

УДК 621.373:621.3.014.12

А. В. Алифанов, И. А. Богданович, В. В. Малеронок

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования
Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь
+375 (17) 369 85 52, alifanov_aav@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Предложен метод структурного анализа свойств поверхностного слоя стальных образцов, основанный на прохождении через образец тока высокой частоты, до и после упрочняющей обработки образцов магнитно-импульсным воздействием. Результаты исследований остальных цилиндрических образцов, в том числе пружин, доказали эффективность метода, показавшего повышение физико-механических свойств образцов после их магнитно-импульсной обработки.

Ключевые слова: стальные образцы; пружина; метод структурного анализа; токи высокой частоты; физико-механические свойства.

Табл. 1. Рис. 4. Библиогр.: 5 назв.

A. V. Alifanov, I. A. Bogdanovich, V. V. Maleronok

Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21, Voykova Str.,
225404 Baranovichi, Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, alifanov_aav@mail.ru

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF STEEL SAMPLES SURFACE LAYER ON THEIR PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

The method of structural analysis of the properties of the surface layer of steel samples, based on passing of high-frequency current through the sample, before and after hardening treatment of samples by magnetic-pulse impact is proposed in the article. The results of studies of other cylindrical specimens, including springs, proved the effectiveness of the method: it showed improved physical and mechanical properties of samples after magnetic-pulse processing.

Keywords: steel samples; spring, method of structural analysis; high-frequency currents; physical and mechanical properties.

Tab. 1. Fig. 4. Ref.: 5 titles.

Введение. Учеными Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» и учреждения образования «Барановичский государственный университет» разработана новая технология повышения прочностных свойств стальных изделий, как закаленных, так и незакаленных, путем воздействия сильным импульсным электромагнитным полем. При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла [1].

Преимуществом магнитно-импульсной обработки (далее — МИО), по сравнению с известными методами упрочнения, является то, что геометрические параметры и качество поверхности упрочненных изделий не меняются, не требуется дополнительная термообработка, финишные операции, сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.

Под воздействием МИО на поверхности стального изделия образуется упрочненный слой толщиной до 70 мкм [1—4].

Существуют многочисленные методы исследования свойств упрочненных поверхностных слоев.

В процессе упрочнения металлических изделий высокоэнергетическими методами (МИО, ионно-плазменное азотирование) чаще всего прибегают к диагностированию результата обработки с помощью измерения твердости изделия и проведения микроскопии структуры поверхности. Существуют также различные методы определения внутренних напряжений: рентгеновский, поляризационно-оптический, акустический, электромагнитный и др. [5]. Данные методы являются фундаментальными при анализе, но при этом не дают полной картины результата, требуют наличия дорогостоящего лабораторного оборудования и существенных затрат времени как на проведение самого исследования, так и в процессе подготовки.

В данной работе предложен более простой и удобный в использовании метод исследования свойств упрочненного слоя стальных изделий, основанный на прохождении через металлический образец тока высокой частоты.

Основная часть. Методика проведения экспериментов. Для проведения исследований были изготовлены образцы из стали 40Х диаметром 20 мм и длиной 100 мм.

Упрочняющую обработку образцов проводили на магнитно-импульсной установке, изготовленной для БарГУ в лаборатории механофизики формообразования гетерогенных систем Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси, с максимальным накопленным напряжением 5,2 кВ и энергией импульса 6,1 кДж. Обработку образцов осуществляли в цилиндрическом индукторе с внутренним (рабочим) диаметром 22 мм. Количество импульсов изменяли от 2 до 4. Для исследования свойств поверхностного слоя стального образца использован осциллограф и генератор высокой частоты, которые в совокупности представляют собой USB-приставку к компьютеру (рисунок 1).

Температуру образцов после обработки в индукторе измеряли пирометром.

Результаты исследований. Для опробования нового метода структурного анализа провели магнитно-импульсную обработку стального прутка, подвергшегося коррозии (рисунок 2).

