

Учреждение образования  
«Барановичский государственный университет»

## *Вестник БарГУ*

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 5, июнь, 2017.

Серия «Технические науки»

---

*Учредитель:* учреждение образования «Барановичский государственный университет».

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Главный редактор журнала* Кочурко Василий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, Заслуженный работник образования Республики Беларусь, ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

*Заместитель главного редактора журнала* Никишова Алла Васильевна, кандидат филологических наук, доцент, проректор по научной работе учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

#### Главный редактор серии

Алифанов Александр Викторович, лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования и автоматизации производства учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### Ответственный секретарь серии

Горбач Юлия Евгеньевна, старший преподаватель кафедры экономики и организации производства инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### Редактор текстов на английском языке

Пинюта Ирина Вячеславовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры профессиональной иноязычной подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общенаучных дисциплин инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Дубень Игорь Викторович (*ответственный за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»*), кандидат технических наук, доцент кафедры механизации и энергообеспечения производства инженерного факультета, декан факультета довузовской подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и организации технического сервиса учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Белый Алексей Владимирович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Гордиенко Анатолий Илларионович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, начальник Центра индукционных технологий Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Девоино Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть» (Минск, Республика Беларусь).

Добышев Анатолий Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации животноводства и электрификации сельскохозяйственного производства учреждения образования «Белорусская государ-

ственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации и энергообеспечения производства учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Ивашко Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Калугин Юрий Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (Гродно, Республика Беларусь).

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сельскохозяйственных машин учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Ласковнѳ Александр Петрович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, академик-секретарь отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь).

Нерода Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Спиридонов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры деталей машин Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Шелег Валерий Константинович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

*Адрес редакции:*

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: [vestnik@barsu.by](mailto:vestnik@barsu.by).

*Подписные индексы:* 00993 — для индивидуальных подписчиков; 009932 — для организаций.

Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

*В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включѳн в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (машиностроение и машиноведение; процессы и машины агроинженерных систем).*

*Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включѳн в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-1/2016.*

*Издатель:* учреждение образования «Барановичский государственный университет».

*Выходит на русском, белорусском и английском языках.*

*Журнал распространяется на территории Республики Беларусь.*

*Заведующий редакционно-издательским отделом С. А. Березнюк*

*Технический редактор А. Ю. Сидоренко*

*Компьютерная вѳстка С. М. Глушак*

*Корректор С. А. Березнюк*

Подписано в печать 12.06.2017. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,50. Уч.-изд. л. 7,60. Тираж 75 экз. Заказ 1325.

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: открытое акционерное общество «Красная звезда». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя печатных изданий № 2/7 от 28.10.2013.

Юридический адрес: пер. 1-й Загородный, 3, 220073 Минск.

Почтовый адрес: ул. Советская, 80, 225409 Барановичи.

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Дечко М. М., Сенчуров Е. В.</b> Факторный анализ процесса магнитно-абразивной обработки по критериям качества обработанной поверхности . . . . .	10
<b>Алифанов А. В., Богданович И. А., Малеронок В. В.</b> Исследование влияния магнитно-импульсной обработки поверхностного слоя стальных образцов на их физико-механические свойства . . . . .	18
<b>Алифанов А. В., Милюкова А. М., Бурносов Н. В., Толкачева О. А.</b> Повышение прочностных характеристик порошковой титановой бронзы . . . . .	25
<b>Голубев В. С., Гуринович В. И., Романчук И. А.</b> Лазерная поверхностная обработка материалов и пути повышения ее эффективности . . . . .	31
<b>Горчанин А. И., Милюкова А. М.</b> Исследование ножей, упрочненных магнитно-импульсной обработкой, для резки сахарной свеклы . . . . .	37
<b>Грищенко Л. С., Иванова Н. П., Матыс В. Г., Ащуйко В. А.</b> Ингибиторная защита горячеоцинкованной стали в хлоридсодержащих средах . . . . .	43
<b>Милюкова А. М., Горчанин А. И., Бурносов Н. В., Михлюк А. И.</b> Определение режима магнитно-импульсного упрочнения дисков хлопкоочистительных машин . . . . .	49
<b>Попок Н. Н., Кузьмич Е. В., Черневич М. В.</b> Сверление комбинированного металлостеклополимерного материала . . . . .	56
<b>Попок Н. Н., Кунцевич И. П., Хмельницкий Р. С., Анисимов В. С., Гвоздь Г. И.</b> Изменение передних и задних углов лезвия фрезы при обработке сферических поверхностей детали . . . . .	71
<b>Русан С. И.</b> Нетрадиционный метод силового анализа статически неопределимых систем с жестким объектом . . . . .	78
<b>Сиваченко Л. А., Сотник Л. Л.</b> Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибро-валкового измельчителя . . . . .	87

### ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

<b>Клочков А. В., Ковалевский В. Ф.</b> Результаты испытаний пружинно-пальцевых активаторов клавишного соломотряса зерноуборочного комбайна . . . . .	93
---	----

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

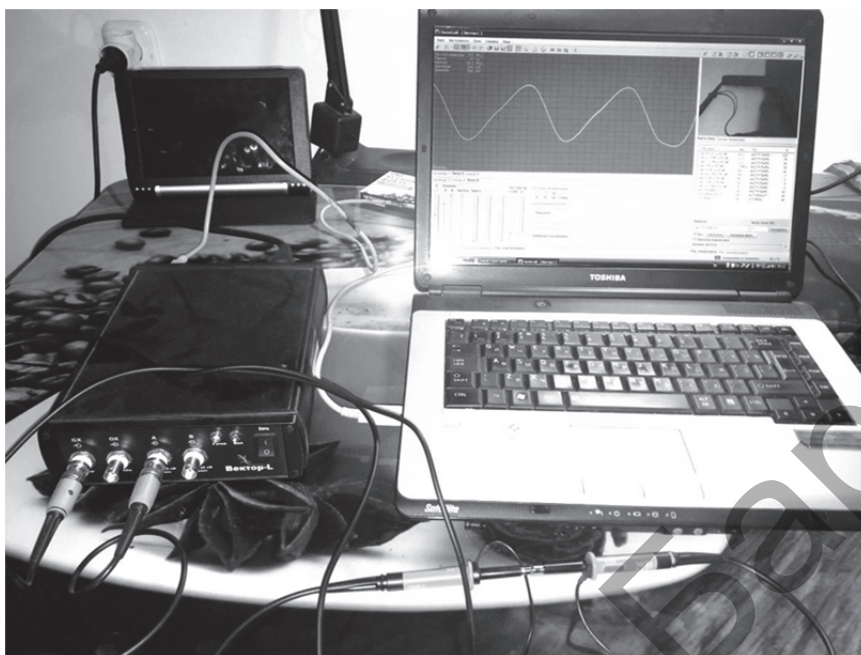


Рисунок 1. — USB-приставка к компьютеру, содержащая осциллограф и генератор сигналов произвольной формы



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  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление;

$\mu_m$  — 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.

