

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 2 (14), ноябрь, 2023

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.
Телефон: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных
подписчиков; 009992 — 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» включён в Перечень
научных изданий Республики Беларусь для
опубликования результатов диссертационных
исследований по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ»
включён в РИНЦ (Российский индекс научного
цитирования), лицензионный договор
№ 06-01/2016.

Выходит на русском и английском языках.
Распространяется на территории
Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской
группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор А. Ю. Сидоренко
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор: Н. Н. Колодко

Подписано в печать 03.11.2023. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 9,40. Уч.-изд. л. 6,40.
Тираж 40 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: республиканское
унитарное предприятие «Информационно-
вычислительный центр Министерства финансов
Республики Беларусь». Специальное разреше-
ние (лицензия) на право осуществления поли-
графической деятельности № 02330/89
от 3 марта 2014 года.
Адрес: ул. Кальварийская, 17, 220004 г. Минск.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (гл. ред. журн.), 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, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного
производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный
университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый
проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
Барановичи, Республика Беларусь).

Алифанов А. В. (гл. ред. сер.), лауреат Государственной премии Республики Беларусь
в области науки и техники, доктор технических наук, профессор (государственное научное
учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,
Минск, Республика Беларусь; учреждение образования «Барановичский государственный
университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Горбач Ю. Е. (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский
государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Зубрицкая Л. С. (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский
государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович И. А. (отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»), кандидат
технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный
университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Дубень И. В.** (отв. за направление
«Процессы и машины агроинженерных систем»), кандидат технических наук, доцент
(учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи,
Республика Беларусь).

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский
государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

Белый А. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук,
профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**,
доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной
лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального
технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

Дремук В. А., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский
государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**,

доктор технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный
университет», Барановичи, Республика Беларусь; государственное научное учреждение
«Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», Могилев,
Республика Беларусь);

Калугин Ю. К., кандидат технических наук, доцент (учреждение
образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно,
Республика Беларусь); **Карташевич А. Н.**, доктор технических наук, профессор (учреждение
образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового
Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клубович В. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук,

профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Националь-
ной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**, доктор
технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высше-
го образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь);

Томило В. А., доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический
университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, член-корреспондент Национальной
академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный
технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Institution of Education "Baranavichy State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranavichy.
Phone: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;
009992 — for companies.
The certificate of the registration of mass media № 1533
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information
of Belarus.

In compliance with the order of the Higher Attestation
Commission of the Republic of Belarus from January 21,
2015 № 16 the scientific and practical journal "BarSU
Herald. Engineering Series" is included into the List of
scientific publications of the Republic of Belarus for
publishing the results of theses research on engineering
sciences (mechanical engineering and machines,
processes and machines of agroengineering systems).

Scientific-and-practical journal "BarSU Herald"
is included into RSCI (Russian Science Citation Index),
license agreement № 06-01/2016.

Issued in Russian and English. The journal is distributed
on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor A. Y. Sidorenko
Technical editor A. Y. Sidorenko
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader: N. N. Kolodko

Signed print 03.11.2023. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 9,40.
Acc.-pub. s. l. 6,40. Circulation of 40 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Republican Unitary Enterprise
"Information and Computing Center of the Ministry of
Finance of the Republic of Belarus". Special permission
(license) for the right to carry out printing activities
No. 02330/89, March 3, 2014.
Address: 17 Kalvaryiskaya, 220004 Minsk

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus; Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus; State scientific institution "Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Mogilev, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochkov A. V.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Алифанов А. В., Богданович И. А., Богданова Т. Я., Рогозина Е. В. Исследование трибологических свойств и микротвердости стальных образцов, упрочненных вакуумными покрытиями и магнитно-импульсной обработкой

Голубев В. С., Вегера И. И., Ходюш В. Е., Дьяченко О. В., Протасевич К. В. Применение волоконного лазера для поверхностного легирования стали

Матяс А. Н., Лях А. А. Разработка экспериментального оборудования для нового метода магнитно-импульсной обработки с независимым регулированием длительности импульса

Милиукова А. М., Матяс А. Н., Лях А. А., Толкачева О. А. Исследование свойств магниевых сплавов после магнитно-импульсной обработки

Михальков Д. В., Михальков В. С. Построение математической модели процесса измельчения щебня в дробильной установке с вертикальным валом

Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Рабцевич Н. С. Исследование эксплуатационных свойств синтетических трансмиссионных масел в процессе эксплуатации автобусов

Попок Н. Н., Беляков Н. В., Селезнёв С. К. Система поддержки принятия решений по определению параметров размерной настройки сверл для программирования обработки отверстий на станках с числовым программным управлением

Юницкий А. Э., Першай Н. С., Арнаут С. А. Исследование влияния электрогидроудара на измельчение бурого угля как компонента почвогрунта

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Китун А. В., Бондарев С. Н. Определение силового взаимодействия соска вымени коровы с сосковой резиной доильного стакана при такте «сжатие»

- 4 **Alifanov A. V., Bogdanovich I. A., Bogdanova T. Ya., Rogozina E. V.** Research of steel specimens tribological properties and microhardness strengthened by vacuum coatings and magnetic pulse processing
- 8 **Golubev V. S., Vegera I. I., Hodjush V. E., Dyachenko O. V., Protasevich K. V.** Fiber laser application for steel surface alloying
- 16 **Matsias A. N., Lyakh A. A.** The development of experimental equipment for a new magnetic pulse processing method with independent pulse duration control
- 27 **Miliukova A. M., Matsias A. N., Lyakh A. A., Tolkachova O. A.** Study of the magnesium alloys properties after magnetic pulse processing
- 37 **Mikhalkov D. V., Mikhalkov V. S.** Construction of mathematical model of crushed stone grinding process in crushing unit with vertical shaft
- 45 **Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Rabtsevich N. S.** Study of the synthetic gear oils performance properties during bus operation
- 50 **Popok N. N., Belyakov N. V., Seleznev S. K.** Decision support system for determining the dimensional adjustment parameters of drills for programming hole processing on CNC machine-tools
- 64 **Unitsky A. E., Pershai N., Arnaut S.** Influence of electrohydraulic impact on the brown coal grinding as a soil component

PROCESSES AND MACHINES
OF AGROENGINEERING SYSTEMS

- 74 **Kitun A. V., Bondarev S. N.** Determination of the cow udder nipple force interaction with teat rubber of the milking cup at the "compression" stroke

УДК 621.784; 621.794; 674.055

А. В. Алифанов¹, доктор технических наук, профессор,

И. А. Богданович², кандидат технических наук, доцент,

Т. Я. Богданова³, Е. В. Рогозина⁴

^{1, 2, 3, 4} Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (029) 352 71 81

¹ Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 367 60 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОТВЕРДОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ, УПРОЧНЕННЫХ ВАКУУМНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Исследовано влияние режимов вакуумного нанесения упрочняющих (TiN и ZrN) и антифрикционных (содержащих Cu, S и N) покрытий на стальные образцы с последующей магнитно-импульсной обработкой на трибологические свойства сформированных покрытий, разработаны опытные режимы нанесения покрытий, обеспечивающие повышенные трибологические характеристики стальных образцов. Установлено, что нанесение Cu на вакуумное покрытие с последующей магнитно-импульсной обработкой улучшает эксплуатационные характеристики покрытия — коэффициент трения и износостойкость.

Проведенные исследования показали, что для деталей, работающих в условиях интенсивного износа, целесообразно применять вакуумные покрытия типа TiN и ZrN с последующим нанесением слоя меди и магнитно-импульсной обработкой.

Ключевые слова: стальные образцы; вакуумные покрытия; магнитно-импульсная обработка; трибологические свойства; микротвердость.

Библиогр.: 7 назв.

A. V. Alifanov¹, DSc in Technical Sciences, Professor,

I. A. Bogdanovich², Phd in Technical Sciences, Associate Professor,

T. Ya. Bogdanova³, E. V. Rogozina⁴

^{1, 2, 3, 4} Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voikova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus, +375 (029) 352 71 81

¹ State Scientific Institution “Physical and 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

RESEARCH OF STEEL SPECIMENS TRIBOLOGICAL PROPERTIES AND MICROHARDNESS STRENGTHENED BY VACUUM COATINGS AND MAGNETIC PULSE PROCESSING

The influence of vacuum deposition modes of strengthening (TiN and ZrN) and antifriction agents (containing Cu, S and N) coatings on steel samples with subsequent magnetic pulse processing on the formed coatings tribological properties, experimental coating application modes have been developed. It provides increased tribological

characteristics of steel samples. It has been established that applying Cu to a vacuum coating followed by magnetic pulse treatment improves the coating performance characteristics — friction coefficient and wear resistance.

The conducted studies have shown that for parts operating under intense wear conditions, it is advisable to use vacuum coatings such as TiN and ZrN, followed by the application of a copper layer and magnetic pulse processing.

Key words: steel samples; vacuum coatings; magnetic pulse processing; tribological properties; microhardness.
Ref.: 7 titles.

Введение. В государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» и учреждении образования «Барановичский государственный университет» исследован эффект упрочнения сильным электромагнитным полем стальных изделий, в том числе закаленных, что открывает широкие перспективы в области упрочняющих технологий. Этот метод выгодно отличается от многих традиционных методов упрочнения простотой исполнения, низкими трудозатратами, малой энергоемкостью, экологической чистотой [1—4].

Необходимость обрабатывать механическими методами высокопрочные поверхности ставит перед инструментальщиками задачу упрочнять режущие инструменты в целях повышения их стойкостных показателей. Применение магнитно-импульсной упрочняющей обработки (далее — МИО) позволяет значительно увеличить период стойкости дерево-режущих ножей [2; 3].

В последнее время для модификации инструмента методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) создаются и исследуются ионно-плазменные покрытия на базе нитридов тугоплавких металлов (Ti, Mo, Cr, Zr), которые позволяют существенно увеличить физико-механические свойства различных материалов и, соответственно, улучшить эксплуатационные свойства изделий, применяемых в различных отраслях промышленности, в том числе при деревообработке [5; 6].

Однако требования производителей к эксплуатационным характеристикам изделий непрерывно растут, в связи с чем появилась необходимость создания комбинированных методов упрочнения, сочетающих различные виды высокоэнергетических воздействий, в частности КИБ и МИО.

Особенности воздействия комбинированного метода вакуумного ионно-плазменного напыления и МИО на микроструктуру, фазовый состав и триботехнические свойства лезвий ножей фрезерного инструмента, применяемого при обработке древесины, практически не изучены. Для проведения исследований были использованы стальные образцы из стали 45. Для уменьшения коэффициента трения поверх упрочняющих покрытий химико-термическим методом наносилась медь, а также на поверхность стальных образцов методом сульфатирования наносилось покрытие, содержащее серу и азот.

Сульфатирование — диффузионный процесс насыщения поверхности деталей серой и азотом [7]. Слой, содержащий соединения серы, ускоряет приработку трущихся пар, улучшает адсорбцию масла и предотвращает схватывание и задиры. Слой карбонитридных фаз и нитридов обеспечивает длительное сохранение высокой износостойкости и хорошую приработку поверхности. Процесс сульфатирования не требует специального оборудования и может быть осуществлен в обычных тигельных печах-ваннах.

Результаты исследования и их обсуждение. Для проведения исследований было изготовлено 36 стальных образцов из стали 45 размером $10 \times 10 \times 5$ мм, произведена шлифовка всех поверхностей. Затем на поверхность 12 образцов было нанесено покрытие TiN толщиной 4 мкм, после чего эти образцы были подвергнуты МИО с энергией импульса 1, 4, 6 кДж (по 3 образца на каждую величину энергии). На поверхность 12 образцов нанесено покрытие ZrN также толщиной 4 мкм, после чего их подвергли МИО по вышеуказанной схеме. На оставшиеся 12 образцов нанесли, кроме TiN и ZrN, слой меди толщиной 4 мкм, после чего образцы также

были обработаны магнитно-импульсным воздействием с энергией импульса 1 и 6 кДж (2 образца, покрытых ZrN + Cu, и 2 образца, покрытых TiN + Cu, МИО не подвергались).

На машине трения были исследованы трибологические свойства образцов из стали 45, покрытых нитридом циркония (ZrN) и обработанных магнитно-импульсным воздействием с энергией импульса 1, 4 и 6 кДж.

Микротвердость покрытий на всех образцах находилась в пределах 29...34 ГПа (нагрузка — 0,1 Н). Коэффициент трения образцов практически не менялся за время эксперимента и находился в пределах от 0,08 до 0,13. Изменение энергии импульса существенно не повлияло на величину и характер изменений коэффициента трения.

На машине трения также исследованы трибологические свойства 12 образцов из стали 45, покрытых вакуумным упрочняющим покрытием TiN и обработанных магнитно-импульсным воздействием с энергией импульса 1, 4 и 6 кДж. И в этом случае изменение энергии импульса мало влияет на характер изменения коэффициента трения, который находится в пределах 0,09... 0,12.

Микротвердость покрытия на всех образцах находилась в пределах 22...34 ГПа, в частности, микротвердость незакаленных образцов из стали 45, упрочненных вакуумными покрытиями TiN и ZrN и магнитно-импульсным воздействием, увеличилась для образцов с покрытием TiN от 22...25 до 25...28 ГПа, образцов с покрытием ZrN — от 26...30 до 29...34 ГПа.

Были проведены исследования трибологических свойств образцов из стали 45 с комбинированным покрытием ZrN + Cu. Установлено, что коэффициент трения образца, обработанного магнитно-импульсным воздействием, сохраняется практически без изменений в процессе исследования (в пределах 0,05...0,06), а у образца, не обработанного магнитно-импульсным воздействием, коэффициент трения очень быстро увеличивается (от 0,05 до 0,13), ухудшая трибологические свойства покрытия. Такая же картина наблюдается и при исследовании образцов с покрытием TiN + Cu.

Сравнение полученных результатов показывает, что коэффициент трения стальных образцов, покрытых ZrN + Cu и обработанных магнитно-импульсным воздействием, в 1,5...2,0 раза меньше, чем у стальных образцов, покрытых только ZrN или TiN и обработанных магнитно-импульсным воздействием, что позволяет сделать вывод о благоприятном влиянии дополнительной обработки упрочняемых стальных поверхностей медью. Следует также отметить, что медное покрытие, не обработанное магнитным полем, очень быстро истирается, коэффициент трения, соответственно, возрастает. Дополнительная обработка магнитно-импульсным воздействием уплотняет медное покрытие и улучшает адгезию к стальной основе, в результате чего улучшаются эксплуатационные характеристики образца (коэффициент трения и износостойкость).

Заключение. Анализ вышеприведенных исследований трибологических свойств образцов, обработанных комбинированным методом, показывает, что коэффициент трения у образцов с покрытиями TiN и ZrN находится в пределах 0,8...1,3, а у образцов, дополнительно покрытых слоем меди толщиной 4 мкм, коэффициент трения уменьшается до значений 0,5...0,75. Этот результат показывает, что для деталей, работающих в условиях интенсивного износа, целесообразно применять вакуумные покрытия типа TiN и ZrN с последующим слоем меди и МИО.

Список цитированных источников

1. Алифанов, А. В. Проблемы станкостроения / А. В. Алифанов, А. С. Демянчик. — Барановичи : РИО БарГУ. — 2014. — 92 с.
2. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. — 2012 — № 3. — С. 77—83.

3. Алифанов, А. В. Влияние режимов упрочняющей магнитно-импульсной обработки на прочностные характеристики дереворежущих ножей / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, А. С. Демянчик // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. — 2012. — С. 74—78.
4. 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.
5. Алифанов, А. В. Влияние TiN-покрытий твердосплавных ножей на эксплуатацию дереворежущего фрезерного инструмента при обработке ламинированных ДСтП // Тр. БГТУ. — 2012. — № 2 : Лесная и деревообрабатывающая промышленность. — С. 207—211.
6. Гришкевич, А. А. Особенности износа упрочненных методом КИБ лезвий и ножей дереворежущего фрезерного инструмента при обработке ДСтП // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. материалов VII Междунар. науч.-техн. конф., 19—21 сент. 2012 г. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2012. — Кн. 2. — С. 297—303.
7. Елизаветин, М. А. Технологические способы повышения долговечности машин / М. А. Елизаветин, Э. А. Сатель. — М. : Машиностроение, 1969. — 400 с.

Поступила в редакцию 11.10.2023.

УДК 621.78:535.211

В. С. Голубев¹, кандидат технических наук,
И. И. Вегера², кандидат технических наук,
В. Е. Ходюш³, О. В. Дьяченко⁴, кандидат технических наук,
К. В. Протасевич⁵

^{1, 2, 3}Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь

+375 (17) 369 31 24, gvs_fti@mail.ru

^{4, 5}Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет», пр-т Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ

Изучены особенности легирования поверхности стали Hardox 600 с использованием порошков WC, B₄C и Ni(Cr) на основе воздействия излучением волоконного иттербиевого лазера. Проведено исследование качества и структуры поверхностных слоев, их геометрических размеров. Режимы лазерного воздействия на стали подбирались в зависимости от плотности мощности излучения установки, диаметра лазерного пятна и линейных скоростей перемещения луча. Показано, что процесс лазерного легирования критичен к режимам обработки. При мощности лазерного излучения ~ 2 кВт качественные легированные слои могут более устойчиво наблюдаться во всем энергетическом диапазоне воздействия лазерным лучом. С ростом глубины легированных слоев при использовании B₄C микротвердость снижается, что обуславливается снижением концентрации вводимых легирующих элементов. Микротвердость таких слоев может изменяться в диапазоне 7 300...16 000 МПа.

Ключевые слова: лазерное легирование; поверхностный слой; микроструктура; микротвердость.

Рис. 5. Библиогр.: 9 назв.

V. S. Golubev¹, PhD in Technical Sciences,
I. I. Vegera², PhD in Technical Sciences,
V. E. Hodjush³, O. V. Dyachenko⁴, PhD in Technical Sciences,
K. V. Protasevich⁵

^{1, 2, 3}State Scientific Institution "Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", 10 Akademika Kuprevicha Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus,

+375 (17) 369 31 24, gvs_fti@mail.ru

^{4, 5}Institution of Education "Belarusian National Technical University", 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus

FIBER LASER APPLICATION FOR STEEL SURFACE ALLOYING

The features of alloying the surface of Hardox 600 steel using WC, B₄C and Ni(Cr) powders based on exposure to ytterbium fiber laser radiation have been studied. A study of the quality and surface layers structure, their geometric dimensions has been carried out. The modes of laser exposure on steel have been selected depending on the radiation power density installation, the laser spot diameter and the linear speeds of beam movement. It is shown that the laser alloying process is critical to the processing modes. With a laser radiation power of ~ 2 kW, high-quality doped layers can be observed more stably throughout the entire energy range of laser beam exposure. With increasing depth of the alloyed layers when using B₄C, the microhardness decreases, which is caused by the decrease in the of introduced alloying elements concentration. The microhardness of such layers can vary in the range of 7,300...16,000 MPa.

Key words: laser alloying; surface layer; microstructure; microhardness.

Fig. 5. Ref.: 9 titles.

Введение. Традиционные металлургические методы термообработки и получения многих сталей и сплавов в настоящее время практически исчерпали свои возможности и перспективы в плане повышения эксплуатационных свойств. Делать ставку на получение новых материалов с применением известных технологий, которые могли бы существенно изменить положение дел в этом направлении, не приходится. В связи с этим в последние десятилетия для решения этих вопросов уклон делается на развитие и применение новых, в частности, высокоэнергетических технологий инженерии поверхности и получения материалов, создания покрытий и др. [1—8].

Многими исследователями отмечается перспективность развития и применения в различных сферах промышленного производства результатов лазерного поверхностного легирования. Однако сегодня, несмотря на несомненную научную и практическую важность, технологии лазерного поверхностного легирования не получили еще должного развития и внедрения. Главной причиной этого является недостаточная теоретическая и экспериментальная изученность основных закономерностей изменения как отдельных, так и комплекса свойств обрабатываемых сталей и сплавов в зависимости от получаемого структурно-фазового состояния при осуществлении процессов легирования различными элементами в условиях весьма высоких скоростей нагрева и охлаждения, что существенно тормозит разработку рекомендаций прикладного характера, а также конкретных промышленных технологий. Исследования, осуществляемые в области лазерного легирования поверхностей металлических изделий, зачастую направлены на решение частной задачи повышения эксплуатационных свойств конкретно взятого металла или отдельно изготовленных из него деталей. В связи с этим из-за существенных различий в условиях и схемах проведения исследований полученные многими авторами результаты не поддаются полной систематизации. Это связано во многом с отсутствием полного понимания принципов управления структурой при формировании поверхностных слоев, благодаря чему обеспечивается нужный уровень характеристик конструкционной прочности, что составляет основу разработки таких технологий [7].

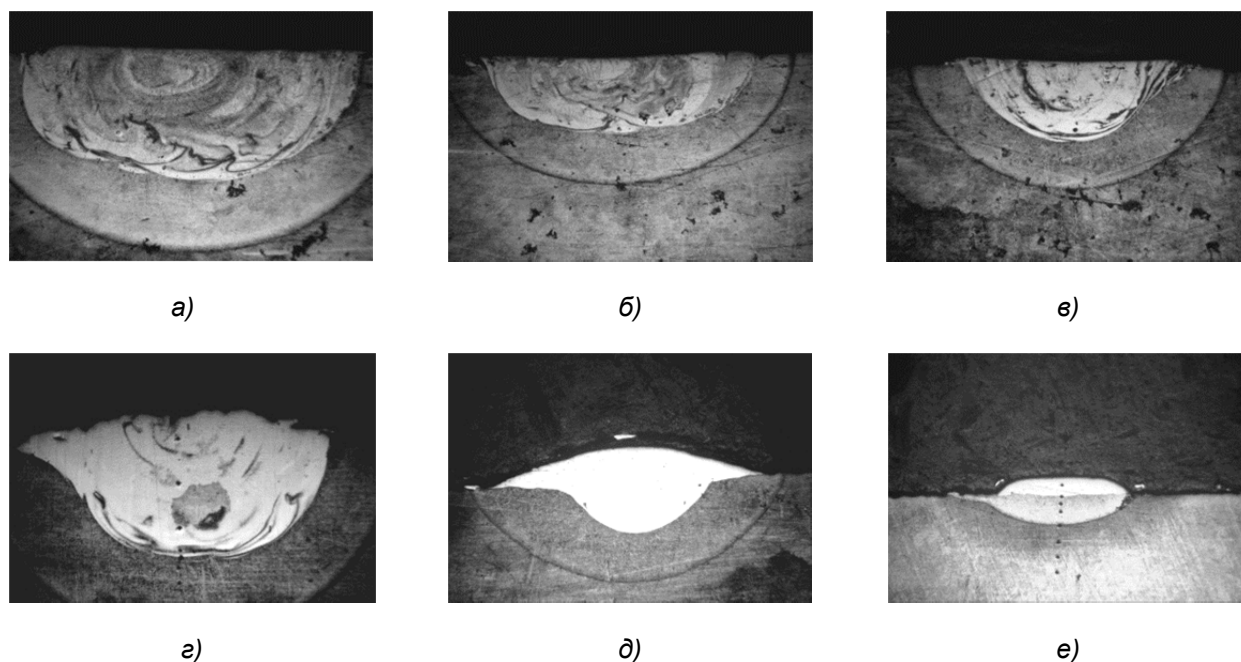
С учетом этого нами начато выполнение работ по изучению особенностей лазерного легирования поверхностей ряда сталей различными легирующими компонентами в равнозначных условиях эксперимента с использованием излучения волоконного лазера мощностью 2 кВт. В этой статье приводятся некоторые результаты по лазерному легированию современной износостойкой стали Hardox 600. Эта задача обусловлена тем, что вследствие различных условий эксплуатации зачастую на отдельных участках поверхностей деталей, изготовленных из этой весьма качественной стали, необходимо дополнительно повысить какие-то свойства, придать другие или создать комплекс новых.

Стали семейства Hardox — легированные горячекатаные стали конструкционного класса с твердостью от 350 до 650 HB. Изготавливаются такие мелкозернистые стали шведской компанией SSAB Oxelösund AB. В процессе производства сталь проходит специфические закалку и отпуск. Производители этих сталей при разработке сделали упор именно на устойчивости материала ко многим видам износа. Срок эксплуатации изделий и конструкций из стали марки Hardox благодаря этому в несколько раз выше, чем у такого же металлопроката других марок [9].

Материалы и методы исследования. Образцы для исследования вырезались из листа стали марки Hardox 600 ($C \leq 0,47$; $Si \leq 0,70$; $Mn \leq 1,40$; $Cr \leq 1,20$; $Ni \leq 2,50$; $Mo \leq 0,70$; $B \leq 0,005$; $P \leq 0,015$; $S \leq 0,010$) толщиной 10 мм. Исходная твердость стали была на уровне ~ 600 HB. Эта сталь способна обеспечить оптимальную твердость при высокой вязкости и по параметрам легко заменяет стальное литье и ковкий чугун. Несмотря на высокую твердость и достаточно высокую ударную вязкость, такая сталь легко обрабатывается, режется и сваривается.

В качестве легирующих материалов в настоящих экспериментах использовались порошки карбидов W_4C , WC и Ni (~ 17 % Cr). Перед лазерной обработкой на поверхности предварительно формировался слой нанесением на нее обмазки из вышеуказанных порошков. Это позволяет обеспечить экономию в расходе легирующих компонентов и дает возможность создания в зоне упрочнения нужной концентрации легирующих элементов. Отметим, что таким способом удастся наносить самые различные легирующие материалы, что не всегда возможно осуществить другими способами. Толщина слоя при этом составляла ~ 100...150 мкм. Обработка образцов проводилась на основе модуля поверхностной термообработки МЛ35-ПО, в котором используется иттербиевый волоконный лазер ЛС-2 с максимальной выходной мощностью 2 кВт. В качестве защитного газа в экспериментах использовался аргон. Анализ микроструктуры проводился на травленых шлифах в сечениях перпендикулярно поверхности с использованием оптического микроскопа Neophot-2, измерения микротвердости — на микротвердомере ПМТ-3, элементный анализ — на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3LMH. Режимы обработки подбирались в зависимости от мощности лазерного излучения установки, линейных скоростей перемещения лазерного луча и диаметра пятна его фокусировки.

Результаты исследования и их обсуждение. Лазерное поверхностное легирование в данном случае заключается в получении легированных слоев с предварительным размещением присадочных компонентов непосредственно в зоне воздействия лазерного луча. Образец со слоем легирующей обмазки при воздействии сканирующего лазерного луча оплавлялся, легирующие элементы попадают в ванну расплава, который затем быстро кристаллизуется. При скоростной кристаллизации расплавленного металла в зоне легирования создается мелкозернистая структура со специфическими эксплуатационными характеристиками. На рисунке 1 показаны характерные микроструктуры легированных слоев, получаемых в данных экспериментах.



а, з — $P = 2$ кВт, $v = 1$ м / мин; б — $P = 2$ кВт, $v = 2,5$ м / мин; в — $P = 1$ кВт, $v = 1$ м / мин;
 д — $P = 1$ кВт, $v = 1$ м / мин; е — $P = 1$ кВт, $v = 5$ м / мин

Рисунок 1. — Микроструктуры поверхностных слоев при использовании для легирования порошков WC (а, б, в) и Ni (~ 17 % Cr) (з, д, е)

Лазерное поверхностное упрочнение в режимах с оплавлением поверхности отличается от обычной лазерной закалки в твердой фазе как большими размерами зон лазерного воздействия, так и более выраженной структурной неоднородностью поверхностных слоев, которая состоит обычно из нескольких слоев. Наружный слой, как правило, имеет дендритное, ячеистое или дендритно-ячеистое строение, которые характерны для закалки металлов из жидкого состояния. Ниже располагаются зона термического влияния и переходный слой, где все превращения происходят в твердой фазе, а далее следует материал основы. В зоне термического влияния в большинстве случаев может происходить подзакалка стали, а в переходной зоне — наблюдаться ее частичный отпуск.

