

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ СИСТЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ

У статті представлені результати практичної апробації методики вимірювань і визначення характеристик тонкостінних листових ферромагнетиків при реальному магнітно-імпульсному притяженні їх ділянок, заданих умовами виробничої операції. Показано, що величина відносної магнітної проникності оброблюваних металів відмінна від одиниці, що відповідає повному насиченню.

В статье представлены результаты практической апробации методики измерений и определение характеристик тонкостенных листовых ферромагнетиков при реальном магнитно-импульсном притяжении их участков, заданных условиями производственной операции. Показано, что величина относительной магнитной проницаемости обрабатываемых металлов отлична от единицы, что соответствует полному насыщению.

ВВЕДЕНИЕ

В технологиях традиционной магнитно-импульсной обработки разного рода стальных заготовок (например, плоская штамповка, обжим и раздача полых труб, холодная сварка и др.), магнитные свойства образцов никак не влияли на успешность выполняемой производственной операции [1]. Действительно, при реальном силовом давлении на массивные объекты амплитуды напряжённости составляли $\sim 10^7$ А/м и выше. В этом диапазоне действующих полей относительная магнитная проницаемость обрабатываемых металлов далека от своего максимума и стремится к единице [2]. Отличие её величины от предельного значения не оказывало влияния на эффективность обработки. Соответственно, вопрос об определении магнитных характеристик обрабатываемых металлов не представлял никакого практического интереса. Но с появлением разработок производственных операций, основанных на магнитно-импульсном притяжении ферромагнетиков, идентификация магнитной проницаемости объектов обработки при реальном силовом воздействии становится весьма актуальной. Результаты проведенных исследований дали основание полагать, что её величина, даже незначительно больше единицы, определяет амплитуды возбуждаемых сил магнитного притяжения заготовки к источнику поля – индуктору [3].

Цель работы – практическая апробация методики измерений и определение характеристик тонкостенных листовых ферромагнетиков при реальном магнитно-импульсном притяжении их участков, заданных условиями производственной операции.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объект исследований – заготовка из тонкостенной листовой стали автомобиля "Citroën" толщиной ~ 0.001 м (здесь следует перечислить все заготовки из различных сталей, но, как объект экспериментальной отработки предложенного метода, указать один из них) с вырезами, позволяющими размещение катушек индукционных датчиков. В одном из вырезов сохраняется металлический выступ (рис. 1,а, справа), во втором – крепится диэлектрическая вставка (рис. 1,а, слева).

Индукционный датчик через интегратор (рис. 1,б) подключается к осциллографу.

Оборудование – магнитно-импульсная установка МИУС-2, созданная в лаборатории электромагнитных технологий Харьковского национального автомо-

бильно-дорожного университета, согласующее устройство и одновитковая индукторная система с внутренним отверстием конической формы [4]. Полость отверстия – рабочая зона инструмента.

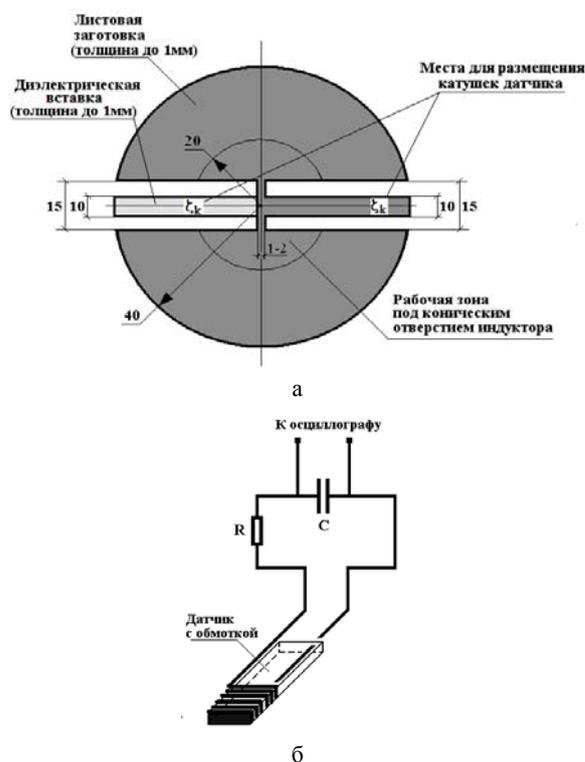


Рис. 1. Эксперимент по измерению магнитных характеристик в МИОМ: а – эскиз листовой заготовки, б – схема подключения индукционного измерителя (через интегратор)