В процессе МИО происходит улучшение физико-механических показателей металла. В данном случае магнитное поле воздействует на заготовку не с целью ее деформации, а с целью улучшения физико-механических свойств. Магнитное поле нагревает заготовку; интенсивность вихревых токов, которые им создаются, растет в местах структурной неоднородности заготовки, а именно в местах, где есть дефекты кристаллической решетки или сторонние включения (коррозия, естественное старение, деформация). Под воздействием магнитных полей дефекты исправляются или выталкиваются. Магнитно-импульсная обработка металлов повышает такие показатели как стойкость, прочность и коррозионная защищенность.

В данной работе предлагается метод структурного анализа металлических изделий, основанный на появлении скин-эффекта при прохождении тока высокой частоты (ТВЧ). Скин-эффект, или поверхностный эффект, — эффект уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды. В результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое. А так как при магнитно-импульсном упрочнении происходит воздействие именно на верхние слои изделия, то анализ данного эффекта позволит говорить о качестве упрочнения (однородность, мелкодисперсность).

В качестве зондирующего сигнала использован сигнал синусоидальной формы частотой 33,3 МГц и амплитудой 255 мВ. Выбор обусловлен увеличением чувствительности и точности данного метода, а также с учетом результатов исследований, говорящих о появлении упрочненного слоя толщиной до 70 мкм [1]. Глубину проникновения зондирующего

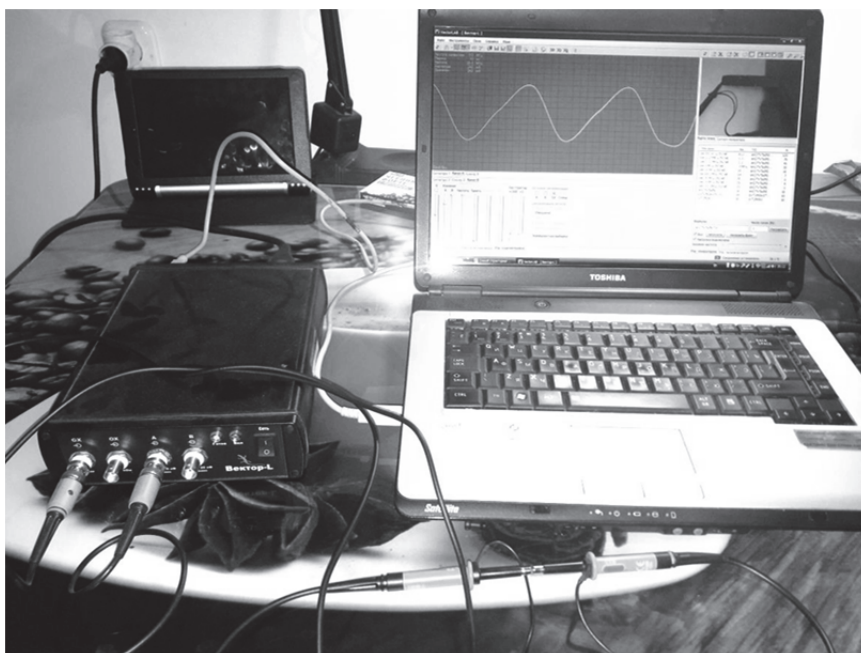


Рисунок 1. — USB-приставка к компьютеру, содержащая осциллограф и генератор сигналов произвольной формы

