

УДК 621.98.044.7

А. Н. Матяс, А. А. Лях

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10,
220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 267 60 10,
+375 (017) 361 55 52, priemnaya@phti.by

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НОВОГО МЕТОДА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ С НЕЗАВИСИМЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА

В связи с тем, что в существующей упрочняющей технологии магнитно-импульсной обработки мало внимания уделяют такому параметру, как длительность импульса, который, в свою очередь, напрямую влияет на изменение энергии в импульсе и на энергию, выделенную в индукторе при прохождении импульса, были разработаны принципиально новые электрические схемы и конструкция оборудования для магнитно-импульсной обработки. Изготовленная магнитно-импульсная установка МИУ 20-21 с независимым регулированием частоты и длительности импульса по сравнению с существующими установками характеризуется отсутствием в конструкции дорогостоящих комплектующих, что позволило удешевить конструкцию оборудования, а самое главное — сам метод обработки.

Проведенные исследования характеристик полученных сигналов позволили установить, что обработка с длительностью импульсов от 0,1 до 5,0 с дает возможность поднять энергию воздействия магнитного поля на изделие от 5 до 100 кДж и выше. Исследование осциллограмм полученных сигналов показали, что при обработке возможно получать пачки импульсов, содержащие от 5 до 1 000 импульсов. Это дает возможность проводить обработку деталей более продолжительное время и значительно повысить эффективность процесса магнитно-импульсной обработки по изменению свойств стальных изделий.

Ключевые слова: длительность импульса; характеристики; сигнал; параметры; магнитно-импульсная установка и обработка; метод; частота; классификация.

Рис. 8. Табл. 3. Библиогр.: 15 назв.

A. N. Matsias, A. A. Lyakh

State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”,
10 Akademika Kuprevicha Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus,
+375 (017) 367 60 10, +375 (017) 361 55 52, priemnaya@phti.by

THE DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR A NEW MAGNETIC PULSE PROCESSING METHOD WITH INDEPENDENT PULSE DURATION CONTROL

Due to the fact that in the existing new magnetic-pulse treatment hardening technology little attention is paid to such a parameter as the pulse duration, which in turn directly affects the energy change in the pulse and the energy released in the inductor during the pulse passage, a fundamentally new electrical circuit development and the equipment design magnetic-pulse treatment were developed. The manufactured magnetic-pulse unit MIU 20-21 with frequency independent control and pulse duration, compared with existing units, is characterized by the absence of expensive components in the design, which has made it possible to make the equipment design cheaper, and most importantly, the treatment — method itself.

The conducted studies of the received signals characteristics have made it possible to establish that treatment with a pulse duration of 0.1 to 5.0 s increase the energy of the magnetic field on the product from 5 to 100 kJ and more. The study of the received signals oscillograms has shown that during treatment it is possible to obtain pulses bursts containing from 5 to 1 000 pulses. It enables to process parts for a longer time and makes it possible to increase the efficiency of the magnetic-pulse treatment process significantly to change the properties of steel products.

Key words: pulse duration; characteristics; signal; parameters; magnetic pulse installation and treatment; method; frequency; classification.

Fig. 8. Table 3. Ref.: 15 titles.

Введение. Основной задачей развития машиностроения является вывод его на ресурсосберегающие технологии, обеспечивающие повышение производительности труда, экономию материальных и энергетических ресурсов и охрану окружающей среды. Практическое использование энергии импульсных электромагнитных полей открывает исключительные перспективы для создания прогрессивных технологий по обработке изделий из инструментальных и конструкционных сталей.

Преимуществом применения упрочняющей магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) по сравнению с известными методами поверхностного упрочнения является то, что геометрические параметры упрочненных изделий не меняются, выравниваются остаточные напряжения в изделии, снижается трещинообразование, также метод позволяет повысить качество поверхности. После МИО не требуется проводить дополнительную механическую или термическую обработку, финишные операции. Данный процесс отличается высокой производительностью, низким энергопотреблением и экологической безопасностью [1—4].

Применяемые на практике методы магнитной обработки материалов различаются по своим физическим аспектам и технологии производства. Существует большая классификация способов обработки импульсным магнитным полем, основными отличиями которых являются диапазон напряженности магнитного поля H , кА / м, длительность импульса $t_{и}$, с, количество повторяющихся циклов или импульсов n [5].

Так, Н. И. Кинденко в одном из своих трудов представил более общую классификацию методов магнитной обработки изделий [6]. Магнитно-импульсную обработку он классифицирует следующим образом: с применением локальных концентраторов, с размагничиванием 1...24 ч, с последующим размагничиванием.

Выбор того или иного метода магнитной обработки существенно зависит от обрабатываемого изделия: его размера, геометрических особенностей, марки стали, нагрузок, действующих на изделие в процессе работы, от конструктивного и технического исполнения установок для импульсной обработки.