Из рисунка 1 можно видеть, что полной гомогенизации ванны расплава за один проход получить не всегда удастся, особенно при использовании химических соединений с высокой температурой плавления. Могут наблюдаться своеобразные «языки» и вихри, которые имеют различную степень травимости и, как можно предположить, различный структурно-фазовый состав, а также концентрацию легирующих элементов. Это свидетельствует о том, что при данном времени существования ванны расплава, скорости его конвекции недостаточно для получения однородной структуры расплавленной зоны. В то же время однородная структура характерна непосредственно для оплавленного поверхностного слоя этой стали во всех режимах лазерного воздействия без нанесения легирующего материала на поверхность. Такие режимы лазерного легирования с созданием своеобразной гетерофазной структуры могут тем не менее быть весьма перспективны при условиях работы деталей с абразивным износом. Максимальная глубина получаемых легированных слоев при уровне мощности 1 кВт составляет ~ 350 мкм, при уровне мощности 2 кВт — ~ 600 мкм, зона нижележащих мартенситно-аустенитных превращений в твердой фазе в этих случаях, соответственно, может достигать $\sim 200...250$ и $\sim 300...350$ мкм. В целом при возрастании плотности потока лазерного излучения увеличивался объем расплавленного металла, т. е. увеличивалась не только глубина, но и ширина расплавленной дорожки, которая достигала, например, при диаметре пятна фокусировки лазерного луча $\sim 1,5$ мм и мощности излучения ~ 2 кВт максимальных значений $\sim 2,5...3,0$ мм. Было обращено внимание также на наличие достаточно ровной поверхности закристаллизовавшегося металла при использовании для легирования WC и B_4C , т. е. наблюдалась небольшая конечная шероховатость поверхности, что может потребовать при необходимости совсем небольшую механическую шлифовку, таким образом будет обеспечиваться при эксплуатации достаточная глубина легированного слоя.

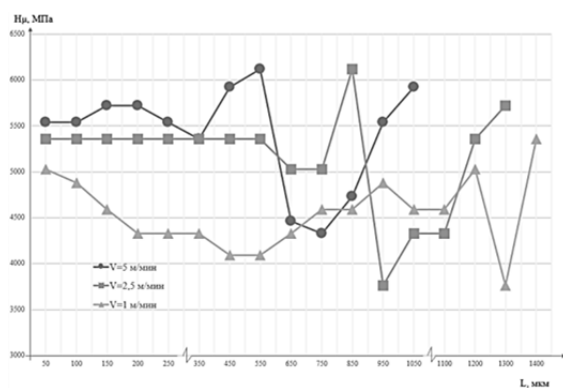
Отметим, что при реализации процесса лазерного легирования обычно над поверхностью в зоне обработки наблюдался светящийся факел, который связывается с испарением легирующего компонента и созданием паров отдачи. Однако изогнутости поверхности в данных случаях не наблюдается. Это свидетельствует о том, что пары отдачи формируются только в начальный момент нагрева поверхностного слоя, когда расплавления материала основы образцов еще не происходит. В противоположном случае наблюдался бы прогиб свободной границы расплавленного металла и фиксация таких изгибов при конечной кристаллизации. Такой перегрев поверхности частиц порошка нанесенного материала будет более характерен для излучения с более короткими длинами волн именно в начальной стадии процесса легирования. Напомним, что для волоконного лазера длина волны излучения на порядок меньше длины волны, например, CO_2 -лазера. В этой связи будет снижаться характерная глубина зоны поглощения лазерного излучения как легирующим материалом, так в целом металлической поверхностью, будет возрастать коэффициент такого поглощения. В свою очередь, это будет приводить к ускорению перегрева поверхности порошинок легирующего материала, последующему испарению и образованию характерного факела. В экспериментах не наблюдался также и выплеск расплава в стороны, что также приводило бы к значительному деформированию свободной границы и нарушало сплошность легированного слоя. Это свидетельствует о том, что в процессе лазерного легирования не создава-

лись высокие давления в расплаве, так как не происходило интенсивного термохимического взаимодействия легирующих элементов с элементами материала основы при протекании мощных эндотермических реакций, т. е. не наблюдалось выделения большого количества тепла, последующего перегрева расплава, роста давления паров отдачи и капельного выброса.

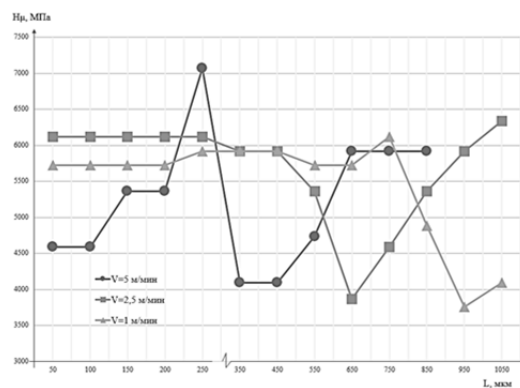
Измерения микротвердости по глубине получаемых слоев показали следующее. На рисунке 2 представлены зависимости микротвердости в поверхностных слоях стали Hardox 600 при различных параметрах лазерной обработки, когда легирующая обмазка не наносилась.

Видно, что в зоне расплава в целом дополнительного упрочнения не происходило, значения микротвердости во всем диапазоне режимов изменялись в пределах 4 200...6 200 МПа, небольшое упрочнение (6 200...7 000 МПа) при этом наблюдалось в зоне закалки из твердой фазы. В зоне отпуска значения микротвердости снижались до 3 750...4 200 МПа. Как отмечалось выше, состав данной стали и режимы термообработки позволяют создавать для нее универсальный комплекс свойств, тогда как дополнительный нагрев приводит в целом к его ухудшению. Как видим, это наблюдается и при лазерной обработке ее поверхности. В частности, при режимах расплавления происходит снижение твердости материала, что, по-видимому, связано с дополнительной фиксацией остаточного аустенита. В то же время в зоне отпуска имеют место стандартные процессы превращения мартенсита с образованием промежуточных структур. Проведение непосредственно самого процесса лазерного легирования удается уже варьировать в той или иной степени свойствами поверхностных слоев.

Из рисунка 3 следует, что процесс поверхностного легирования критичен к режимам лазерного воздействия. Так, например, при мощности 1 кВт (см. рисунок 3, б) возрастание твердости поверхностного слоя фиксируется только при минимальной скорости 1 м/мин, тогда как при более высокой мощности $P = 2$ кВт (см. рисунок 3, а) области легирования с повышенной твердостью наблюдаются устойчиво во всем диапазоне скоростей перемещения лазерного луча. При этом с ростом глубины зоны легирования значения микротвердости снижаются, что, вероятно, может быть связано с концентрационным снижением вводимых легирующих элементов. Значения микротвердости слоя уже могут изменяться в диапазоне 7 300...16 000 МПа. При этом следует обратить внимание на факт более пологого поведения зависимости значений микротвердости по глубине легированного слоя в зоне отпуска при использовании порошка В4С (см. рисунок 3, б) по сравнению с режимом обработки с оплавлением поверхности, но без нанесения легирующего компонента. При этом возрастает и размер этой зоны. Как отмечалось другими исследователями [1; 7], этот факт может быть связан непосредственно с диффузией атомов бора из зоны лазерного легирования в зону термического влияния.



а)



б)

а — $P = 2$ кВт; б — $P = 1$ кВт

Рисунок 2. — Зависимости микротвердости по глубине слоев при лазерной поверхностной обработке стали Hardox 600

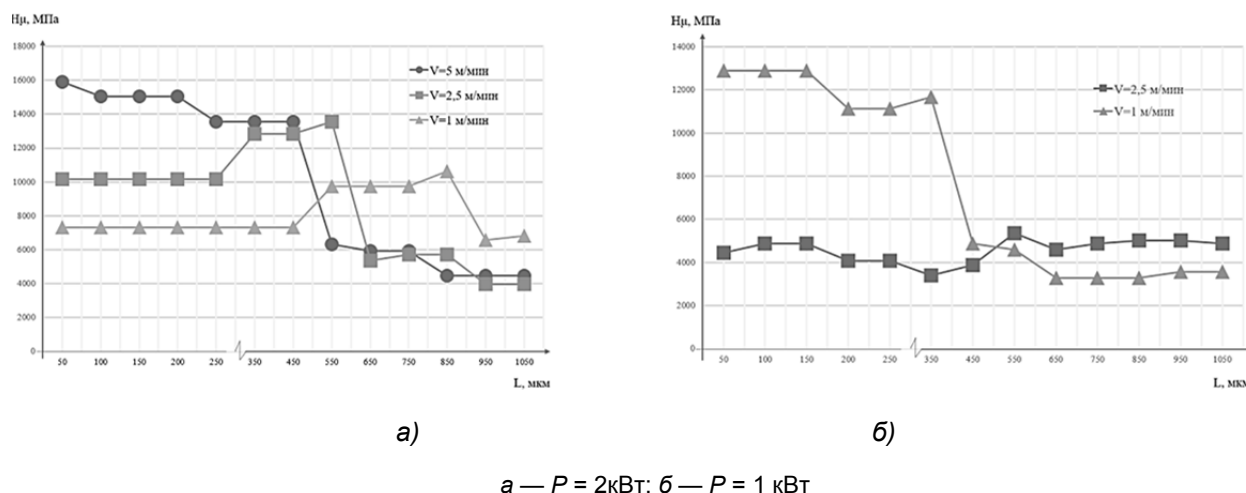


Рисунок 3. — Зависимости микротвердости по глубине легированных слоев при лазерной поверхностной обработке стали Hardox 600 с использованием порошка B_4C

Довольно своеобразная картина наблюдается при использовании в качестве легирующего материала порошков WC и Ni ($\sim 17\% \text{ Cr}$) (рисунок 4). Как и при легировании стали 5XНМ с использованием CO_2 -лазера [1], значительного упрочнения при применении порошка WC нами не наблюдалось, хотя не наблюдалось и порообразования. В случае с Ni ($\sim 17\% \text{ Cr}$) наблюдалось, наоборот, разупрочнение легированного слоя, тогда как на стали 5XНМ при легировании этими компонентами значения микротвердости в легированном слое повышались до 7 400...10 000 МПа, а теплостойкость легированного слоя по уровню 60 HRC достигала температуры 550 °С. При этом из рисунка 1 видно, что свободная поверхность закристаллизовавшегося металла для всех параметров обработки является выпуклой. Как и при легировании с использованием порошка B_4C , влияния давления паров отдачи в этом случае, по-видимому, тоже не проявлялось, а проявилось влияние сил поверхностного натяжения. В этом случае именно действие значительных сил поверхностного натяжения приводит к стягиванию расплава от периферии к центру лазерной дорожки с формированием при последующей кристаллизации выпуклости. При этом можно наблюдать, как со снижением плотности мощности лазерного излучения процесс легирования постепенно переходит в процесс лазерной наплавки.

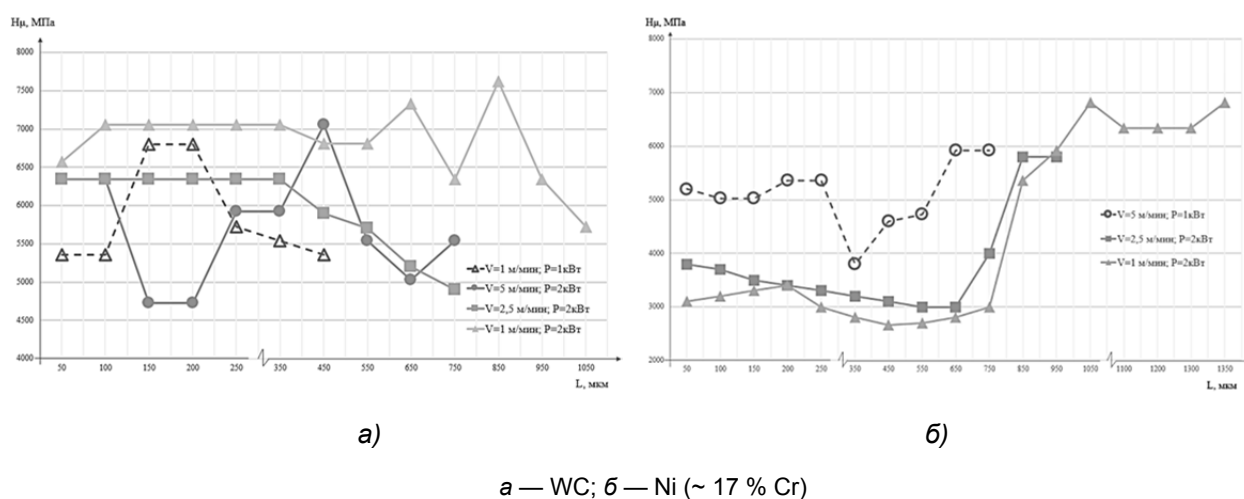
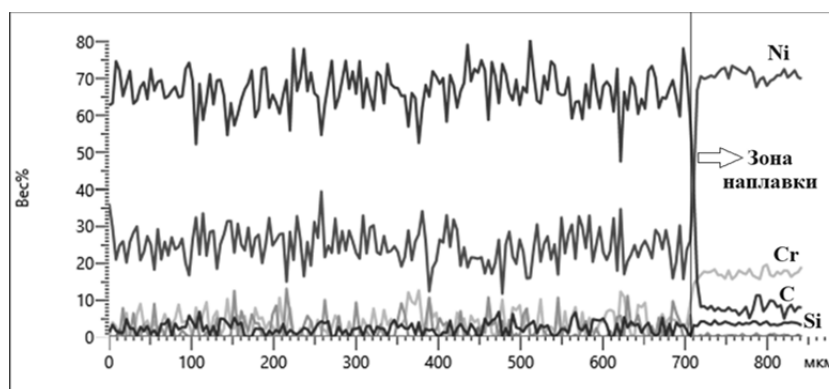


Рисунок 4. — Зависимости микротвердости по глубине легированных слоев при лазерной поверхностной обработке стали Hardox 600 с использованием порошков

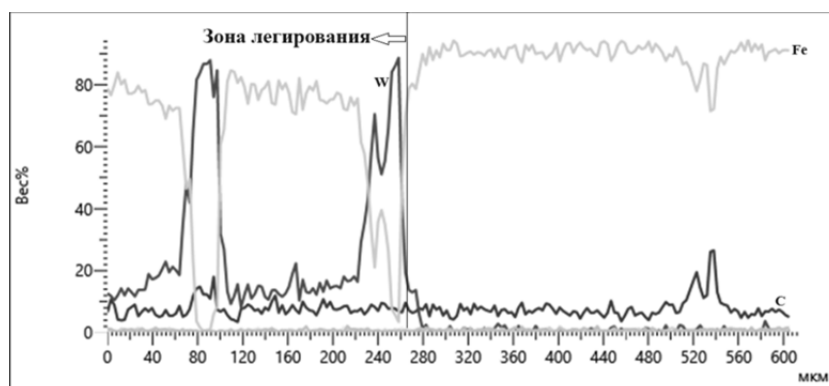
На рисунке 5 приведены результаты исследования распределения элементов по глубине для случая использования порошка Ni (~ 17 % Cr) (рисунок 5, а) и WC (см. рисунок 5, б).

Видно, что при наплавке элементный состав слоя практически повторяет состав исходного порошка: C ~ 5,8, Si ~ 3,9, Cr ~ 15,0, Ni ~ 70,7. При использовании WC в слое могут наблюдаться включения исходного материала. При этом на глубине ~ 80 мкм наряду с пиком по вольфраму наблюдается некоторый рост и по углероду, т. е. в этом месте, вероятнее всего, располагается карбид вольфрама, тогда как на глубине ~ 250 мкм располагается, видимо, свободный вольфрам. Это может быть связано или с присутствием его в исходном порошке, или с диссоциацией молекулы исходного карбида вольфрама при лазерном нагреве.

Также отмечено, что создаваемые слои с повышением концентрации Ni (~ 17 % Cr) в ванне расплава начинают постепенно проявлять все более высокую коррозионную стойкость (см. рисунок 1). Такая картина, когда использовался порошок Ni (~ 17 % Cr) в качестве легирующего компонента для стали Hardox 600, может быть связана со следующими факторами. Данная сталь близка по химическому составу и со значениями по концентрации со сталью 5ХНМ, но сталь Hardox 600 является борсодержащей сталью, хотя концентрация бора в ней весьма незначительна ($\leq 0,005$ %). Однако именно введение бора в таких незначительных концентрациях приводит к существенному влиянию на поведение расплава при кристаллизации, что в конечном итоге ведет к измельчению зеренной структуры. Весьма вероятно, что этот фактор может оказаться важным по своему влиянию на коэффициенты смачиваемости расплавов, суммарную величину сил поверхностного натяжения и степень их перемешивания.



а)



б)

а — Ni (~ 17 % Cr), $P = 1$ кВт, $v = 5$ м / мин; б — WC, $P = 1$ кВт, $v = 1$ м / мин

Рисунок 5. — Распределение элементов по глубине слоя при лазерной наплавке (а) и легировании поверхности (б) стали Hardox 600 с использованием порошков

Как известно, при лазерном поверхностном легировании происходят одновременно взаимосвязанные как микрометаллургические процессы, так и процессы тепло- и массопереноса [7]. Из-за неравномерного нагрева по пятну фокусировки лазерного луча организуется своеобразное вихревое движение расплава. При движении лазерного луча расплавленный металл вследствие интегрального действия давления образующегося пара, вихревых течений расплава, разницы сил поверхностного натяжения в хвостовой и центральной частях расплавленной ванны оттесняется в хвостовую ее часть [7]. За время существования расплава благодаря термокапиллярной конвекции Марангони осуществляется полное или частичное перемешивание расплавленных легирующих материалов с металлической основой. Это в конечном итоге ведет к насыщению поверхности стали легирующими элементами, образованию соответствующих химических соединений, полной или частичной гомогенизации жидкого металла в области лазерного легирования. Таким образом, при последующей кристаллизации расплава формируется легированный слой.

Заключение. Исследовано влияние ряда энергетических и технологических факторов на особенности осуществления процесса поверхностного легирования износостойкой стали Hardox 600 на основе воздействия излучением волоконного иттербиевого лазера. В качестве легирующих компонентов использовались порошки карбидов W_4C , WC и Ni (~17 % Cr). Режимы лазерной обработки выбирались в зависимости от мощности лазерного излучения, линейных скоростей сканирования луча и диаметра лазерного пятна. Изучены геометрические размеры, качество и структура легированных слоев, получаемых в результате лазерного воздействия.

Список цитированных источников

1. Лазерное легирование сталей с использованием порошковых материалов / С. А. Астапчик [и др.] // *Весті АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук.* — 1989. — № 4. — С. 7—13.
2. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. — Минск : Белорус. наука, 2008. — 252 с.
3. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
4. Девойно, О. Г. Технология формирования износостойких поверхностей лазерным легированием / О. Г. Девойно. — Минск : Технопринт, 2001. — 180 с.
5. Астапчик, С. А. Лазерные технологии: возможности и перспективы обработки деталей и инструмента / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков // *Тяжелое машиностроение.* — 2004. — № 2. — С. 33—37.
6. Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя / В. С. Голубев [и др.] // *Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки».* — 2019. — № 7. — С. 34—42.
7. Бернацкий, А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) / А. В. Бернацкий // *Автомат. сварка.* — 2013. — № 12. — С. 3—10.
8. Кизина, Я. Н. Моделирование кинетики процесса лазерного поверхностного легирования через жидкую фазу [Электронный ресурс] / Я. Н. Кизина // Молодёжь и наука : сб. материалов VI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. — Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/section1.html>. — Дата доступа: 30.09.2023.
9. Европейская металлургическая компания [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://emk24.ru/wiki/spetsialnye_stali/iznosostoykie_stali_hardox_4368174/. — Дата доступа: 30.09.2023.

Поступила в редакцию 04.10.2023.

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 $t_{\text{и}}$, 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.



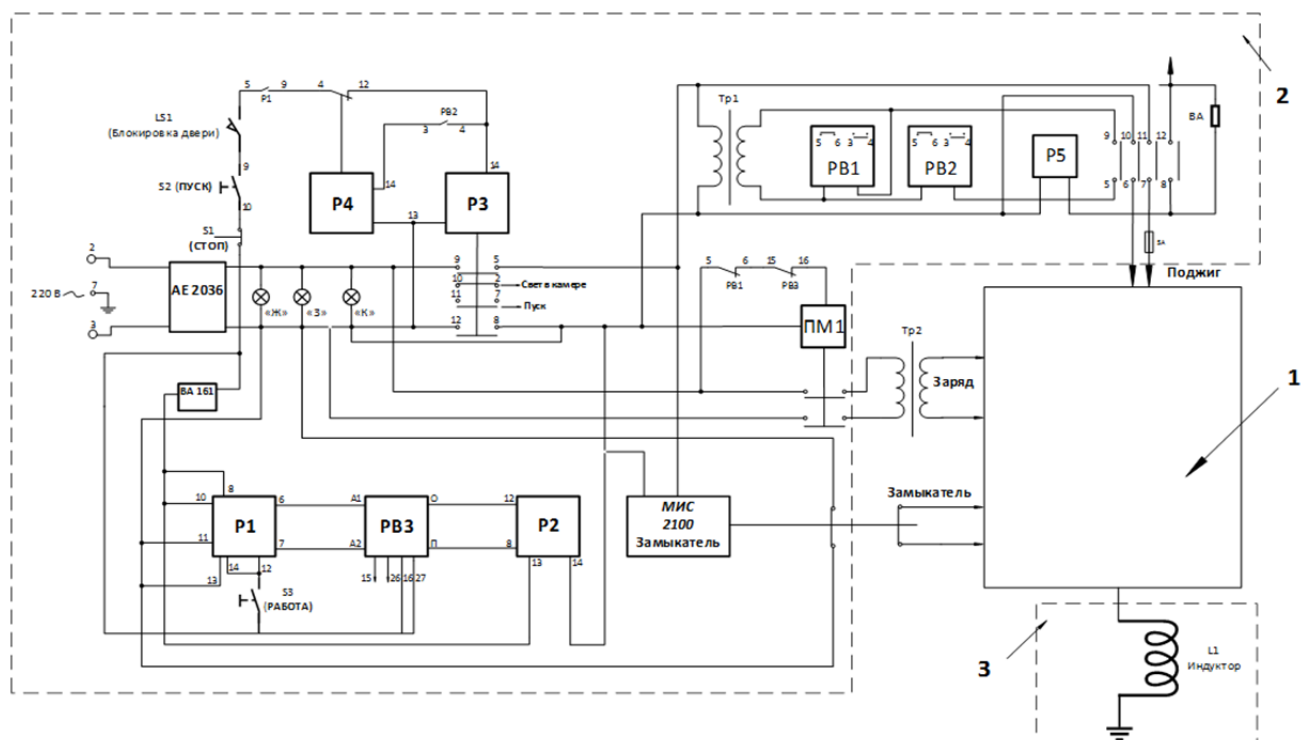
Рисунок 1. — Классификация магнитно-импульсного оборудования для упрочнения стальных изделий

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.

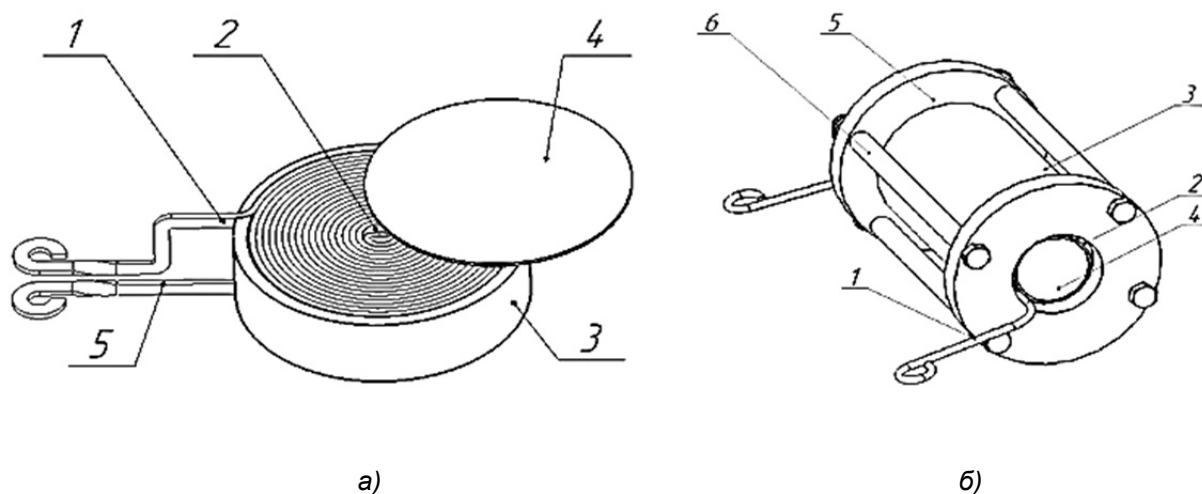


Рисунок 3. — Общий вид индукторных систем: а — плоский индуктор; б — цилиндрический индуктор

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.



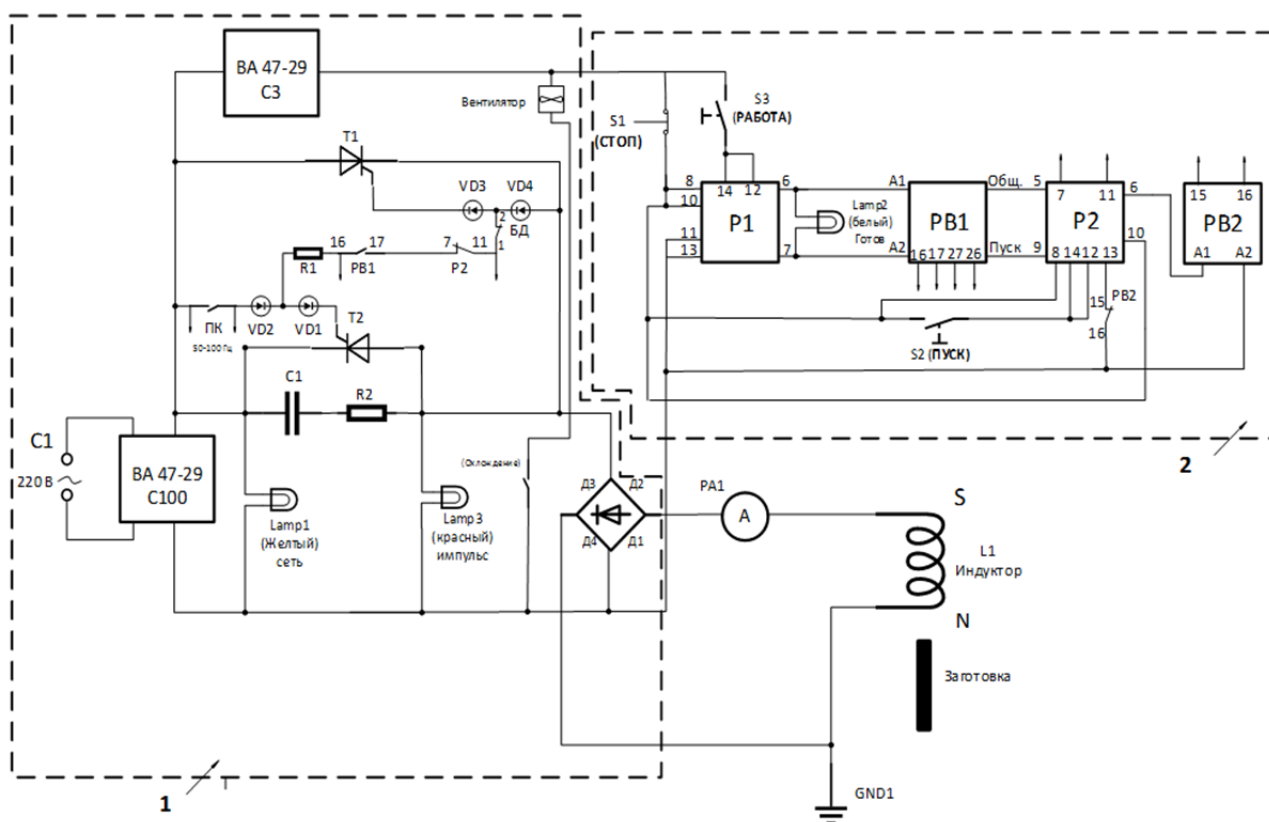
Рисунок 4. — Общий вид экспериментальной установки МИУ 20-21

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.

