

Техническое и физико-математическое направления

УДК 621.373:538.91
ГРНТИ 55.20.15

МЕТОДИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И НА СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ

Алифанов Александр Викторович

д.т.н., профессор технологии и оборудования машиностроения

Богданович Ирина Аркадьевна

к.т.н., доцент технологии и оборудования машиностроения

УО «Барановичский государственный университет»

Республика Беларусь, г. Барановичи

Малеронок Владимир Владимирович

м.т.н., преподаватель кафедры беспилотных авиационных комплексов

Белорусская государственная академия авиации

Республика Беларусь, г. Минск

Милюкова Анна Михайловна

к.т.н., заведующий лабораторией магнитно-импульсных технологий

Лях Анатолий Александрович

научный сотрудник лаборатории магнитно-импульсных технологий

Толкачёва Ольга Антоновна

старший научный сотрудник лаборатории магнитно-импульсных технологий

Физико-технический институт Национальной академии наук

Республика Беларусь, г. Минск

Аннотация: В данной работе описан оригинальный специальный электроизмерительный комплект оборудования для исследования влияния различных режимов магнитно-импульсной обработки на электросопротивление образцов. С помощью этого комплекта оборудования и разработанной методики проведения исследований можно определять, какие изменения происходят в измеряемом электропроводящем слое (скин-слое) исследуемых образцов. С помощью изменения частоты тока высокой частоты можно устанавливать необходимую толщину скин-слоя, по которому протекает ток. С увеличением количества и энергии импульсов изменяется величина напряжения тока и, соответственно, электросопротивления, в сторону уменьшения или увеличения. Изменение этих величин говорит об устранении различных дефектов кристаллической решетки или о существенном увеличении размеров зерен за счет вторичной рекристаллизации, и, соответственно, об уменьшении количества межзеренных границ. Увеличение электросопротивления говорит о росте количества зерен, а резкое увеличение — об экстремальном увеличении, за счет измельчения зерен, протяженности межзеренных границ. Это происходит в связи с проявлением процесса первичной рекристаллизации. За счет образования мелкозернистой, однородной структуры и большого количества межзеренных границ повышается прочность, износостойкость стального изделия, что является свидетельством эффективности проводимой магнито-импульсной обработки.

Оптимальные режимы для упрочняющей обработки различных стальных изделий выбираются путем анализа изменения электросопротивления в электропроводном слое

изделия при воздействии токов высокой частоты, которое резко увеличивается, что говорит о начале первичной рекристаллизации в материале.

Ключевые слова: Стальные образцы из конструкционных и легированных сталей, магнитно-импульсная обработка, скин-слой, токи высокой частоты, электросопротивление, физико-механические свойства, структура.

METHOD AND STUDY OF THE INFLUENCE OF MAGNETIC-PULSE PROCESSING REGIMES ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN STEEL SAMPLES

Alifanov Alexander Viktorovich

Doctor of Technical Sciences,
Professor of Technology and Equipment of Mechanical Engineering

Bogdanovich Irina Arkadyevna

Ph.D., Associate Professor of Technology and Equipment for Mechanical Engineering
EE «Baranovichi State University»
Republic of Belarus, Baranovichi

Maleronok Vladimir Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Unmanned Aircraft Systems
Belarusian State Aviation Academy
Republic of Belarus, Minsk

Milyukova Anna Mikhailovna

Ph.D., Head of the Laboratory of Magnetic Pulse Technologies

Lyakh Anatoly Alexandrovich

Researcher, Laboratory of Magnetic Pulse Technologies

Olga Antonovna Tolkacheva

Senior Researcher, Laboratory of Magnetic Pulse Technologies,
Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences
Republic of Belarus, Minsk

Abstract: This paper describes an original special electrical measuring set of equipment for studying the effect of different modes of magnetic-pulse processing on the electrical resistance of samples. With the help of this set of equipment and the developed research methodology, it is possible to determine what changes occur in the measured electrically conductive layer (skin layer) of the samples under study. By changing the frequency of the high-frequency current, it is possible to set the required thickness of the skin layer through which the current flows. With an increase in the number and energy of pulses, the value of the current voltage and, accordingly, the electrical resistance, in the direction of decreasing or increasing, changes. A change in these values indicates the elimination of various defects in the crystal lattice or a significant increase in grain sizes due to secondary recrystallization, and, accordingly, a decrease in the number of grain boundaries. An increase in electrical resistance indicates an increase in the number of grains, and a sharp increase - an extreme increase, due to the refinement of grains, the length of grain boundaries. This is due to the manifestation of the primary recrystallization process. Due to the formation of a fine-grained, homogeneous structure and a large number of grain boundaries, the strength, wear resistance of the steel product increases, which is evidence of the effectiveness of the magnetic-pulse processing. The optimal modes for the hardening treatment of various steel products are selected by analyzing the change in electrical resistance in the electrically conductive layer of the product when exposed to high-frequency currents, which sharply increases, which indicates the beginning of primary recrystallization in the material.

Key words: Steel samples from structural and alloy steels, magnetic-pulse treatment, skin layer, high-frequency currents, electrical resistance, physical and mechanical properties, structure.

Введение

Учеными Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси и Барановичского государственного университета разработана новая технология повышения прочностных свойств стальных изделий, как закаленных, так и не закаленных, путём воздействия сильным импульсным электромагнитным полем. При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла.