Методика эксперимента:

- 1) на выступах (рис. 1, диэлектрическая вставка – слева, металл заготовки – справа) в пределах рабочей зоны индукторной системы были отмечены 5 точек для размещения обмотки индукционного датчика;
- 2) сигнал непосредственно с обмотки индукционного датчика подавался на вход осциллографа;
- 3) выход обмотки индукционного датчика через интегратор (рис. 1,б) подключался к осциллографу;
- 4) осциллографируемые сигналы измерялись;
- 5) производилась численная обработка результатов измерений.



а

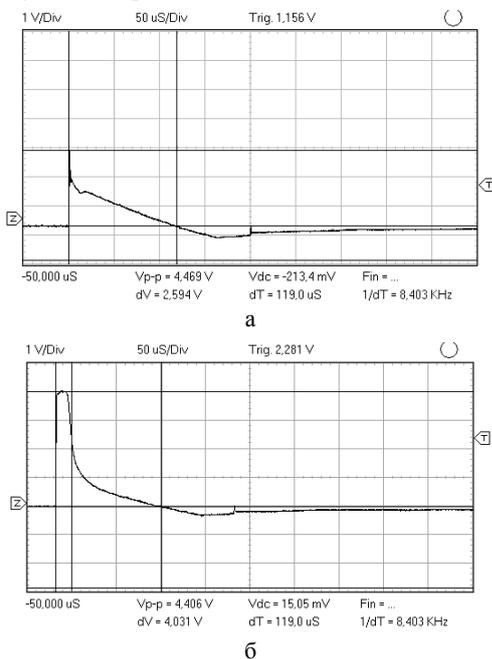
б

Рис. 2. Экспериментальное оборудование:
а – магнитно-импульсная установка МИУС-2 (сверху – выносной инструмент в защитном корпусе с кабельным подсоединением), б – массивный одновитковый индуктор с внутренним отверстием конической формы

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Первые эксперименты проводились для двух значений напряжения на емкостном накопителе: $U = 900$ В и $U = 1800$ В. Выбранный диапазон энергий должен проиллюстрировать дифференциацию магнитных свойств исследуемого образца в режимах, когда при многократном повторении силовых воздействий в зависимости от их количества имело место образование вмятин разной глубины [5].

Численные оценки характеристик импульсных сигналов в настоящих экспериментах (типичные представления на рис. 3, 4), проведенные соответственно методикам монографии [6], показали, что отличия отношений их средних значений от отношений их максимумов не превышают 10-12%.



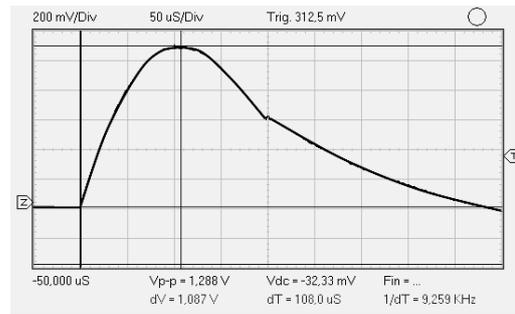
а

б

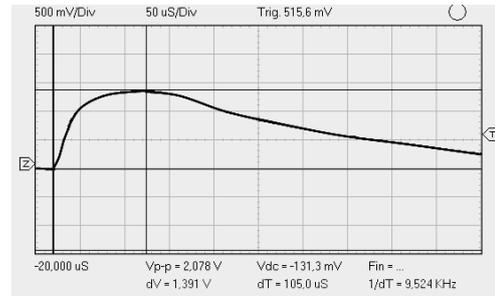
Рис. 3. Осциллограммы сигналов с обмоток индукционных датчиков для определения динамической проницаемости (в точке $r/R \approx 0.2$):

- а – во внутренней полости катушки – диэлектрик;
- б – во внутренней полости катушки – ферромагнетик

Это позволяет приближённые оценки усреднённых характеристик ферромагнитных заготовок в каждой точке расположения обмотки измерителя находить как отношение временных максимумов числителя и знаменателя.