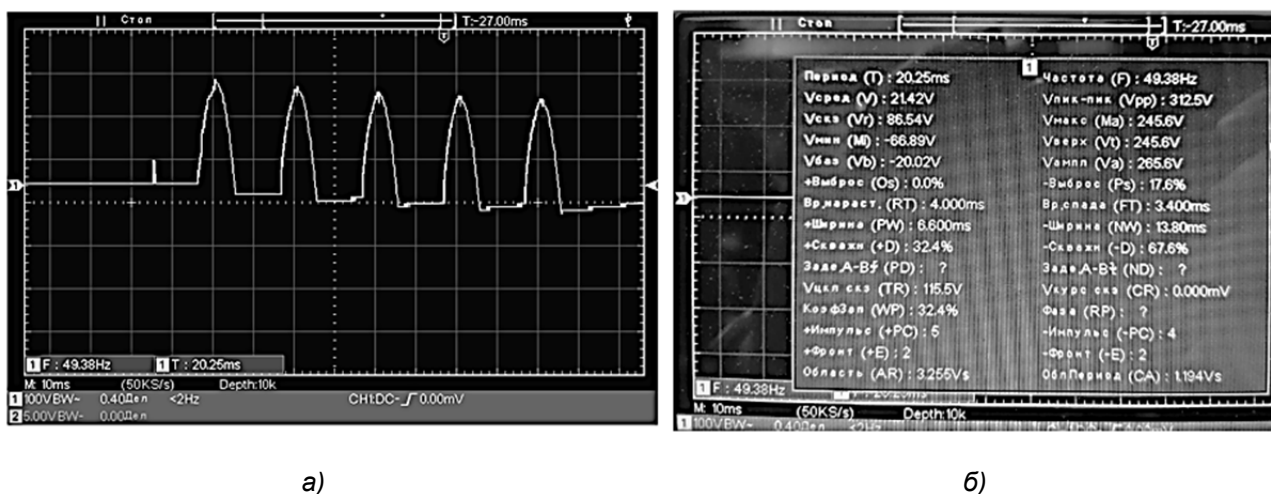


Рисунок 6. — Осциллограмма (а) и характеристики (б) импульсов с длительностью 0,1 с при частоте в 50 Гц

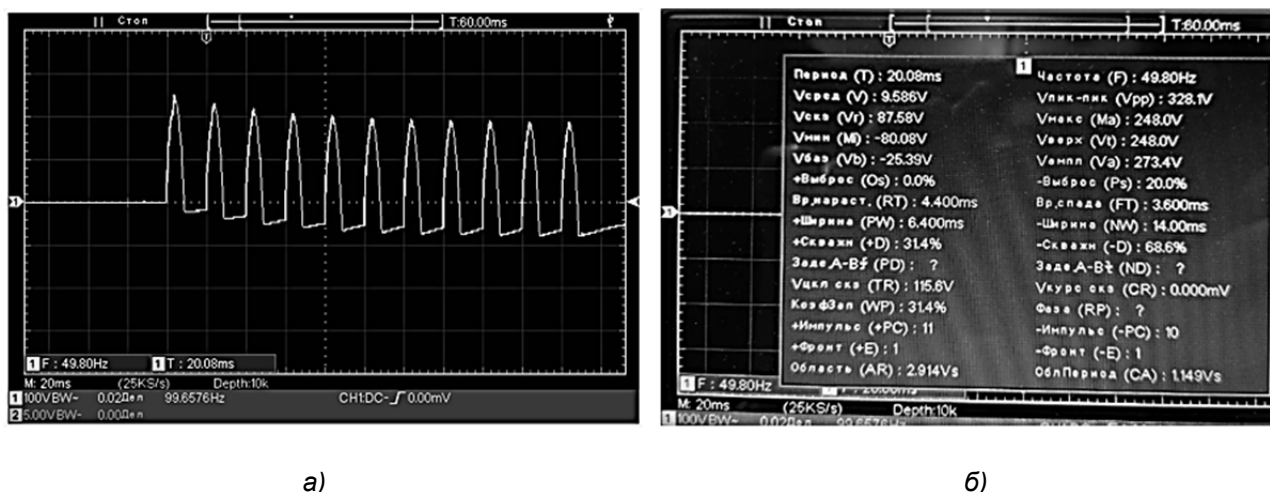


Рисунок 7. — Осциллограмма (а) и характеристики (б) импульсов с длительностью 0,2 с при частоте в 50 Гц

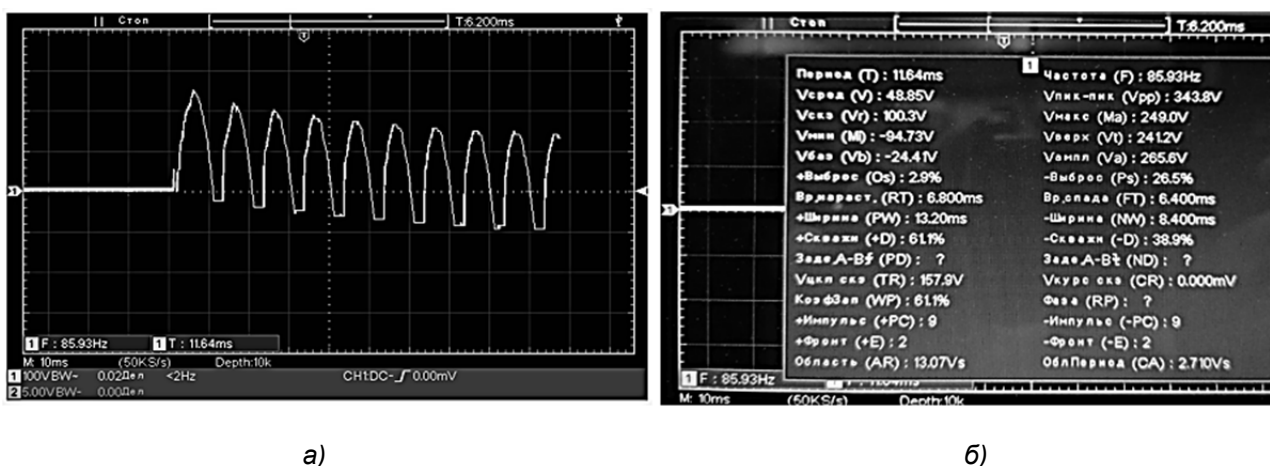


Рисунок 8. — Осциллограмма (а) и характеристики (б) импульсов с длительностью 0,1 с при частоте в 100 Гц

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 № T21-099.

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. Милюкова // 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. Милюкова // 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. Милюкова [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. Милукова, 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.

УДК 621.98.044.7

А. М. Милюкова, кандидат технических наук,**А. Н. Матяс, А. А. Лях, О. А. Толкачева**

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, annart@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Проведены исследования физико-механических свойств магниевых сплавов (температура, твердость, шероховатость, остаточные макронапряжения) до и после магнитно-импульсной обработки при различных режимах. Показано, что магнитно-импульсное воздействие при определенных параметрах режимов позволяет улучшить физические и механические свойства исследуемых сплавов.

Ключевые слова: магнитные сплавы; магнитно-импульсная обработка; энергия; импульс; упрочнение; физические и механические свойства.

Рис. 7. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.

A. M. Miliukova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**A. N. Matsias, A. A. Lyakh, O. A. Tolkachova**

State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 220084
Minsk, the Republic of Belarus, 10 Academician Kuprevicha Str., +375 (17) 367 60 10, 375 (17) 361 55 52,
priemnaya@phti.by, annart@mail.ru

STUDY OF THE MAGNESIUM ALLOYS PROPERTIES AFTER MAGNETIC PULSE PROCESSING

Physical and mechanical properties of magnesium alloys have been studied (temperature, hardness, roughness, residual stresses) before and after magnetic-pulse processing under various conditions. It is shown that the magnetic-pulse effect under certain optimal conditions can improve the physical and mechanical properties of the studied alloys.

Key words: magnesium alloys, magnetic-pulse processing; energy; impulse; hardening; physical and mechanical properties.

Fig. 7. Table 3. Ref.: 6 titles.

Введение. Целью работы является исследование воздействия сильного импульсного магнитного поля и определение его параметров, обеспечивающих улучшение физических и механических свойств образцов из магниевых сплавов AZ80 (Китай), МА 2-1 (Россия), изготовленных по различным технологиям.

Механические свойства металлических сплавов определяются химическим составом материала, твердостью, микротвердостью, структурными и фазовыми превращениями, величиной, знаком и глубиной остаточных макронапряжений, деформацией кристаллической решетки и др.

Учеными ФТИ НАН Беларуси (Минск) и БарГУ (Барановичи) успешно развивается инновационное научное направление — магнитно-импульсная упрочняющая обработка (далее — МИО) поверхностей изделий из стали и сплавов. При воздействии МИО на металлические сплавы устраняются дефекты в их кристаллической решетке, выравниваются внутренние макронапряжения, что снижает трещинообразование, измельчается и становится более однородной структура металла в поверхностном слое, что в итоге обеспечивает повышение прочности изделий и увеличивает срок их эксплуатации [1].

Экспериментальный и научный опыт применения сильного импульсного электромагнитного поля показал эффективное и подтвержденное повышение периода работоспособности различных изделий (инструментов), применяемых в дерево- и металлообрабатывающей, машиностроительной, авиаремонтной и пищевой отраслях промышленности как на предприятиях Республики Беларусь, так и за рубежом [2; 3].

Свойства поверхности металлических изделий улучшаются под воздействием электромагнитных импульсов вследствие поверхностных микродеформаций, уплотнения структуры вблизи поверхности, а также фазовых превращений «аустенит—мартенсит» в сталях, миграции примесей вблизи границ зерен, возникновения мелкодисперсной структуры на поверхности, связанного с образованием новых границ между зернами и дроблением пластинок цементита [3; 4]. Эти процессы появляются в связи с неоднородностью металлического сплава и локальным выделением теплоты вблизи границ зерен, а также в местах различных дефектов при протекании вихревых индукционных токов, возникающих в образце в электромагнитном поле [3].

Известно, что металлы с гексагональной решеткой обладают повышенным уровнем анизотропии свойств, а также низкой пластичностью при комнатной температуре. Авторы [5] указывают, что один из способов улучшить пластичность сплава магния в холодном состоянии — модифицировать его гексагональную кристаллическую решетку, уменьшив осевое отношение граней c/a либо полностью превратив его в структуру с кубической решеткой (например, ОЦК).

В настоящее время магниевые сплавы широко применяют в машиностроении, авиастроении, ракетной технике, так как при малой объемной массе они имеют высокую удельную прочность, что позволяет снизить массу двигателей, агрегатов, корпусов и других узлов техники. Ценным свойством магниевых сплавов является то, что они хорошо поглощают механические вибрации. В зависимости от химического состава их разделяют на три основные группы [6]:

I — сплавы на основе системы Mg—Al—Zn (улучшенные прочность, пластичность, литейные свойства при комнатной температуре);

II — Mg—Zn—Zr (одни из наиболее сильно деформируемых сплавов);

III — Mg—РЗМ—Zr (дорогостоящие высокопрочные сплавы, включающие редкоземельные металлы (РЗМ)).

Высокопрочные магниевые сплавы содержат дорогостоящие редкоземельные металлы, что делает стоимость таких сплавов достаточно высокой. Для снижения их стоимости актуальным является поиск новых решений, в том числе технологических, включающих оптимизацию микроструктуры и, следовательно, физических свойств (прочность, вязкость и др.).

В данной работе предложено применить МИО на двух магниевых сплавах I группы AZ80, МА 2-1 и исследовать изменение физических свойств поверхности под воздействием различных параметров режимов магнитно-импульсных установок, отличающихся длительностью импульса обработки.

Материалы и методы исследования. К исследованию различных свойств поверхности предложено два магниевых сплава, различающихся химическим составом в процентном содержании элементов и технологией получения. Три группы образцов сплава AZ80 диаметром 20 мм и длиной 40 мм получены в Китайской Народной Республике интенсивной пластической деформацией (экструзией под углом) при температурах 300, 350 и 400 °С. Из них изготовлены образцы в виде таблеток толщиной 5 мм и диаметром 20 мм, которые маркированы тройной нумерацией (1.1.1, 2.1.1, 3.1.1 и т. д.) для проведения исследований. Образцы сплава МА 2-1 отрезаны от прутка диаметром 30 мм, полученного горячей прокаткой.

Химический состав исследуемых магниевых сплавов представлен в таблице 1.

Таблица 1. — Химический состав исследуемых магниевых сплавов

Марка	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Gd	Y
AZ80	91,85	8,16	0,42	0,03	0,01	0,005	0,001	0,001	0,01	0,01
MA 2-1	94,00	3,80...5,00	0,80...1,50	0,30...0,70	0,01	0,005	0,001	0,001	0,01	0,01

Образцы магниевых сплавов подвергнуты воздействию импульсного магнитного поля (далее — ИМП) при помощи высокоскоростного магнитно-импульсного оборудования (МИУ-3 — цилиндрический и плоский индукторы, МИП-18 — плоский индуктор) и экспериментальной магнитно-импульсной установки (далее — МИУ) с увеличенной длительностью импульса МИУ 20-21 (цилиндрический индуктор), характеристики которых представлены в таблице 2.

Таблица 2. — Основные технические характеристики МИУ

Характеристики	МИП-18	МИУ-3	МИУ 20-21
Максимальная запасаемая энергия воздействия, кДж	15,0	8,0	—
Максимальное рабочее напряжение, В	13 000	6 000	220
Емкость накопителя, мкФ	180	450	—
Мощность, потребляемая установкой от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц, не более, ВА	3 000	3 000	> 20 000
Напряжение импульса, до, В	12 000	6 000	300
Ток импульса, до, А	50 000	50 000	800
Частота импульса, до, Гц	10 000	10 000	100
Напряженность магнитного поля в индукторе, кА / м	< 17 000	< 17 000	900

Выбранное магнитно-импульсное оборудование при обработке образцов из магниевых сплавов обеспечивает необходимые значения основных переменных параметров процесса МИО: энергия импульса — 8 кДж, частота импульса — 6...8 кГц для МИУ-3 (МИП-18); энергия импульса — 1 кДж при частоте 5...100 Гц для МИУ 20-21, длительность обработки на различном оборудовании отличается и составляет 50...500 мкс на МИУ-3 (МИП-18); 0,1...5,0 с — на МИУ 20-21.

Образцы магниевых сплавов для осуществления МИО располагали в ИМП, создаваемом в индукторах (плоском или цилиндрическом), таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны исследуемой стороне образца и пронизывали ее. Геометрия ИМП не изменялась во всех экспериментах.

Влияние параметров режимов МИО на механические и физические свойства поверхности образцов магниевых сплавов (температуру, твердость НВ, шероховатость Ra , суммарные макронапряжения 2-го рода, индукцию) исследовали по стандартным методикам на имеющемся исследовательском оборудовании. Твердость поверхности НВ измеряли на твердомере ТШ-2М (с погрешностью измерений 3 %). Внутренние остаточные макронапряжения 2-го рода и структурно-фазовый состав определяли методом рентгеновского структурного анализа с помощью дифрактометра GNR Explorer (Италия) при $\text{CuK}\alpha$ -излучении, шаге съемки $0,20^\circ$, времени интеграции 3 с. Шероховатость поверхности Ra измеряли с помощью профилографа цехового с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем модели 296. Магнитную индукцию ИМП в индукторе, а также на поверхности образцов измеряли миллитесламетром марки ТП2-2У. Измерения температуры поверхности образцов после обработки измеряли мультиметром ALEX 9808+ с термопарой ТХА (ГОСТ 1790) с погрешностью измерения ± 1 %.

Результаты исследования и их обсуждение. Магнитно-импульсную упрочняющую обработку подготовленных образцов двух марок магниевых сплавов AZ80 и МА 2-1 проводили при семи различных технологических режимах (таблица 3). Образцы сплава AZ80, полученные при различных температурах экструзии, разбиты на три группы — № 1, 2, 3, которые были обработаны на трех МИУ в цилиндрическом и на плоском индукторах при режимах № 1—5 (см. таблицу 3).

Четвертую группу образцов из сплава МА 2-1 (МА1, МА2) подвергли МИО на МИУ-3 и МИП-18 при различных режимах 6 и 7 (см. таблицу 3).

Два экспериментальных технологических режима 4, 5 на МИУ 20-21 отличаются напряженностью магнитного поля и длительностью импульса. Плоские образцы в виде таблетки, маркированные номерами 1.6.1 (300 °С), 2.6.1 (350 °С), 3.6.1 (400 °С), обрабатывали при режиме 4: в цилиндрическом индукторе Ø70 мм при частоте 50 Гц с напряженностью магнитного поля $0,45 \cdot 10^6$ А / м и током импульса, равным 300 А. Обработку проводили импульсами с длительностью 1,6 с в 3 цикла с выдержкой между циклами 10 мин.

Образцы с номерами 1.6.2 (300 °С), 2.6.2 (350 °С), 3.6.2 (400 °С) обрабатывали при режиме 5: в цилиндрическом индукторе Ø70 мм при частоте 100 Гц с напряженностью магнитного поля $0,53 \cdot 10^6$ А / м и током импульса, равным 390 А, с длительностью импульса 1 с в 3 цикла с выдержкой между циклами 10 мин.

Измерение магнитной индукции на поверхности всех образцов показало, что до и после МИО по выбранным режимам она равнялась нулю, поскольку парамагнитные материалы практически не намагничиваются под воздействием внешнего магнитного поля.

Проведенный рентгеноструктурный анализ исследуемых образцов показал, что сплавы в основном состоят из магния с гексагональной кристаллической решеткой; до и после МИО на всех МИУ их фазовый состав (рисунок 1) и форма решетки не изменились.

Результаты исследований суммарных остаточных макронапряжений 2-го рода образцов сплава AZ80, обработанных на всех МИУ, представлены на рисунке 2.

Величина суммарного остаточного макронапряжения 2-го рода на поверхности образцов сплава AZ80 несколько снизилась при МИО на режимах 1, 3, приведших к нагреву до 40 °С. При МИО образцов на режиме 2, повысившем температуру свыше 50 °С, макронапряжения увеличились. После МИО установлено значительное снижение до нуля и изменение знака суммарных макронапряжений на поверхности нескольких образцов с растягивающего на сжимающее, что способствует увеличению прочности деформированного магниевого сплава AZ80, за счет залечивания микротрещин снижается трещинообразование.

Таблица 3. — Технологические режимы МИО образцов магниевого сплава

Режим	Маркировка образца из сплава				Наименование магнитно-импульсного оборудования	Технологические характеристики		
	№ 1 (300 °С)	№ 2 (350 °С)	№ 3 (400 °С)	№ 4 (прокат)		Энергия импульса, кДж	Количество импульсов	Частота, Гц
1	1.1.1	2.1.1	3.1.1		МИУ-3, ЦИ 20	8	2	6 000
2	1.1.2	2.1.2	3.1.2		МИУ-3, ПИ 140	8	2	6 800
3	1.4.1	2.4.1	3.4.1		МИП-18, ПИ 140	8	2	8 000
4	1.6.1	2.6.1	3.6.1		МИУ 20-21, ЦИ 70	1	3 × 1,6 с	50
5	1.6.2	2.6.2	3.6.2		МИУ 20-21, ЦИ 70	1	3 × 1 с	100
6				МА1	МИУ-3, ПИ 140	6	1	6 800
7				МА2	МИП-18, ПИ 140	8	3	8 000

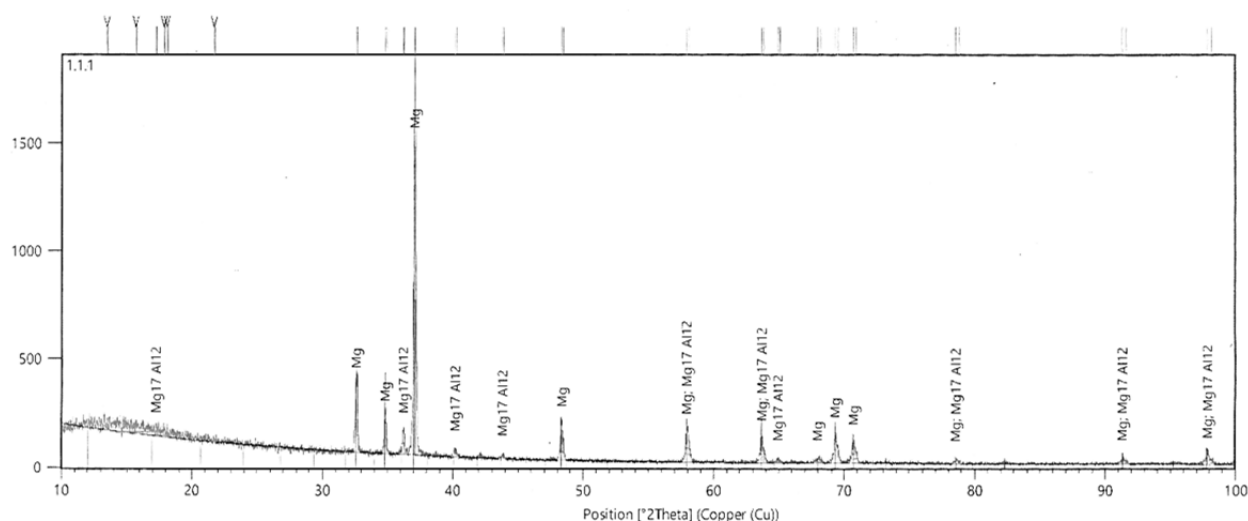


Рисунок 1. — Структурно-фазовый состав образца 1.1.1 магниевого сплава AZ80, полученного экструзией при 300 °С

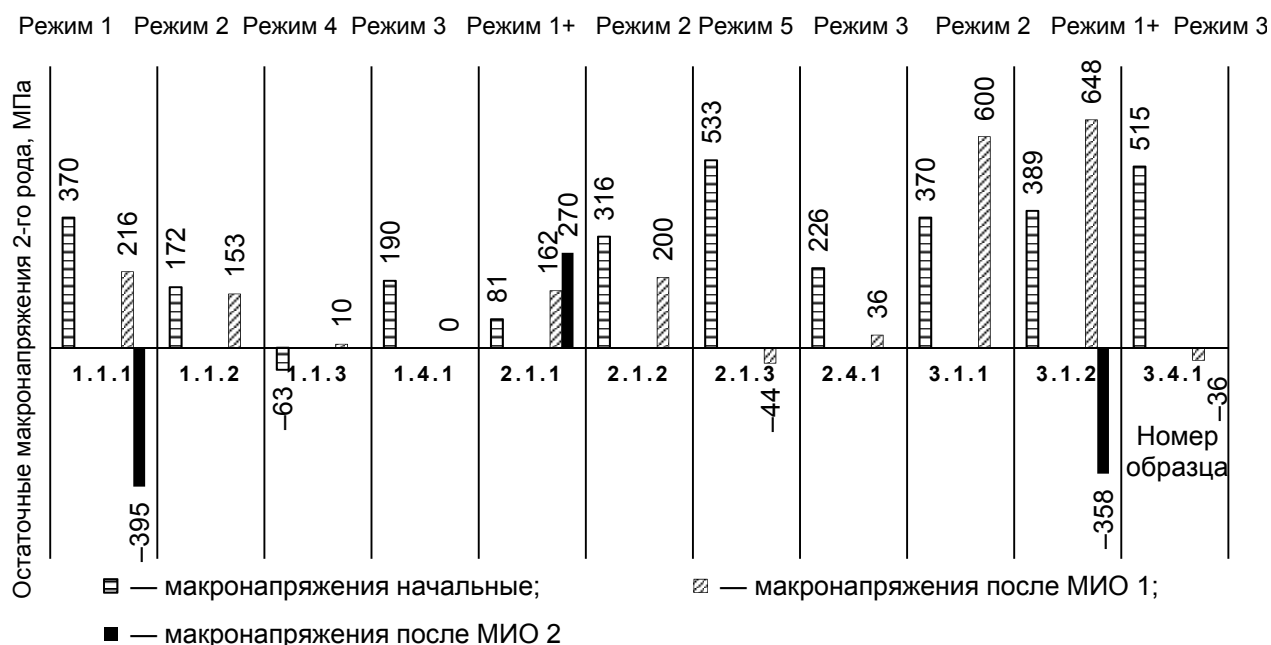


Рисунок 2. — Суммарное остаточное макронапряжение 2-го рода образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО при режимах 1—5

Так, МИО образцов сплава МА 2-1 (МА1) на установке МИУ-3 с плоским индуктором при режиме 6 разогревает поверхность образцов магниевого сплава незначительно (до 26 °С). На поверхности этих образцов обнаружено изменение знака суммарных макронапряжений с растягивающего на сжимающее, что способствует увеличению прочности материала. МИО образца МА2 на установке МИП-18 (режим 7) при высоких токах в индукторной системе при повышении энергии и длительности воздействия сильнее разогревает образец магниевого сплава (до 34 °С), при этом величина растягивающего макронапряжения на поверхности образцов незначительно увеличилась.

Количественно эффект влияния ИМП на определенное свойство характеризовался относительным изменением среднего значения в процентах, которое было измерено и рассчитано до и после МИО.

МИО образцов сплава МА 2-1 на МИУ-3 при режиме 6 способствует повышению среднего значения твердости HB с 62 до 65 (на 4,8 %) и снижению шероховатости Ra на 20 %. МИО на МИП-18 при режиме 7 повышает среднее значение твердости HB с 63 до 65 (на 3 %), а среднюю величину шероховатости Ra снижает на 10 %.

МИО AZ80 на установке МИУ 20-21 при режимах 4, 5 не повышает температуру и индукцию поверхности образцов в отличие от установки МИУ-3 с цилиндрической индукторной системой.

На рисунке 3 показаны результаты измерений средней твердости HB поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО на высокоскоростной установке МИУ-3 на двух типах индукторной системы.