Преимуществом магнитно-импульсной обработки по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры и качество поверхности упрочненных изделий не меняются, не требуются дополнительная термообработка, финишные операции, сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой [1 - 9].

В ФТИ НАН Беларуси разработаны и изготовлены различные магнитно-импульсные установки (МИУ), предназначенные для упрочнения цилиндрических и плоских стальных изделий (как не закаленных, так и закаленных) сильным импульсным электромагнитным полем. Две установки переданы в Барановичский государственный университет. В результате совместно проведенных исследований разработаны опытные технологические процессы магнитно-импульсной упрочняющей обработки фрезерных дереворежущих ножей, концевых фрез и сверл для обработки изделий из древесины, ДСП, металлов и сплавов. При этом стойкость упрочненного инструмента увеличилась в 2 и более раз. Такие же результаты получены при упрочняющей обработке сложнопрофильных ножей для резки свеклы и других видов инструмента. Для определения оптимальных режимов магнитно-импульсной обработки этих инструментов приходилось производить трудоемкую работу по изготовлению большого количества шлифов, с помощью которых подбирались наиболее эффективные режимы обработки для различных марок сталей и конфигураций инструмента.

В последнее время исследователями БарГУ и ФТИ НАН Беларуси предложена методика исследования структуры и физико-механических свойств изделий из различных материалов под воздействием различных режимов магнитно-импульсной обработки с применением токов высокой частоты (ТВЧ) [6-8].

В данной работе используется оригинальный специальный электроизмерительный комплект оборудования для исследования влияния различных режимов магнитно-импульсной обработки на электросопротивление. С помощью этого комплекта оборудования и разработанной методики проведения исследований можно определять, какие изменения происходят в измеряемом электропроводящем слое (скин-слое) исследуемых образцов. С помощью изменения частоты тока высокой частоты можно устанавливать необходимую толщину скин-слоя, по которому протекает ток. С увеличением количества и энергии импульсов изменяется величина напряжения тока и, соответственно, электросопротивления, в сторону уменьшения или увеличения. Уменьшение этих величин говорит об устранении различных дефектов кристаллической решетки или о существенном увеличении размеров зерен за счет вторичной рекристаллизации, и, соответственно, об уменьшении количества межзеренных границ. Увеличение электросопротивления говорит о росте количества зерен, а резкое увеличение — об экстремальном увеличении, за счет измельчения зерен, протяженности межзеренных границ. Это происходит в связи с проявлением первичной рекристаллизации.

Оборудование и методика измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя образцов с применением токов высокой частоты

Измерительный комплект оборудования состоит из трех основных частей: одна предназначена для генерирования ТВЧ с целью создания в стальном образце скин-слоя, вторая часть — для подачи зондирующего сигнала к исследуемому изделию, и третья часть для измерения падения напряжения на поверхностном слое упрочненного изделия, через значение которого можно расчетным путем выйти на электросопротивление скин-слоя.

Рассмотрим электроизмерительный комплект для исследования влияния различных способов воздействия (магнито-импульсная обработка, холодная деформация и др.) на падение напряжение в скин-слое при прохождении ТВЧ (рисунок 1).



Рисунок 1 — Электроизмерительный комплект оборудования для исследования влияния различных обработок на электросопротивление
1 — персональный ПК (интерфейс программы); 2 — цифровая USB приставка «Вектор-L»; 3 — милливольтметр ВЗ-48А; 4 — измерительная ячейка

Для генерирования ТВЧ служит цифровая USB приставка «Вектор-L», которая в режиме генератора настраивается на нужную частоту и форму сигнала с помощью интерфейса программы на персональном компьютере. Для проведения измерений используются милливольтметр ВЗ-48А, который позволяет производить измерения напряжения на частоте до 50 МГц амплитудой до 1 мВ. А для подключения исследуемого изделия используется измерительная ячейка, которая содержит разводные контакты-хомуты и резисторную обвязку для стабильной работы оборудования (рисунок 2).

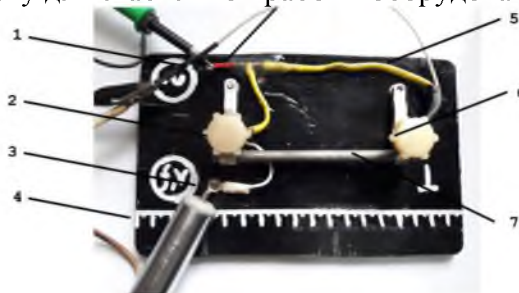


Рисунок 2 — Измерительная ячейка для определения электрических параметров образцов (1 — точка подачи сигнала; 2,6 — разводной контакт-хомут; 3 — точка измерения напряжения; 4 — измерительная линейка, см; 5 — каркас; 7 — образец; 8 — резисторная обвязка)

Для проведения измерений необходимо задаваться соотношением частоты тока и толщиной токопроводящего слоя на поверхности измеряемого образца (в частности, сверла, метчика и т.п.). Зависимость толщины токопроводящего слоя от частоты тока определяется по формуле [9]:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}, \quad (1)$$

где Δ — толщина токопроводящего слоя;
 ρ — удельное сопротивление материала образца;
 μ_r — относительная магнитная проницаемость;
 f — частота электрического тока.