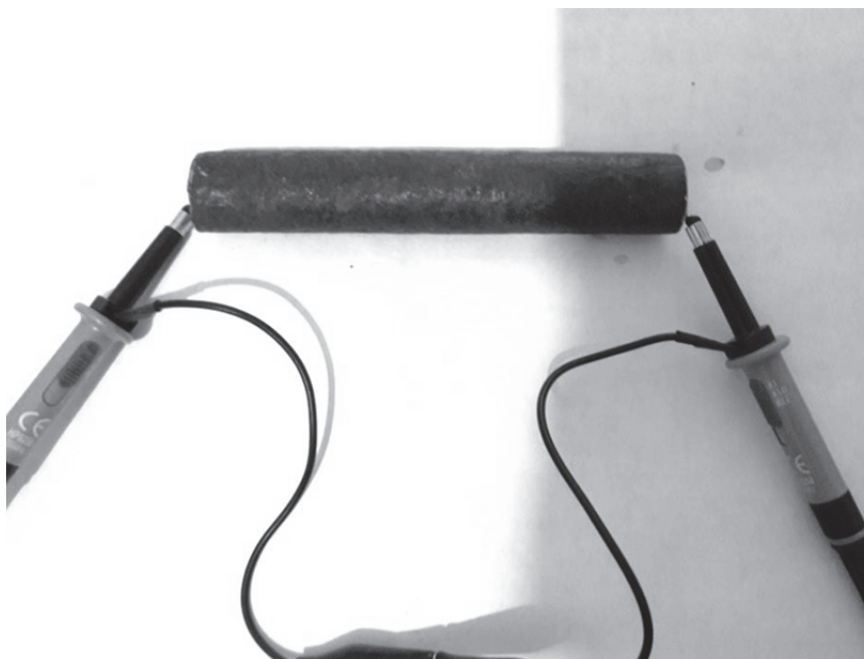


Рисунок 2. — Стальной образец с наличием коррозии

сигнала частотой 33,3 МГц в поверхность стального образца можно определить по формуле

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}},$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление;

μ_m — относительная магнитная проницаемость;

f — частота сигнала.

Подставим табличные значения для изделий из стали и получим:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-7}}{100 \cdot 33,3 \cdot 10^6}} \approx 3,9 \cdot 10^{-6} [\text{м}] = 3,9 \text{ мкм.} \quad (1)$$

Согласно полученным результатам (1) можно говорить о хороших зондирующих свойствах сигнала данной частоты. Это позволит получить результаты при различных режимах упрочнения, т. е. в случаях получения упрочненных слоев в несколько микрометров.

Перед проведением магнитно-импульсного упрочнения получена контрольная осциллограмма прохождения сигнала синусоидальной формы напряжением 255 мВ и частотой 33,3 МГц по стальному образцу цилиндрической формы с наличием коррозии (рисунок 3). Корродированный слой наносили с целью увеличения эффективности метода с использованием ТВЧ, так как он обладает значительно большим электросопротивлением, чем поверхностный слой стального образца.

Видно (см. рисунок 3), что произошло затухание сигнала до 239 мВ (на 16 мВ меньше от исходного). Это объясняется протеканием тока по корродированному слою (неоднородность, нарушение кристаллической решетки), где активное сопротивление увеличено.

Для улучшения физико-механических показателей металла применили МИО образца и получили осциллограмму после ее проведения (рисунок 4).

Анализ рисунка 4 показывает, что произошло улучшение свойств металла (устранены дефекты кристаллической решетки и остаточные напряжения). Это доказывается снижением сопротивления прохождению ТВЧ в корродированном слое и, как результат, уменьшением затухания амплитуды до 250 мВ (на 5 мВ от исходного) по сравнению с рисунком 3.

Таким образом, данный метод обладает достаточной простотой при анализе результатов упрочнения высокоэнергетическими методами обработки и, в сочетании с другими методами (измерение твердости изделия и проведение микроскопии структуры поверхности), дает наиболее полную картину результатов упрочнения (прохождения электрического сигнала высокой частоты).