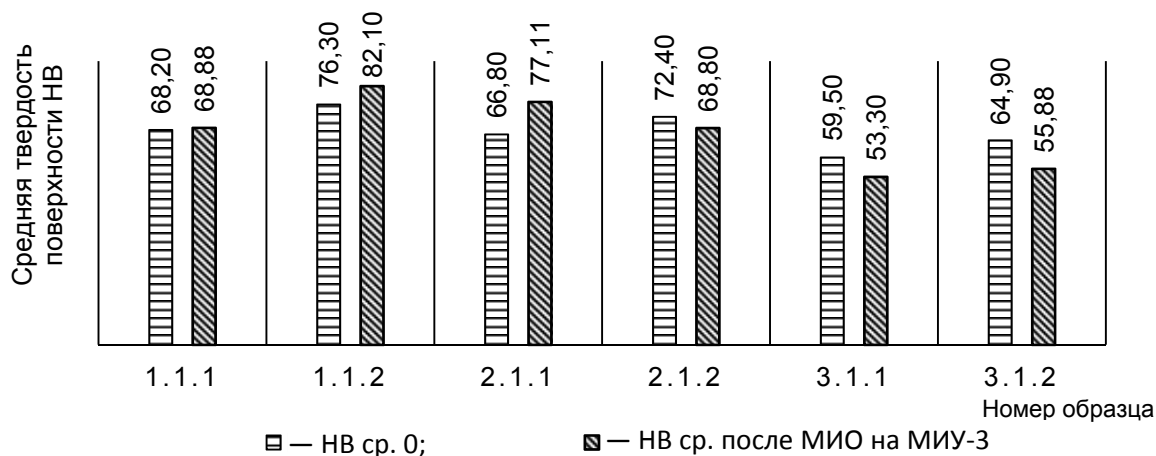


Рисунок 3. — Твердость поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до (1 столбик) и после МИО (2 столбик) на установке МИУ-3 при режимах 1, 2

МИО по режиму 1 на установке МИУ-3 в цилиндрическом индукторе (образцы сплава AZ80 1.1.1, 2.1.1, 3.1.2) с минимальным зазором между спиралью индуктора разогревает поверхность образцов магниевого сплава до 40...60 °С. При этом среднее значение твердости HB образца 1.1.1 (получен экструзией при 300 °С) не изменилось, образца 2.1.1 (получен экструзией при 350 °С) — повысилось до 15,4 %, а образца 3.1.2 (получен экструзией при 400 °С) — понизилось на 14,0 %. Такой результат свидетельствует о различных свойствах сплава, полученного при различных температурах. Для образцов, полученных при 350 °С, режим 1 подходит для повышения твердости поверхности.

На рисунке 4 показаны результаты измерений средней твердости HB поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО на высокоскоростной установке МИП-18 при режиме 3.

МИО при режиме 3 на установке МИП-18 при использовании плоского индуктора температуру образца магниевого сплава AZ80 повышает на 2-3° (до 26 °С), увеличивает среднее значение твердости HB на образце 1.4.1 на 8,6 % и снижает шероховатость Ra на 12,5 % (рисунок 5). На образце 2.4.1 (получен при 350 °С) твердость HB повысилась на 10,3 %, шероховатость Ra снизилась на 6,4 %. Данный режим 3 рекомендуется использовать не только для снижения шероховатости поверхности, но и для повышения среднего значения твердости магниевого сплава, полученного при 300...350 °С, поскольку на образце 3.4.1, который получен при 400 °С, шероховатость Ra снизилась на 7,2 %, твердость HB снизилась на 16,3 %.

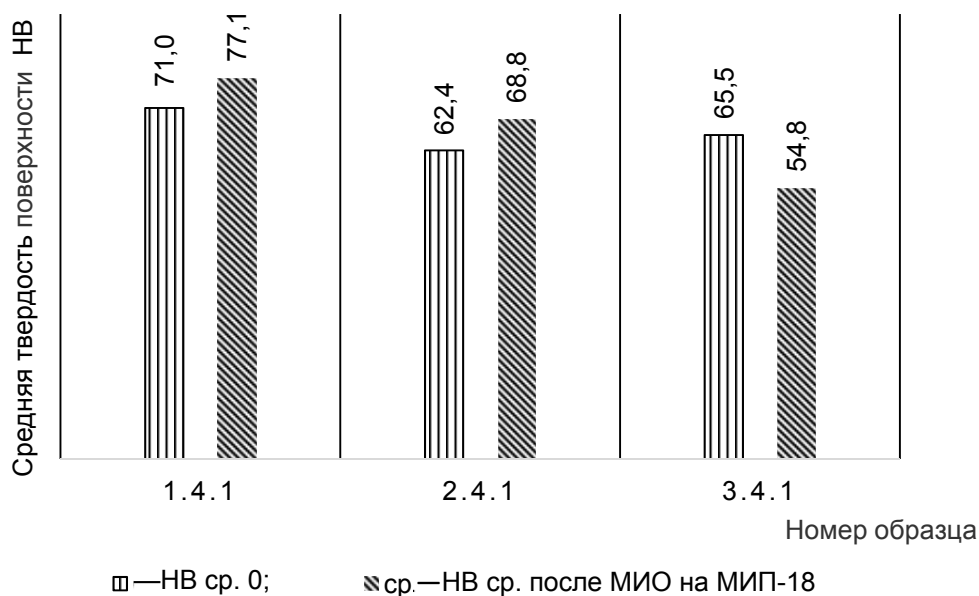


Рисунок 4. — Твердость поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО на установке МИП-18 (режим 3)

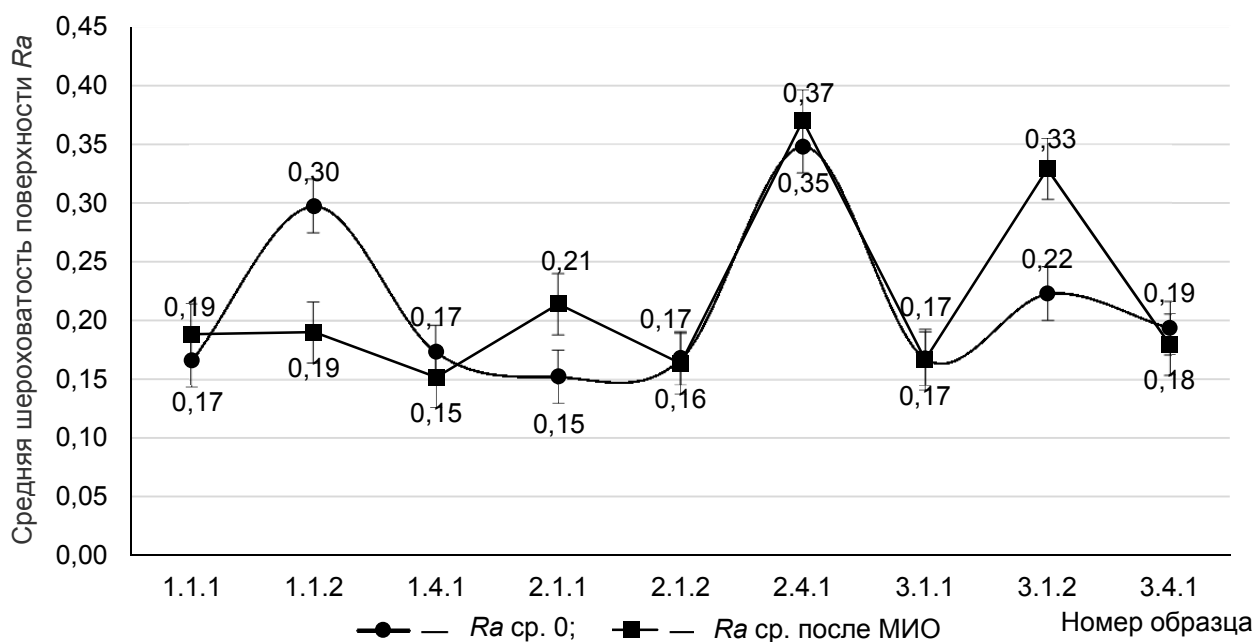


Рисунок 5. — Средняя шероховатость R_a поверхности образцов магниевого сплава до и после МИО на высокочастотном оборудовании (режимы 1, 2, 3)

На рисунке 6 показаны результаты измерений средней твердости НВ поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО при режимах 4, 5 на установке МИУ 20-21.

Исследования образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО на режимах 4, 5 показали увеличение среднего значения твердости поверхности НВ до 3,3 % (в пределах погрешности измерений) на образце 1.6.1, полученном экструзией при температуре 300 °С, а также снижение до 5,5 % на образце 3.6.2, полученном экструзией при температуре 400 °С, т. е. влияние этих режимов на твердость поверхности незначительное.

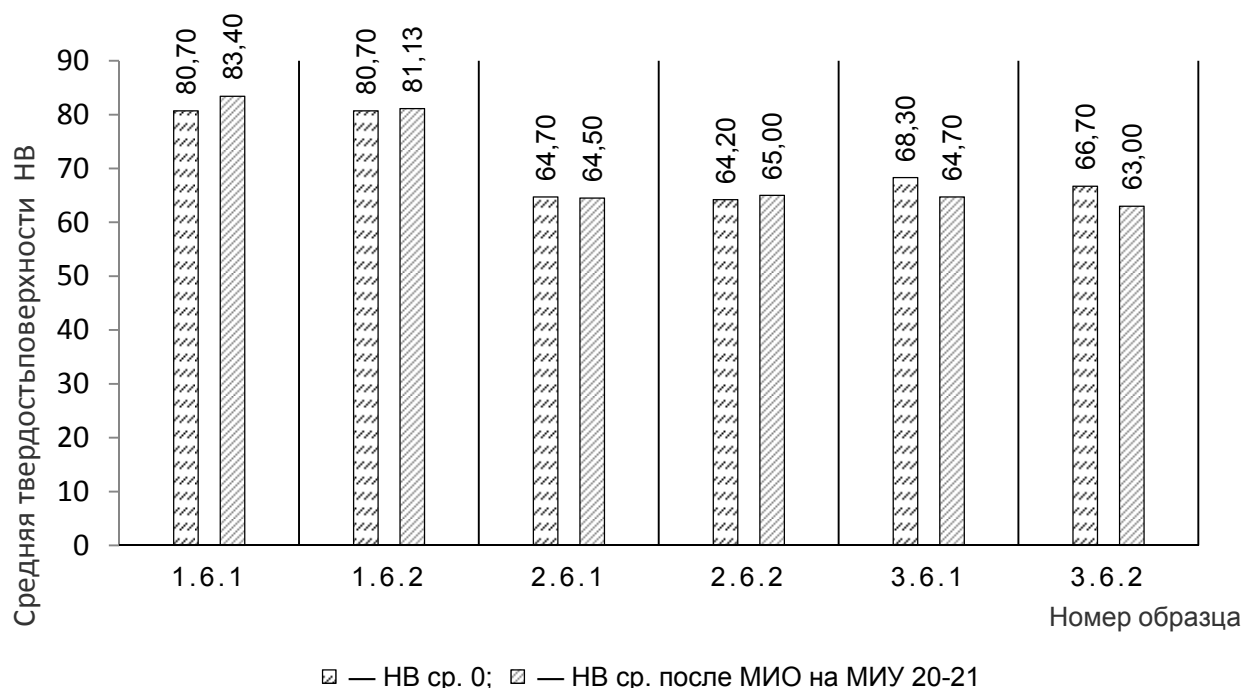


Рисунок 6. — Твердость поверхности образцов магниевого сплава AZ80 до и после МИО на установке МИУ 20-21 (режимы 4, 5)

Из анализа представленных результатов экспериментов МИО и исследований свойств поверхности образцов магниевых сплавов в поперечном сечении, изготовленных по различным технологиям деформации (прокатка, экструзия), очевиден вывод, что повышение температуры материала свыше 50 °С под воздействием МИО имеет разупрочняющее влияние на свойства поверхности образцов магниевого сплава. Дальнейшие исследования позволят это проверить.

Для исследования влияния увеличенной длительности МИО на магниевые сплавы применили новую экспериментальную МИУ 20-21, созданную в лаборатории магнитно-импульсных технологий ФТИ НАН Беларуси. Она обеспечивает ток через индуктор до 700 А, который представляет собой «пачки» импульсов частотой 50 или 100 Гц и длительностью от 0,1 до 5,0 с, что позволяет получить в индукторе пачки импульсов от 10 до 1 000 и более.

На рисунке 7 представлены результаты исследований суммарных остаточных макро-напряжений образцов магниевого сплава AZ80, обработанных сначала на МИУ-3 (МИО 1) и получивших значительное повышение макро-напряжений, затем на МИУ 20-21 (МИО 2), которая сняла эти макро-напряжения.

После МИО 2 произошло изменение знака суммарных макро-напряжений 2-го рода на поверхности двух образцов сплава AZ80 1.1.1 (получен экструзией при 300 °С) и 3.1.2 (получен экструзией при 400 °С) с растягивающего на сжимающее.

Таким образом, анализ результатов исследований свойств поверхности образцов магниевых сплавов AZ80 и МА 2-1 позволил установить, что МИО на установке МИУ 20-21 по выбранным режимам способна на изменение знака суммарных макро-напряжений 2-го рода с растягивающего на сжимающее, что способствует увеличению прочности деформированного магниевого сплава за счет снижения вероятности процессов разрушения.

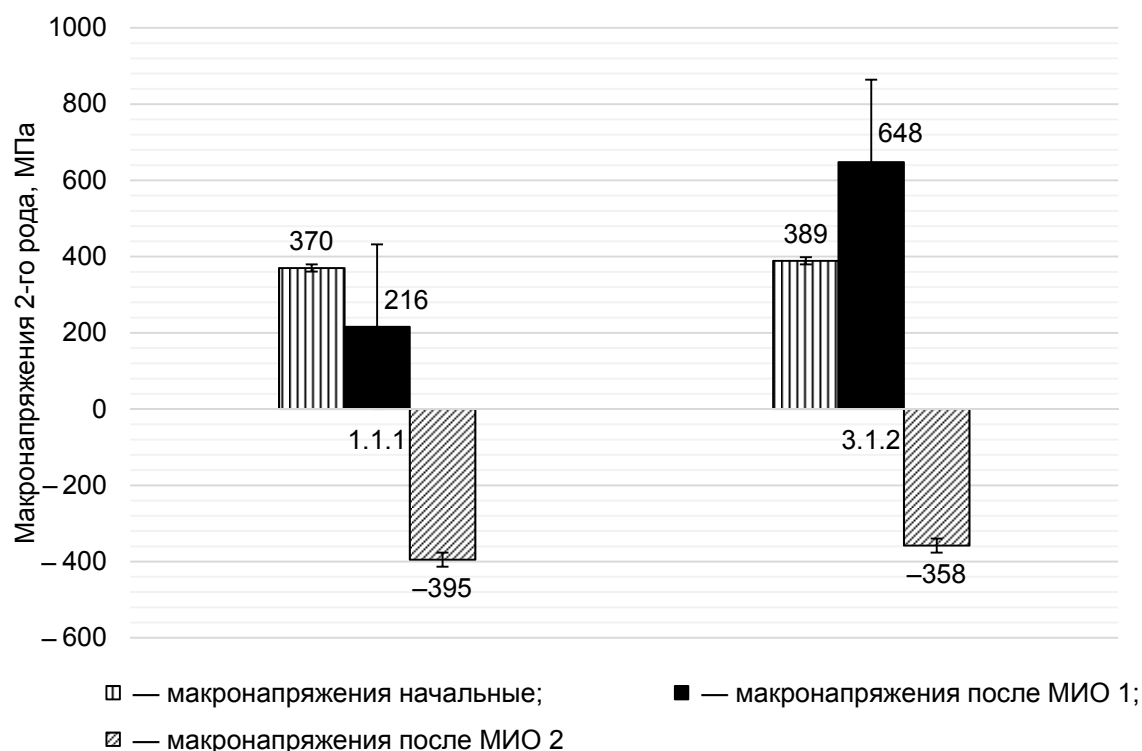


Рисунок 7. — Суммарное остаточное макронапряжение образцов магниевого сплава AZ80 до и после последовательной МИО на МИУ-3, затем на МИУ 20-21

Заключение. Результаты проведенных исследований показали, что применение МИО на парамагнитных магниевых сплавах системы Mg—Al—Zn, полученных различными деформационными технологиями (прокатка, интенсивная пластическая деформация — экструзия при различных температурах), позволяет улучшить свойства поверхности и, соответственно, повысить прочность.

Путем МИО при использовании различных технологических режимов на высокоскоростном магнитно-импульсном оборудовании (МИУ-3, МИП-18) улучшили свойства поверхностного слоя образцов магниевых сплавов в нужном направлении: повысили твердость НВ на 10...15 % и снизили шероховатость Ra на 12...36 %.

На экспериментальной низкочастотной установке с увеличенной длительностью импульса МИУ 20-21 на большинстве образцов получили изменение знака суммарных макронапряжений 2-го рода с растягивающего на сжимающее.

В совокупности эти результаты при дальнейших исследованиях позволят определить механизмы повышения прочности деформированного магниевого сплава за счет снижения вероятности процессов разрушения.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ в рамках совместного белорусско-китайского проекта по договору № T23КИ-003.

Список цитированных источников

1. Алифанов, А. В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милукова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. — Витебск : ВГТУ, 2017. — Гл. 2. — С. 31—52.

2. *Малыгин, Б. В.* Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
3. 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.
4. Импульсные методы обработки материалов / АН БССР, Физ.-техн. ин-т. — Минск : Наука и техника, 1977. — 216 с.
5. *Петров, А. А.* Магниево-алюминиевые сплавы: перспективные отрасли применения, преимущества и недостатки (обзор). Ч. 1 : Применение в медицине. Кристаллографические факторы, влияющие на коррозионную стойкость магниевых сплавов / А. А. Петров, К. А. Сперанский // Тр. ВИАМ. — № 11 (105). — С. 12—24.
6. Магниево-алюминиевые сплавы : справочник / под ред. И. И. Гуреева, М. В. Чухрова. — М. : Металлургия, 1978. — Ч. 2 : Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов. — 273 с.

Поступила в редакцию 25.09.2023.

УДК 621.926.4

Д. В. Михальков¹, кандидат технических наук, доцент,**В. С. Михальков²**, кандидат технических наук, доцент

Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», пр-т Мира, 43, 212000 Могилев, Республика Беларусь, ¹mikhalkovdv@yandex.by, ²mvs1949@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЩЕБНЯ В ДРОБИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ВАЛОМ

Проведено исследование движения ударных элементов центробежной дробильной установки с вертикальным валом до соударения с частицей материала. Рассчитаны скорости центров масс звеньев ударных элементов. Описанный процесс колебания ударных элементов характеризуется существенной неустойчивостью по отношению к разбросу входных параметров, что учитывается при составлении модели. Составлено выражение кинетической энергии в общем виде с учетом движения ударных элементов, шарниров, ротора и звеньев. Составлено выражение кинетической энергии в аналитической форме. Получены значения координат положения ударного элемента в функции времени на отрезке. Составлены уравнения Лагранжа 2-го рода для вращающейся системы дробильной установки. Получены схемы четвертого порядка точности, образующие семейство четырехчленных схем, как имеющий достаточную точность при отсутствии громоздкости. Разработан численно-аналитический алгоритм, позволяющий получить дискретные значения функции на протяжении конечного промежутка времени.

Ключевые слова: ударные элементы; дробильная установка; обобщенные координаты; центры масс звеньев; коэффициенты трения в шарнирах; координаты точек.

Рис. 3. Библиогр.: 7 назв.

D. V. Mikhalkov¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**V. S. Mikhalkov²**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Inter-state Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University”, 43 Mira Ave., 212000 Mogilev, the Republic of Belarus, ¹mikhalkovdv@yandex.by, ²mvs1949@mail.ru

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODEL OF CRUSHED STONE GRINDING PROCESS IN CRUSHING UNIT WITH VERTICAL SHAFT

The study of the movement of centrifugal crushing plant impact elements with a vertical shaft before collision with a particle of material has been carried out. The velocities of the links mass centers of the impact elements have been calculated. The described process of shock elements vibration is characterized by significant instability with respect to the input parameters spread, which is taken into account when compiling the model. The expression of kinetic energy in a general form is compiled taking into account the movement of shock elements, hinges, rotor and links. The expression of kinetic energy in analytical form has been compiled. The coordinates values of the impactor position in the function of time on the segment have been obtained, the Lagrange equations of the 2nd kind for the rotating system of the crushing plant have been compiled. Schemes of the fourth order of accuracy have been obtained, forming a family of four-term schemes, as having sufficient accuracy in the bulkiness absence. A numerical-analytical algorithm has been developed to obtain of the function discrete values over a finite period of time.

Key words: impact elements; crushing plant; generalized coordinates; centers of links mass; friction coefficients in hinges; points coordinates.

Fig. 3. Ref.: 7 titles.

Введение. Строительное материаловедение регламентирует основные закономерности формирования конгломератной структуры применяемых строительных материалов. Предъявляются требования к размерам, форме, фракционному составу, формированию взаимосвязанных композиций и другим характеристикам.

Группу материалов, подвергающихся дезинтеграции, составляют различные виды минерального сырья, которые требуется измельчать в процессе создания материалов. Это различные наполнители, рудные и нерудные материалы, отходы металлургических производств, твердое энергетическое топливо. Из-за низкой селективности требуется создавать оборудование в соответствии с точными математическими моделями [1].

Моделирование, применяемое в экспериментальных и теоретических исследованиях, является процессом замещения объекта исследования на модель, изучение которой позволяет получить необходимую информацию об объекте исследования с меньшими материальными затратами и в кратчайшие сроки [2].

Наибольший интерес представляет абстрактное моделирование, связанное с построением абстрактной модели (математическое моделирование). Посредством математических зависимостей составляется достаточно полное описание работы объекта исследования, позволяющее определить его выходные параметры и характеристики. Математическое моделирование дает возможность отказаться от физического моделирования, значительно сокращает объем испытаний и доводочных работ, позволяет обеспечить создание машины с высокими показателями эффективности и качества [3].

Материалы и методы исследования. Моделирование рабочих процессов измельчения твердых материалов связано с исследованием взаимодействия рабочих органов дробильной установки с частицами материала. На выходные параметры процесса измельчения оказывает решающее влияние большое количество факторов: частота вращения рабочего органа машины, размер и масса рабочих ударных элементов, их количество, характеристика перерабатываемого материала, условия подачи материала в дробильную установку, требуемая мощность и др. [4; 5]. Создаваемая математическая модель исследуемой машины должна быть как можно проще, обеспечивая при этом адекватное описание анализируемого процесса, экономична, универсальна. На рисунке 1 представлена промышленная дробильная установка ударного действия с вертикальным расположением вала.



Рисунок 1. — Промышленная дробильная установка ударного действия с вертикальным валом для получения кубовидного щебня

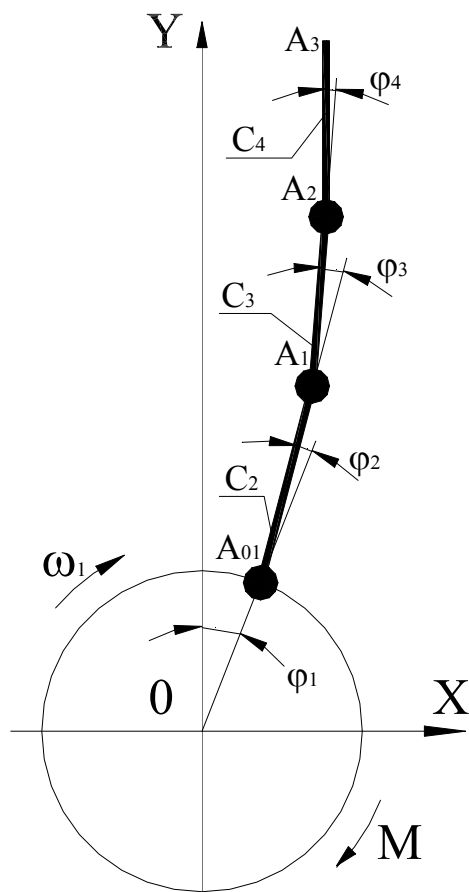


Рисунок 2. — Схема к определению параметров элементов дробилки

Кинетическую энергию системы запишем в следующем виде:

$$T = T_{O1} + T_{A1} + T_{A2} + T_1 + T_2 + T_3 + T_4,$$

где T_{O1}, T_{A1}, T_{A2} — кинетические энергии шарниров;

T_1 — кинетическая энергия вращающегося ротора;

T_2, T_3, T_4 — кинетические энергии звеньев.

Запишем формулы для определения кинетических энергий звеньев и шарниров вращающейся системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = J_1 \frac{\dot{q}_1^2}{2}; T_{O1} = m_{A1} \frac{V_{O1}^2}{2} = m_{A1} R_1^2 \frac{\dot{q}_1^2}{2}; T_{A1} = m_{A1} \frac{V_{A1}^2}{2}; \\ T_{A2} = m_{A2} \frac{V_{A2}^2}{2}; T_2 = m_2 \frac{V_{C2}^2}{2} + J_1 \frac{\dot{\varphi}_1^2}{2}; \\ T_3 = m_3 \frac{V_{C3}^2}{2} + J_2 \frac{\dot{\varphi}_2^2}{2}; T_4 = m_4 \frac{V_{C4}^2}{2} + J_3 \frac{\dot{\varphi}_3^2}{2}, \end{array} \right.$$

Измельчение щебня в дробильной установке осуществляется при помощи нескольких рядов ударных элементов, закрепленных на валу и вращающихся в горизонтальной плоскости [3; 6].

Исследуем движение ударных элементов центробежной дробильной установки с вертикальным валом до соударения с частицей материала.

Рассматривая рисунок 2, устанавливаем число степеней свободы механизма ($K = 4$), для корректности звено 1 включаем в модель.

В качестве обобщенных координат выберем абсолютный угол поворота φ_1 звена 1; угол поворота звена 2 относительно звена 1 — $\varphi_2 - 1$; угол поворота звена 3 относительно звена 2 — $\varphi_3 - 2$; угол поворота звена 4 относительно звена 3 — $\varphi_4 - 3$.

Обозначаем углы поворота звеньев относительно корпуса дробилки: звена 1 (ротора) — φ_1 ; звена 2 относительно звена 1 — φ_2 ; звена 3 относительно звена 2 — φ_3 ; звена 4 относительно звена 3 — φ_4 .

Обобщенные скорости поворота звеньев относительно корпуса дробилки: звена 1 (ротора) — $\dot{\varphi}_1 = \omega_1$; звена 2 относительно звена 1 — $\dot{\varphi}_2$; звена 3 относительно звена 2 — $\dot{\varphi}_3$; звена 4 относительно звена 3 — $\dot{\varphi}_4$.

где J_1, J_2, J_3 — моменты инерции ротора и звеньев 2 и 3 соответственно;
 m_{A1}, m_{A2} — массы шарниров A_1 и A_2 соответственно;
 $V_{O1}, V_{A1}, V_{A2}, V_{A3}$ — абсолютные скорости шарниров O_1, A_1, A_2, A_3 соответственно;
 R_1 — радиус ротора;
 m_2, m_3, m_4 — массы звеньев 2, 3 и 4 соответственно;
 V_{C2}, V_{C3}, V_{C4} — абсолютные скорости центров масс звеньев 2, 3 и 4 соответственно.

Для определения скоростей точек $A_1, A_2, A_3, C_2, C_3, C_4$ воспользуемся координатным методом. Координаты шарниров A_1, A_2, A_3 находим по следующим формулам:

$$\begin{cases} x_{A1} = R_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2); \\ y_{A1} = R_1 \sin \varphi_1 + L_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2); \end{cases} \quad \begin{cases} x_{A2} = x_{A1} + L_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3); \\ y_{A2} = y_{A1} + L_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3); \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{A3} = x_{A2} + L_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4); \\ y_{A3} = y_{A2} + L_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \end{cases}$$

где R_1 — радиус звена 1;
 L_2, L_3, L_4 — длины звеньев 2, 3 и 4 соответственно.