Значение толщины упрочненного слоя (глубины проникновения сигнала), в свою очередь, позволит рассчитать активное электрическое сопротивление слоя $R_{\text{актив}}$ по формуле [9]:

$$R_{\text{актив}} = \frac{\rho \cdot l}{\pi \cdot \Delta \cdot (2 \cdot r - \Delta)}, \quad (2)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление;
 l — длина изделия;
 Δ — толщина токопроводящего слоя (скин-слоя);
 r — радиус изделия.

Для получения полного (сумма волнового и активного) электрического сопротивления упрочненного слоя изделия необходимо произвести измерение падения напряжения на изделии при прохождении тока высокой частоты. Выбранная частота должна обеспечивать глубину проникновения сигнала на толщину упрочненного слоя (1). При последовательном соединении необходимо перед проведением измерения получить контрольную осциллограмму напряжения сигнала высокой частоты без установки изделия в измерительную цепь и зафиксировать амплитудное значение эталонного сигнала ($U_э$). Затем установить изделие в измерительную цепь и произвести повторное измерение с фиксацией амплитудного значения напряжения с изделием ($U_и$). Разница напряжений ($U_э - U_и$) и есть падение напряжения на упрочненном слое изделия. Затем по заданному значению тока ($I_э$) произвести расчет (3) полного электрического сопротивления ($R_{\text{полн}}$):

$$R_{\text{полн}} = \frac{U_э - U_и}{I_э}. \quad (3)$$

Если по данному алгоритму произвести измерение полного электрического сопротивления до проведения обработки изделия и после него, то полученная информация говорит о качестве появившегося упрочненного слоя (однородность, мелкодисперсность, отсутствие искривления кристаллической решетки и др.), которое напрямую влияет на величину полного электрического сопротивления.

Расчеты, выполненные по формуле (1), позволили определить соотношения между частотой ТВЧ и толщиной скин-слоя, через который проходит ток:

частота — 1 мГц, толщина слоя 23 мкм;
 частота — 0,5 мГц, толщина слоя 32 мкм;
 частота — 0,1 мГц, толщина слоя 71 мкм;
 частота — 0,05 мГц, толщина слоя 101 мкм;
 частота — 0,01 мГц, толщина слоя 225 мкм;
 частота — 0,005 мГц, толщина слоя 318 мкм;

Эти соотношения пригодятся при проведении исследований влияния режимов МИО на электросопротивление упрочненного слоя образцов.

Подставив в формулу (1) табличные значения для изделий из стали: $\mu_r=100$, $\rho = 2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м и необходимые для измерений значения частот ТВЧ, получим соответствующие этим частотам толщины электропроводящего слоя Δ .

Исследование влияния параметров магнитно-импульсной обработки на величину электросопротивления токопроводящего слоя стальных образцов

Стальные образцы представляют собой цилиндрические цельные изделия диаметром $\varnothing=19,2$ мм и длиной 100 мм. Магнитно-импульсная обработка (МИО)

осуществляется в цилиндрическом индукторе с рабочим отверстием диаметром $\varnothing=20$ мм. Индуктор устанавливается в магнитно-импульсной установке МИУ-18 с максимальной энергией импульсов 18 кДж. Для исследований использовали образцы, изготовленные из стали Ст.3КП, стали Ст.20, стали Р6М5 и стали 18Х2Н4ВА. Конструкционные стали Ст.3КП, Ст.20 используются для сравнительного анализа с легированными сталями Р6М5 и 18Х2Н4ВА. Магнитно-импульсная обработка производилась следующим образом: с помощью изменения частоты тока соответственно изменяли толщину электропроводящего слоя (от 23 мкм до 318 мкм), при установлении одного из шести показателей толщины слоя каждый образец обрабатывался на различных режимах МИО, после чего для каждого образца строились графики зависимости электросопротивления от режимов МИО. В каждой партии образцов (Стали Ст.3КП, Ст.20, Р6М5, 18Х2Н4ВА) оставляли контрольный образец, который не подвергался воздействию ТВЧ.

На рисунке 3 приведены зависимости электросопротивления от режимов МИО и толщины токопроводящего слоя (скин-слоя) образца из стали Ст.3КП. Из рисунка видно, что чем тоньше слой, тем больше электросопротивление. При обработке по режиму: 1 импульс с энергией 6 кДж электросопротивление увеличилось незначительно: от 1827,0 до 1838,4 мОм. Также ненамного оно повысилось и при комплексной обработке: 1 импульс с энергией 6 кДж и следом 3 импульса по 6 кДж (от 1838,4 до 1860 мОм). Но в целом уровень электросопротивления в данных условиях (толщина электропроводящего слоя — 23 мкм) намного выше, чем при толщине слоя 318 мкм (425,7 — 462,2 мОм) при одинаковых параметрах МИО. Во всех случаях исследований после 1 импульса с энергией 6 кДж электросопротивление увеличилось (при 3-х импульсах с энергией 6 кДж) на 30 – 68 мОм, что говорит о начале первичной рекристаллизации.