На сегодня создан достаточно большой модельный ряд магнитно-импульсных установок (далее — МИУ) с различными характеристиками по запасаемой энергии, длительности и частоте разряда и производительности. По конструктивному оформлению они охватывают широкий диапазон применения. В литературе приводят классификацию МИУ, предназначенных в основном для формообразования. Конструктивно установки для магнитно-импульсного упрочнения отличаются незначительно, однако по своим характеристикам (энергии, частоте, напряженности магнитного поля, длительности импульса) имеют отличия. Для упрочнения используются установки с меньшими частотой и энергией воздействия, длительностью импульса и величиной напряженности магнитного поля.

В связи с этим предложена классификация магнитно-импульсного оборудования для упрочнения стальных изделий (рисунок 1).

Материалы и методы исследования. В качестве основного технологического оборудования для проведения экспериментальных исследований магнитно-импульсной упрочняющей обработки изделий и инструмента из различных сталей используются разработанные в ФТИ НАН Беларуси экспериментальные МИУ.

Установки отличаются своими техническими характеристиками: длительностью и частотой импульса. Длительность единичного импульса магнитного поля при воздействии на образцы в установках МИУ-3, МИП-18 находится в интервале 35...180 мкс в зависимости от используемого типа индуктора. Максимальное амплитудное значение напряженности магнитного поля составляет порядка $1,7 \cdot 10^7$ А / м.



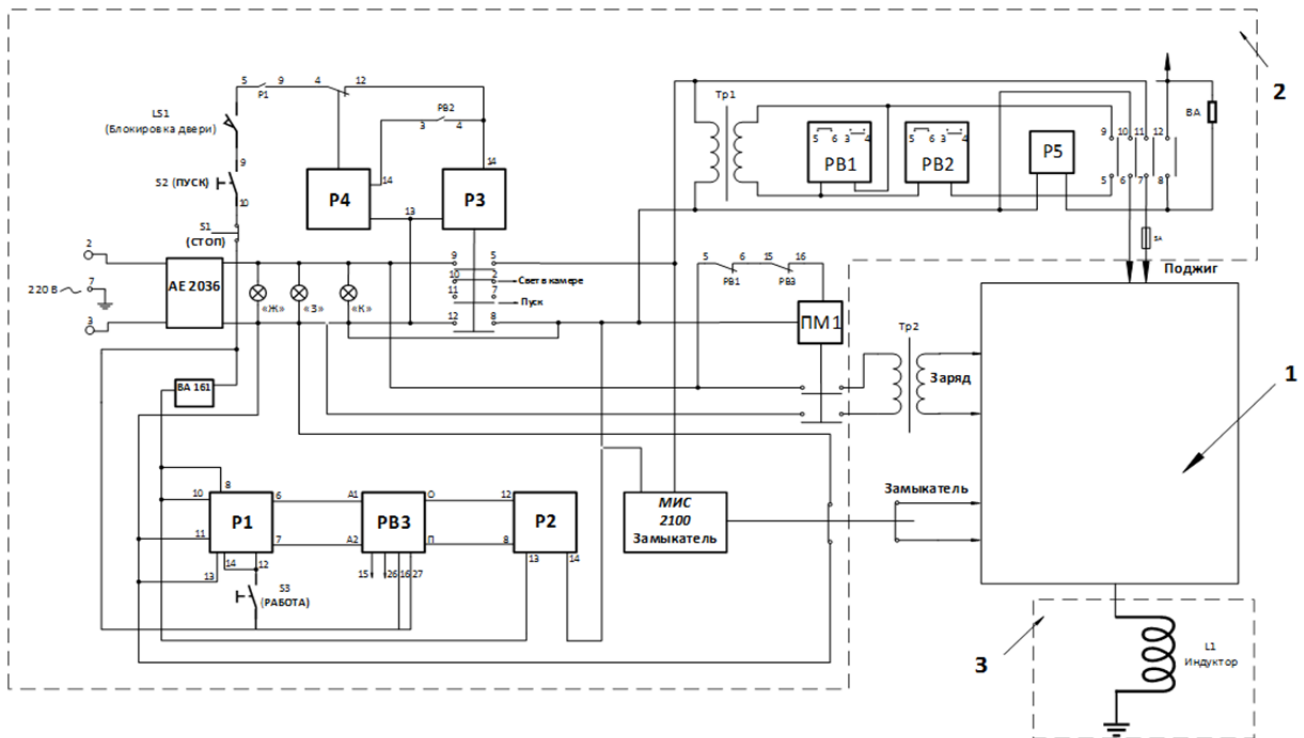
Рисунок 1. — Классификация магнитно-импульсного оборудования для упрочнения стальных изделий

Оборудование для МИО металлов представляет собой силовой блок, состоящий из емкостного накопителя электрической энергии — высоковольтной конденсаторной батареи, зарядного устройства, устройства поджига и разрядника, устройства (блока) управления, индукторной системы, которая располагается в рабочей зоне. Электрическая схема изготовленных высокоскоростных установок для МИО представлена на рисунке 2.