Аналогично определяем координаты точек C_2, C_3, C_4 центров тяжести звеньев:

$$\begin{cases} x_{C2} = R_1 \cos \varphi_1 + 0,5L_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2); \\ y_{C2} = R_1 \sin \varphi_1 + 0,5L_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2); \end{cases} \quad \begin{cases} x_{C3} = x_{A2} + 0,5L_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3); \\ y_{C3} = y_{A2} + 0,5L_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3); \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{C4} = x_{A3} + 0,5L_4 \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4); \\ y_{C4} = y_{A3} + 0,5L_4 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4). \end{cases}$$

Выражение линейных скоростей точек через обобщенные скорости и координаты весьма громоздко, но не представляет трудности:

$$V_{A1}^2 = \dot{x}_{A1}^2 + \dot{y}_{A1}^2; \quad V_{A2}^2 = \dot{x}_{A2}^2 + \dot{y}_{A2}^2; \quad V_{A3}^2 = \dot{x}_{A3}^2 + \dot{y}_{A3}^2;$$

$$V_{C2}^2 = \dot{x}_{C2}^2 + \dot{y}_{C2}^2; \quad V_{C3}^2 = \dot{x}_{C3}^2 + \dot{y}_{C3}^2; \quad V_{C4}^2 = \dot{x}_{C4}^2 + \dot{y}_{C4}^2.$$

Таким образом, имеем аналитическое выражение для кинетической энергии системы:

$$T = T(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4, q_1, q_2, q_3, q_4).$$

Активные силы и пары сил: суммарный момент M , действующий на элемент 1, составляющими которого являются движущий момент, момент сопротивления в подшипниках вертикального вала; моменты сухого трения $M_{O1}^f, M_{A1}^f, M_{A2}^f$ в шарнирах O_1, A_1, A_2 и момент сопротивления среды. Моментом сопротивления среды ввиду его малости можно пренебречь.

Определим обобщенные силы:

$$Q_1 = \frac{\delta A_{\delta q_1}}{\delta q_1};$$

$$\delta q_1 = \delta \varphi_1 \neq 0; \quad \delta q_2 = \delta \varphi_2 = 0; \quad \delta q_3 = \delta \varphi_3 = 0; \quad \delta q_4 = \delta \varphi_4 = 0; \quad \delta A_{\delta q} = M \delta q,$$

следовательно, $Q_1 = \frac{M \delta q_1}{\delta q_1} = M$.

Примечание: если $M = \text{const} = 0 \Rightarrow \varepsilon_1 = 0 \Rightarrow \omega_1 = \dot{q}_1 = \text{const} \Rightarrow \varphi_1 + \omega_1 t$.

$$Q_2 = Q_{q_2} = \frac{\delta A_{\delta q_2}}{\delta q_2};$$

$$\delta \varphi_1 = \delta q_1 = 0; \quad \delta \varphi_2 = \delta q_2 \neq 0; \quad \delta \varphi_3 = \delta q_3 = 0; \quad \delta \varphi_4 = \delta q_4 = 0;$$

$$\delta A_{\delta q_2} = \left(- \frac{\dot{q}_2}{\left| \dot{q}_2 \right|} M_{O1}^f - M_{O1}^C - M_{O1}^y \right) \delta q_2,$$

где $M_{O1}^f = f_{O1} P_{O1}$, где f_{O1} — коэффициент трения в шарнире O_1 ; P_{O1} — нормальная реакция в шарнире O_1 , направлена против перемещения;

$M_{O1}^C = \mu_{O1} \dot{q}_2$, где μ_{O1} — коэффициент вязкого линейного сопротивления в шарнире O_1 , направлен против скорости $\dot{q}_2$;

$M_{O1}^y = C_{O1} \varphi_2 = C_{O1} q_1$, где C_{O1} — коэффициент упругости в шарнире O_1 .

Коэффициент трения в шарнире можно определить экспериментально либо воспользоваться статистическими данными, полученными на подобных машинах.

Таким образом, получим

$$Q_2 = - \frac{\dot{q}_2}{\left| \dot{q}_2 \right|} f_{O1} P_{O1} - \mu_{O1} \dot{q}_2 - C_{O1} q_1.$$

Аналогично для остальных элементов:

$$Q_3 = Q_{q_3} = \frac{\delta A_{q_3}}{\delta q_3}; \quad \delta q_1 = 0; \quad \delta q_2 = 0; \quad \delta q_3 \neq 0; \quad \delta q_4 = 0;$$

$$\delta A_{q_3} = \left(-\operatorname{sign}(\dot{q}_3) M_{A1}^f - M_{A1}^C - M_{A1}^y \right) \delta q_3,$$

где $\operatorname{sign}(\dot{q}_3) = \frac{\dot{q}_3}{|\dot{q}_3|}$.

$$Q_3 = -\frac{\dot{q}_3}{|\dot{q}_3|} f_{A1} P_{A1} - \mu_{A1} \dot{q}_2 - C_{A1} q_2.$$

$$Q_4 = -\frac{\dot{q}_4}{|\dot{q}_4|} f_{A2} P_{A2} - \mu_{A2} \dot{q}_4 - C_{A2} q_4.$$

Результаты исследования и их обсуждение. Составляем уравнения Лагранжа 2-го рода для вращающейся системы дробильной установки [1, с. 272]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_1} = Q_1; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_2} = Q_2; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_3} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_3} = Q_3; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_4} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_4} = Q_4, \end{cases}$$

или в общем виде

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j,$$

где $j = 1, 4$.

Алгоритм составления математической модели показан на схеме, представленной на рисунке 3 [7, с. 246].



Рисунок 3. — Алгоритм составления математической модели

Заключение. Разработана математическая модель динамики движения ударного элемента дробильной установки, представляющая собой систему уравнений Лагранжа 2-го рода, решение которой возможно с использованием компьютерных программ. Полученные значения координат положения ударного элемента в функции времени на отрезке $(t_0 = 0, T^* = \tau)$ позволяют определить характер перемещения ударного элемента после удара по частице материала, скорости ударного элемента и всех его промежуточных звеньев в любой момент времени.

Список цитированных источников

1. *Березкин, Е. Н.* Лекции по теоретической механике. Динамика системы, динамика твердого тела, аналитическая динамика / Е. Н. Березкин. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1968. — Ч. 2. — 316 с.
2. *Сиваченко, Л. А.* Дробилки ударного действия / Л. А. Сиваченко, В. С. Михальков, Д. В. Михальков // Строит. и дорож. машины. — 2003. — № 12. — С. 27—31.
3. *Михальков, Д. В.* Получение щебня узкофракционного гранулометрического состава как крупного заполнителя для бетона и железобетона // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві : зб. наук. праць. — Луцьк : Вежа-Друк, 2016. — Вип. 5. — С. 17—24.
4. *Михальков, Д. В.* Получение теплоизоляционных материалов на основе трепела для энергоэффективных ограждающих конструкций / Д. В. Михальков, В. С. Михальков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2017. — № 4 (57). — С. 143—150.
5. *Михальков, Д. В.* Анализ возможности использования сырьевых материалов Беларуси для получения энергоэффективных ограждающих конструкций / Д. В. Михальков, В. С. Михальков // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. «Строительство. Прикладные науки». — 2017. — № 8. — С. 19—27.
6. *Сиваченко, Л. А.* Получение кубовидного щебня на дробильных установках ударного действия / Л. А. Сиваченко, В. С. Михальков, Д. В. Михальков // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2003. — № 6. — С. 371—374.
7. *Калиткин, Н. Н.* Численные методы / Н. Н. Калиткин. — М. : Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1978. — 512 с.

Поступила в редакцию 18.09.2023.

УДК 621.89.097.2

А. А. Пивоварчик¹, кандидат технических наук, доцент,
А. К. Гавриленя², кандидат технических наук, доцент,
Н. С. Рабцевич³

^{1,3}Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»,
ул. Ожешко, 22, 230021 Гродно, Республика Беларусь, +375 (29) 876 68 24, Pivovarchik_AA@grsu.by

²Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 222 59 33, AndrejGavrilenya@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОБУСОВ

Целью настоящей работы является исследование кинематической вязкости и температуры вспышки в открытом тигле синтетических трансмиссионных масел при увеличении пробега автобусов модели MAZ-215.

Научная новизна работы состоит в получении новых экспериментальных данных по изменению кинематической вязкости и температуры вспышки в открытом тигле синтетических трансмиссионных масел при увеличении пробега автобуса.

Введение содержит краткую информацию по требованиям, предъявляемым к кинематической вязкости и температуре вспышки в открытом тигле синтетических трансмиссионных масел, используемых в автобусах модели MAZ-215.

В основной части описана методика проведения исследований по определению изменения кинематической вязкости при температуре 100 °С и температуры вспышки в открытом тигле трансмиссионных масел в зависимости от величины пробега транспортного средства. Установлено, что минимальное снижение кинематической вязкости при температуре 100 °С после пробега транспортным средством 195 тыс. км наблюдается при использовании синтетического трансмиссионного масла марки Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90. Также установлено, что синтетические трансмиссионные масла марок Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90 и Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90 вследствие высоких эксплуатационных свойств могут быть применены в качестве трансмиссионных масел для автобусов модели MAZ-215.

Результаты исследований будут полезны инженерам-механикам при выборе марок синтетических трансмиссионных масел в целях увеличения надежности и работоспособности основных узлов трансмиссии автобусов.

Ключевые слова: автобус; трансмиссионное масло; кинематическая вязкость; температура вспышки в открытом тигле; пробег.

Табл. 2. Библиогр.: 7 назв.

A. A. Pivovarchyk¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. K. Haurilenia², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
N. S. Rabtsevich³

^{1,3}Institution of Education “Yanka Kupala State University of Grodno”, 22 Ozhesko Str., 230021 Grodno,
the Republic of Belarus, +375 (29) 876 68 24, Pivovarchik_AA@grsu.by

²Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,
the Republic of Belarus, +375 (29) 222 59 33, AndrejGavrilenya@mail.ru

STUDY OF THE SYNTHETIC GEAR OILS PERFORMANCE PROPERTIES DURING BUS OPERATION

The purpose of this work is to study the kinematic viscosity and flash point in an open crucible of synthetic transmission oils with an increase in the MAZ-215 buses mileage.

The scientific novelty of the work is in obtaining new experimental data on changes in the kinematic viscosity and flash point in an open crucible of synthetic transmission oils with an increase in the bus mileage.

The introduction contains brief information on the requirements for kinematic viscosity and flash point in an open crucible of synthetic transmission oils used in MAZ-215 model buses.

The main part describes the methodology for conducting research to determine changes in kinematic viscosity at a temperature of 100 °C and flash point in an open crucible of transmission oils, depending on the vehicle mileage. It has been found that a minimal decrease in kinematic viscosity at a temperature of 100 °C after a vehicle mileage of 195 thousand km is observed when using synthetic transmission oil brand Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90. It has also been established that synthetic transmission oils of Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90 and Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90 brands can be used as transmission oils for MAZ-215 buses due to their high performance properties.

The results of the research will be useful to mechanical engineers when choosing brands of synthetic transmission oils in order to increase the reliability and operability of the main buses transmission components.

Key words: bus; gear oil; kinematic viscosity; flash point in an open crucible; mileage.

Table 2. Ref.: 7 titles.

Введение. В настоящее время на внутреннем рынке Республики Беларусь в продаже имеются различные марки трансмиссионных масел (далее — ТМ), необходимых для технической эксплуатации и обслуживания транспортных средств различных категорий. Так, присутствует более 20 зарубежных производителей ТМ. Наиболее известными являются ТМ марок Mannol Extra Getriebeoil (Германия), Motul ATF VI (Франция), Lukoil (Россия), G-Energy G-Box ATF DX III (Италия) и др. Следует отметить, что выбор потребителями ТМ основывается на информации, указываемой производителем, которая, как правило, носит рекламный характер, а также на стоимости продукции, ее доступности, возможности централизованной закупки. Важным обстоятельством является и то, что владелец нового транспортного средства при выборе марки ТМ вынужден придерживаться рекомендаций завода-изготовителя, так как в ином случае транспортное средство будет снято с гарантийного обслуживания. В связи с этим представляют интерес и являются весьма актуальными результаты исследований эксплуатационных свойств ТМ в процессе эксплуатации конкретных моделей транспортных средств.

Известно, что к числу основных эксплуатационных свойств ТМ относятся кинематическая вязкость при температурах 100 и 40 °C, а также температура вспышки ТМ в открытом тигле. В свою очередь авторы [1—3] отмечают, что смазывающая способность ТМ — это способность снижать сопротивление движению (уменьшать силы трения) и предупреждать изнашивание трущихся деталей в условиях жидкофазного и граничного режимов. Это обеспечивается за счет образования (адсорбции) на твердой поверхности прочной масляной пленки, именуемой граничным слоем. Смазывающая способность ТМ возрастает по мере увеличения кинематической вязкости масла. Также из работы [1] известно, что величина температуры вспышки ТМ в открытом тигле должна быть как можно выше и максимально длительный срок сохранять свое первоначальное значение. Согласно [1—3], температура вспышки в открытом тигле ТМ должна быть более 175 °C и, как правило, находиться в пределах от 180 до 230 °C, реже — немногим более 230 °C.

Целью данной работы является определение изменения кинематической вязкости и температуры вспышки синтетических ТМ при эксплуатации автобусов модели MAZ-215.

Материалы и методы исследования. Экспериментальное исследование синтетических ТМ марок ZF Ecofluid X SAE 80W-90, Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90 и Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90 проводили в целях установления зависимости эксплуатационных свойств указанных масел от величины пробега автобусов модели MAZ-215, оборудованных дизельным двигателем внутреннего сгорания модели Daimler OM 926LA и трансмиссией ZF 6HP 604C. Отбор проб ТМ проводили в автобусах, пробег которых равен 150, 165, 180 и 195 тыс. км. Методика проведения исследований по определению кинематической вязкости при температуре 100 °C с точки зрения порядка отбора проб ТМ для проведения экспериментов представлена в научных работах [4—7]. Кинематическую вязкость при температуре 100 °C для выбранных ТМ определяли по ГОСТ 22 «Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической

вязкости и расчет динамической вязкости». Температуру вспышки в открытом тигле при исследовании ТМ определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 4333 «Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле».

Рекомендуемый срок замены исследуемых ТМ, согласно данным, изложенным в инструкции по эксплуатации для автобусов марки МАЗ-215, при осуществлении городских пассажирских перевозок составляет 3 года (180 тыс. км пробега). Следует отметить, что в руководстве по эксплуатации рекомендуется использовать определенное синтетическое ТМ — ZF Ecofluid X SAE 80W-90. При этом категорически запрещено доливание и смешивание с другими маслами.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты экспериментального исследования, целью которого являлось определение изменения кинематической вязкости при температуре 100 °С и температуры вспышки в открытом тигле исследуемых ТМ в процессе эксплуатации автобусов модели МАЗ-215 с дизельным двигателем, оборудованных трансмиссией ZF 6HP 604C, в зависимости от величины пробега транспортного средства.

Результаты исследования и их обсуждение. Экспериментально подтверждено, что кинематическая вязкость при температуре 100 °С во всех исследуемых образцах синтетических ТМ при увеличении пробега автобуса модели МАЗ-215 уменьшается, что происходит ввиду естественного «старения» ТМ. Показано, что изначально ТМ марки Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90 при температуре 100 °С имеет более высокую кинематическую вязкость (15,09 мм²/с), а масла марок Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90 и ZF Ecofluid X SAE 80W-90 — 14,3 и 9,3 мм²/с соответственно (см. таблицу 1).

Т а б л и ц а 1. — Результаты изменения кинематической вязкости при температуре 100 °С при применении различных зарубежных синтетических ТМ

Пробег автобуса, тыс. км	Кинематическая вязкость при температуре 100 °С, мм ² /с		
	Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90	Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90	ZF Ecofluid X SAE 80W-90
Исходное значение	15,09	14,30	9,30
150	14,20	13,50	8,90
165	13,60	13,10	8,10
180	12,10	12,40	7,60
195	10,70	11,30	6,70

Т а б л и ц а 2. — Результаты изменения температуры вспышки в открытом тигле в исследуемых синтетических ТМ

Пробег автобуса, тыс. км	Температура вспышки в открытом тигле, °С		
	Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90	Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90	ZF Ecofluid X SAE 80W-90
Исходное значение	190	190	240
150	185	187	235
165	178	182	229
180	172	175	220
195	167	169	208

Установлено, что при использовании ТМ марки Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90 при пробеге автобуса 195 тыс. км кинематическая вязкость при температуре 100 °C снижается до 10,7 мм²/с (на 29,1 %), при использовании ТМ марок Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90 и ZF Ecofluid X SAE 80W-90 при аналогичном пробеге транспортного средства кинематическая вязкость снижается до 11,3 (21,0 %) и 6,7 мм²/с (28,0 %) соответственно. Наиболее интенсивное снижение кинематической вязкости исследуемых масел при температуре 100 °C наблюдается после 180 тыс. км пробега. Показано, что при пробеге транспортным средством 180 тыс. км кинематическая вязкость при температуре 100 °C ТМ марки Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90 снижается до 12,1 мм²/с (на 2,99 мм²/с), а ТМ марок Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90 и ZF Ecofluid X SAE 80W-90 до 12,4 мм²/с (на 1,9 мм²/с) и 7,6 мм²/с (1,7 мм²/с) соответственно.

В результате проведенного исследования установлено, что при пробеге 180 тыс. км значение кинематической вязкости при температуре 100 °C во всех исследуемых синтетических ТМ снизилось на величину в пределах от 13,3 до 19,8 %. Данное изменение кинематической вязкости при температуре 100 °C свидетельствует о том, что данные ТМ обладают высокими эксплуатационными свойствами по исследуемому показателю. В работе [2] рекомендуется замена ТМ при изменении кинематической вязкости при температуре 100 °C более чем на 20 % от исходного значения, что наблюдается по истечении установленного нормативной документацией срока замены ТМ. Минимальное допустимое значение кинематической вязкости при 100 °C для ТМ составляет 5,0 мм²/с [1].

Экспериментально установлено, что температура вспышки в открытом тигле во всех исследуемых образцах синтетических ТМ с увеличением пробега автобуса модели МА3-215 снижается (см. таблицу 2). Показано, что изначально ТМ марки ZF Ecofluid X SAE 80W-90 в сравнении с другими исследуемыми синтетическими ТМ имеет более высокую температуру вспышки (240 °C).

Так, при пробеге автобуса модели МА3-215 195 тыс. км температура вспышки в открытом тигле ТМ марки Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90 снижается до 167 °C (12,1 %), при использовании ТМ марок Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90 и ZF Ecofluid X SAE 80W-90 — до 169 °C (11,1 %) и 208 °C (13,3 %) соответственно. Наиболее интенсивное снижение значения температуры вспышки в открытом тигле у всех масел наблюдается после 180 тыс. км пробега. Экспериментальные данные, представленные в таблице 2, показывают, что после пробега транспортным средством 180 тыс. км температура вспышки в открытом тигле в исследуемом образце ТМ марки Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90 снижается до 172 °C (18 °C), ТМ марок Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90 и ZF Ecofluid X SAE 80W-90 — до 175 (15 °C) и 220 °C (20 °C) соответственно.

Согласно рекомендациям, изложенным в литературных источниках [1; 2], ТМ следует заменить при изменении температуры вспышки в открытом тигле более чем на 20 % от первоначального значения. В результате проведенных экспериментов установлено, что после 195 тыс. км пробега температура вспышки в открытом тигле во всех исследуемых синтетических ТМ снизилась на величину от 11,1 до 13,3 %. Таким образом, незначительное изменение температуры вспышки в открытом тигле свидетельствует о том, что исследуемые ТМ обладают высокими эксплуатационными свойствами по данному показателю.

По результатам проведенного исследования можно утверждать, что минимальное снижение температуры вспышки в открытом тигле при пробеге транспортным средством 195 тыс. км наблюдается при использовании синтетического ТМ марки Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90.

Заключение. Экспериментально установлено, что кинематическая вязкость при температуре 100 °C и температура вспышки в открытом тигле синтетических ТМ марок Castrol Syntrans Multivehicle SAE 75W-90, Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90 и ZF

Ecofluid X SAE 80W-90 при использовании в автобусах МАЗ-215, оборудованных трансмиссией ZF 6HP 604C, при пробеге 195 тыс. км снижаются в допустимых пределах. При этом менее интенсивное снижение исследуемых эксплуатационных свойств наблюдается у синтетического ТМ марки Liqui Moly Vollsynthetisches Getriebeoil SAE 75W-90.

Список цитированных источников

1. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости : учеб. пособие / В. В. Остриков [и др.]. — Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. — 304 с.
2. Методы контроля и результаты исследования состояния трансмиссионных и моторных масел при их окислении и триботехнических испытаниях : монография / В. И. Верещагин [и др.]. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. — 208 с.
3. Селезнев, М. В. Динамика изменения кинематической вязкости трансмиссионного масла в среднем мосту автомобилей КамАЗ / М. В. Селезнев // Проблемы науч. мысли. — 2017. — Т. 1, № 10. — С. 69—74.
4. Пивоварчик, А. А. Исследование температурно-вязкостных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. И. Сергей // Весн. Гродз. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 6, Тэхніка. — 2019. — Т. 9, № 1. — С. 78—87.
5. Пивоварчик, А. А. Исследование вязкостно-температурных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. К. Гавриленя, О. Д. Заболотный // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2021. — № 1 (9). — С. 70—76.
6. Пивоварчик, А. А. Исследование эксплуатационных показателей полусинтетических моторных масел марки SAE 10W40, используемых в бензиновых двигателях / А. А. Пивоварчик, А. К. Гавриленя, О. Д. Заболотный // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2021. — № 1 (9). — С. 77—84.
7. Пивоварчик, А. А. Исследование эксплуатационных показателей синтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях легковых механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. С. Корольков, Н. Н. Алифировец // Весн. ГрДУ імя Я. Купалы. Сер. 6, Тэхніка. — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 21—27.

Поступила в редакцию 05.09.2023.

УДК 658.512

Н. Н. Попок¹, доктор технических наук, профессор,
Н. В. Беляков², кандидат технических наук, доцент,
С. К. Селезнёв³

^{1,3}Учреждение образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»,
ул. Блохина, 29, 211440 Новополоцк, Республика Беларусь, +375 (214) 59 95 53, ¹n.popok@psu.by

²Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»,
пр-т Московский, 72, 210038 Витебск, Республика Беларусь,
+375 (212) 49 53 84, belyakov@vstu.by

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ РАЗМЕРНОЙ НАСТРОЙКИ СВЕРЛ ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Для развития процессов цифровизации на машиностроительных предприятиях разработана система поддержки принятия решений по определению длин рабочих ходов, минимальных величин врезаний и выходов, координат начальных, промежуточных и конечных положений сверл в зависимости от условий врезания, выхода и геометрических параметров их режущих частей для размерной настройки металлорежущих станков с числовым программным управлением на обработку отверстий с учетом границ переходных процессов. Использование системы на машиностроительных предприятиях дает возможность: снизить затраты на обработку отверстий сверлами из-за сокращения основного (машинного) времени за счет минимизации величин рабочих ходов инструментов; повысить срок службы и период стойкости инструмента за счет назначения щадящих режимов резания на участках динамических изменений сил резания при врезании и выходе сверл. Результаты работы также могут быть полезны в организациях, специализирующихся на разработке САМ-систем и учебном процессе.

Ключевые слова: сверло; сверление; основное время; длина врезания; длина выхода; рабочий ход; переходный процесс; САМ-система; управляющая программа; машиностроение.

Рис. 7. Табл. 3. Библиогр.: 14 назв.

N. N. Popok¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
N. V. Belyakov², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
S. K. Seleznev³

^{1,3}Institution of Education "Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk",
29 Blokhina Str., 211440 Novopolotsk, the Republic of Belarus, +375 (214) 59 95 53, ¹n.popok@psu.by

²Institution of Education "Vitebsk State Technological University", 72 Moskovsky Ave., 210038 Vitebsk,
the Republic of Belarus, +375 (212) 49 53 84, belyakov@vstu.by

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR DETERMINING THE DIMENSIONAL ADJUSTMENT PARAMETERS OF DRILLS FOR PROGRAMMING HOLE PROCESSING ON CNC MACHINE-TOOLS

For the development of digitalization processes at machine-building enterprises, a decision support system has been developed to determine the lengths of working strokes, minimum cuts and exits values, coordinates of the initial, intermediate and final drills positions, depending on the embedding conditions, exit and geometric parameters of their cutting parts for dimensional adjustment of CNC cutting machine-tools for hole processing, taking into account the transients boundaries. The use of the system in machine-building enterprises makes it possible: to reduce the cost of processing holes with drills due to the reduction of the main (machine) time by minimizing the values of the tools working strokes; to increase the service life and the period of tool durability by assigning gentle cutting modes in dynamic changes areas in cutting forces during the drill insertion and exit. The results of the work can also be useful in organizations specializing in the development of CAM systems and in the educational process.

Key words: drill bit; drilling; main time; embedding length; output length; working stroke; transient; CAM-system; control program; mechanical engineering.

Fig. 7. Table 3. Ref.: 14 titles.

Введение. Современным мировым трендом является цифровая трансформация всех сфер жизнедеятельности человека. Особое значение цифровизация приобретает в сфере промышленного производства как локомотива экономического развития общества. Основными условиями цифровизации промышленного производства являются: 1) наличие единого информационного пространства для обмена данными между различными процессами и подразделениями предприятий; 2) создание цифровых моделей изделий и процессов; 3) использование современного оборудования с числовым программным управлением (далее — ЧПУ).

На машиностроительных предприятиях для реализации условия интеграции информационных пространств все большее развитие получают технологии PLM (Product Lifecycle Management), PDM (Product Data Management), ERP (Enterprise Resource Planning), MES (Manufacturing Execution System). Для цифровизации моделей изделий и процессов в PLM /PDM/ERP/MES развиваются и интегрируются системы автоматизированного проектирования моделей изделий (computer-aided design, CAD), инженерного анализа (computer-aided engineering, CAE), технологических процессов (Computer-Aided Process Planning, CAPP), процессов сборки (Computer Aided Assembly Planning, CAAP), диспетчерского управления производственными процессами (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA), поддержки принятия решений (Decision Support System, DSS), системы автоматизированной подготовки производства на станках с ЧПУ (computer-aided manufacturing, CAM) и др.

Для подготовки управляющих программ обработки деталей машин на современных станках с ЧПУ широкое распространение получили такие CAM-системы, как Компас ЧПУ, T-Flex ЧПУ, SiemensNX, MasterCAM, EdgeCAM, SolidCAM, Прамень ЧПУ, Creo, CATIA, PowerMill, Esprite и др. [1—4].

В работах [5; 6] приводится метод решения задачи определения положения систем координат заготовки и инструмента в начальной и конечной точках траекторий резания, а также величин врезания и выхода концевых и торцевых фрез для размерной настройки при обработке плоских поверхностей на станках с ЧПУ. Аналогично при программировании сверления отверстий на станках с ЧПУ от оптимального расположения системы координат инструмента и заготовки зависит основное (машинное) время и, как следствие, затраты на обработку.