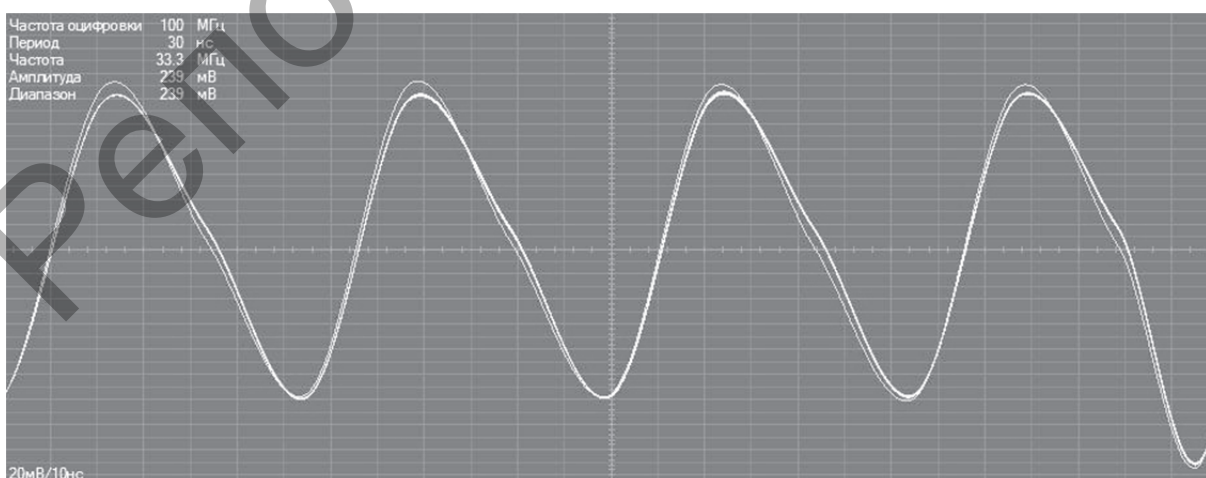
Перед проведением магнитно-импульсного упрочнения получена контрольная осциллограмма прохождения сигнала синусоидальной формы напряжением 255 мВ и частотой 33,3 МГц по стальному образцу цилиндрической формы с наличием коррозии (рисунок 3). Корродированный слой наносили с целью увеличения эффективности 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.

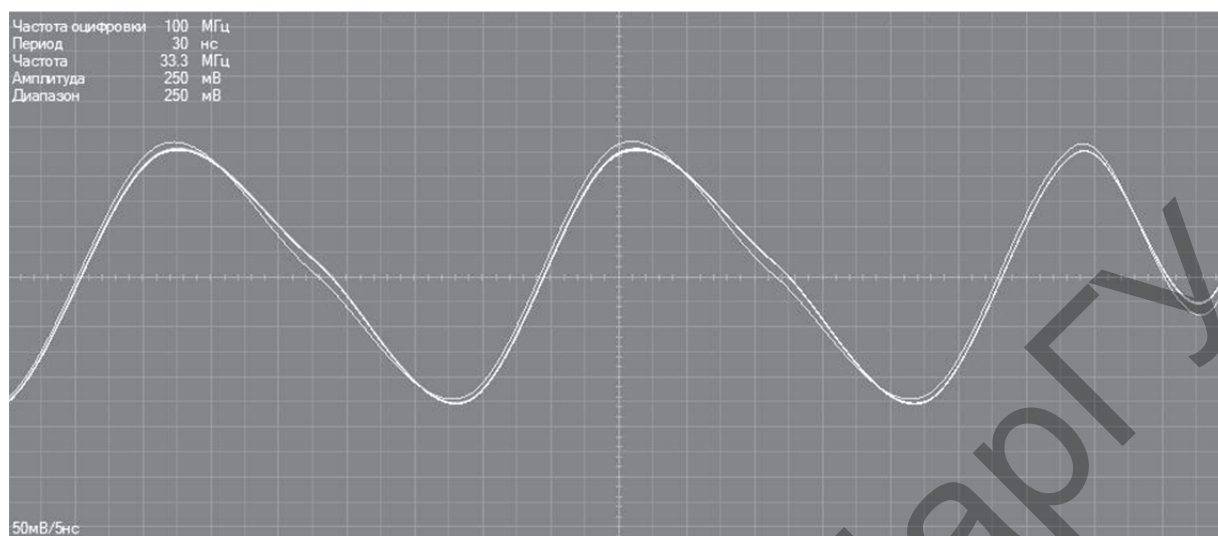
Для улучшения физико-механических показателей металла применили МИО образца и получили осциллограмму после ее проведения (рисунок 4).

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  $156^{\circ}\text{C}$ . 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;  
 $\Delta l$  — 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/с<sup>2</sup>;

$\Delta l_1$  — модуль удлинения до упрочнения, равный  $3,88 \cdot 10^{-3}$  м;

$\Delta l_2$  — 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