Рассмотрим подробнее конструкционные особенности оборудования и устройство установок.

1. Силовой блок включает в себя:

- зарядное устройство, выполненное по схеме трансформаторного мостового емкостного преобразователя и представляющее собой источник тока;



1 — силовой блок; 2 — блок управления; 3 — индукторная система

Рисунок 2. — Схема установки для МИО металлов

– устройство поджига, предназначенное для управления высоковольтным разрядником и включающее в себя трансформатор повышающий, выпрямитель, умножитель напряжения, конденсаторы, резистивный делитель напряжения и схему поджига. При поступлении сигнала на поджиг с блока управления включается блок поджига, импульс поджига поступает на управляющий электрод разрядника, разрядник открывается, в результате чего происходит разряд рабочего конденсатора на индуктор.

2. Блок управления предназначен для управления зарядом и разрядом накопителя и включает в себя схему управления на программируемом реле времени, а также исполнительные устройства на реле и магнитных пускателях, которыми управляют кнопки РАБОТА, ПУСК, СТОП и программируемое реле времени [7–10].

3. Индукторная система, которая включает в себя плоский или цилиндрический индуктор, конструкция которого защищена патентом Республики Беларусь № 10603 U от 30.04.2015 (рисунок 3).

Индукторы для МИО, как плоский, так и цилиндрический, схожи по структуре изготовления и состоят из токоведущей спирали 1, выполненной из изолированной медной плоской шины в виде спирали Архимеда на малое ребро.

Токоведущая спираль 1 размещена в изоляционном корпусе 2 из текстолита. С наружной стороны корпус 2 бандажирован металлическим кожухом 3. В нижней части кожуха 3 плоского индуктора выполнены отверстие и паз для размещения изолированного токоподвода 5. Центральный вывод токоведущей спирали 1 соединен с изолированным токоподводом 5 при помощи гайки. Токоподвод 5 изолирован от кожуха 3 при помощи изолятора из текстолита. К нижней и верхней части индуктора крепится сборочными винтами 6 изолятор 4 [11].

Конструкция оборудования, режимы обработки и технология за долгие годы исследований упрочнения с помощью МИО изменялись и дорабатывались исходя из поставленных задач.

В качестве основных входных (управляемых) факторов обработки выделяют следующие технологические параметры процесса: E — энергия воздействия, кДж; n — количество импульсов; ν — частота импульса, кГц (в нашем случае регулировалась выбором установки и индуктора).

В результате анализа литературы по МИО, а также основываясь на имеющейся классификации методов магнитной обработки, было установлено, что в существующих упрочняющих технологиях мало внимания уделяют такому фактору, как длительность импульса, которая напрямую влияет на изменение энергии в импульсе и энергию, выделенную в индукторе при прохождении импульса.

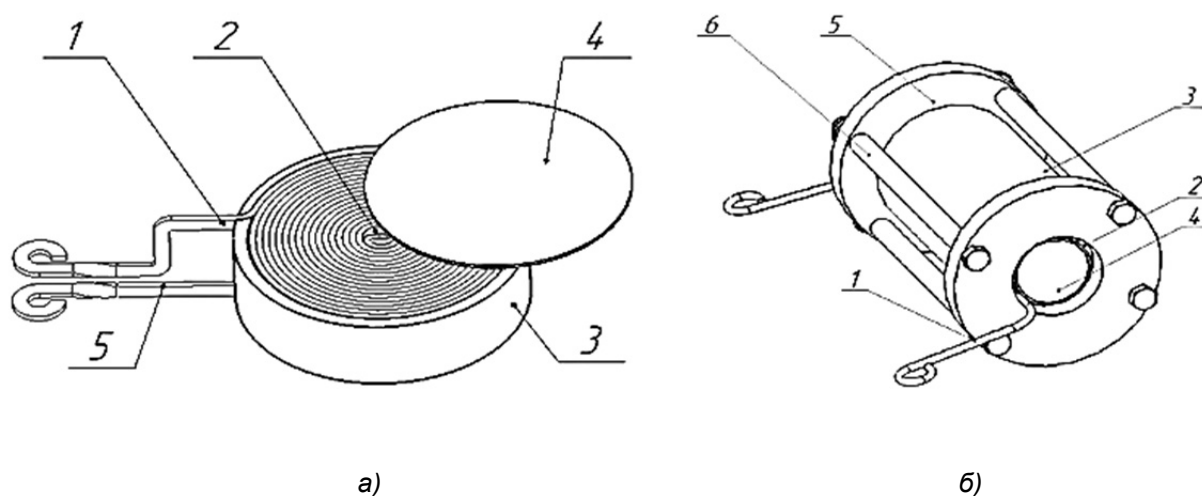


Рисунок 3. — Общий вид индукторных систем: а — плоский индуктор; б — цилиндрический индуктор