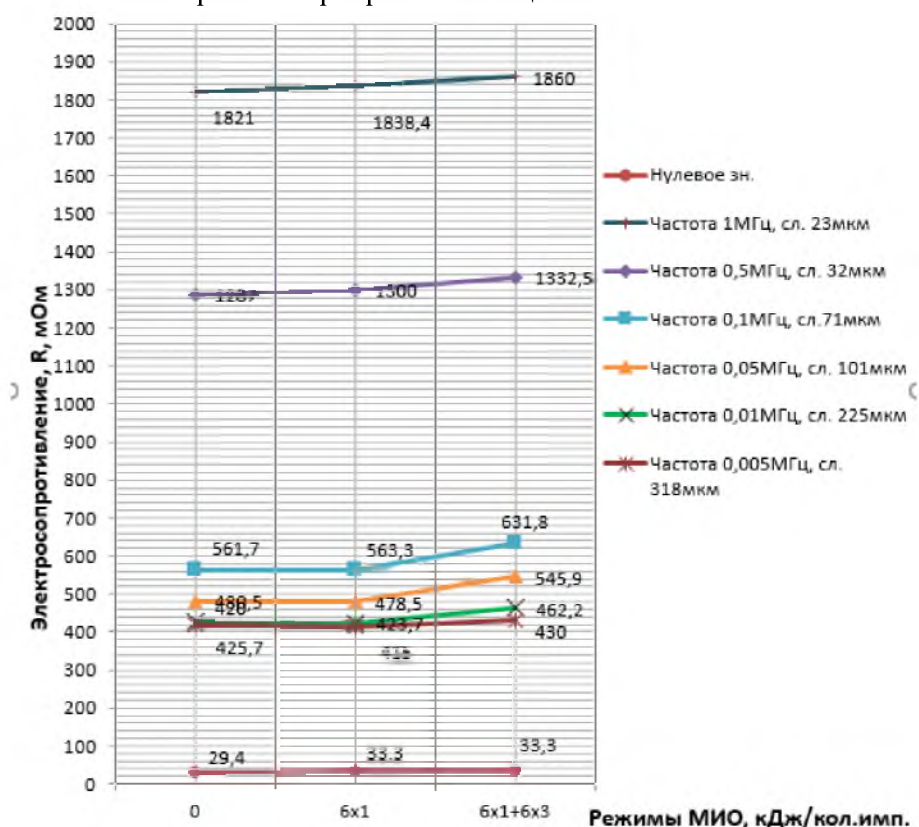


Рисунок 3 — Зависимость электросопротивления упрочненного слоя образца из стали Ст.3КП от режима МИО

На рисунке 4 представлены результаты исследований образцов из стали Ст.20 (незакаленных). Исследования проводились при таких же частотах электрического тока и,

соответственно, при таких же толщинах электропроводящего слоя, как и в предыдущем случае (сталь Ст.3).

В этом случае величина электросопротивления в слоях толщиной 23 и 32 мкм (1020,6 — 1040,8 мОм и 694,5 — 703,1 мОм соответственно) намного превышает электросопротивление в слоях от 71 мкм до 318 мкм (нижний предел составляет 85 — 86,8 мОм).

Следует отметить, что и для стали Ст.20 и для стали Ст.3 повышение электросопротивления, связанное с повышением количества и энергии импульсов, незначительно, что говорит о малодефектности структуры указанных сталей, т.к. они не проходили термообработку.