а



б

Рис. 4. Типичные осциллограммы проинтегрированных сигналов с обмоток индукционных датчиков при определении относительной магнитной проницаемости (в точке $r/R \approx 0.2$):

- а – во внутренней полости катушки – диэлектрик;
- б – во внутренней полости катушки – ферромагнетик

Конечные результаты определения магнитных характеристик исследуемого образца при магнитно-импульсном воздействии сведены в табл. 1.

Таблица 1

$\frac{r}{R}$	Отн. магн. проницаемость, $\bar{\mu}_r(\zeta_k)$, $U = 900$ В	Динам. магн. проницаемость, $\bar{\mu}_H(\zeta_k)$, $U = 900$ В	Отн. магн. проницаемость, $\bar{\mu}_r(\zeta_k)$, $U = 1800$ В	Дин. магн. проницаемость, $\bar{\mu}_H(\zeta_k)$, $U = 1800$ В
0.2	2.40	2.50	1.26	1.55
0.4	2.17	2.34	1.33	1.85
0.6	1.88	2.54	1.30	1.49
0.8	1.81	2.40	1.27	1.52
1.0	1.87	2.47	1.37	1.60
Ср. вел.	$\bar{\mu}_r \approx 2.026$	$\bar{\mu}_H \approx 2.45$	$\bar{\mu}_r \approx 1.306$	$\bar{\mu}_H \approx 1.602$

Визуально, радиальные распределения магнитных проницаемостей иллюстрируют графические зависимости на рис. 5.

Как следует из проведенных измерений, средние значения динамической и относительной магнитной проницаемости в диапазоне напряжений емкостного накопителя $U \in [900$ В, 1800 В], соответственно, будут равны: $\bar{\mu}_H \approx 2.025$ и $\bar{\mu}_r \approx 1.67$.

Результаты измерений относительной магнитной проницаемости согласуются с теорией, а также значениями μ_r , принятыми авторами теоретического обоснования экспериментально обнаруженного эффекта притяжения листового ферромагнетика при низких частотах [7].

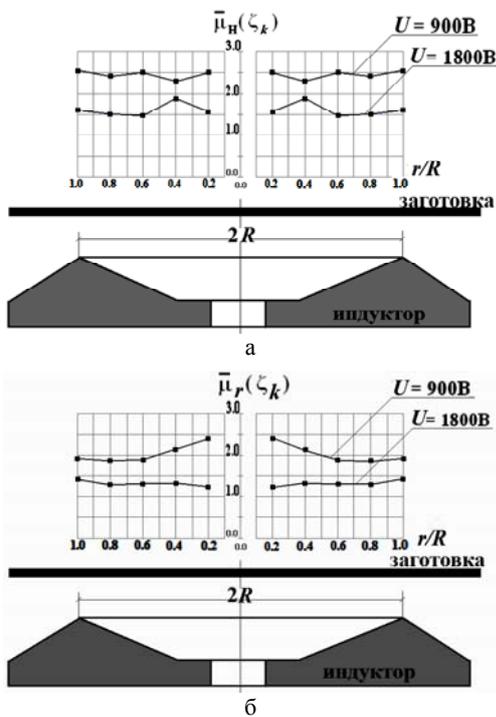


Рис. 5. Радиальные распределения магнитных проницаемостей в листовых ферромагнетиках при МИОМ: а – динамическая магнитная проницаемость, б – относительная магнитная проницаемость

В экспериментальном образце на рис. 1 отсутствует металл в центральной части, соответствующей рабочей зоне индукторной системы. Очевидно, что данная геометрия практически полностью исключает влияние индуцированных токов на результаты измерений. Тем не менее, это влияние требует количественного определения.