При сверлении отверстий во время переходных процессов (врезание и выход инструмента) динамически меняются составляющие силы резания, наблюдается нестабильность упругих деформаций технологической системы, что может приводить к затуплению, перегреву и поломке инструмента. Поэтому производители инструментов в каталогах свёрл и онлайн-калькуляторах режимов резания [7; 8] часто рекомендуют их различные значения для врезания, устойчивого резания и выхода. Для снижения негативных последствий переходных процессов при сверлении также используются способы регистрации начала такого процесса при выходе сверла из отверстия по снижению осевой силы, увеличению крутящего момента, перемещению в направлении оси сверла слоя металла, расположенного под режущей кромкой, и др. Предлагаемые решения адаптивного управления требуют использования специальных сложных и дорогих конструктивных решений, часто являются недостаточно эффективными ввиду отсутствия измерительных преобразователей нужных размеров, точности, быстрогодействия или невозможности их установки из-за неприспособленности станков, а также отсутствия математических моделей для управления процессами резания и недостаточностью быстрогодействия механизмов станков [9—12].

При программировании станков с ЧПУ возможно предусмотреть изменение режимов резания в любой момент времени и траектории движения инструмента и заготовки. Однако проведенный анализ показывает, что современные онлайн-калькуляторы и САМ-системы при разработке управляющих программ для сверления отверстий не позволяют учесть все

разнообразие форм режущих частей современных свёрл, определить и (или) задать длины врезаний, устойчивого резания и выходов свёрл для задания различных щадящих режимов резания и, как следствие, оптимально расположить системы координат инструмента и заготовки в начальной, промежуточных и конечной точках траекторий резания с учетом границ переходных процессов (рисунок 1). В справочной и учебной литературе лишь приводятся рекомендации по определению основного времени для некоторых вариантов врезания свёрл без учета различия их режущих частей [13; 14].

Поэтому целью работы является разработка системы поддержки принятия решений (DSS) для определения минимальных величин врезания и выходов свёрл, координат их начального, промежуточного и конечного положения с учетом границ переходных процессов, а также основного времени для программирования обработки отверстий на станках с ЧПУ.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) составлены расчетные схемы и математические модели для определения таких параметров размерной настройки свёрл, как длины рабочих ходов, минимальные величины врезаний и выходов, координаты начальных, промежуточных и конечных положений свёрл в зависимости от условий врезания, выхода и геометрических параметров их режущих частей;
- 2) разработаны общие модели для определения затрат основного (машинного) времени;
- 3) разработан алгоритм функционирования и общая структура DSS по определению параметров размерной настройки свёрл;
- 4) разработано программное обеспечение реализации моделей, проведена его комплексная отладка и предварительные испытания, а также разработаны программные документы.

Для исследования и решения поставленных в работе задач использовались методы теории автоматизации проектирования, аналитической геометрии, системно-структурного анализа и моделирования. Проводился анализ литературных источников, электронных изданий, опыта использования систем автоматизированного проектирования на предприятиях, а также анализ конструкторской и технологической документации в соответствующих бюро машиностроительных заводов.

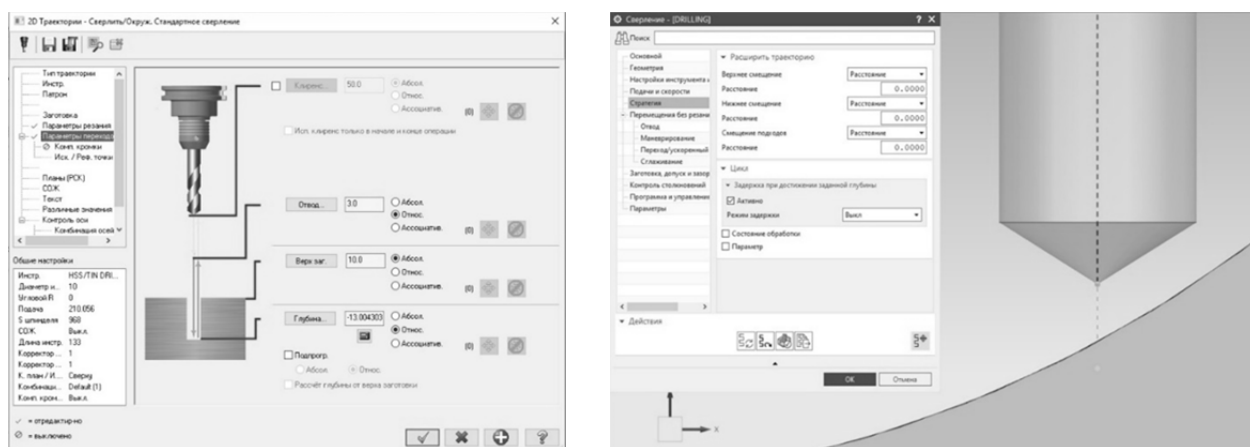


Рисунок 1. — Некоторые интерфейсы задания параметров размерной настройки в MasterCAM и SiemensNX

Результаты исследования и их обсуждение. При формировании общих моделей для определения затрат основного (машинного) времени установлено, что в практике использования наиболее широкое применение находят варианты врезания и выхода свёрл относительно плоскости (перпендикулярной или наклонной) или цилиндрической поверхности (наружной и внутренней симметрично или со смещением). Прочие варианты могут быть

к ним приведены. Различные сочетания поверхностей врезания и выхода инструментов задают различные положения системы координат инструмента относительно системы координат заготовки различными способами. Эти способы определяют общие принципиальные расчётные схемы для определения длины рабочего хода инструмента $L_{рх}$, величины врезания $L_{вр}$, величины выхода $L_{вых}$, а также координат начального и конечного положений инструмента (E_n и E_k) в системе координат заготовки (W_n и W_k).

Формирование общих моделей для определения затрат основного (машинного) времени осуществлялось отдельно по различным видам сверления. Так, на рисунке 2 показаны некоторые примеры принципиальных расчетных схем для сверления. На схемах тройной штриховой линией обозначены в общем виде формы режущих частей инструментов.

На основе принятых обозначений длина рабочего хода в общем виде может определяться по формуле

$$L_{рх} = L_{вр} + L_{уст} + L_{вых} = L_{под} \pm L_{нвр} \pm L \pm L_{квых} + L_{вых},$$

где $L_{уст}$ — длина устойчивого резания;

$L_{под}$ — длина подвода инструмента (принимается 2...3 мм);

$L_{нвр}$ — расстояние между системой координат заготовки и точкой начала врезания инструмента;

L — расстояние между системами координат заготовки (определяется заданным на чертеже размером);

$L_{квых}$ — расстояние между системой координат заготовки и точкой начала выхода инструмента.

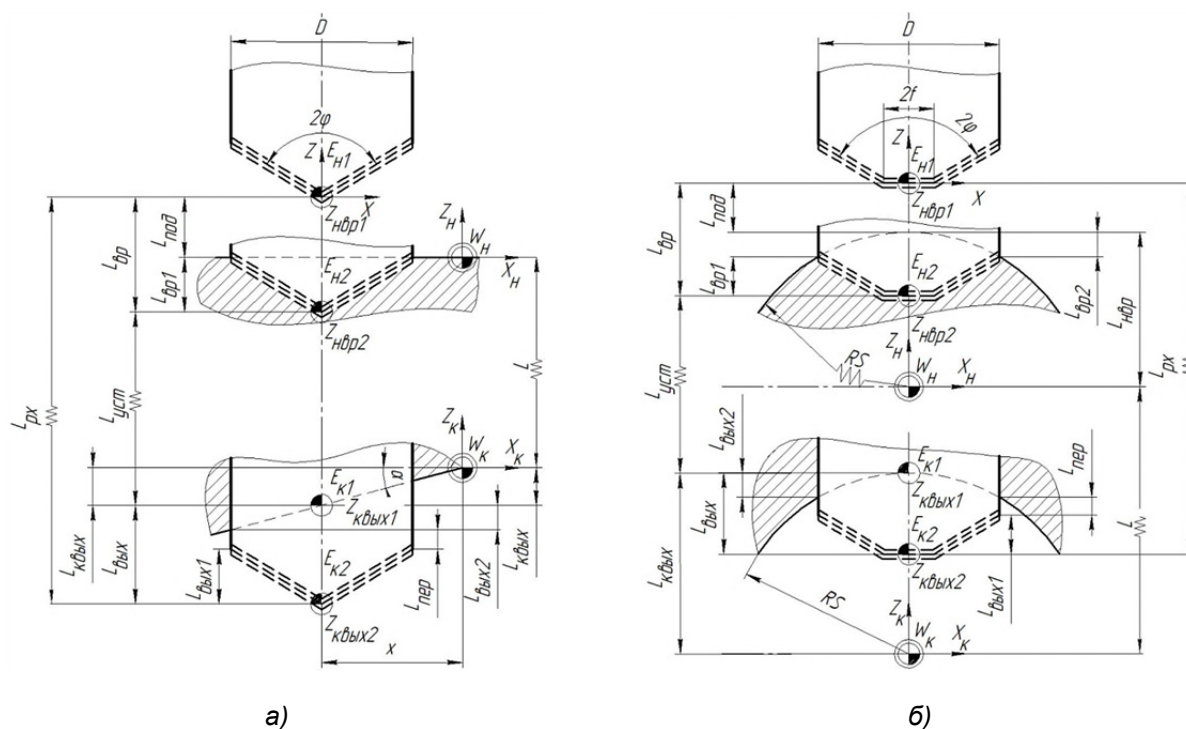


Рисунок 2. — Примеры общих принципиальных расчетных схем для сверления: врезание по плоскости, перпендикулярной инструменту, и с выходом по наклонной плоскости (а), врезание и выход симметричные по наружному и внутреннему цилиндрам (б)

Включение перечисленных составляющих в формулу длины рабочего хода и знаки перед $L_{\text{нвр}}$, L и $L_{\text{квых}}$ зависят от геометрических условий врезания и выхода инструментов, а также расположения системы координат $W_{\text{н}}$ и $W_{\text{к}}$.

Так, для схемы, показанной на рисунке 2, а: $L_{\text{рх}} = L_{\text{вр}} + L_{\text{уст}} + L_{\text{вых}} = L_{\text{под}} + L + L_{\text{квых}} + L_{\text{вых}}$; для схемы, приведенной на рисунке 2, б: $L_{\text{рх}} = L_{\text{вр}} + L_{\text{уст}} + L_{\text{вых}} = L_{\text{под}} + L_{\text{нвр}} + L - L_{\text{квых}} + L_{\text{вых}}$.

Таким образом, затраты основного (машинного) времени T_0 на переход в общем виде могут определяться по формуле

$$T_0 = \frac{L_{\text{вр}}}{ns_1} + \frac{L_{\text{уст}}}{ns_2} + \frac{L_{\text{вых}}}{ns_3} = \frac{L_{\text{вр}}}{ns_1} + \frac{L_{\text{под}} \pm L_{\text{нвр}} \pm L \pm L_{\text{квых}} - L_{\text{вр}}}{ns_2} + \frac{L_{\text{вых}}}{ns_3},$$

где s_1 — подача на оборот при врезании;

s_2 — подача на оборот при устойчивом резании;

s_3 — подача на оборот при выходе инструмента.

Величины врезания и выхода инструмента:

$$L_{\text{вр}} = L_{\text{под}} + L_{\text{вр1}} \pm L_{\text{вр2}}, \quad L_{\text{вых}} = L_{\text{вых1}} + L_{\text{пер}} \pm L_{\text{вых2}},$$

где $L_{\text{вр1}}$ — длина врезания инструмента, обусловленная геометрией его режущей части;

$L_{\text{вр2}}$ — длина врезания, обусловленная геометрией заготовки;

$L_{\text{вых1}} = L_{\text{вр1}}$ — длина выхода инструмента, обусловленная геометрией его режущей части;

$L_{\text{пер}}$ — длина перебега (принимается 2...3 мм);

$L_{\text{вых2}}$ — длина выхода инструмента, обусловленная геометрией заготовки.

В результате анализа каталогов фирм производителей свёрл проведена классификация их режущих частей. Так, установлено, что все многообразие режущих частей сверл можно свести к восьми вариантам (рисунок 3).

Для расчета величин врезания инструментов $L_{\text{вр1}}$, обусловленных геометрией его режущих частей, составлены соответствующие расчетные схемы, позволяющие сформировать математические модели для их определения. Так, на рисунке 4 показаны расчетные схемы для определения $L_{\text{вр1}}$.

Согласно рисунку 4, а, из $\triangle ABC$

$$L_{\text{вр1}} = AB = \frac{BC}{\text{tg}\phi} = \frac{D}{2\text{tg}\phi}.$$

Согласно рисунку 4, б, из $\triangle ABC$ и $\triangle CDE$

$$\begin{aligned} L_{\text{вр1}} = AF = AB + CD &= \frac{EF - DF}{\text{tg}\phi} = \frac{\frac{D}{2} - 0,2 \frac{D}{2} \sin\phi_1}{\text{tg}\phi} + 0,2D\cos\phi_1 = \\ &= \frac{D(1 - 0,2\sin\phi_1)}{2\text{tg}\phi} + 0,2D\cos\phi_1. \end{aligned}$$

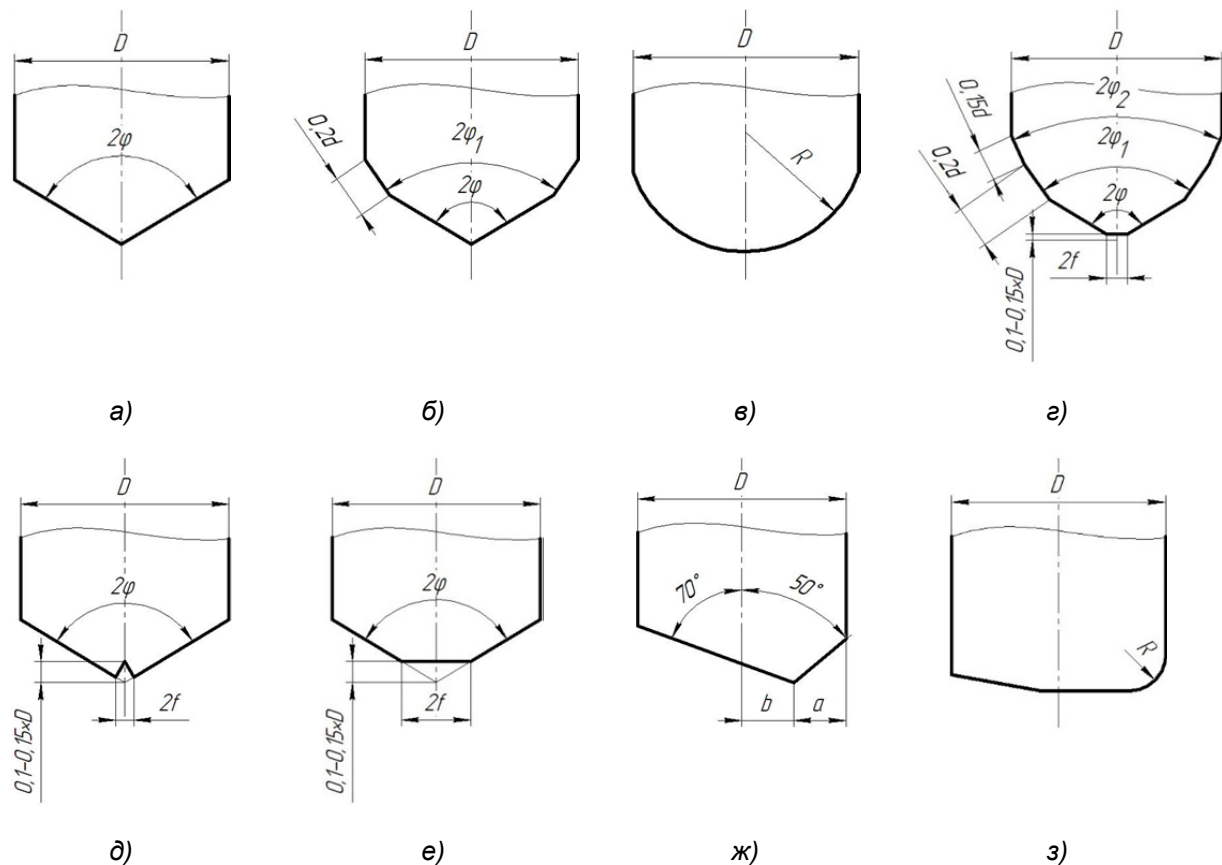


Рисунок 3. — Варианты режущих частей свёрл: а — спиральное, шнековое, эжекторное с одноплоскостной заточкой; б — спиральное с двухплоскостной заточкой; в — спиральное с закруглёнными режущими кромкам; г — спиральное конструкции В. И. Жирова; д — спиральное с прорезной перемычкой; е — спиральное со стачиванием перемычки; ж — ружейное; з — кольцевое со сменными пластинками

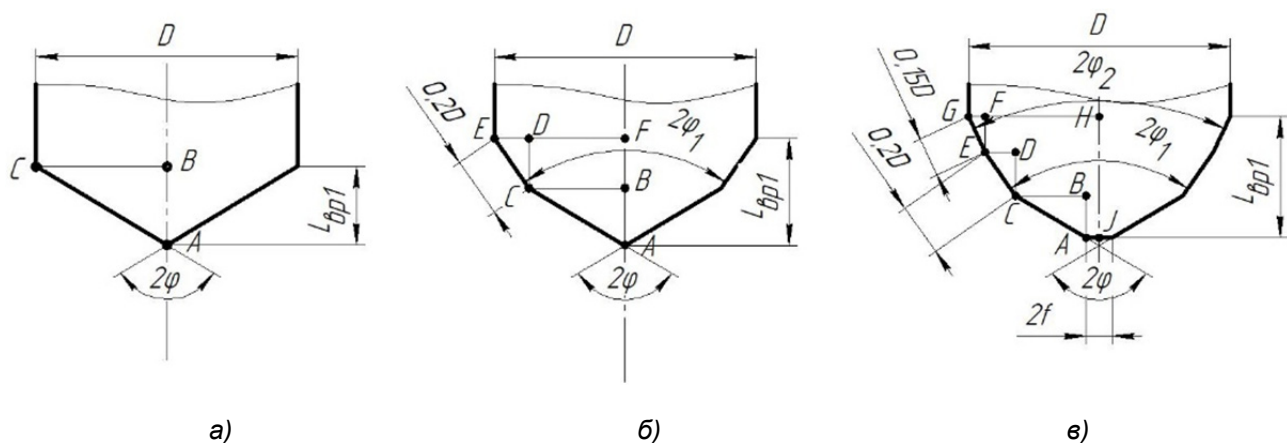


Рисунок 4. — Примеры расчетных схем для определения $L_{вр1}$ некоторых видов свёрл: а — спиральное, шнековое, эжекторное с одноплоскостной заточкой; б — спиральное с двухплоскостной заточкой; в — спиральное конструкции В. И. Жирова

Согласно рисунку 4, в, из $\triangle ABC$, $\triangle CDE$ и $\triangle EFG$

$$\begin{aligned}
 L_{\text{вр1}} = JH = AB + CD + EF &= \frac{HG - FG - DE}{\operatorname{tg}\phi} + EG\cos\phi_2 + EC\cos\phi_2 = \\
 &= (GH - AJ - 0,2GH2\sin\phi_1 - 0,15GH2\sin\phi_2)\operatorname{ctg}\phi + 0,2GH2\sin\phi_1\operatorname{ctg}\phi_1 + \\
 &\quad + 0,15GH2\sin\phi_2\operatorname{ctg}\phi_2 = \left(\frac{D}{2} - f - 0,2D\sin\phi_1 - 0,15D\sin\phi_2\right) \times \\
 &\quad \times \operatorname{ctg}\phi + 0,2D\sin\phi_1\operatorname{ctg}\phi_1 + 0,15D\sin\phi_2\operatorname{ctg}\phi_2.
 \end{aligned}$$

В таблице 1 приведены математические модели для определения $L_{\text{вр1}}$ для различных режущих частей сверл.

Т а б л и ц а 1. — Сводная таблица для определения величин врезания сверл $L_{\text{вр1}}$, обусловленных геометрией их режущих частей

Сверло	$L_{\text{вр1}} = L_{\text{вых1}}$
Спиральное с одноплоскостной заточкой	$\frac{D}{2\operatorname{tg}\phi}$
Спиральное с двойной заточкой	$\frac{D - 0,2D\sin\phi_1}{2\operatorname{tg}\phi} + 0,2D\cos\phi_1$
Спиральное для сверления чугуна (по В. Г. Жирову)	$\left(\frac{D}{2} - 0,2D\sin\phi_1 - 0,15D\sin\phi_2\right)\operatorname{ctg}\phi +$ $+ 0,2D\sin\phi_2\operatorname{ctg}\phi_1 + 0,15D\sin\phi_2\operatorname{ctg}\phi_2$
Спиральное с закругленными режущими кромками	$R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}}$
Спиральное со стачиваемыми перемычками	$\left(\frac{D}{2} - f\right)\cos\phi$
Спиральное с прорезной перемычкой	$\left(\frac{D}{2} - f\right)\cos\phi$
Кольцевое (или со сменными пластинками)	0
Пушечное	$\frac{D+f}{2}\operatorname{tg}\alpha$
Ружейное	$\frac{D}{2} + b\operatorname{ctg}\alpha$
Шнековое	$\frac{D}{2\operatorname{tg}\phi}$
Эжекторное	$\frac{D}{2\operatorname{tg}\phi}$

Для определения таких параметров размерной настройки, как расстояния между системой координат заготовки и точкой начала врезания инструмента $L_{\text{нвр}}$, расстояния между системой координат заготовки и точкой начала выхода инструмента $L_{\text{квых}}$, длины входа инструмен-

та, обусловленной геометрией его режущей части $L_{вр1}$, длины входа (выхода), обусловленной геометрией заготовки $L_{вр2}$, а также координат начального и конечного положений сверла в системе координат заготовки (в начальной точке траектории при врезании $Z_{нвр1}$, в конечной точке траектории при врезании $Z_{нвр2}$, начальной точки траектории при выходе $Z_{квых1}$ и конечной точки траектории при выходе $Z_{квых2}$) были составлены соответствующие расчетные схемы. Некоторые схемы для определения этих параметров при сверлении приведены на рисунках 5 и 6. При этом установлено, что принципиальное отличие для сверления при расчетах имеют варианты с наличием горизонтальной режущей кромки перемычки и без неё.

Согласно рисунку 5, а, из $\triangle CED$, $\triangle ABO$ и $\triangle ABC$

$$L_{нвр} = CD = \frac{ED}{\operatorname{ctg}\alpha} = \frac{x}{\operatorname{ctg}\alpha}, \quad L_{вр2} = BC = \frac{D}{2} \operatorname{tg}\alpha.$$

Тогда

$$L_{вр} = L_{под} + L_{вр1} + L_{вр2} = L_{под} + L_{вр1} + \frac{D}{2} \operatorname{tg}\alpha, \quad Z_{нвр1} = -L_{нвр} + L_{под} = -\frac{x}{\operatorname{ctg}\alpha} + L_{под},$$

$$Z_{нвр2} = -L_{нвр} - L_{вр2} - L_{вр1} = -\frac{x}{\operatorname{ctg}\alpha} - \frac{D}{2} \operatorname{tg}\alpha - L_{вр1}.$$

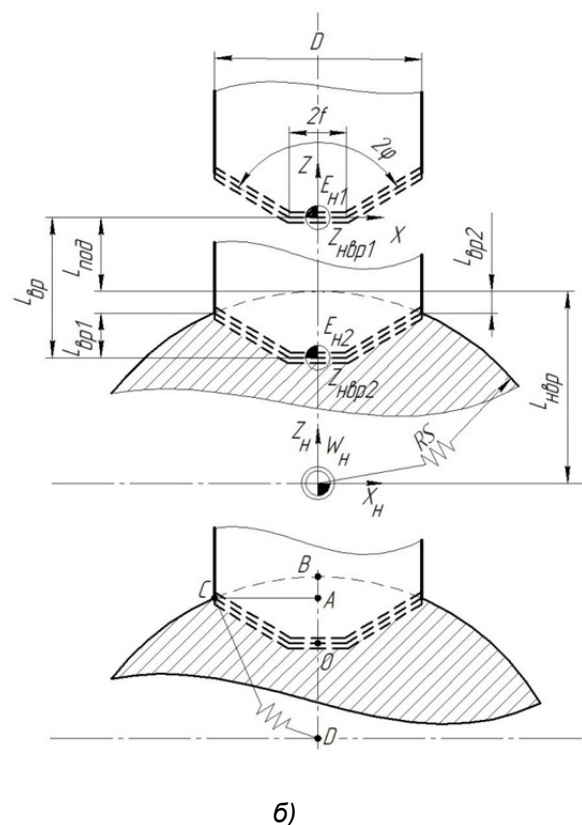
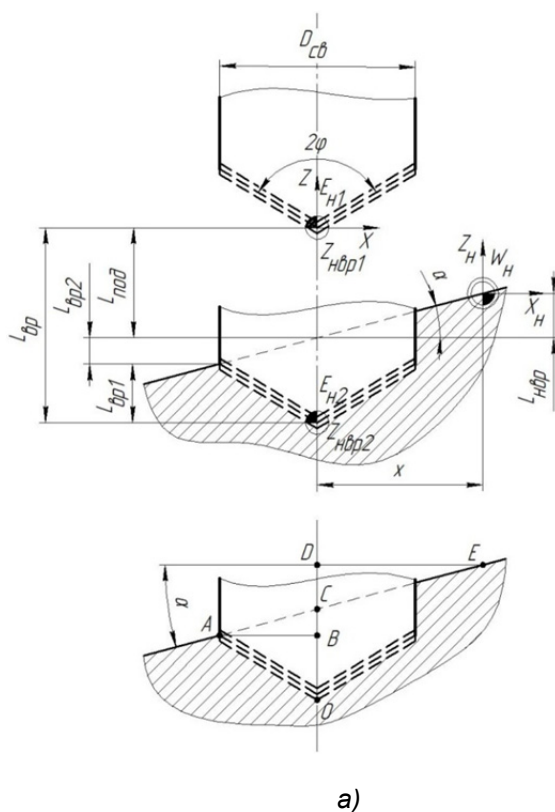


Рисунок 5. — Примеры расчетных схем для определения параметров размерной настройки при врезании сверл: а — под углом; б — по цилиндру симметрично