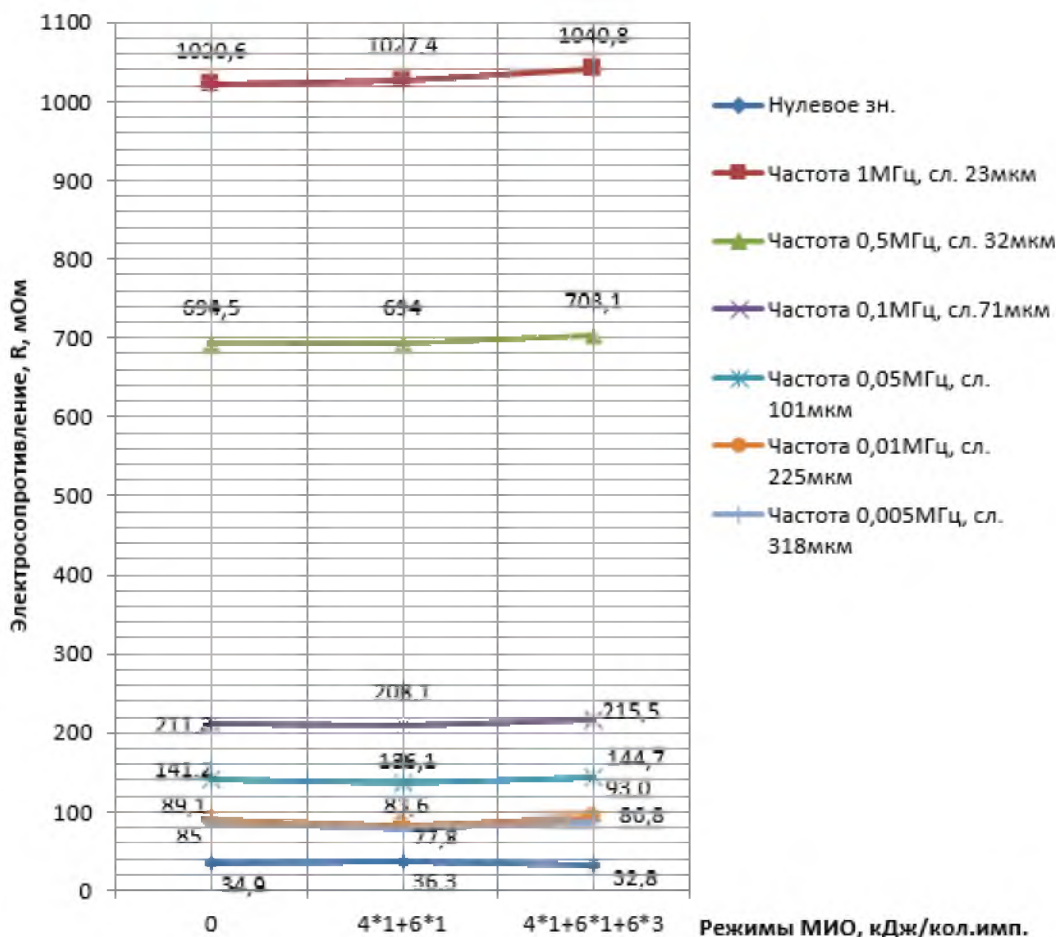


Рисунок 4 — Зависимость электросопротивления упрочненного слоя образца из стали Ст. 20 (незакаленного) от режима МИО

Такие же исследования закаленных образцов стали Ст.20 показали другой результат. Исследования проводились при таких же частотах ТВЧ (от 1 МГц до 0,05 МГц), которые обеспечивали толщину слоев 23 мкм, 32 мкм, 71 мкм, 101 мкм, 225 мкм и 318 мкм соответственно. Применялись следующие режимы МИО: (6 кДж × 1 импульс); (6 кДж × 1 импульс + 6 кДж × 3 импульса); (6 кДж × 1 импульс + 6 кДж × 3 импульса + 6 кДж × 3 импульса).