В этой связи были проведены аналогичные измерения для "контрольного" листового образца с частичным сохранением металла в центральной части, представленного на рис. 6, что в отличие от геометрии на рис. 1, а, позволяет указать замкнутые контуры для протекания индуцированных токов.

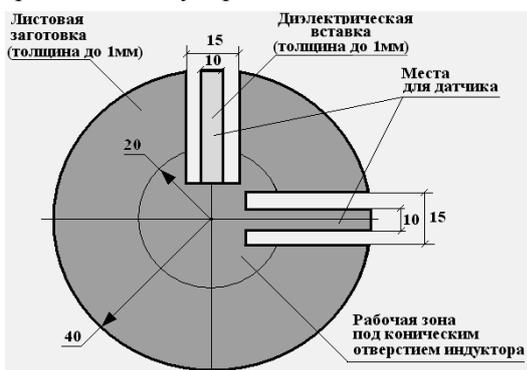


Рис. 6. Эскиз "контрольной" листовой заготовки с сохранением металла в рабочей зоне индукторной системы

Типичные осциллограммы проинтегрированных сигналов представлены на рис. 7.

Вычисления, проведенные по результатам измерений, показали, что средняя величина относительной магнитной проницаемости металла листового образца на рис. 6 (рис. 8, б) в рабочей зоне индукторной сис-

темы составляет: при напряжении $U = 900 \text{ В}$ – $\bar{\mu}_r \approx 2.0$, а при напряжении $U = 1800 \text{ В}$ – $\bar{\mu}_r \approx 1.36$.

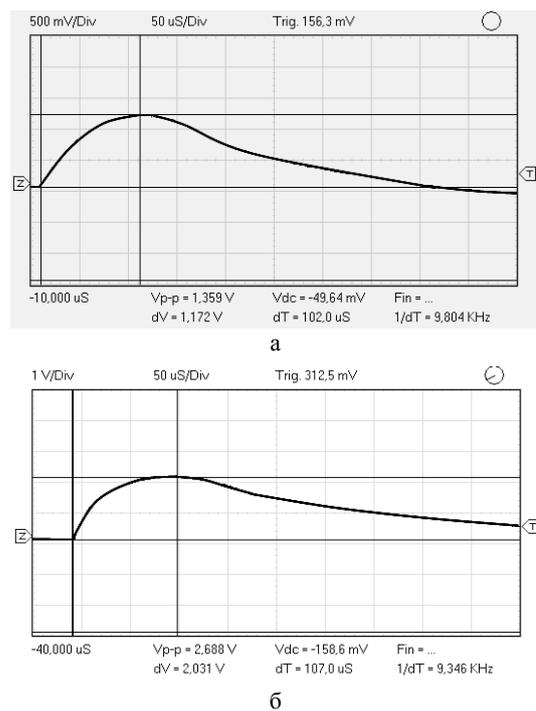


Рис. 7. Осциллограммы проинтегрированных сигналов с обмоток индукционных датчиков для определения относительной магнитной проницаемости (в точке $r/R \approx 0.5$): а – во внутренней полости катушки – диэлектрик; б – во внутренней полости катушки – ферромагнетик

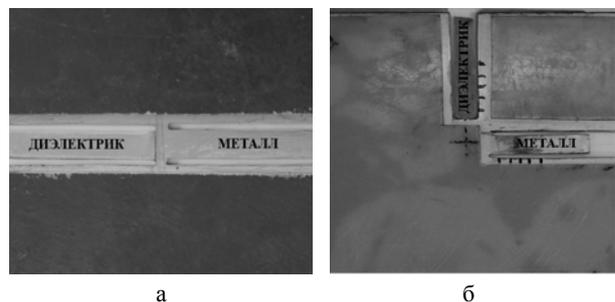


Рис. 8. Реальные листовые ферромагнетики в экспериментах по определению магнитных характеристик при МИОМ: а – образец, эскиз которого представлен на рис. 1, а, б – "контрольный" образец, эскиз которого представлен на рис. 6

Сравнение данных, полученных для листовых заготовок с различной геометрией вырезов для размещения индукционных датчиков, показали, что временная форма сигналов в измерителях остаётся неизменной, а расхождения в определении относительной магнитной проницаемости не превышают 4 %. Таким образом, геометрия образца для определения магнитных характеристик листовых ферромагнетиков при МИОМ, практически, не влияет на результаты измерений.