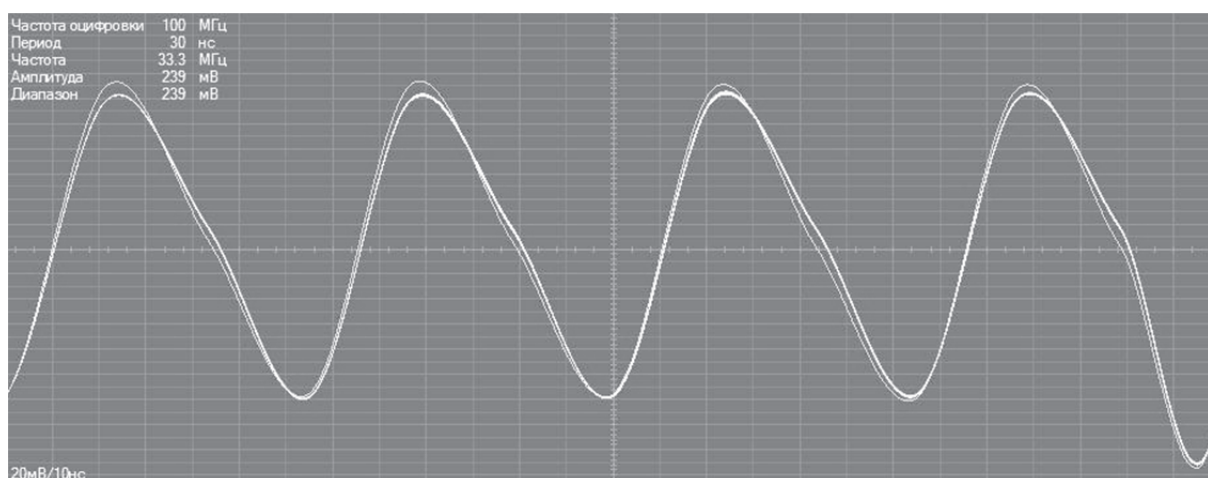


Рисунок 3. — Осциллограмма прохождения тока с частотой 33,3 МГц по корродированному образцу до проведения упрочняющей обработки

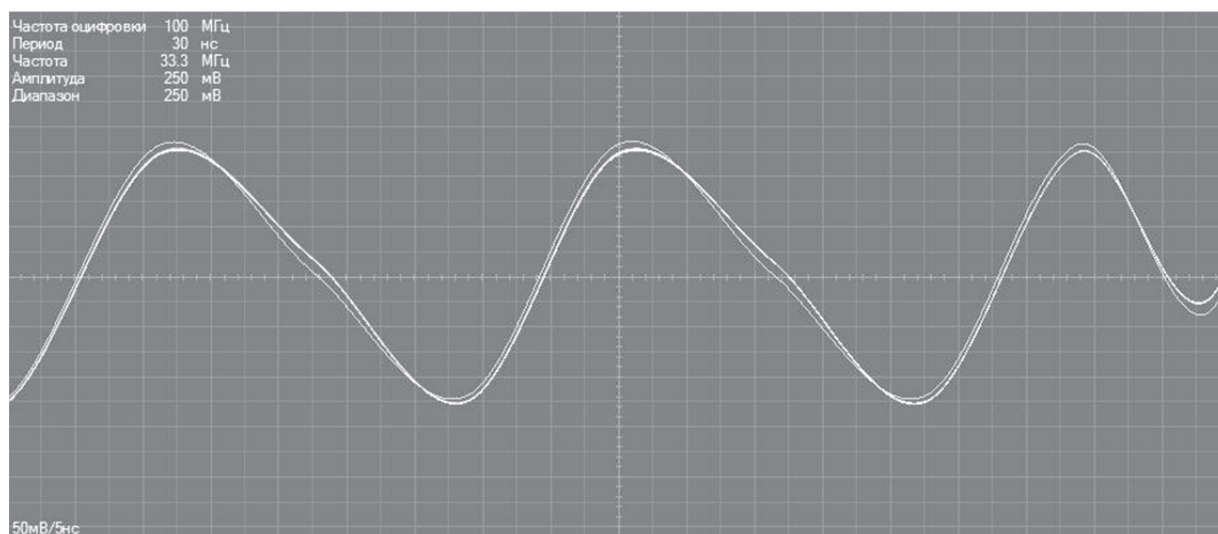


Рисунок 4. — Осциллограмма прохождения тока с частотой 33,3 МГц по корродированному образцу после проведения упрочнения методом МИО

В ходе исследований проводили обработку образцов при различных режимах работы магнитно-импульсной установки с изменением количества сообщенной энергии и количества импульсов. С помощью пирометра определяли температуру образцов после МИО. Рассмотрим полученные результаты (таблица 1).

Из анализа таблицы видно, что температура образца зависит как от энергии, так и от количества импульсов, достигая довольно значительной максимальной величины 156°C . Исследователями [2] установлено, что в результате МИО стальных образцов вышеуказанными режимами локальная температура (в микрообъемах) может достигать $1\ 000^{\circ}\text{C}$, что объясняет достаточно высокую объемную температуру образца. Как известно [2—4], повышение температуры способствует процессу рекристаллизации и, соответственно, проявлению мелкодисперсной структуры.