Во многих литературных источниках при МИО изделий из инструментальных сталей акцентируют внимание на длительности импульса. Так, в работах В. А. Полетаева, где описываются перспективы использования МИО при упрочнении режущего инструмента, а также влияние магнитного поля на механические свойства стали, представлены результаты исследований, где инструмент обрабатывается магнитно-импульсным полем при длительности импульса 0,1...4,5 с [12]. Количество импульсов и энергия, как и в нашем случае, регулировались в зависимости от материала инструмента и его размеров, при этом стойкость обработанного инструмента повышалась в 2...4 раза. В монографии А. Б. Прокофьева также имеются исследования установок МИО, где в зависимости от технологии длительность импульса составляет 1...2 с [13]. В. В. Драгобецкий, Б. В. Малыгин, Т. Ю. Степанова и другие авторы, описывая технологии магнитно-импульсного упрочнения, указывают режимы, где длительность импульса варьируется от 0,1 до 10,0 с [5; 7; 14].

Приняв во внимание все изученные выше особенности исследования влияния магнитно-импульсной упрочняющей обработки на повышение стойкости стального изделия в зависимости от характера и технологии обработки, была изготовлена установка МИУ 20-21 с возможностью изменения продолжительности импульса от 0,1 до 5,0 с, регулирования частоты в 50 и 100 Гц, а также изменения напряженности магнитного поля. В нашей конструкции напряженность магнитного поля можно изменять за счет характеристик самого индуктора или последовательного подключения двух одинаковых индукторов. Изготовленная установка представлена на рисунке 4.

При разработке экспериментального оборудования предполагались уменьшенные габаритные размеры установки для компактности и удобства использования, в то же время она должна соответствовать необходимым для упрочнения техническим характеристикам: энергия, мощность, частота.

Настольная установка МИУ 20-21 работает на однофазном переменном токе напряжением 220 В. Она состоит из силового блока, блока управления, индуктора с системой загрузки и выгрузки деталей.

К основным изменениям по сравнению с существующими установками можно отнести то, что в конструкции экспериментального оборудования для нового метода обработки отсутствуют дорогостоящие высоковольтные конденсаторные батареи, зарядное устройство, устройства поджига и разрядника, что, в свою очередь, упрощает саму конструкцию оборудования и снижает его стоимость.



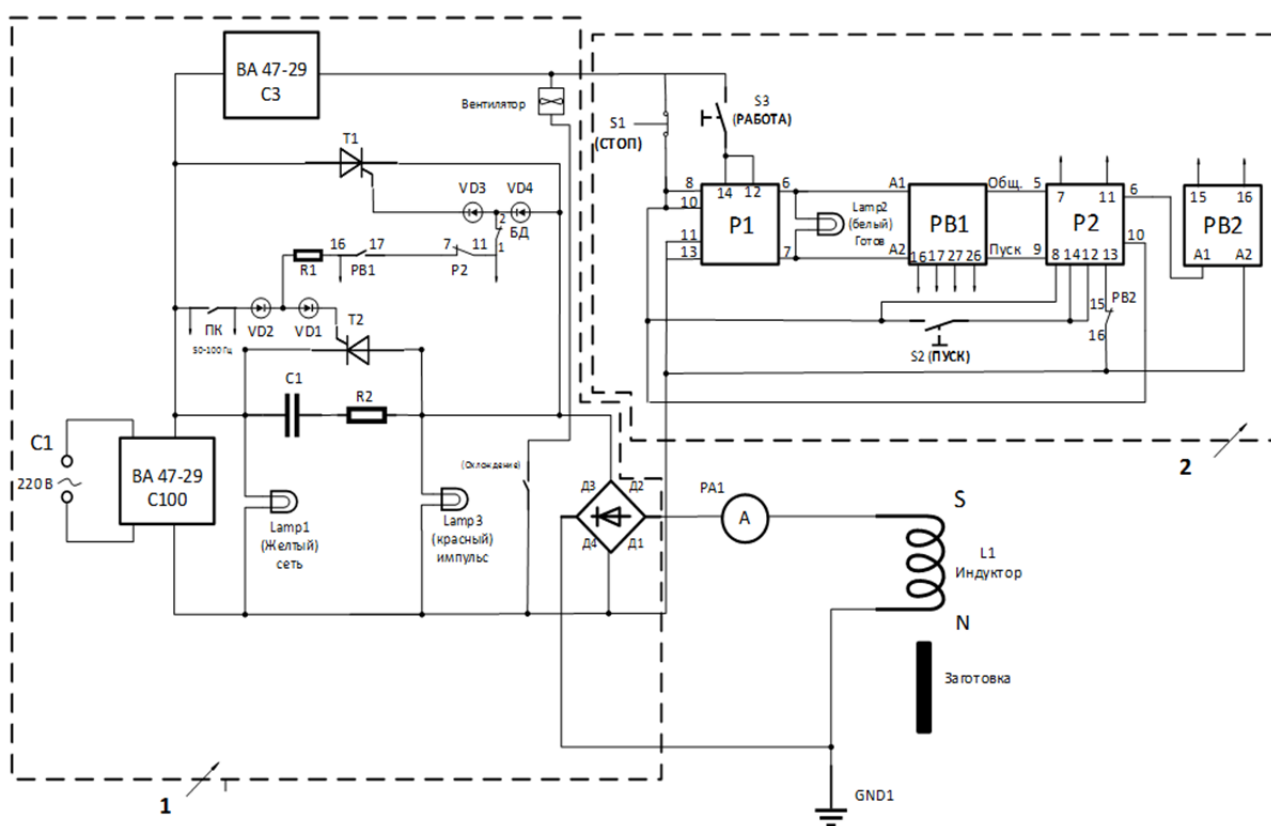
Рисунок 4. — Общий вид экспериментальной установки МИУ 20-21

