

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЛИСТОВОЙ ФЕРРОМАГНЕТИК ПРИ МИОМ

Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., А.В. Гнатов, доцент, к.т.н.,  
С.А. Щиголева, аспирант, ХНАДУ

*Аннотация.* В работе приведено экспериментальное обоснование механизма силового воздействия импульсных магнитных полей на тонкостенные листовые заготовки из ферромагнитных и неферромагнитных проводников. Показано преобладающее действие сил притяжения, обусловленных проявлением магнитных свойств тонкостенных металлов при низких рабочих частотах, в индукторных системах для магнитно-импульсной обработки металлов.

*Ключевые слова:* импульсные магнитные поля, силовое притяжение, низкочастотный режим.

## ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ НАПРЯМКУ СИЛ, ЩО ДІЮТЬ НА ЛИСТОВИЙ ФЕРРОМАГНЕТИК ПРИ МІОМ

Ю.В. Батигін, професор, д.т.н., А.В. Гнатов, доцент, к.т.н.,  
С.О. Щигольєва, аспірант, ХНАДУ

*Анотація.* В роботі приведено експериментальне підтвердження механізму силової дії імпульсних магнітних полів на тонкостінні листові заготовки з феромагнітних і неферомагнітних провідників. Показано переважуючу дію сил притягання, обумовлених проявом магнітних властивостей тонкостінних металів при низьких робочих частотах в індукторних системах для магнітно-імпульсної обробки металів.

*Ключові слова:* імпульсні магнітні поля, силове притягання, низькочастотний режим.

## CHANGING DIRECTION FEATURES OF THE FORCES, ACTING ON THE SHEET FERROMAGNETIC OVER MPMT

Yu. Batygin, professor, dr. eng. sc., A. Gnatov, assistant professor, cand. eng. sc.,  
S. Shchigoleva, post graduate student, KhNAHU

*Abstract.* This paper gives an experimental study of the force pulsed magnetic fields mechanism in thin sheet blanks of ferrous and non-ferromagnetic conductor. Displaying the predominant attraction force due to the manifestation of the thin metal magnetic properties with low operating frequency, inductor systems for magnetic-pulse metal treatment.

*Key words:* pulsed magnetic fields, power pull, low-frequency mode.

### Введение

Естественный эффект силового притяжения тонкостенных металлов низкочастотными магнитными полями был экспериментально обнаружен профессорами Ю.В.Батыгиным, В.И. Лавинским, Л.Т. Хименко в 2004г. и

впервые описан в авторских публикациях [1,2].

Сущность обнаруженного явления состоит в следующем. При частоте  $\sim 2.2$  кГц силовое воздействие со стороны магнитного поля приводило к притяжению участка ровного

стального образца толщиной  $\sim 0.5 \div 1.0$  мм и образованию вмятины, соответственно поперечным размерам рабочей зоны индуктора-инструмента. При повышении рабочей частоты до  $\sim 7.5$  кГц этот же участок стальной пластины испытывал отталкивание. Имело место образование выпуклости, то есть проявление известного магнитного давления на проводник.

### Анализ публикаций

Практическое использование обнаруженного эффекта представляет несомненный интерес для создания современных обрабатывающих технологий. На его базе можно будет создавать рабочие инструменты для выполнения производственных операций не только по устранению вмятин в повреждённых металлических покрытиях транспортных средств [3,4], но и технологий комбинированного плана, осуществляющих магнитно-импульсную формовку изделий, как отталкиванием, так и притяжением заданных участков обрабатываемого объекта [5].

Достоверное объяснение физической природы обнаруженного эффекта может базироваться на выводах работ [6,7,8]. Вкратце перечислим их.

Как показали вычисления, проведенные для условий эксперимента по притяжению тонкостенных стальных образцов, при достаточно низких частотах магнитных полей:

- временная форма индуцированных токов стремится к производной тока индуктора [6];
- вследствие изменения временной формы индуцированных токов, интегральное действие сил Лоренца стремится к нулю, и проводник не испытывает магнитного давления, отталкивающего его от рабочей поверхности индуктора-инструмента [7];
- даже незначительное отличие относительной магнитной проницаемости металла обрабатываемого образца от единицы ( $\mu_r \approx 5 \div 10$ ) есть причина появления довольно мощных сил притяжения, деформирующих тонкостенный листовой образец [8].