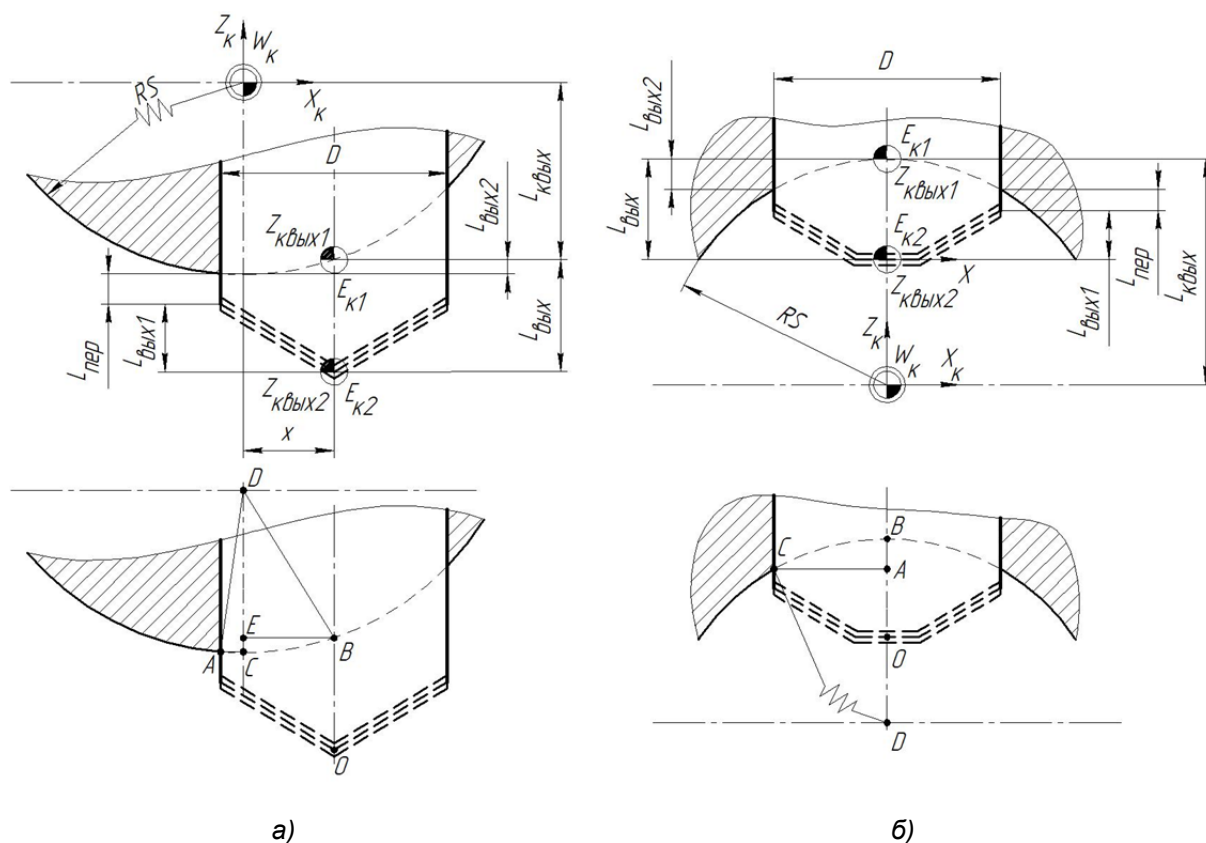


Рисунок 6. — Примеры расчетных схем для определения параметров размерной настройки при выходе сверл: а — по наружному цилиндру со смещением; б — по внутреннему цилиндру симметрично

Согласно рисунку 5, б, из $\triangle ACD$ и $\triangle ABC$

$$L_{\text{нвр}} = DB = RS, \quad L_{\text{вр2}} = AB = BD - AD = BD - \sqrt{BD^2 - AC^2} = RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}.$$

Тогда

$$L_{\text{вр}} = L_{\text{под}} + L_{\text{вр1}} + L_{\text{вр2}} = L_{\text{под}} + L_{\text{вр1}} + \frac{D}{2} \operatorname{tg} \alpha, \quad Z_{\text{нвр1}} = L_{\text{нвр}} + L_{\text{под}} = RS + L_{\text{под}},$$

$$Z_{\text{нвр2}} = L_{\text{нвр}} - L_{\text{вр2}} - L_{\text{вр1}} = RS - \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{\text{вр1}}.$$

Согласно рисунку 6, а, из $\triangle ACD$ и $\triangle BDE$

$$L_{\text{квых}} = DE = \sqrt{BD^2 - BE^2} = \sqrt{RS^2 - x^2},$$

$$L_{\text{вых}2} = CE = \sqrt{AD^2 - AC^2} - \sqrt{BD^2 - BE^2} = \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2}.$$

Тогда

$$L_{\text{вых}} = L_{\text{пер}} + L_{\text{вых}1} - L_{\text{вых}2} = L_{\text{пер}} + L_{\text{вых}1} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2},$$

$$Z_{\text{квых}1} = -L_{\text{квых}} = -\sqrt{RS^2 - x^2},$$

$$Z_{\text{квых}2} = -L_{\text{квых}} - L_{\text{вых}2} - L_{\text{пер}} - L_{\text{вых}1} = -\sqrt{RS^2 - x^2} -$$

$$-\sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2} - L_{\text{пер}} - L_{\text{вых}1}.$$

Согласно рисунку 6, б, из $\triangle ACD$

$$L_{\text{вых}2} = BA = BD - \sqrt{BD^2 - CE^2} = RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$L_{\text{квых}} = BD = RS.$$

Тогда

$$L_{\text{вых}} = L_{\text{пер}} + L_{\text{вых}1} + L_{\text{вых}2} = L_{\text{пер}} + L_{\text{вых}1} + RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2},$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{квых}1} &= L_{\text{квых}} = RS, Z_{\text{квых}2} = L_{\text{квых}} - L_{\text{вых}2} - L_{\text{пер}} - L_{\text{вых}1} = \\ &= RS - \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{\text{пер}} - L_{\text{вых}1}. \end{aligned}$$

Результаты моделирования параметров размерной настройки для сверления сведены в таблицы 2 и 3.

Предложенные методики, модели и алгоритмы позволили создать программное обеспечение DSS определения параметров размерной настройки свёрл и доказать их работоспособность (рисунок 7). При работе с системой пользователь последовательно вводит информацию о геометрии заготовки на входе и выходе инструмента, геометрии режущей части инструмента и режимах резания, а результатом работы являются координаты начального и конечного положений инструмента, величины врезания и выхода, рабочих ходов и основное (машинное) время обработки на участках врезания, выхода и устойчивого резания инструмента.

Т а б л и ц а 2. — Сводная таблица для определения параметров размерной настройки $L_{вр2}$, $L_{нвр}$, $L_{квых}$, $Z_{нвр1}$ и $Z_{нвр2}$

Вход (выход)	$L_{вр2}$	$L_{нвр} = L_{квых}$	$Z_{нвр1}$	$Z_{нвр2}$
Плоскость прямая	0	0	$L_{под}$	$-L_{вр1}$
Плоскость наклонная $\alpha < 0$	$\frac{D}{2} \operatorname{tg} \alpha$	$\frac{x}{\operatorname{ctg} \alpha}$	$-\frac{x}{\operatorname{ctg} \alpha} + L_{под}$	$-\frac{x}{\operatorname{ctg} \alpha} - \frac{D}{2} \operatorname{tg} \alpha - L_{вр1}$
Плоскость наклонная $\alpha > 0$	$\frac{D}{2} \operatorname{tg} \alpha$	$\frac{x}{\operatorname{ctg} \alpha}$	$\frac{x}{\operatorname{ctg} \alpha} + L_{под}$	$\frac{x}{\operatorname{ctg} \alpha} - \frac{D}{2} \operatorname{tg} \alpha - L_{вр1}$
Цилиндр наружный симметрично	$RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$	RS	$RS + L_{под}$	$RS - \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{вр1}$
Цилиндр наружный со смещением	$\sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2}$	$\sqrt{RS^2 - x^2}$	$\sqrt{RS^2 - x^2} + L_{под}$	$\sqrt{RS^2 - x^2} - L_{вр1} - \left(\sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2} \right)$
Цилиндр внутренний симметрично	$RS - \sqrt{RS^2 - \frac{D^2}{4}}$	RS	$-RS + L_{под}$	$-RS - L_{вр1} + \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right)$
Цилиндр внутренний со смещением	$\sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2}$	$\sqrt{RS^2 - x^2}$	$-\sqrt{RS^2 - x^2} + L_{под}$	$-\sqrt{RS^2 - x^2} - L_{вр1} - \left(\sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2} \right)$

Т а б л и ц а 3. — Сводная таблица для определения параметров размерной настройки $L_{\text{вых}2}$, $Z_{\text{квых}1}$ и $Z_{\text{квых}2}$

Вход (выход)	$L_{\text{вых}2}$	$Z_{\text{квых}1}$	$Z_{\text{квых}2}$
Плоскость прямая	0	0	$-L_{\text{вых}1} - L_{\text{пер}}$
Плоскость наклонная $\alpha < 0$	$\frac{D}{2} \operatorname{tg} \alpha$	$-\frac{x}{\operatorname{ctg} \alpha}$	$-\frac{x}{\operatorname{ctg} \alpha} - \frac{D}{2} \operatorname{tg} \alpha - L_{\text{вых}1} - L_{\text{пер}}$
Плоскость наклонная $\alpha > 0$	$\frac{D}{2} \operatorname{tg} \alpha$	$\frac{x}{\operatorname{ctg} \alpha}$	$\frac{x}{\operatorname{ctg} \alpha} - \frac{D}{2} \operatorname{tg} \alpha - L_{\text{вых}1} - L_{\text{пер}}$
Цилиндр наружный симметрично	$RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$	$-RS$	$-RS - L_{\text{вых}1} - L_{\text{пер}} + RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$
Цилиндр наружный со смещением	$\sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2}$	$-\sqrt{RS^2 - x^2}$	$-\sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - L_{\text{пер}} - L_{\text{вых}1}$
Цилиндр внутренний симметрично	$RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$	RS	$-RS + \left(RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{\text{вых}1}$
Цилиндр внутренний со смещением	$\sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2}$	$\sqrt{RS^2 - x^2}$	$\sqrt{RS^2 - x^2} - L_{\text{вых}1} - L_{\text{пер}} - \left(\sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2} \right)$

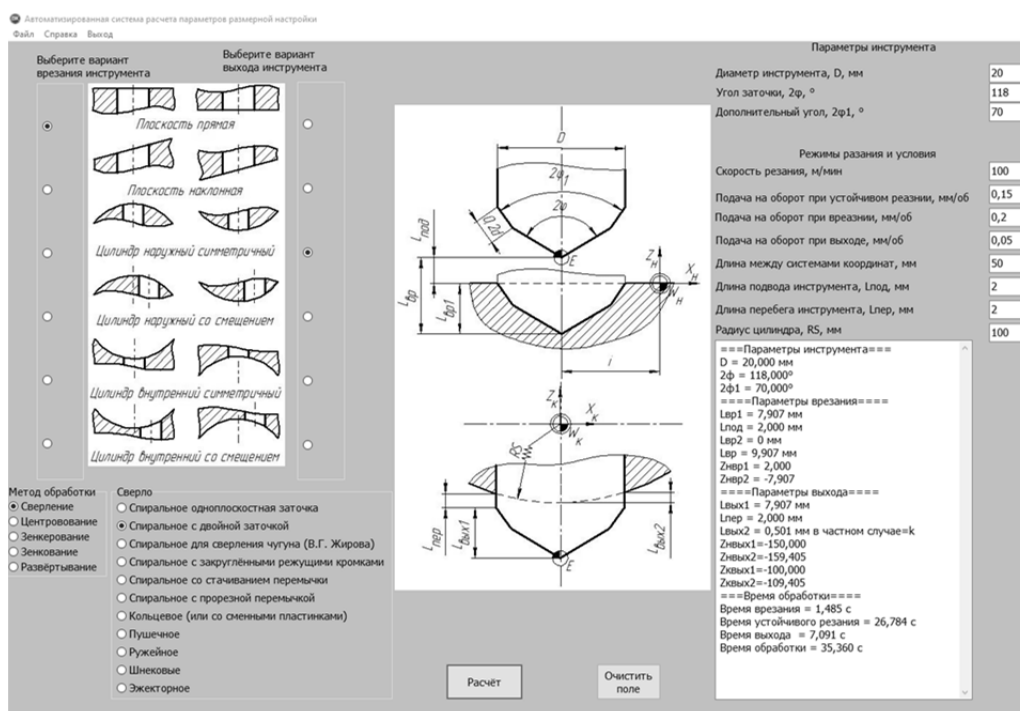


Рисунок 7. — Интерфейс программного обеспечения

Заключение. Для развития процессов цифровизации на машиностроительных предприятиях предложен подход к моделированию длин рабочих ходов, минимальных величин врезаний и выходов, координат начальных, промежуточных и конечных положений сверл в зависимости от условий врезания, выхода и геометрических параметров их режущих частей с учетом границ переходных процессов. Представление разработанных моделей на языке теории автоматизации проектирования, алгебры логики и теории алгоритмов позволило создать систему поддержки принятия решений для автоматизированного определения указанных параметров размерной настройки свёрл для программирования обработки отверстий на металлорежущих станках с ЧПУ и доказать их работоспособность.

Система прошла опытную эксплуатацию в учебном процессе кафедр технологии и оборудования машиностроительного производства учреждений образования «Витебский государственный технологический университет» и «Полоцкий государственный университет». Использование системы дает возможность: снизить затраты на обработку отверстий сверлами из-за сокращения основного (машинного) времени за счет минимизации величин рабочих ходов инструментов; повысить срок службы и период стойкости инструмента за счет назначения щадящих режимов резания на участках динамических изменений сил резания при врезании и выходе свёрл; улучшить показатели качества поверхности на участке врезания и выхода инструмента.

Разработки могут использоваться в проектных бюро машиностроительных предприятий при размерной настройке металлорежущих станков и проектировании их наладок, разработке управляющих программ для станков с ЧПУ, в организациях, специализирующихся на разработке систем автоматизированного проектирования для разработки и совершенствования САМ-систем, в учебном процессе для подготовки специалистов в области технологии машиностроения.

Список цитированных источников

1. Компас 3D. Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/module-chpu-fo/>. — Дата доступа: 30.09.2023.
2. T-FLEX ЧПУ 3D [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.tflex.ru/products/uprav/chpu3d/>. — Дата доступа: 30.09.2023.
3. SiemensNX [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/>. — Дата доступа: 30.09.2023.
4. MasterCAM [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mastercam-russia.ru/index.html>. — Дата доступа: 30.09.2023.
5. Система автоматизированного расчета параметров размерной настройки концевых фрез для обработки плоских поверхностей на станках с ЧПУ / Н. В. Беляков [и др.] // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. — 2021. — № 40 (1). — С. 39—50.
6. Попок, Н. Н. Система поддержки принятия решений по размерной настройке торцовых фрез для программирования обработки на станках с ЧПУ / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков, В. В. Янович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. — 2021. — № 11. — С. 7—17.
7. Калькулятор режимов резания Iskar [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mpwr.iscar.com/MachiningPower>. — Дата доступа: 30.09.2023.
8. Калькулятор режимов резания Walter [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.walter-tools.com/ru-ru/press/media-portal/apps/tools-more/pages/default.aspx>. — Дата доступа: 22.09.2023.
9. Способ регистрации начала переходного процесса при выходе сверла из отверстия : пат. 859110 СССР / С. Г. Нагорняк ; дата опубл.: 30.08.1981.
10. Адаптивная система управления станком : пат. 8437 Респ. Беларусь / И. А. Каштальян, М. К. Цыркунов, Ю. М. Цыркунов, П. К. Жуковский ; дата опубл.: 30.12.2006.
11. Использование датчиков адаптивного управления для повышения качества обработки деталей на станках с ЧПУ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/56/7662/>. — Дата доступа: 22.09.2023.
12. Реализация функции адаптивного управления нестационарными процессами резания на станках с ЧПУ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/67750>. — Дата доступа: 22.09.2023.
13. Справочник технолога машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина. — 6-е изд., перераб. и доп. — М. : Инновац. машиностроение, 2018. — Т. 2. — 818 с.
14. Схиртладзе, А. Г. Проектирование технологических процессов в машиностроении : учеб. пособие / А. Г. Схиртладзе, В. П. Пучков, Н. М. Прис. — Старый Оскол : ТНТ, 2019. — 408 с.

Поступила в редакцию 04.10.2023.

УДК 621.9:631.878

А. Э. Юницкий¹, доктор философии транспорта,**Н. С. Першай**², кандидат технических наук,**С. А. Арнаут**³, кандидат технических наук^{1, 2, 3}Закрытое акционерное общество «Струнные технологии», 220089 Минск, ул. Железнодорожная, 33,
Республика Беларусь, ²n.pershai@unitsky.com¹Общество с ограниченной ответственностью «Астроинженерные технологии», 220089 Минск,
ул. Железнодорожная, 33, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОУДАРА НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ БУРОГО УГЛЯ КАК КОМПОНЕНТА ПОЧВОГРУНТА

В работе рассмотрено применение электрогидроудара для измельчения бурого угля в качестве компонента почвогрунта при выращивании растений. Представлены результаты влияния различных факторов на качество измельчения бурого угля в электрогидроударной установке. Подобраны оптимальные режимы работы электрогидроударной установки (рабочий зазор, загрузка, исходная фракция) в зависимости от исходного сырья для получения почвогрунтов с использованием измельчённого бурого угля в качестве органической составляющей для выращивания растений.

Ключевые слова: электрогидроударная установка; измельчение; бурый уголь; почвогрунт.

Рис. 7. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

A. E. Unitsky¹, DSc in Philosophy of Transport,**N. Pershai**², PhD in Technical Sciences,**S. Arnaut**³, PhD in Technical Sciences^{1, 2, 3}Unitsky String Technologies, Inc., 33 Zheleznodorozhnaya Str., 220089 Minsk, the Republic of Belarus,
²n.pershai@unitsky.com¹Astroengineering technologies, LLC, 33 Zheleznodorozhnaya Str., 220089 Minsk, the Republic of Belarus

INFLUENCE OF ELECTROHYDRAULIC IMPACT ON THE BROWN COAL GRINDING AS A SOIL COMPONENT

The use of an electrohydrostrike for brown coal grinding as a component of the soil when growing plants has been studied. The results of various factors on the quality of brown coals grinding using an electrohydraulic impact installation are presented. The optimal operating modes of the electro-hydraulic equipment (working gap, loading, initial fraction) have been selected depending on the raw materials for the soil using grinded brown coal as an organic raw material for growing plants.

Key words: electrohydraulic equipment; grinding; brown coal; soil.

Fig. 7. Table 1. Ref.: 10 titles.

Введение. Биогумус является основой плодородия почв и здоровья человека. Для обеспечения продовольственной безопасности человечества огромное значение имеет состояние земель, которые дают людям всё необходимое для пищи. Уже больше века происходит масштабное использование в сельском хозяйстве минеральных удобрений и ядохимикатов, что приводит к катастрофическому ухудшению биогеоценозов почв и продуктов питания, выращенных на этих почвах. Это влечет за собой нарушение круговорота живого вещества, формировавшегося в течение миллионов лет эволюции, деградацию плодородного слоя почвы и, соответственно, ухудшение здоровья человечества. В живой природе все процессы протекают по принципу круговорота веществ, так, например, все органические отходы перерабатываются в плодородный слой почвы (гумус) с помощью нескольких тысяч видов почвенных микроорганизмов.

Восстановить плодородие почв возможно только с помощью органического удобрения — биогумуса, который представляет собой органическое вещество, получаемое в процессе жизнедеятельности дождевых червей и продуцируемых ими ассоциаций тысяч видов агрономически ценных аэробных и анаэробных почвенных микроорганизмов. Гумус — основная органическая часть почвы, содержащая комплекс питательных веществ, необходимых растениям, в том числе нерастворимые соли гуминовых кислот. Гумус улучшает физические свойства почвы, является отличным хранилищем питательных элементов, создаёт прочную почвенную структуру, которая обеспечивает благоприятную циркуляцию воды и воздуха.

Бурые угли характеризуются повышенным содержанием фенольных, карбоксильных и гидроксильных групп, наличием свободных гуминовых кислот (до 64 %). Среднее содержание минерального остатка (зола) бурых углей составляет 20...45 % от массы сухого вещества. Основными компонентами золы углей являются диоксид кремния (около 30...60 %), оксид алюминия (порядка 10...20 %), а также оксиды кальция (7...15 %) и железа (8...15 %). Элементный состав золы сильно зависит не только от доминирующих пород исходных растений, но и от условий формирования угольного пласта (глубина залегания, подземные водоёмы, состав почвы на данной глубине и др.) [1].

Бурые угли также используются в качестве источника получения биогумуса — основы плодородия почв. Для получения биогумуса сотрудниками компании ЗАО «Струнные технологии» была разработана технология получения почвогрунтов и органических биоудобрений под торговыми марками «Биогумус uTeга» и «Эликсир плодородия uTeга» [2; 3], одним из компонентов которых является измельчённый бурый уголь как источник гуминовых кислот, макро- и микроэлементов. Внесение в грунт такого биогумуса от 2 % даже песок пустыни превращает в плодородную почву. В ряде работ [4—6] опубликованы результаты применения биогумуса uTeга при выращивании растений, показывающие его высокую эффективность, в том числе при использовании в замкнутых экосистемах, теплицах, оранжереях и т. п.

Основным технологическим параметром оценки качества измельчения бурого угля является гранулометрический состав, поэтому важно правильно подобрать оборудование для осуществления этого процесса. Для получения почвогрунтов подходит измельчённый бурый уголь крупностью 150 мкм и менее, при этом чем меньше размер частиц, тем быстрее органическое вещество будет преобразовано почвенными микроорганизмами в усвояемую для растений форму. Данная стадия технологического процесса является ещё и самой энергозатратной. Подбор оборудования для измельчения со сниженным энергопотреблением позволит понизить технологические затраты на производство почвогрунтов и удобрений, а также повысить их полезные свойства.

В качестве альтернативы традиционным способам измельчения угля обращают на себя внимание электрогидроударные установки (далее — ЭГУ). Использование ЭГУ в промышленности достаточно разнообразно [7]. Известно около 35 направлений применения их в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, энергетике: дробление материалов, обогащение руд, извлечение остаточных полезных ископаемых, разрушение различного рода объектов, смешивание растворов, очистка поверхностей и др.

Принцип работы таких установок основан на электрогидравлическом эффекте (эффект Юткина), сущность которого заключается в преобразовании электрической энергии в механическую с высоким КПД без применения механических звеньев. Происходит это за счёт того, что внутри объёма жидкости протекает специально сформированный импульсный электрический разряд, вокруг зоны его образования возникают сверхвысокие импульсные давления, способные совершать механическую работу и сопровождающиеся комплексом физико-химических явлений [7]. Один из главных плюсов использования электрогидроударной технологии — экологичность, пожаро- и взрывобезопасность.

Несмотря на известность и применение в различных отраслях электрогидравлического удара для измельчения природных материалов, в открытых источниках отсутствует информация о влиянии природы сырья, технологических параметров измельчения бурого угля на ЭГУ как в целом, так и в разрезе использования его в качестве компонента почвогрунта. Чаще всего в работах имеется разрозненная информация, касающаяся только каких-то отдельных аспектов эффекта Юткина либо общего плана, что не позволяло использовать её на практике в реальных условиях.

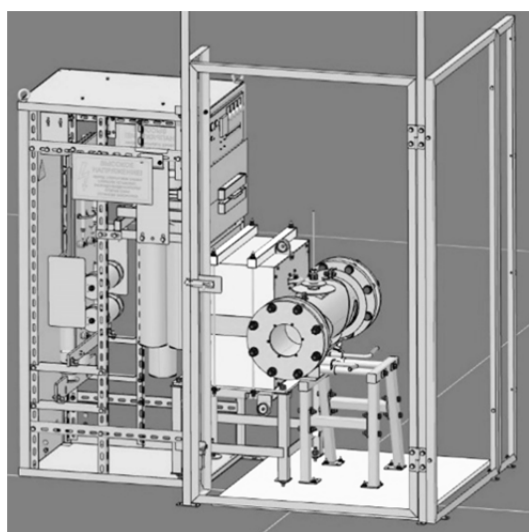
В связи с этим цель настоящей работы заключалась в определении влияния различных параметров работы ЭГУ на качество измельчения бурого угля для получения почвогрунтов.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились на ЭГУ UniThorr, разработанной специалистами белорусской научно-инжиниринговой компании ЗАО «Струнные технологии» (рисунок 1, а). Основными элементами установки являются генератор импульсных токов и рабочая камера. Рабочая камера с расположенными внутри неё отрицательным и положительным электродами представляет собой ёмкость, в которую загружают бурый уголь и подают воду. Упрощённая электрическая схема ЭГУ представлена на рисунке 1, б.

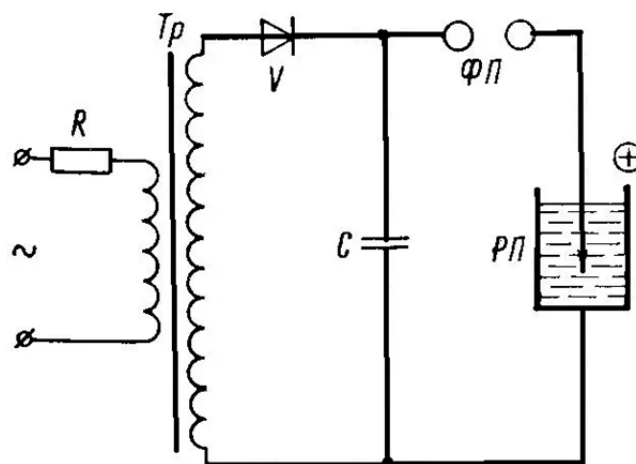
Установка работает следующим образом. От высоковольтного трансформатора T_p через выпрямитель V и зарядное сопротивление R заряжается конденсаторная батарея C . Напряжение заряда конденсатора измеряется с помощью киловольтметра. При достижении требуемого напряжения по воздушному промежутку ФП происходит подача напряжения на положительный электрод, расположенный в рабочей камере. Замыкание разрядного промежутка РП осуществляется искровым пробоем в жидкости между положительным и отрицательным электродами, расположенными внутри рабочей камеры. Отрицательный электрод представляет собой металлическую пластину, встроенную в дно камеры, положительный имеет вид «карандаша» из диэлектрика, внутри которого находится металлический прут.

Данная установка разрабатывалась для измельчения бурого угля и обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными моделями:

- 1) улучшенная конструкция, обеспечивающая минимальную индуктивность разрядного контура при высоких скоростях нарастания тока;
- 2) компактность, позволяющая использовать её в передвижных мобильных комплексах;



а)



б)

Рисунок 1. — ЭГУ UniThorr: а — модель; б — упрощённая электрическая схема

3) оснащённость автоматизированной системой мониторинга высоковольтных импульсов. Это даёт возможность обслуживающему персоналу оперативно отслеживать эффективность работы установки;

4) модернизированная конструкция положительного электрода, способствующая увеличению ресурса его работы в жидкой среде с повышенной удельной электропроводностью.

Основные технические характеристики, обеспечивающие работу ЭГУ UniThorr: энергия в импульсе — 300 Дж, зарядное напряжение — от 40 до 50 кВ, сила тока — 15...20 кА, ёмкость конденсаторной батареи C — от 0,2 до 0,4 мкФ, объём рабочей камеры — 9 л, длина разрядного промежутка — от 10 до 50 мм.

Для проведения исследований был использован бурый уголь двух месторождений марки Б1: российский и казахстанский. Диапазон исходной фракции составлял от 0 до 50 мм. Масса загрузки варьировалась от 1,0 до 2,5 кг. В качестве рабочей жидкости использовали водопроводную воду. Объём воды, загружаемый в разрядную камеру, зависел от соотношения «уголь / вода» и массы загрузки.

Бурый уголь определённой фракции или нефракционированный (в зависимости от целей эксперимента) в виде водоугольной суспензии загружался в рабочую камеру и обрабатывался от 0 до 60 мин. Через заданный промежуток времени проводился отбор проб. Время отбора варьировалось от 2 до 10 минут. Гранулометрический анализ образцов ситовым методом проводили по методике [8]. Для количественной оценки частиц размером менее 500 мкм использован метод лазерной дифракции на лазерном анализаторе размера частиц Analysette 22. Микрофотографии с определением химического состава зольных остатков бурого угля получали с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-5610LV с системой химического анализа JEOL JED-2201. Определение гуминовых веществ в буром угле проводили по методике [9], зольность — по [10].

Результаты исследования и их обсуждение. Для оценки качества измельчения проводился гранулометрический анализ с построением гистограмм распределения частиц для каждого образца. Анализ гистограмм показал эффективное измельчение бурого угля в течение 10 мин с получением частиц менее 150 мкм, подходящих для получения почвогрунтов, биогумуса, органических удобрений. Проведённый анализ гистограмм образцов показал, что полученный методом электрогидравлического удара измельчённый бурый уголь полидисперсен, о чём свидетельствуют несколько (2-3) пиков на гистограммах.