Электрическая схема экспериментальной установки для МИО с отличными от своих предшественников характеристиками представлена на рисунке 5.

Силовой блок обеспечивает ток через индуктор до 700 А. Ток представляет собой пачки импульсов частотой 50 и 100 Гц длительностью от 0,1 до 5,0 с. В результате мы будем получать в индукторе пачки импульсов от 5 до 1 000 импульсов, что позволит проводить обработку деталей более продолжительное время и обеспечивать возможность более полного прохождения структурных преобразований в металле образца в процессе обработки. Силовой блок включает в себя силовоточный диодный мост, ключевой элемент — силовоточный тиристор и элементы управления и защиты, обеспечивает прохождение рабочего тока через индуктор.

Блок управления обеспечивает формирование необходимых режимов обработки, индикацию работы, блокировки и защиту установки. Блок управления состоит из реле времени РВ1 с микропроцессорным управлением ВЛ-159М-21 УХЛ4, которое управляет процессом обработки изделий по восьми основным программам, обеспечивая режимы обработки необходимой длительности и периодичностью. В блок управления также входят электромагнитные реле и реле времени РВ2, которые управляют индикацией, настройками режима обработки и защитой установки МИУ 20-21.

Установка МИУ 20-21 оснащена цилиндрическим индуктором, который монтируется вместе с установкой, а также дополнительными разъёмами и контактами, которые позволяют подключать к установке индукторы с различными характеристиками, давая возможность обрабатывать широкую номенклатуру различного инструмента.



1 — силовой блок; 2 — блок управления

Рисунок 5. — Схема электрическая установки МИУ 20-21

Учитывая, что при обработке протекают достаточно большие токи и происходит быстрый нагрев медной шины и подводных проводов, в установке предусмотрено воздушное охлаждение индуктора и силовых кабелей.

Основные отличия характеристик разработанной новой установки МИУ 20-21 от имеющихся высокоскоростных МИУ представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1. — Технические характеристики МИУ

Характеристики	МИУ-3 (МИП-18)	МИУ 20-21
Напряжение импульса, до, В	6 000 (12 000)	300
Ток импульса, до, А	70 000	800
Частота импульса, Гц	от 5 до 1 000	50 и 100
Напряженность магнитного поля в индукторе, кА / м	17 000	Порядка 900
Максимально запасаемая энергия воздействия, кДж	До 20	—
Суммарная энергия воздействия, кДж	—	до 700

При исследовании работоспособности МИУ 20-21 проводили измерения силы тока импульса с помощью электроизмерительных клещей СМР-1006, позволяющих фиксировать пусковые токи до 1 000 А. Индукцию магнитного поля контролировали с помощью миллитесламетра Ш1-15У.

Результаты исследования и их обсуждения. Статические результаты измерений индукции магнитного поля, напряженности и тока импульса, полученные с помощью установки МИУ 20-21, показали, что независимо от изменения длительности воздействия характеристики остаются стабильными. В таблицах 2 и 3 представлены результаты измерений.

Т а б л и ц а 2. — Результаты измерений индукции магнитного поля и тока при подключении одного индуктора

Длительность импульса, с	Индукция магнитного поля, Тл	Ток импульса, А	Напряженность магнитного поля, А / м
<i>Частота 50 Гц</i>			
0,1...1,0	1,05...1,09	549...569	$(0,85...0,87) \cdot 10^6$
<i>Частота 100 Гц</i>			
0,1...1,0	1,06...1,11	684...712	$(0,84...0,89) \cdot 10^6$

Т а б л и ц а 3. — Результаты измерения индукции магнитного поля и тока при подключении двух индукторов

Длительность импульса, с	Индукция магнитного поля, мТл	Ток импульса, А	Напряженность магнитного поля, А / м
<i>Частота 50 Гц</i>			
0,1...1,0	545...565	258...305	$(0,43...0,45) \cdot 10^6$
<i>Частота 100 Гц</i>			
0,1...1,0	640...662	348...396	$(0,51...0,53) \cdot 10^6$

В таблице 3 представлены результаты измерений индукции магнитного поля, силы тока и напряженности магнитного поля при последовательном подключении двух индукторов.