Примечание: величина  $\mu_r=1.2$ , для которой имеет место притяжение, указана также в [4].

### Цель и постановка задачи

Цель настоящей работы – экспериментальное подтверждение преобладающей действительности сил притяжения, обусловленных проявлением магнитных свойств тонкостенных металлов при низких рабочих частотах в индукторных системах для магнитно-импульсной обработки металлов.

### Экспериментальное оборудование и экспериментальные образцы

Экспериментальное оборудование включало источник мощности – сильноточный генератор и индукторную систему, состоящую из одновиткового соленоида, подключаемого к электрическому выходу источника мощности через согласующее устройство – импульсный трансформатор тока цилиндрического типа.



Рис. 1. Экспериментальный магнитно-импульсный комплекс: 1 – источник мощности (сильноточный генератор), 2 – индукторная система-инструмент, 3 – экспериментальные образцы.

Источник мощности:

- магнитно-импульсная установка МИУС-2, разработанная и созданная в лаборатории электромагнитных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета;
- запасаемая энергия  $\sim 2$  кДж;
- ёмкость накопителя –  $C = 1200$  мкФ;
- собственная частота –  $f_0 \approx 7$  кГц;
- собственная индуктивность –  $L \approx 430$  нГн;

- напряжение емкостного накопителя допускало регулировку в диапазоне  $\sim 100\div 2000$  В;
- частота следования генерируемых импульсов тока в режиме их многократного повторения  $\sim 3.5$  Гц;
- режим многократного повторения обеспечивается электронным блоком управления, синхронизирующим процессы заряд – разряд;
- тип коммутаторов – тиристорные выключатели;
- габаритные размеры установки –  $860\times 600\times 400$  мм;
- напряжение питающей сети  $\sim 220$ В.

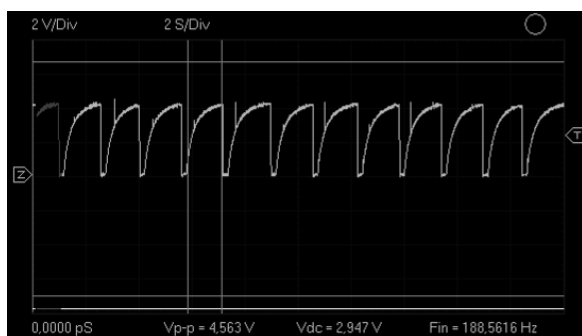


Рис. 2. Осциллограмма зарядного напряжения емкостного накопителя.

Одновитковый индуктор-соленоид подключался к электрическому выходу МИУС-2 через согласующее устройство – импульсный трансформатор тока цилиндрического типа с коэффициентом трансформации на рабочих частотах  $\sim 2$ кГц не более  $\sim 5$ .

Экспериментальные образцы – объекты исследования:

- плоская пластина из ферромагнитной стали кузовной обшивки автомобиля модели «Субару» толщиной  $\sim 0.8$  мм (Япония);
- плоская пластина из ферромагнитной стали кузовной обшивки автомобиля модели «Ситроен» толщиной  $\sim 1.0$  мм (Европа);
- плоская пластина из неферромагнитной нержавеющей стали толщиной  $\sim 0.8$  мм.

Примечание: Наличие магнитных свойств у металла каждого из экспериментальных образцов устанавливалось их реакцией при внесении в поле постоянного пробного магнита.