Было исследовано 2 закаленных образца из стали Ст.20. Результаты представлены на рисунках 5 и 6. На обоих рисунках видно, что при первом же магнитно-импульсном воздействии (6 кДж × 1 импульс) электросопротивление резко увеличивается; при режиме МИО (6 кДж × 1 импульс + 6 кДж × 3 импульса) увеличение продолжилось, а потом электросопротивление достаточно интенсивно уменьшается.

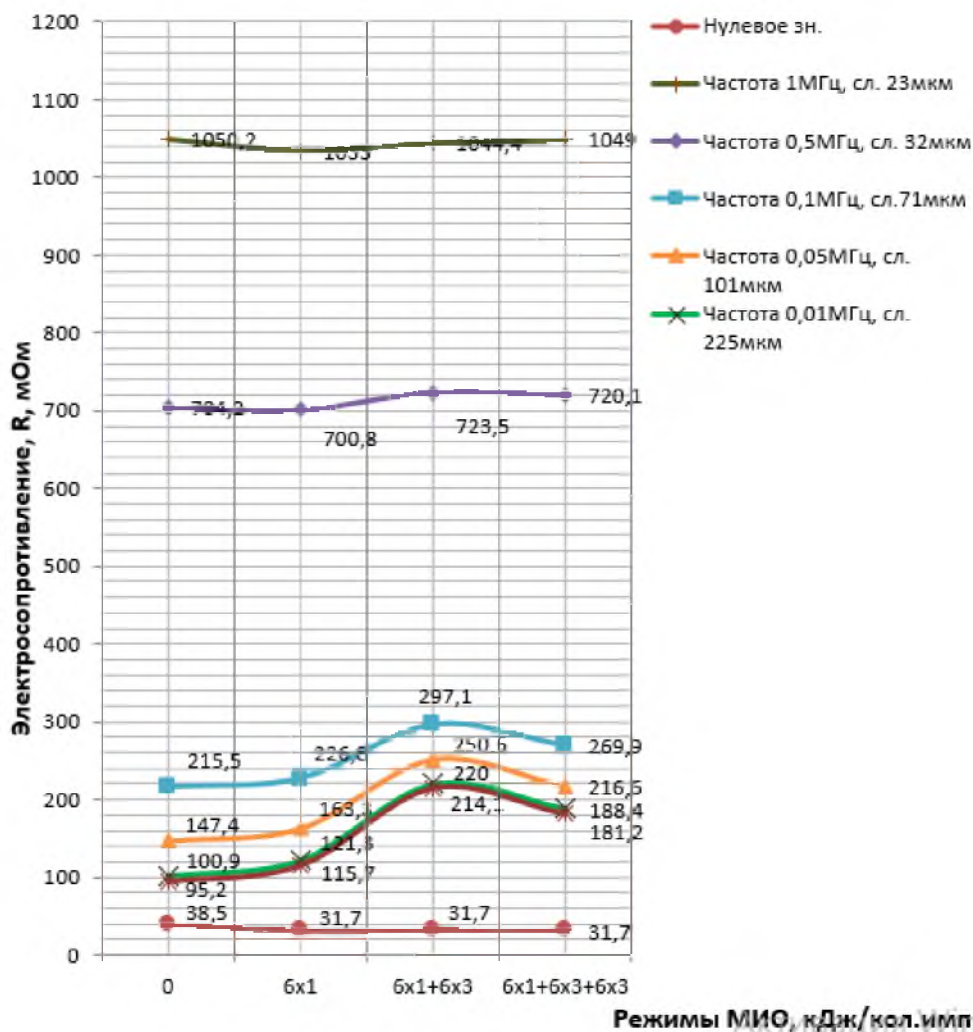
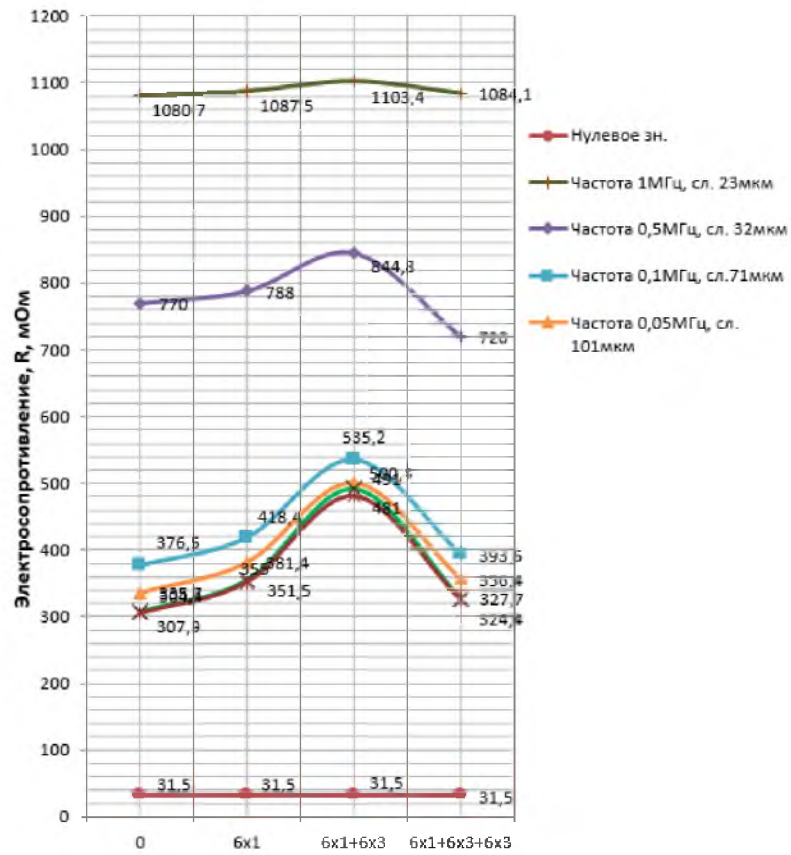