Из таблиц 2 и 3 видно, что как при первом варианте подключения, так и при втором разброс по значению индукции магнитного поля и тока импульса практически отсутствует.

Далее были проведены исследования параметров пачек импульсов, поступающих на индуктор. Измерения проводились с помощью двухканального цифрового запоминающего осциллографа ALEX 1111.

На рисунках 6—8 представлены осциллограммы и характеристики импульсов при различных значениях частоты и продолжительности импульса, а также напряженности магнитного поля.

Осциллограмма (см. рисунок 6) представляет собой группу импульсов, которую мы получили при продолжительности импульса 0,1 с и частоте 50 Гц. Как видно из рисунка, при такой обработке мы получаем «пачку» импульсов из 5 шт., каждый длительностью в среднем 4 мс. При этом энергия «пачки» импульсов, которую мы получаем с продолжительностью 0,1 с, при обработке составит порядка 6 кДж.

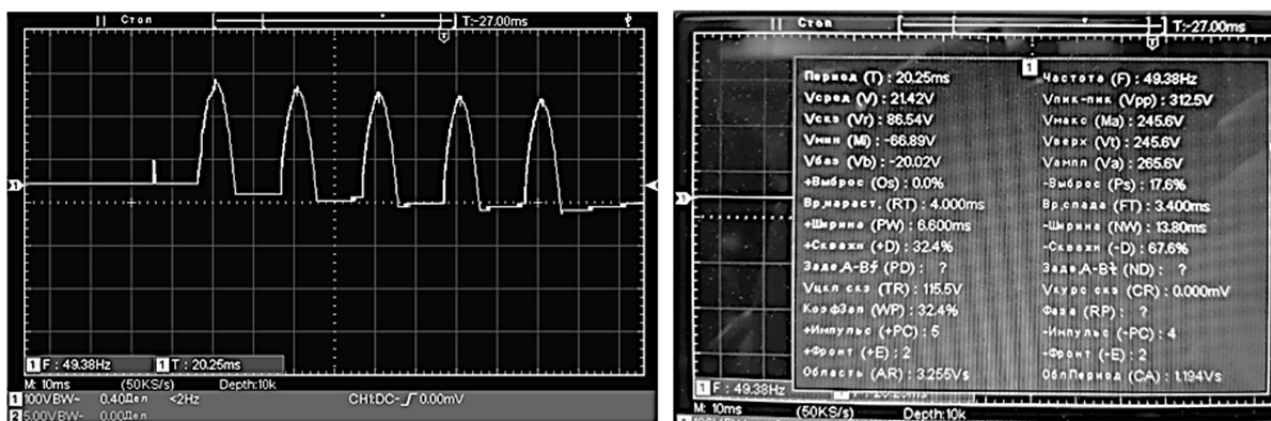
При увеличении продолжительности времени обработки (длительности импульсов) их количество и энергия пропорционально возрастают. На рисунке 7 представлены результаты осциллограммы «пачки» импульсов, полученных при времени обработки 0,2 с.

Исследуя полученные результаты, мы видим, что при увеличении продолжительности обработки на 0,1 с количество импульсов возрастает до 10, что позволяет проводить обработку с энергией воздействия 12 кДж.

Соответственно, увеличивая продолжительность обработки до 0,3 с, получим «пачку» уже из 15 импульсов, энергия обработки составит 18 кДж.

Проанализировав результаты осциллограмм, также наблюдаем стабильность по параметрам импульсов (частоте, их периоду и амплитудным параметрам).

Изменив частоту импульса до 100 Гц, получили аналогичные результаты. Обработка с такой частотой позволит получать за то же время большее количество импульсов и, соответственно, обрабатывать изделие с большей энергией. Так, при длительности 0,1 с энергия воздействия, учитывая, что средний ток равен 690 А, составит 14 кДж, вместо 5 импульсов за один цикл мы получаем 10. Результаты полученной «пачки» импульсов при обработке с частотой в 100 Гц представлены на рисунке 8.