## Результаты экспериментов

Настоящие эксперименты по созданию вмятин притяжением участков на поверхности листовых образцов (область внутреннего отверстия индуктора!) проводились в режиме многократного повторения импульсов силового воздействия:

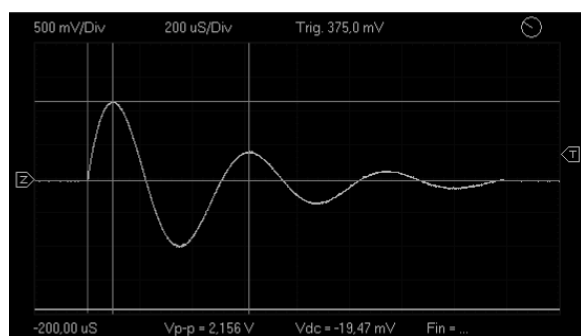
- частота следования  $\sim 3.5$  Гц, количество повторений  $\sim 50$ ;
- рабочая частота тока в импульсе  $\sim 1.9$  кГц;
- напряжение на емкостном накопителе  $\sim 1800$  В;
- амплитуда тока в первичной цепи согласующего устройства  $\sim 8000$  А;
- амплитуда тока во вторичной цепи согласующего устройства (то есть, собственно в индукторе)  $\sim 38000$  А.

Напомним, что в экспериментах, где впервые был обнаружен эффект притяжения, в качестве источника мощности использовалась магнитно-импульсная установка МИУ-10 НТУ «ХПИ», к электрическому выходу которой также через согласующее устройство (дискового типа) подключался одновитковый индуктор. Притяжением на поверхности ровных листовых образцов из стали толщиной до  $\sim 1$ мм были получены вмятины по размеру внутреннего окна индуктора. Эффект имел место при рабочей частоте токового импульса  $\sim 2.2$ кГц, напряжении емкостного накопителя  $\sim 4600$  В, значении запасённой энергии  $\sim 10$  кДж [1,2].

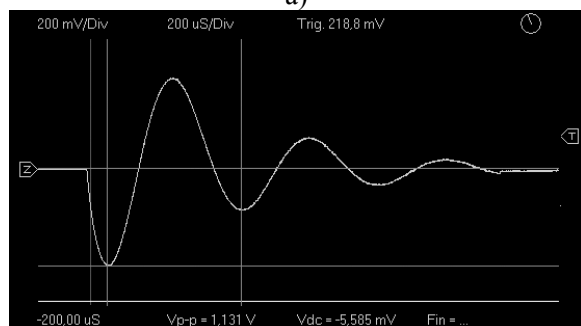
Как видно из сравнения данных по условиям проведения экспериментов, рабочие частоты токовых импульсов практически идентичны. Отличие состоит лишь в значениях напряжения и запасённой энергии, соответственно,  $\sim 1800$  В и  $\sim 4600$  В,  $\sim 2$  кДж и  $\sim 10$  кДж. Переход к более низким показателям процесса стал возможным за счёт более эффективной конструкции согласующего устройства и работы в режиме многократного повторения импульсов силового воздействия.

Осциллограммы токовых импульсов представлены на рис. 3. Следует отметить характерное изменение формы индуцированных токов в начальной фазе процесса, как во вторичной обмотке согласующего устройства, так и в металле экспериментального образца. Как было показано ранее в цитированных работах [6,7,8], данное изменение обуслов-

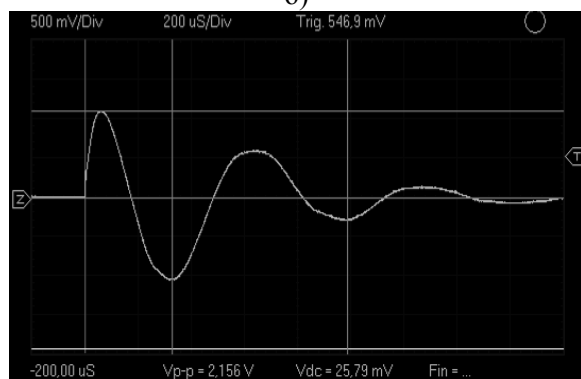
лено низкочастотным характером действующих магнитных полей.



