosti toka v vitkah induktora. *Praci IED NANU,* 2015, 41, pp. 132–139.
18. Strel'nikova V. A. Osobennosti indukcionnogo nagreva massivnyh metallicheskih zagotovok induktorami s ferromagnitnymi serdechnikami. *Visnik NTU «HPI» Serija: Problemi udoskonalennja elektrichnih mashin i aparativ,* 2018, 32 (1308), pp. 99–104, doi: 10.20998/2079-3944.2018.32.17.
19. Batigin Ju. V., Chapligin Є. O., Sabokar O. S., Strel'nikova V. A. Sposib obrobki listovih metaliv koncentrovanimi dzherelami energiї magnitnih poliv z poperednim nagrivom. Patent Ukraïni № 121597, 2017.
20. Strel'nikova V. A. Suchasni tehnologiї remontu avtomobiliv z vikoristannjam elektromagnitnoї formovki metaliv. *Problemi energoresursozberezhennja v promislovomu regioni. Nauka i praktika. Tezi dopovidej III Vseukraïns'koї naukovo-praktichnoї konferenciї molodih vchenih, specialistiv ta aspirantiv. (11-12 travnja 2017 r., m. Mariupol')*. Mariupol'. DVNZ «PDTU», 2017. P. 70–72.
21. Batygin Ju. V., Strel'nikova V. A. *Indukcionnyj nagrev i magnitno-impul'snoe pritjazhenie dlja promyshlennyh tehnologij sovremennosti: monografija*. Har'kov. Lider, 2019. 162 s.
22. BETAG Innovation. Available at: https://www.betaginnovation.com/medium-panel-repair/ (accessed 15.11.2021).
23. Batygin Ju. V., Gorkin L. D., Gorkin A. L., Lysenko I. M. *Magnitno-impul'snaja ustanovka s vynosnym induktorom*. № 8480, 1989.
24. Beneson W., Harris J. W., Stoker H., Lutz H. *Handbook of Physics*. *1 st ed. 2002. Corr. 2nd printing 2006*. Berlin. Springer, 2006. 1186 p.

Відомості про авторів (About authors)

Гаврилова Тетяна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3677-2219; e-mail: gavrilova.tatyana@i.ua.

Gavrylova Tetiana – Candidate of Physical and Matematical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3677-2219; e-mail: gavrilova.tatyana@i.ua.

Чаплигін Євген Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2968-4800; e-mail: chaplygin_e_a@gmail.com.

Chaplygin Evgen – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2968-4800; e-mail: chaplygin_e_a@gmail.com.

Шиндерук Світлана Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Shinderuk Svitlana – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гаврилова Т. В., Чаплигін Є. О., Шиндерук С. О. Застосування та схеми попереднього індукційного нагріву у магнітно-імпульсній обробці металів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 17-23. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.03.

Please cite this article as:

Gavrylova T., Chaplygin E., Shinderuk S. Application and schemes of induction preliminary heating in magnetic-pulse treatment of metals. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4 (10), pp. 17-23, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гаврилова Т. В., Чаплыгин Е. А., Шиндерук С. О. Применение и схемы предварительного индукционного нагрева в магнитно-импульсной обработке металлов. *Вестник Национального технического университета « ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 4 (10). С. 17-23. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.03.

АННОТАЦИЯ *Выделены особенности процессов магнитно-импульсной обработки металлов в традиционных схемах технологических процессов современного промышленного производства. Работа представляет собой краткое описание состояния, применения, а также предложены схемы предварительного индукционного нагрева в промышленной магнитно-импульсной обработке металлов. Рассмотрен способ повышения эффективности выполнения заданных производственных операций. Использование предварительного нагрева приводит к существенному повышению качества выполнения производственных операций при снижении энергопотребления. Отмечены новые направления магнитно-импульсной обработки металлов, предполагающие преобразование естественных сил отталкивания металла обрабатываемого объекта в силы магнитно-импульсного притяжения с уменьшением рабочих частот действующих полей. Существенное понижение рабочих частот позволяет не только перейти от процесса отталкивания к притяжению, но и перейти от работы с ферромагнитными металлами к не ферромагнитным. Например, появляется возможность притяжения алюминиевых заготовок. Приведены примеры использования индукционного нагрева металлических заготовок в современной промышленности. Рассмотрены различные устройства, применяемые для данных операций, предлагаемые на современном рынке, как отечественными, так и зарубежными производителями. Описана физика тепловыделения Ленца-Джоуля, результатом которого является индукционный нагрев проводников токами Фуко во внешнем электромагнитном поле инструмента. Предложены схемы практической реализации предварительного индукционного нагрева при магнитно-импульсной обработке металлических заготовок, позволяющие использовать, как автономные устройства для возбуждения вихревых токов, так и стационарное подключение, с той же целью, дополнительного источника электроэнергии. В качестве результата работы отмечается возможность повышения коэффициента полезного действия за счет увеличения пластичности металла при нагреве заготовки, а также возможные ограничения описанной технологии, связанные с увеличением активного сопротивления металлов при повышении Ленц-Джоулева тепловыделения.*

Ключевые слова: *листовые металлы; индукторные системы; магнитно-импульсная обработка металлов; индукционный нагрев; электромагнитные процессы; предварительный индукционный нагрев; пластичность металлов.*

Надійшла 20.11.2021