а)

б)

Рисунок 6. — Осциллограмма (а) и характеристики (б) импульсов с длительностью 0,1 с при частоте в 50 Гц

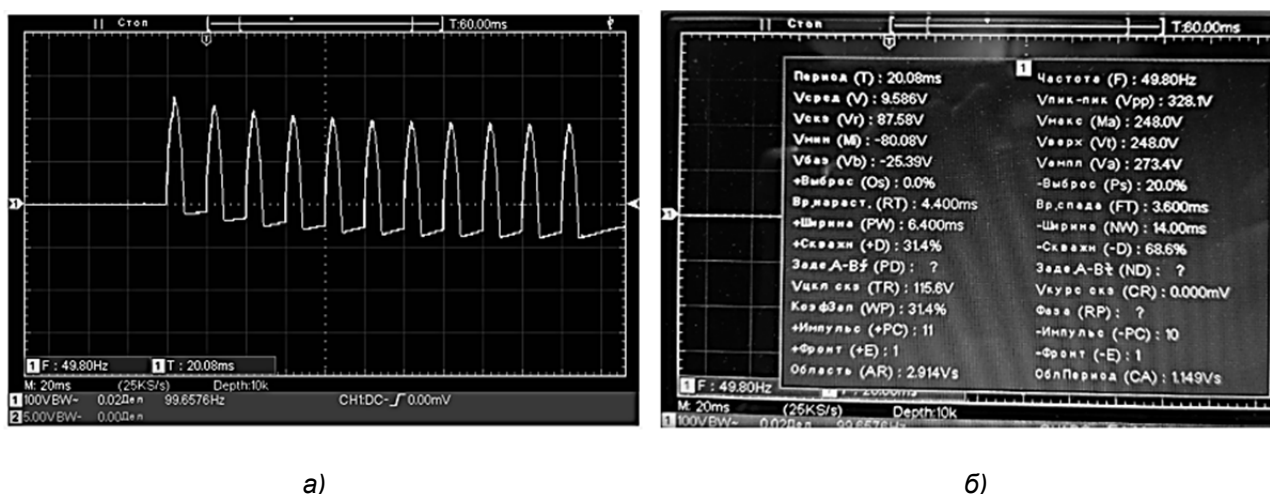


Рисунок 7. — Осциллограмма (а) и характеристики (б) импульсов с длительностью 0,2 с при частоте в 50 Гц

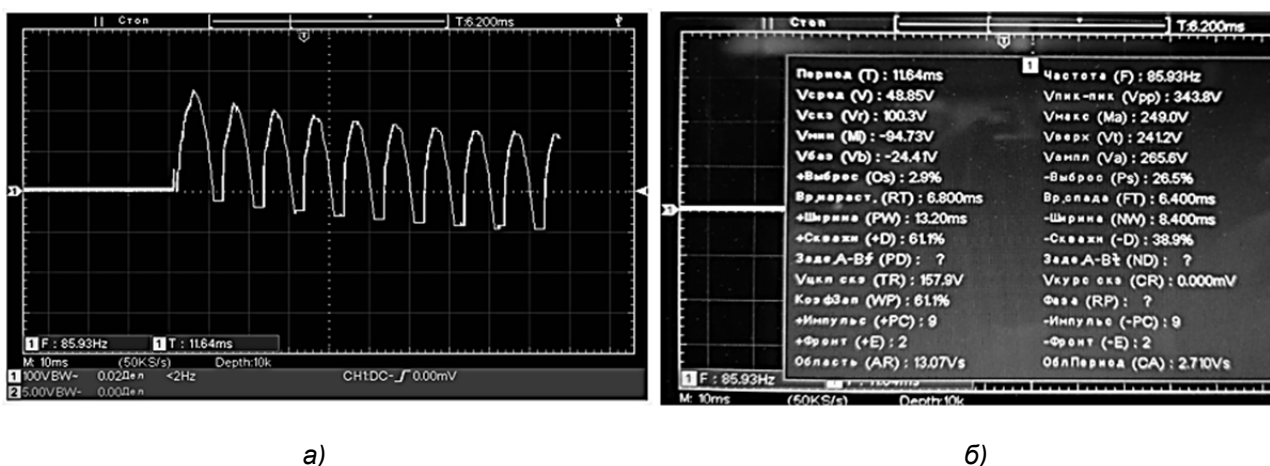


Рисунок 8. — Осциллограмма (а) и характеристики (б) импульсов с длительностью 0,1 с при частоте в 100 Гц

Дальнейшие исследования проводились с последовательно подключенным вторым индуктором. Данный тип подключения позволяет уменьшить индукцию магнитного поля, ток импульса и напряженность магнитного поля в 2 раза. Полученные результаты аналогичны первому варианту, однако суммарная энергия магнитного воздействия также уменьшилась в 2 раза.

На данном этапе были проведены испытания, при которых мы сможем проводить обработку с длительностью импульса от 0,1 до 5,0 с. Обработка с продолжительностью 5 с позволит повысить суммарную энергию магнитного воздействия на изделие до 250 кДж при частоте в 50 Гц и до 700 кДж при частоте 100 Гц.