а)



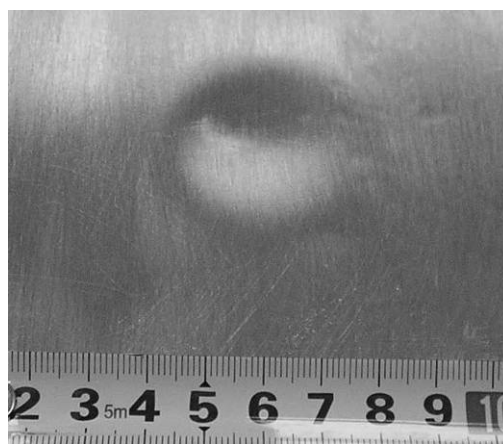
б)



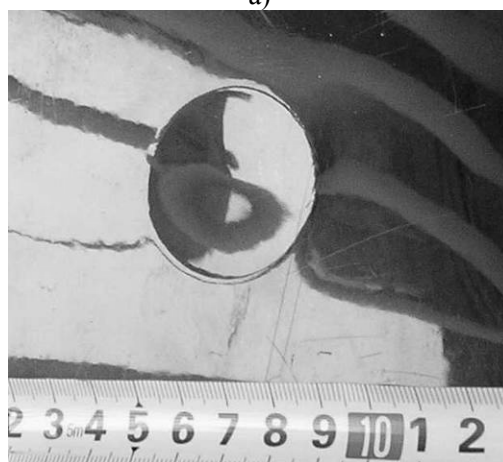
в)

Рис. 3. Осциллограммы токовых импульсов: а) первичная обмотка согласующего устройства; б) вторичная обмотка согласующего устройства – собственно индуктор; в) в металле экспериментального листового образца.

Экспериментальные образцы, приведенные на рис. 4, были получены после 50-кратного силового воздействия.



а)



б)



в)

Рис. 4. Экспериментальные листовые образцы: а) сталь кузова автомобиля модели «Субару», толщина  $\sim 0,8$  мм; б) сталь кузова автомобиля модели «Ситроен», толщина  $\sim 1,0$  мм; в) нержавеющая сталь, толщина  $\sim 0,8$  мм.

Глубина вмятин, полученных магнитно-импульсным притяжением, составляет  $\sim 1,2\div 1,5$  мм. Поперечные размеры соответ-

ствуют диаметру внутреннего окна индуктора ~ 40 мм. Различия в глубине вмятин, несмотря на идентичность экспериментов, объясняются, вероятно, различием в механических характеристиках сталей разных производителей.

В образце из нержавеющей стали, не обладающей магнитными свойствами, отсутствуют какие-либо следы силового воздействия со стороны магнитного поля. Нет ни притяжения, ни отталкивания. Последнее соответствует магнитному давлению, лежащему в основе большинства известных технологий с помощью магнитно-импульсной обработки металлов.

### Выводы

Экспериментально обоснована возможность повышения эффективности магнитно-импульсной обработки металлов в режиме серийного повторения силового воздействия.

Экспериментально подтверждена превалирующая действенность сил притяжения, обусловленных проявлением магнитных свойств тонкостенных металлов при низких рабочих частотах, немагнитные металлы не испытывают никакого силового воздействия.

### Литература

1. Yu.V.Batygin, V.I.Lavinsky, L.T.Khimenko, Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. P.157-160.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т., Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов. // Электротехника і електромеханіка. Харків. 2004, №2, с.80-84.
3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т., Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок. Патент України №775676. 15.05.2006. Бюл. №5.
4. R.Meichtry, I.Kouba. Dent removing method and device. Patent US 2008/0163661A1, Jul.10, 2008.
5. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Магнитно-импульсное притяжение листовых металлов – перспективное направление в развитии электромагнитной штамповки. //Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Київ. 2010. – Ч.1, с.175 – 180.
6. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бондаренко А.Ю., Вихревые токи в тонких металлических листах при магнитно-импульсной обработке металлов. // Электричество. 2009. №9. с.61-65.
7. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Силы, действующие на тонкостенный проводник, в проникающем поле плоского одновиткового соленоида. // Технічна електродинаміка. Київ. 2010. №1, с.9 – 14.
8. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Теория и эксперимент магнитно-импульсного притяжения тонкостенных металлов. Харьков: Изд. ХНАДУ. 2009. – 245с.

Рецензент: А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 11 сентября 2011 г.