Теперь о пространственном распределении напряжённости магнитного поля.

Параметры интегратора: $R = 8.2 \cdot 10^3 \text{ Ом}$, $C = 0.1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$. Параметры датчика: число витков – $w = 100$, площадь поперечного сечения – $S = 10^{-5} \text{ м}^2$.

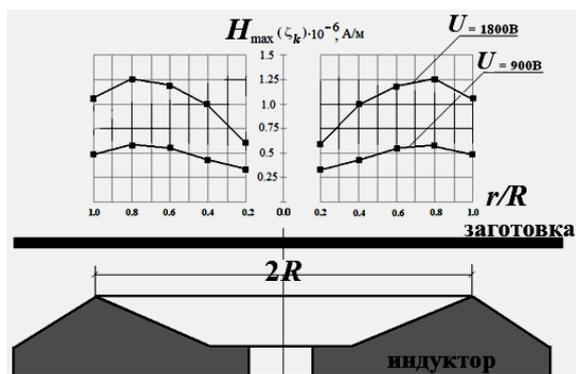


Рис. 9. Радиальное распределение напряжённости возбуждаемого магнитного поля в рабочей зоне индукторной системы при различных значениях напряжения на ёмкостном накопителе

По измеренным максимумам напряжения на выходе интегратора в фиксированных точках рабочей зоны были определены амплитудные значения напряжённости магнитного поля. Результаты представлены на рис. 9.

Как следует из рис. 9, максимальная напряжённость магнитного поля (тангенциальная составляющая) составляет $\sim 1.25 \cdot 10^6$ А/м, а усреднённая по радиусу $\sim 1.05 \cdot 10^6$ А/м. Вероятно, что данные величины могут служить ориентиром для оценки амплитуды возбуждаемого поля, достаточной для преодоления предела пластичности металла обрабатываемого листового ферромагнетика и его деформирования притяжением к индуктору.

Вторая группа экспериментов, проведенных для напряжений $U = 450$ В и $U = 1350$ В, была направлена на обобщение полученных результатов. Она дополняет физическую картину зависимости магнитных характеристик металлов от величин напряжённости действующего поля в реальных процессах МИОМ.

Аналогично предыдущему для выделенных напряжений ёмкостного накопителя были проведены измерения проинтегрированных сигналов. С учётом ранее полученных результатов была получена зависимость относительной магнитной проницаемости металла от напряжённости магнитного поля, усреднённых по величинам в различных точках рабочей зоны индукторной системы (см. рис. 10).

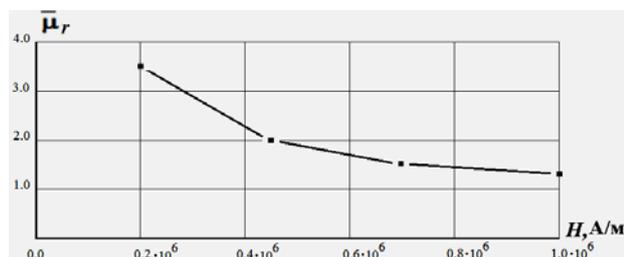


Рис. 10. Функциональная зависимость относительной магнитной проницаемости металла листовой заготовки от амплитуды напряжённости поля в индукторной системе при МИОМ

Характер и поведение кривой $\mu_r(H)$ на рис. 10 физически полностью согласуется с зависимостью, представленной в фундаментальных работах по исследованиям ферромагнетиков (например, в монографии Я. Туровского [2]).

Прогнозирование "скорости" изменения магнитных свойств обрабатываемого металла в диапазоне реальной для МИОМ напряжённости действующего поля представляет практический интерес и может быть проведено с помощью первой производной относительной магнитной проницаемости.