В процессе упрочнения с помощью магнитно-импульсной установки наблюдалась остаточная намагниченность изделий, так как рабочее поле индуктора имеет постоянный характер, что требует учета и мер по размагничиванию. Так, простейшим способом размагничивания является выдержка изделий в воздушном пространстве в течение нескольких часов. При необходимости ускорения процесса размагничивания заготовку необходимо поместить в индуктор с переменным магнитным полем, что приведет к многократному перемагничиванию (даже в промышленной сети 50 раз за 1 секунду) без ощутимой остаточной намагниченности.

Т а б л и ц а 1. — Температура нагрева образцов в зависимости от режимов обработки

Режим обработки	Параметры обработки		
	3,3 кВ; 2,45 кДж	4,2 кВ; 4 кДж	5,2 кВ; 6,1 кДж
Температура нагрева образца при двух импульсах, $^{\circ}\text{C}$	63	78	96
Температура нагрева образца при четырех импульсах, $^{\circ}\text{C}$	97	110	156

В данной работе также проводили упрочнение стальной пружины диаметром 20 мм с измерением коэффициента упругости до упрочнения и после. Приравняв силу упругости (по закону Гука) (2) и силу тяжести (3), находим коэффициент упругости (4):

$$F_{\text{упр}} = k\Delta l, \quad (2)$$

где k — коэффициент упругости пружины;
 Δl — удлинение пружины.

$$F_{\text{тяж}} = mg, \quad (3)$$

где m — масса груза;
 g — ускорение свободного падения.

$$k = \frac{mg}{\Delta l}, \quad (4)$$

где $m = 1,144$ кг;
 $g = 9,8$ м/с²;

Δl_1 — модуль удлинения до упрочнения, равный $3,88 \cdot 10^{-3}$ м;

Δl_2 — модуль удлинения после упрочнения, равный $3,805 \cdot 10^{-3}$ м.

Подставив соответствующие значения в формулу (4), получим два значения коэффициентов упругости: до упрочнения — $2,8895 \cdot 10^3$ Н/м, после — $2,95 \cdot 10^3$ Н/м. Сравнение этих значений показывает, что произошло увеличение коэффициента упругости пружины на 56,94 Н/м, что указывает на появление упрочненного слоя в материале пружины.

Особенность обработки изделий, подобных пружине, заключается в подборе определенного режима обработки с целью недопущения перегрева изделия и, как следствие, отпуска металла с последующим снижением коэффициента упругости.

Заключение. Предложен метод структурного анализа металлических изделий, основанный на появлении скин-эффекта при прохождении ТВЧ. С помощью этого метода проведены исследования влияния МИО стальных цилиндрических изделий на амплитуду электрического сигнала в процессе пропускания тока высокой частоты (33,3 МГц) через стальной образец диаметром 20 мм, предварительно подвергшийся коррозии. Корродированный слой наносили на образец с целью увеличения эффективности метода с использованием ТВЧ, так как он обладает значительно большим электросопротивлением, чем поверхностный слой стального образца. Исследования показали, что в результате МИО амплитуда тока увеличивается, что говорит об уменьшении электросопротивления поверхностного слоя за счет устранения дефектов кристаллической решетки, снижения остаточных напряжений, измельчения структуры.

Проведены также исследования влияния МИО на коэффициент упругости стальной пружины, результаты которых показали увеличение коэффициента упругости образца, что подтверждает появление упрочненного слоя в материале пружины.

Список цитируемых источников

1. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 3. — С. 77—82.
2. *Алифанов, А. В.* Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 4. — С. 25—35.
3. Modeling of non-stationary diffusion of alloying elements on exposure of steel samples to magnetic pulses / A. Alifanov [et al.] // 15-th International Scientific Conference — «TRANSFER 2014» Alexander Dubcek University of Trencin, 23-24.10.2014, Trencin, Slovakia. — P. 10—14.
4. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук*. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
5. *Кане, М. М.* Основы научных исследований в технологии машиностроения / М. М. Кане. — Минск : Выш. шк., 1987. — 231 с.

Поступила в редакцию 03.05.2017