Рисунок 5 — Зависимость электросопротивления упрочненного слоя образца стали Ст.20 (закаленного, образец 1) от режима МИО

Такое поведение электросопротивления можно объяснить тем, что при режиме МИО (6×1) начинается первичная рекристаллизация, которая продолжается до режима (6×1 + 6×3), после чего начинается вторичная (собирающая) рекристаллизация. Такие резкие перепады электросопротивления происходят в связи с тем, что в результате термообработки в стальном образце происходит деформация кристаллической решетки, появляются атомы внедрения или, наоборот, образуются вакансии и т.д. и т.п. В результате МИО с указанными режимами сначала, в процессе первичной рекристаллизации, образуется большое количество мелких зерен и, соответственно, межзеренных границ, которые затрудняют протекание электрического тока, в результате его величина увеличивается. Затем, при определенном режиме МИО происходит вторичная (собирающая) рекристаллизация, при которой зерна быстро растут за счет поглощения мелких зерен более крупными; при этом количество межзеренных границ и, соответственно, величина электросопротивления уменьшаются.



Режимы МИО, кДж/нол.имп.

Рисунок 6 — Зависимость электросопротивления упрочненного слоя образца стали Ст.20 (закаленного, образец 2) от режима МИО

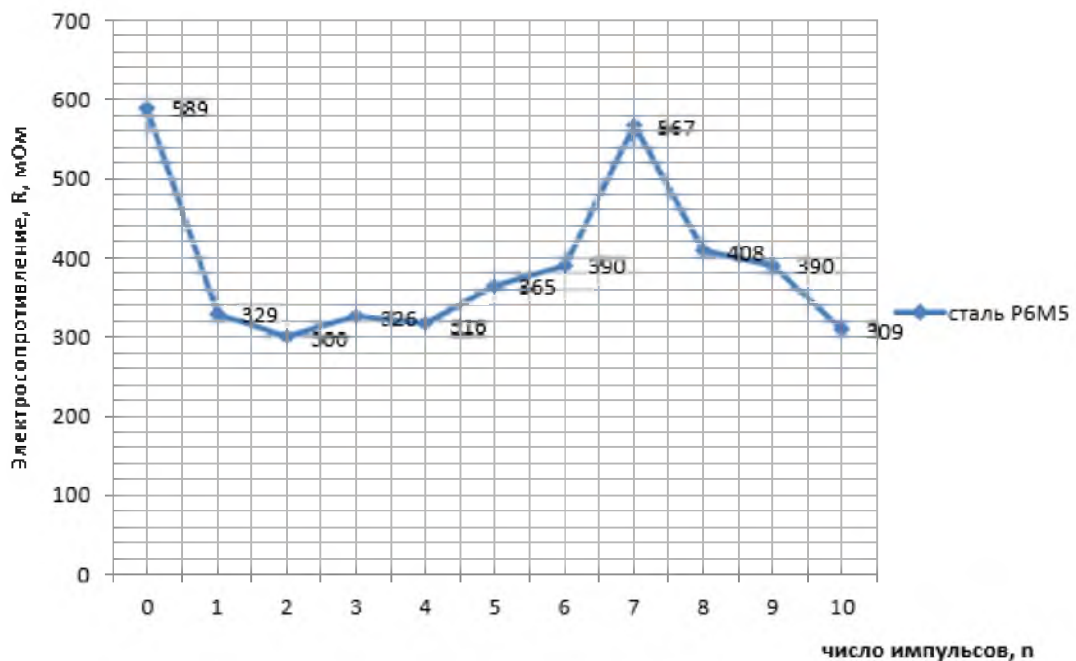


Рисунок 7 — Зависимость электросопротивления упрочненного слоя образца стали P6M5 от режима МИО (частота электрического тока 0,005 МГц, толщина скин-слоя 318 мкм)

На рисунке 7 представлены результаты исследования зависимости электросопротивления скин-слоя (токопроводящего слоя) образца из стали Р6М5 от режимов МИО.

На рисунке 7 показана кривая, полученная в результате режимов МИО: число импульсов 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10; энергия импульсов 10 кДж. Частота тока 0,005 МГц, глубина слоя 318 мкм.

Из приведенной зависимости видно, что от 0 до 2-х импульсов кривая резко идет вниз, что говорит об исправлении электромагнитным полем различных дефектов структуры; затем идет сначала постепенное (до 6 импульсов), а затем резкое увеличение (7 импульсов) электросопротивления, что говорит о дроблении или рождении новых мелких зерен, что приводит к мелкозернистой однородной структуре, характеризующейся большим количеством межзеренных границ. Этот процесс свойственен первичной рекристаллизации. При дальнейшей МИО (8 – 10 импульсов) происходит вторичная (собирательная) рекристаллизация, характеризующаяся быстрым ростом зерен за счет поглощения мелких зерен более крупными; протяженность межзеренных границ при этом быстро сокращается и величина электросопротивления также уменьшается.

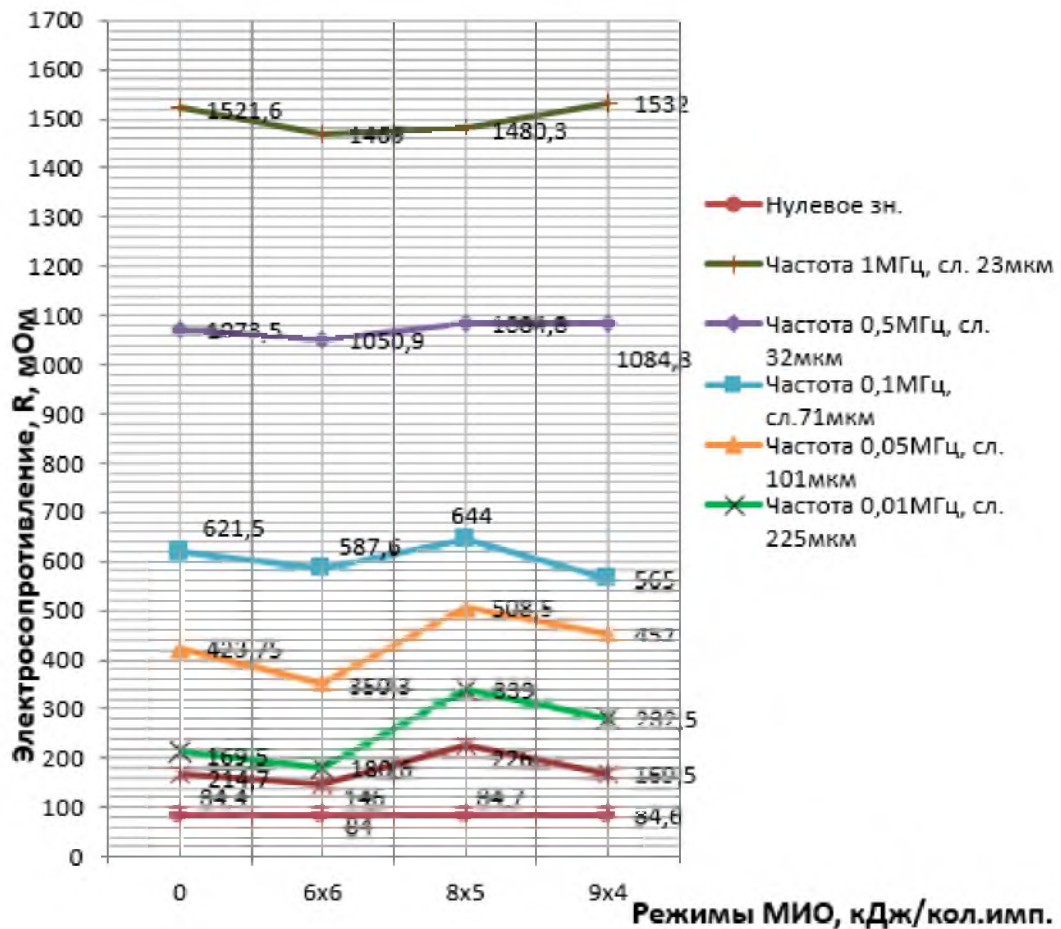


Рисунок 8 — Зависимость электросопротивления в упрочненном слое образца стали марки 18Х2Н4ВАСт.20 от режима МИО (энергия и количество импульсов)