Как следует из формулы для усреднённой динамической проницаемости

$$\frac{d\bar{\mu}_r(\bar{H})}{d\bar{H}} = \frac{1}{\bar{H}} \cdot [\bar{\mu}_H(\bar{H}) + \bar{\mu}_r(\bar{H})].$$

Данное выражение, записанное в терминах усреднённых величин, определяет первую динамическую характеристику поведения магнитных свойств, а именно, "скорости" изменения проницаемости при вариации напряжённости поля в индукторной системе.

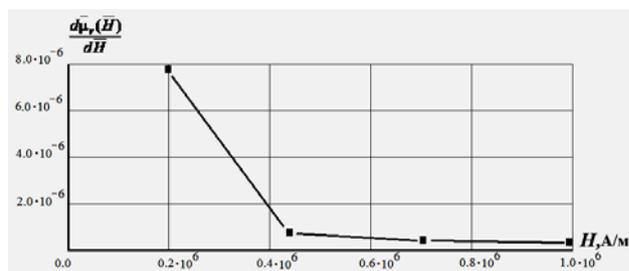


Рис. 11. Первая динамическая характеристика магнитных свойств металла обрабатываемого объекта в диапазоне реальных напряжённостей полей при МИОМ

Как видно из графической зависимости на рис. 11, абсолютная величина скорости изменения магнитной проницаемости достаточно мала. Тем не менее, следует отметить резкое изменение производной при низких значениях напряжённости (почти на порядок для $(0.2 \div 0.4) \cdot 10^6$ А/м!). Но при приближении к амплитуде поля, когда имеет место деформирование, $d\bar{\mu}_r(\bar{H})/d\bar{H}$ изменяется весьма слабо, что означает сохранение значения относительной магнитной проницаемости, близкого к единице, но отличного от неё. Данное утверждение согласуется с простыми физическими соображениями. Очевидно, что $\mu = 1$ при $H \rightarrow \infty$.

В заключение приведём результаты измерений в табл. 2 для сталей обшивок автомобилей американского концерна "Ford Motor Company". В сравнении с аналогами для европейской фирмы "Citroën" эти данные дают некоторое обобщающее представление о магнитных характеристиках сталей, применяемых в мировом автомобилестроении.

Таблица 2

Марка стали	Усреднённая относительная магнитная проницаемость в рабочей зоне инструмента	
	$\bar{\mu}_r _{U=900B}$	$\bar{\mu}_r _{U=1800B}$
IF	2.25	1.36
ВН 210	2.188	1.41
ВН 240	2.334	1.44
Усреднение по маркам сталей	$\bar{\mu}_r \approx 2.26$	$\bar{\mu}_r \approx 1.4$

Для стали автомобильной обшивки фирмы "Citroën" из табл. 1. можно выписать соответствующие аналоги: $\bar{\mu}_r|_{U=900B} = 2.026$ и $\bar{\mu}_r|_{U=1800B} = 1.306$.

Сравнение этих данных с величинами из табл. 2 показывает, что относительная магнитная проницаемость стальных обшивок современных автомобилей, выпускаемых как американскими, так и европейскими производителями, в режиме магнитно-импульсного притяжения приблизительно одинакова и принимает значения в интервалах: $\bar{\mu}_r|_{U=900B} \in [2.026, 2.26]$ и $\bar{\mu}_r|_{U=1800B} \in [1.306, 1.4]$.

ВЫВОДЫ

1. Реализована успешная экспериментальная апробация методики измерения магнитных характеристик ферромагнитных листовых заготовок в реальных режимах магнитно-импульсной обработки металлов.

2. Показано, что при магнитно-импульсном притяжении тонкостенных листовых ферромагнетиков величина относительной магнитной проницаемости обрабатываемых металлов отлична от единицы, что соответствует полному насыщению, и принимает значения в диапазоне $\mu_r \geq 1.3$.