Таким образом, установлено, что разработанная новая установка МИУ 20-21 за счет широкого диапазона изменения входных параметров по сравнению с аналогичным оборудованием позволяет увеличить технологические возможности упрочняющей МИО стальных изделий.

Заключение. Учитывая специфику использования технологии МИО, а также экономические возможности предприятий, разработка новой технологии магнитно-импульсного упрочнения, а также создание нового оборудования на сегодня является актуальной задачей. Проведен анализ литературных источников и оптимизация ранее полученных результатов, предложена классификация магнитно-импульсного оборудования, применяемого для упрочнения металлических изделий.

Для создания новой технологии МИО изделий из инструментальных сталей были проведены работы по разработке принципиально новой схемы и конструкции оборудования.

Изготовленная МИУ 20-21 для МИО с независимым регулированием частоты и длительности импульса в целях упрочнения металлических изделий по сравнению с существующими установками характеризуется отсутствием в конструкции дорогостоящих комплектующих, что удешевляет конструкцию оборудования и сам метод обработки. Установка, работающая на однофазном переменном токе напряжением 220 В, частотой 50 и 100 Гц, длительностью до 5 с, позволяет получать пакеты импульсов, содержащие от 5 до 1 000 импульсов, проводить обработку деталей более продолжительное время и обеспечивать возможность более полного эффективного осуществления технологических процессов и структурных преобразований в металле образца в процессе обработки.

Проведенные предварительные испытания длительностью импульсов от 0,1 до 5,0 с позволили поднять суммарную энергию воздействия магнитного поля на изделие до 250 кДж при частоте в 50 Гц и до 700 кДж при частоте 100 Гц. Обработка проводилась при разных входных параметрах, где регулировались частота и длительность импульса, а также напряженность магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ в рамках договора от 01.07.2021 № Т21-099.

Список цитированных источников

1. *Малыгин, Б. В.* Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1989. — 112 с.
2. *Матяс, А. Н.* Определение эффективности использования упрочняющей магнитно-импульсной обработки для повышения периода стойкости режущего инструмента / А. Н. Матяс, А. М. Милокова // Механическое оборудование металлургических заводов. — Магнитогорск, 2020. — С. 3—10.
3. *Матяс, А. Н.* Исследование влияния магнитно-импульсного воздействия на шероховатость поверхности инструментальной стали / А. Н. Матяс, А. И. Горчанин, А. М. Милокова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2019. — С. 238—246.
4. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлорежущих сверл из быстрорежущей стали / А. М. Милокова [и др.] // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 50—56.
5. *Степанова, Т. Ю.* Технологии поверхностного упрочнения деталей машин : учеб. пособие / Т. Ю. Степанова ; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. — Иваново, 2009. — 64 с.
6. *Кинденко, Н. И.* О физической сущности процесса магнитной обработки осевого инструмента из быстрорежущей стали / Н. И. Кинденко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. — Краматорськ : ДДМА, 2010. — Вип. 26. — С. 203—208.
7. *Драгобецкий, В. В.* Новые и высокоэффективные технологии в машиностроении : учеб. пособие / В. В. Драгобецкий, А. Д. Коноваленко, В. Г. Загорянский. — Харьков : Точка, 2012. — 238 с.
8. *Попов, Ю. А.* К выбору оптимальных электрических режимов магнитно-импульсной обработки металлов / Ю. А. Попов, Е. Г. Иванов // Исследование новых электрофизических и электротермических установок. — Чебоксары, 1972. — С. 23—26.
9. *Курлаев, Н. В.* Влияние импульсной обработки на технологические дефекты деталей / Н. В. Курлаев, А. И. Гулидов. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. — 168 с.
10. *Степанов, В. Г.* Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов / В. Г. Степанов, И. А. Шавров. — Л. : Машиностроение, 1975. — 278 с.

11. Индуктор для магнитно-импульсной обработки : полезная модель № 10603 U от 30.04.2015 Респ. Беларусь / А. В. Алифанов, А. А. Лях, А. М. Милюкова, В. Н. Шишмолин, А. А. Демянчик, Ж. А. Попова. — Дата публ.: 07.08.2014.

12. *Полетаев, В. А.* Энергетический анализ влияния магнитного поля на механические свойства стали / В. А. Полетаев, Д. А. Потемкин // Вестн. ИГЭУ. — 2007. — Вып. 3. — С. 4.

13. Магнитно-импульсная обработка материалов : монография / А. Б. Прокофьев [и др.] ; под ред. А. Б. Прокофьев. — Самара : Изд-во СНЦ, 2019. — 140 с.

14. *Малыгин, Б. В.* Магнитное упрочнение изделий (Теория и практика) : монография / Б. В. Малыгин, А. П. Бень. — Изд-во ХДМИ, 2009. — 350 с.

Поступила в редакцию 26.09.2023.