На рисунке 8 приведены графики, отражающие зависимость электросопротивления в скин-слое цементуемой стали 18Х2Н4ВА. Образцы этой стали имеют насыщенный углеродом (цементированный) слой толщиной 1 мм. Характер кривых на рисунке 8 напоминает характер кривых на рисунке 7, построенных для стали Р6М5. У кривых на рисунке 8, построенных для образцов цементуемой стали 18Х2Н4ВА, имеются такие же, как и на рисунке 7, участки понижения электросопротивления, затем — участки повышения и следом — понижения электросопротивления. То есть, можно и для

поведения образцов из стали 18Х2Н4ВА, как и для образцов из стали Р6М5, отметить участок исправления дефектов в скин-слое, затем — участок начала и продолжения первичной рекристаллизации, после чего — участок вторичной (собирающей) рекристаллизации. Только перепады электросопротивления (уменьшение — увеличение — уменьшение) выражены не так заметно, как на рисунке 7 (сталь Р6М5). Это можно объяснить наличием большого количества в стали Р6М5 тугоплавких легирующих элементов (6% вольфрама и 5% молибдена), для эффективной обработки которых потребовалась и достаточно большая энергия МИО (10 кДж), благодаря чему произошло более эффективное измельчение зеренной структуры образца Р6М5. В составе образца стали 18Х2Н4ВА тоже имеется вольфрам, но только 1%. Остальные элементы (хром и никель) обладают более низкой температурой плавления, в связи с чем и для осуществления первичной рекристаллизации потребовалась меньшая энергия импульсов (8 кДж), в связи с чем структурная перестройка произошла быстрее и с меньшими усилиями, чем у стали Р6М5.

Заключение

Эффекты, связанные с магнитно-импульсной обработкой (МИО), более выражено проявляются на закаленных образцах как конструкционных, так и легированных сталей.

При магнитно-импульсной обработке практически всех образцов из различных сталей (как конструкционных, так и легированных) при очень малых толщинах электропроводящего слоя (32 мкм и особенно 23 мкм) электросопротивление практически не меняется при всех режимах МИО. Это говорит о том, что в этих случаях электросопротивление в очень тонких слоях значительно превышает изменения электросопротивления, связанные с различными режимами МИО.

При определении оптимальных режимов МИО, обеспечивающих первичную рекристаллизацию в стальных изделиях и, соответственно, повышение их эксплуатационных характеристик, необходимо выбирать такие частоты ТВЧ, при которых толщина электропроводящего слоя должна быть не менее 71 мкм.

Оптимальные режимы МИО для упрочняющей обработки различных стальных изделий выбираются путем анализа изменения электросопротивления в электропроводном слое изделия при воздействии ТВЧ, которое должно резко увеличиваться, что говорит о начале первичной рекристаллизации.

Список литературы:

1. Алифанов А.В., Милюкова А.М., Томило В.А. Технологии изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей машиностроения: монография. — Нац. акад. наук Беларуси, Физ.-техн. ин-т. — Минск: Беларус. навука. — 2014. — 321 с.
2. Алифанов А.В., Ционенко Д.А., Милюкова А.М. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии. — Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. — 2016. — №4. — С. 31—36.
3. Алифанов А.В., Богданович И.А., Малеронок В.В. Исследование влияния магнитно-импульсной обработки поверхностного слоя стальных образцов на их физико-механические свойства. — Вестник БарГУ. Серия Технические науки. — 2017. — Вып. 5. — С. 18—24.
4. Юркевич С.Н., Алифанов А.В., Люцкевич А.И., Юркевич К.С. Применение магнитно-импульсной обработки для модернизации поверхности и упрочнения детали авиатехники из сплавов цветных металлов и улучшения их технологических, эксплуатационных и функциональных свойств. — MILEX—2017: материалы 7-ой междунар. науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. — Минск, 20-22 мая 2017 г. — Минск, 2017. — С. 388—402.
5. Алифанов А.В., Ционенко Д.А., Милюкова А.М. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения изделий, расчет индукторов и параметров процесса. —

Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 т. — Нац. акад. наук Беларуси; под ред. В.В.Клубовича. — Витебск, ВГТУ, 2017. — Т. 2. — С. 31—53.

6. Алифанов А.В., Малеронок В.В., Ционенко Д.А. Исследование упрочненных магнитно-импульсной обработкой поверхностных слоев металлических изделий с помощью токов высокой частоты. — Актуальные проблемы прочности: коллективная монография: в 2 т. / [А.В.Алифанов и др.]; под ред. В.В.Рубаника. — Витебск: ВГТУ, 2018. — Т.1. — Гл.6. — С. 111—126.

7. Малеронок В.В., Алифанов А.В. Экспресс-метод оценки качества упрочненного слоя электропроводных металлических изделий с применением токов высокой частоты. — Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. — 2019. — №4. — С. 67—72.

8. Способ измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделий из металлов с применением сигналов высокой частоты: пат. № 2734061 РФ: СПК G01№27/02 (2020.05) / В.В. Малеронок, А.В. Алифанов. — № 2019125768; заявл. 13.08.2019 ; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29.

9. Усольцев, А. А. Общая электротехника: учеб. пособие / А. А. Усольцев. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. — 301 с.