3. Успешно апробирована методика измерения напряжённости магнитного поля в рабочей зоне индукторной системы в реальном режиме силового воздействия при МИОМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 4: Магнитно-импульсные технологии для формовки кузовных элементов автомобиля. Учебное пособие. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – 182 с.
2. Туровский Я. Техническая электродинамика. – М.: "Энергия", 1974. – 488 с.
3. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Особенности возбуждения электромагнитных сил при магнитно-импульсной обработке листовых ферромагнетиков // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – №1. – С. 71-77.
4. Щиголева С.А., Барбашова М.В. Анализ теоретических и экспериментальных результатов исследований электродинамических характеристик поля в индукторной системе с коническим отверстием // *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт*. – 2012. – Вип. 134. – С. 212-216.
5. Батыгин Ю.В., Воробьев В.В., Гнатов А.В., Гнатова Щ.В., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Расчётные характеристики магнитно-импульсной установки для обработки металлов серий импульсов // *Вісник НТУ "ХПИ"*. – 2011. – №12. – С. 86-95.
6. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
7. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Изменение направления силового воздействия на проводник при вариации частоты действующего магнитного поля // *Вестник науки и техники*. – Харьков, 2004. – № 2, 3 (17, 18). – С. 18-22.

- REFERENCES:** 1. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Serikov G.S., Chaplygin E.A. *Impulsnye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij. Tom 4: Magnitno-impulsnye tehnologii dlja formovki kuzovnyh elementov avtomobilja. Uchebnoe posobie* [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol. 4: Magnetic pulse technology for forming body elements of the car. Textbook]. Kharkov, Kharkov National Automobile and Highway University Publ., 2010. 182 p. 2. Turovskij Ya. *Tekhnicheskaja elektrodinamika* [Technical electrodynamics]. Moscow, Energija Publ., 1974. 488 p. 3. Batygin Yu.V., Gnatov A.V. The features of the electrical magnetic forces excitation in the magnetic pulse sheet ferromagnetic metal working. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrodynamics*, 2012, no.1, pp. 71-77. 4. Schigoleva S.A., Barbashova M.V. Analysis of theoretical and experimental results for electrodynamic field characteristics research in the inductive system with a conical bore. *Visnyk SevNTU: zb. nauk. pr. Serija: Mashynopryladobuduvannya ta transport – Bulletin of Sevastopol National Technical University: The collection of scientific works. Series: Machine-instrument-building and transport*, 2012, no.134, pp. 212-216. 5. Batygin Yu.V., Vorobjev V.V., Gnatov A.V., Gnatova Sch.V., Serikov G.S., Chaplygin E.A. Calculated characteristics of magnetic pulse systems for metal processing by series of pulses. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2011, no.12, pp. 86-95. 6. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. *Impulsnye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij. Tom 3. Teoriya i eksperiment prityazhenija tonkostennyh metallov impulsnymi magnitnymi poljami: monografija* [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol. 3: Theory and experiment attraction thin metal pulsed magnetic fields: Monograph]. Kharkov, Kharkov National Automobile and Highway University Publ., 2009. 240 p. 7. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I., Khimenko L.T. Changing the direction of force action on the conductor at the variation of acting magnetic field frequency. *Vestnik nauki i tehniki – Bulletin of Science and Technology*, 2004, no.2,3 (17,18), pp. 18-22.

Поступила (received) 16.04.2014

Чаплыгин Евгений Александрович¹, к.т.н., доц.,
Барбашова Марина Викторовна¹, аспирант,
Сабокарь Олег Сергеевич¹, студент,
¹ Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,
тел/phone +38 057 7073727, e-mail: barbashova1987@gmail.ru

E.A. Chaplygin¹, M.V. Barbashova¹, O.S. Sabokar¹
¹ Kharkov National Automobile and Highway University
25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine

Experimental approbation of sheet metal magnetic permeability measurement systems.

The article presents results of practical testing of measurement techniques and characterization of thin sheet metallic ferromagnets under real pulsed magnetic attraction of their sections specified by manufacturing operation conditions. It is shown that the relative magnetic permeability of the processed metals is different from one, which corresponds to full saturation.

Key words – thin sheet metal ferromagnets, magnetic permeability.