На рисунке 2 представлены данные по распределению частиц по размеру фракции менее 400 мкм: около 30 % приходится на частицы размером 100...200 мкм, 25 % — 50...100 мкм, 20 % — 20...50 мкм, 10 % — менее 20 мкм, остальное — 200...400 мкм.

При тонком измельчении природных материалов наблюдается два одновременно протекающих процесса: разрушение частиц внешней силой и самопроизвольная агрегация частиц. Оба процесса зависят от природы внешней среды и условий её взаимодействия с частицами измельчаемого материала. При тонком измельчении вследствие относительно развитой поверхности частиц влияние среды на процесс измельчения особенно велико.

В процессе проведения исследований установлено, что увеличение времени обработки более 10 мин не приводит к значительному увеличению доли частиц размером менее 250 мкм (рисунок 3): 35 % приходится на частицы с размером 100...200 мкм, 25 % — на частицы размером 50...100 мкм, 15 % — 20...50 мкм. Это связано с протеканием указанных выше процессов — измельчением и коагуляцией. Возможно, при переходе на камеру непрерывного режима работы при отведении суспензии с частицами менее 250 мкм скорость процесса коагуляции будет снижена.

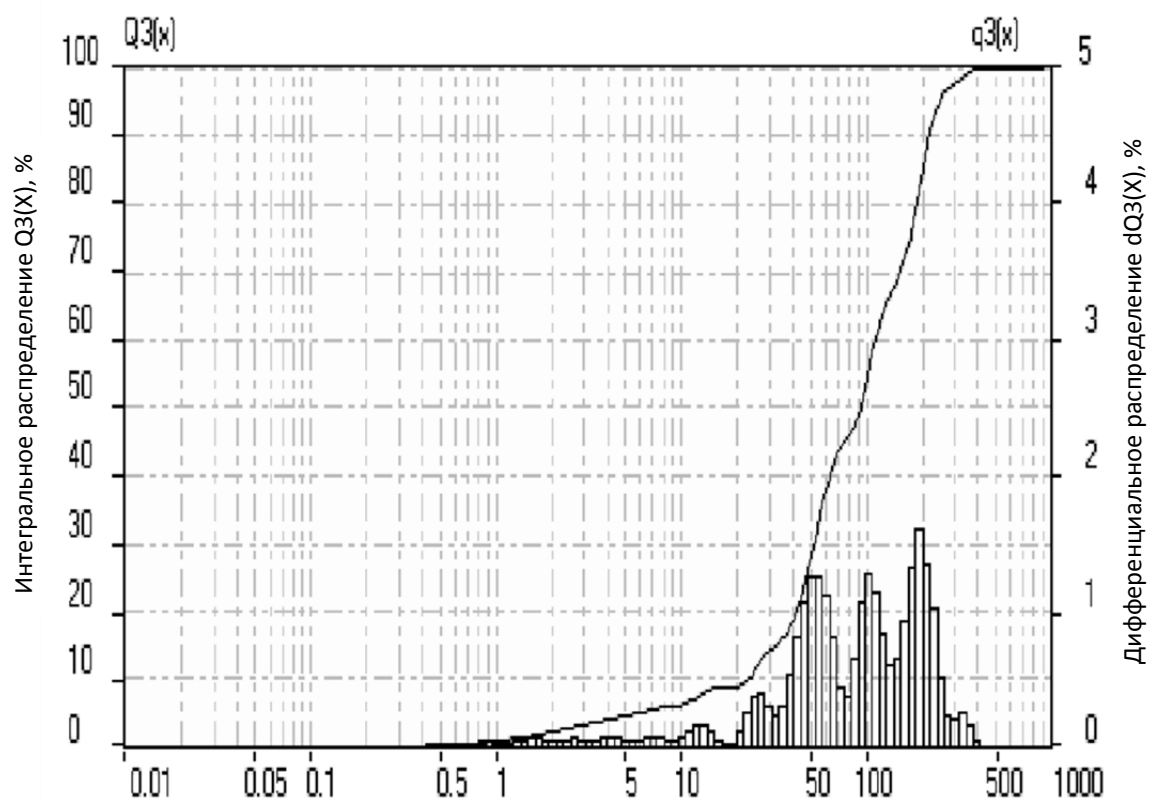


Рисунок 2. — Гистограмма распределения частиц по размерам и дифференциальная кривая распределения частиц бурого угля после измельчения на ЭГУ UniThorr в течение 10 мин

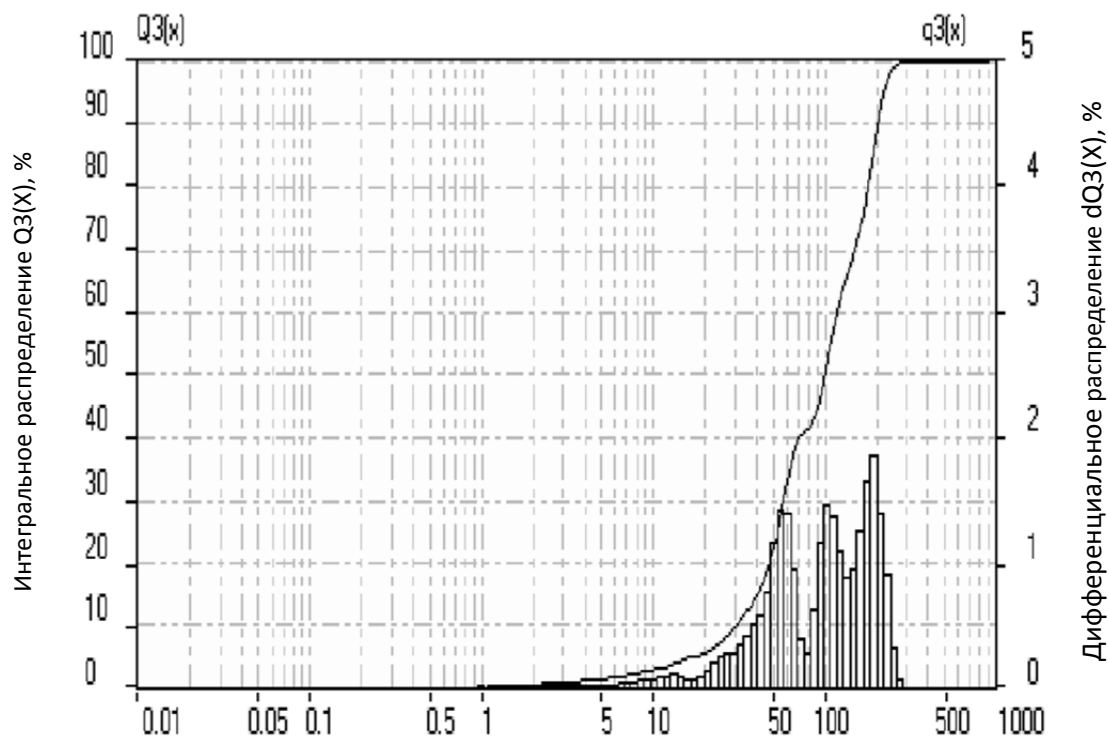


Рисунок 3. — Гистограмма распределения частиц по размерам и дифференциальная кривая распределения частиц бурого угля после измельчения на ЭГУ UniThorr в течение 15 мин

Чем шире диапазон изменения размеров частиц при неизменном среднем диаметре, тем больше общее число частиц, а значит, и число контактов между ними. Важно при этом не только снизить пустотность, но и уменьшить средний размер пор. Снизить пустотность можно добавлением частиц размером менее 100 мкм путём разделения водоугольной суспензии в проточном режиме с применением системы освещения (рисунки 4, 5). Таким образом, получается многокомпонентная смесь с более компактной структурой.

Использование в данном случае «гибкой» технологической схемы обеспечивает возможность варьирования характеристик исходного и готового продуктов за счёт изменения режимов работы оборудования, т. е. получения суспензии с требуемым содержанием частиц заданных размеров.

Исследования влияния размера исходной фракции показали, что между результатами измельчения исходной фракции угля с размерами 3...5, 5...7 и 7...50 мм нет значительных различий, поэтому дальнейшие эксперименты проводились с исходной фракцией угля 7...50 мм. Это связано с тем, что частицы более крупного размера разрушаются быстро и дальнейшее измельчение происходит с такой же скоростью, как и для фракции 3...5 мм.

В зависимости от размера исходной фракции и времени обработки исследовали измельчённый бурый уголь на электронном сканирующем микроскопе. Использование исходного нефракционированного бурого угля (размер фракции угля — 0...50 мм) приводит к ухудшению качества измельчения даже при более длительном измельчении (более 15 мин). Форма частиц имеет более вытянутую форму. Полученный измельчённый бурый уголь имеет высокую неоднородность состава (рисунок 6).

При использовании фракционированного бурого угля (фракции 3...5, 5...7, 7...50 мм) после измельчения на ЭГУ наблюдается однородность измельчения с получением частиц более округлой формы (рисунок 7).

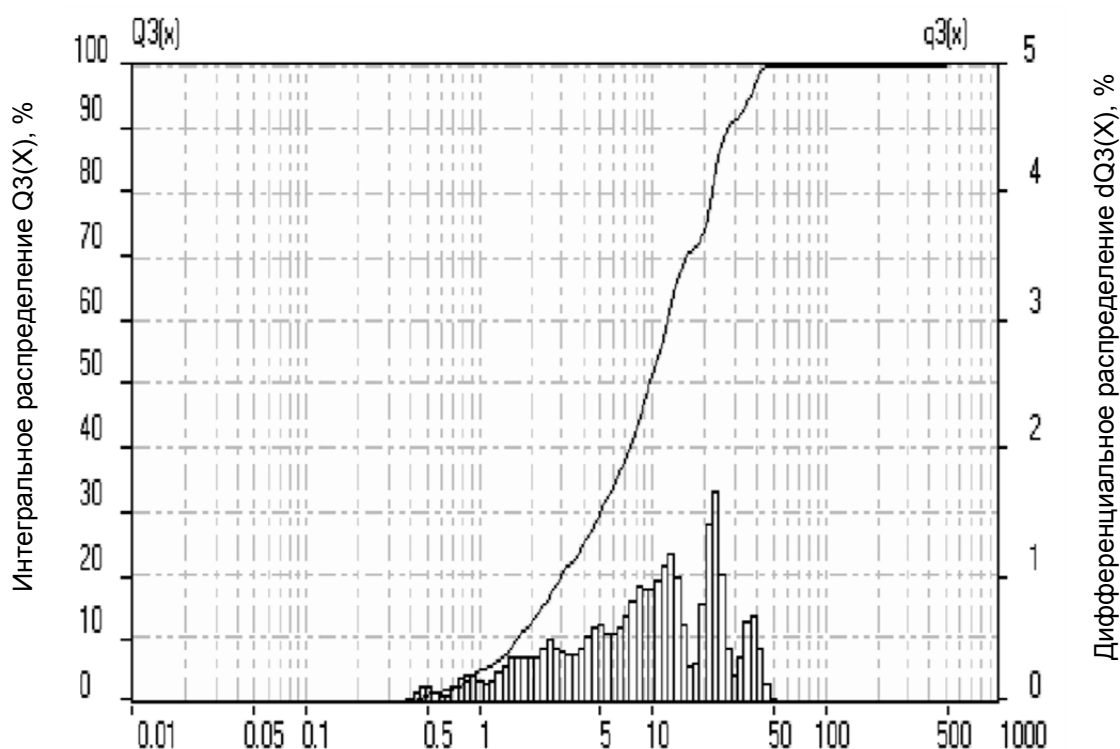


Рисунок 4. — Гистограмма распределения частиц по размерам и дифференциальная кривая распределения частиц бурого угля после измельчения на ЭГУ UniThorr из системы освещения

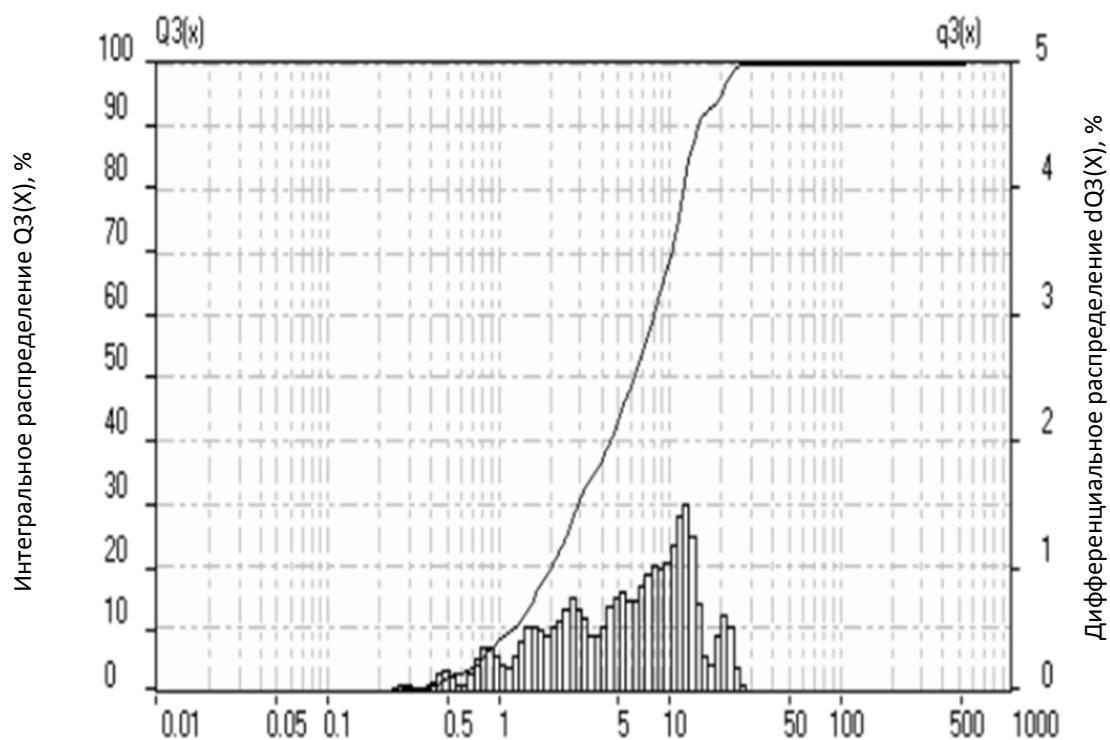


Рисунок 5. — Гистограмма распределения частиц по размерам и дифференциальная кривая распределения частиц бурого угля после измельчения на ЭГУ UniThorr из системы освещения



Рисунок 6. — Электронно-микроскопическое изображение структуры образца бурого угля (без предварительного фракционирования) после измельчения в течение 15 мин

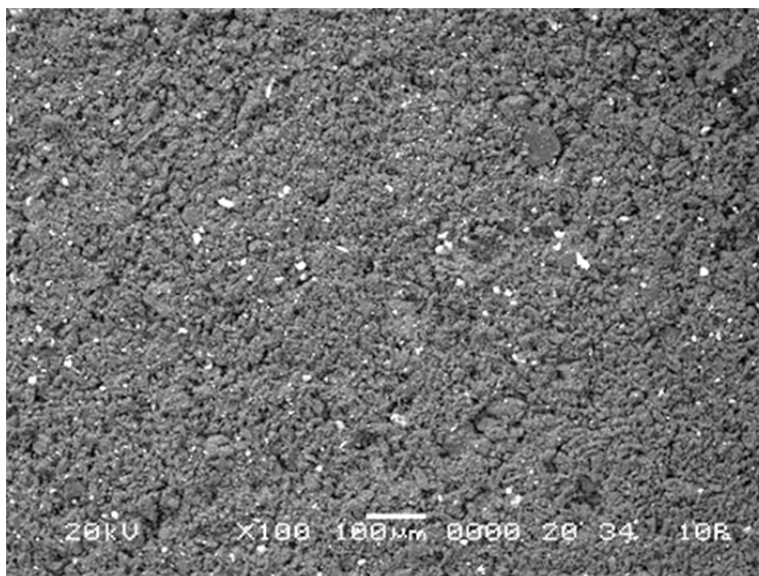


Рисунок 7. — Электронно-микроскопическое изображение структуры образца бурого угля (исходная фракция — 3...5 мм) после измельчения в течение 10 мин

Исследования влияния природы исходного сырья показали, что на начальном этапе измельчения физико-химические свойства угля оказывают влияние на работу установки и требуют корректировки технологического процесса с учётом особенностей сырья. На конечный результат измельчения после корректировки параметров работы ЭГУ природа сырья практически не влияет. Таким образом, параметры установки необходимо подбирать под конкретное исходное сырье.

Основное влияние на корректировку параметров оказывает такой параметр, как удельная электропроводность водоугольной суспензии, которая зависит от содержания в буром угле водорастворимых минеральных веществ. Бурый уголь состоит из минеральной и органической составляющих, причём на минеральную часть может приходиться до 45 % и более от общей массы угля. В нашем случае зольность составляла 12,6 и 3,6 % (таблица 1).

Таблица 1. — Изменение параметров бурого угля после обработки на ЭГУ

Наименование сырья	Время обработки, мин	Количество импульсов, шт.	Зольность, %	Удельная электропроводность, мкСм / см	Массовая доля гуминовых веществ, %		
					Всего, %	из них	
						ГК	ФК
Бурый уголь казахстанский	0	0	12,6	290	29,3	16,9	12,2
	3	134	8,3	950	34,4	19,3	15,1
	6	360	7,9	1 280	33,4	18,2	15,2
	12	720	7,4	1 520	35,8	20,5	15,3
Бурый уголь российский	0	0	3,6	290	29,6	13,4	16,2
	3	134	3,3	610	32,2	15,9	16,3
	6	360	3,5	640	40,8	16,6	24,2
	12	720	3,5	960	38,9	15,3	23,6

Примечание. ГК — гуминовые кислоты, ФК — фульвовые кислоты.

Повышение удельной электропроводности свыше 1 200 мкСм / см приводит к ухудшению качества измельчения за счёт того, что полезная работа импульса идёт главным образом на нагрев рабочей среды.

Экспериментально установлено, что в процессе работы установки удельная электропроводность увеличивается за счёт перехода в водный раствор водорастворимых минеральных компонентов бурого угля (например, зольность казахстанского бурого угля снижается до 40 %) (см. таблицу 1). Химический анализ зольного остатка измельчённого угля показал снижение содержания ряда элементов, которые переходят в раствор: кальций — с 1,48 до 0,37 % масс., магний — с 0,16 до 0,04 % масс., натрий — 0,02 до 0,005 % масс.

Кроме того, обработка бурого угля на ЭГУ UniThorг приводит к увеличению общего выхода гуминовых веществ на 18...27 % (см. таблицу 1), что связано с разрывом химических связей в процессе измельчения, а значит, и повышением их лабильности. При этом существенно увеличивается выход фульвовых кислот, чем гуминовых.

Увеличение выхода гуминовых веществ и водорастворимых солей благоприятно сказывается на характеристиках почвогрунтов, так как данные компоненты необходимы для роста и развития растений [4—6].

Влияние размера рабочего зазора между положительным и отрицательным электродами весьма значимо, особенно при увеличении удельной проводимости среды. Оптимальный рабочий зазор составлял 30...35 мм для данной рабочей камеры и одинаковых условий работы установки. Увеличение рабочего зазора приводит к снижению качества измельчения и увеличению доли частиц размером более 250 нм.

Экспериментально подтверждено, что получаемый гранулометрический состав угля зависит от природы сырья, технологических параметров (загрузка, время измельчения, удельная проводимость среды и др.), параметров самой установки (энергия в импульсе, рабочий зазор, индуктивность, частота импульсов и др.).

Таким образом, на основании полученных данных были определены требования к исходному сырью и подобраны оптимальные режимы работы ЭГУ UniThorг в зависимости от характеристик исходного сырья: рабочий зазор — 30...40 мм; время работы — до 10 мин (до 600 импульсов); объём подаваемого угля — 1,0...1,5 л; объём жидкости — до 5,0 л; исходная фракция — 7...50 мм. Дальнейшая работа будет направлена на увеличение эффективности работы ЭГУ и улучшение её конструктивных элементов.

Заключение. Приведены краткие результаты исследований по измельчению бурого угля на ЭГУ как компонента почвогрунтов и жидких органических гуминовых удобрений. Описаны основные результаты по влиянию различных технологических параметров на качество измельчения бурого угля:

- природа сырья влияет на скорость измельчения бурого угля, величину удельной электропроводности водоугольной суспензии, что потребовало разработки «гибкой» технологической схемы измельчения на ЭГУ;
- размер исходной фракции (до 50 мм) не оказывает существенного влияния на качество измельчения исходного сырья, что позволило исключить стадию предварительного фракционирования перед загрузкой сырья в рабочую камеру;
- величина рабочего зазора между электродами зависит от электрических параметров ЭГУ и удельной проводимости рабочей среды.

Список цитированных источников

1. *Агроскин, А. А.* Химия и технология угля / А. А. Агроскин. — М. : Недра, 1969. — 240 с.
2. *uTerra — Биогумус* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://big-fish.by/catalog/yuniterra-innovatsionnoe-zemledelie/>. — Дата доступа: 25.09.2023.
3. Мелиорант-почвоулучшитель «Гумус Uniterra». Технические условия : ТУ ВУ 691935133.002-2019. — Введ. 19.03.2019. — Минск : Госстандарт : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2019. — 12 с.
4. *Юницкий, А. Э.* Использование кровель зданий различного назначения под размещение оранжерей: особенности и оптимальные решения. Перспективные составы и способы производства лёгких почвогрунтов для ЭкоКосмоДома / А. Э. Юницкий, М. М. Давыдик, Н. С. Зыль // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23—24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А. Э. Юницкого. — Минск : СтройМедиаПроект, 2023. — С. 136—151.
5. Плодородие и физико-химические показатели «космических» почвогрунтов для ЭкоКосмоДома / А. Э. Юницкий [и др.] // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23—24 сент. 2021 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А. Э. Юницкого. — Минск : СтройМедиаПроект, 2022. — С. 312—328.
6. Перспективные составы и способы производства лёгких почвогрунтов для ЭкоКосмоДома / А. Э. Юницкий [и др.] // Безракетная индустриализация космоса: проблемы, идеи, проекты : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Марьина Горка, 23—24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии»; под общ. ред. А. Э. Юницкого. — Минск : СтройМедиаПроект, 2023. — С. 250—261.
7. *Юткин, Л. А.* Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. — Л. : Машиностроение, 1986. — 253 с.
8. Топливо твёрдое. Ситовый метод определения гранулометрического состава : ГОСТ 2093-82. — Взамен ГОСТ 2093-77 ; введ. 01.01.97. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 2001. — 19 с.
9. ГОСТ 9517-76. Угли бурые и каменные. Методы определения выхода гуминовых кислот. — Взамен ГОСТ 9517-69 ; введ. 01.07.77. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 1987. — 6 с.
10. Топливо твёрдое минеральное. Определение зольности : ГОСТ 55661-2013. — Введ. 01.01.2015. — М. : Стандартинформ, 2014. — 29 с.

Поступила в редакцию 20.10.2023.

УДК 637.116.2

А. В. Китун¹, доктор технических наук, профессор,

С. Н. Бондарев²

^{1,2}Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 899 80 92,

¹seregabondarev1991@yandex.ru

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СОСКА ВЫМЕНИ КОРОВЫ С СОСКОВОЙ РЕЗИНОЙ
ДОИЛЬНОГО СТАКАНА ПРИ ТАКТЕ «СЖАТИЕ»**

Проведены фундаментальные исследования по определению факторов силового воздействия на сосок вымени коровы сосковой резиной доильного стакана при такте «сжатие». Установлено, что нормальная сила сжатия соска вымени коровы во время такта «сжатие» формируется из силы его обжатия сосковой резиной и сжатия при вакууме в подсосковой камере доильного стакана и атмосферном давлении в межстенной камере. Усилие действия нормальной силы сжатия соска вымени коровы во время такта «сжатие» зависит от диаметра соска и внутренней поверхности сосковой резины. Решение проблемы адекватного воздействия на сосок вымени коровы возможно в перераспределении давления на тело соска при изменении его формы и размеров.

Ключевые слова: машинное доение; энергоемкость; доильный стакан; пористая полость; сила обжатия.

Рис. 3. Библиогр.: 3 назв.

A. V. Kitun¹, DSc in Technical Sciences, Professor,

S. N. Bondarev²

^{1,2}Institution of Education “Belarusian State Agrarian Technical University”, 99 Nezavisimosti Ave.,
220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 899 80 92, ¹seregabondarev1991@yandex.ru

**DETERMINATION OF THE COW UDDER NIPPLE FORCE
INTERACTION WITH TEAT RUBBER OF THE MILKING CUP
AT THE “COMPRESSION” STROKE**

Fundamental studies to determine the factors of the force effect of the cow's udder on the nipple with the milking cup nipple rubber at the “compression” stroke have been carried out. It has been established that the normal compression force of the cow udder nipple during the “compression” stroke is formed from the force of its compression of the nipple rubber and compression under vacuum in the suction chamber of the milking cup and atmospheric pressure in the inter-wall chamber. The force of the normal compression force of the cow's udder nipple during the “compression” stroke depends on the nipple diameter and the nipple rubber inner surface. The solution to the problem of adequate impact on cow's udder nipple is possible in the redistribution of pressure on the body of the nipple when its shape and size change.

Key words: machine milking; energy intensity; milking cup; porous cavity; compression force.

Fig. 3. Ref.: 3 titles.

Введение. Машинное доение облегчает труд, значительно повышает его производительность и способствует улучшению санитарного качества молока. Для реализации машинного доения коров на животноводческих фермах применяют доильные установки. Технологический процесс выдаивания коровы на доильной установке реализуется за счет создания вакуума в ее основном исполнительном рабочем органе — доильном аппарате.

Доильный аппарат состоит из доильных стаканов, соединенных патрубками с коллектором, и пульсатора, обеспечивающего преобразование постоянного вакуума в переменный и выполнение основных технологических параметров.

По принципу действия доильные аппараты бывают двухтактные (сосание и сжатие) и трехтактные (сосание, сжатие, отдых). Во время выполнения такта «сжатие» в подсосковой камере доильного стакана вакуумным насосом создается вакуум, а в межстенной камере — атмосферное давление. В результате разности давлений — вакуумметрического и атмосферного — стенки сосковой резины сжимают сосок вымени коровы.

Таким образом, при доении коровы на молочную железу соска вымени коровы оказывается силовое воздействие сосковой резины при такте «сжатие».

Для определения силы сжатия соска вымени животного рассмотрим силовые взаимодействия тела соска с сосковой резиной при выполнении такта «сжатие».

По истечении такта «сжатие» давление в подсосковой и межстенной камерах выравнивается, наступает следующий такт машинного доения.

Материалы и методы исследования. На соске вымени коровы можно выделить следующие части — устье, тело и кончик соска [1].

При реализации процесса доения коровы доильные стаканы одеваются на соски вымени животного. Так как диаметр соска меньше внутреннего диаметра сосковой резины (рисунок 1), происходит обжатие тела соска вымени коровы. В этом случае на тело соска действует сила обжатия $P_{\text{обж. тела}}$.

Силу обжатия тела $P_{\text{обж. тела}}$, Н, можно определить по формуле

$$P_{\text{обж. тела}} = \mu \frac{E d_{\text{обж}}^2}{2 d_{\text{т.с}}},$$

где μ — коэффициент Пуассона;

E — модуль деформации сосковой резины, Н / м²;

$d_{\text{обж}}$ — диаметр тела соска вымени коровы при сжатии, м;

$d_{\text{т.с}}$ — диаметр тела соска вымени коровы, м.

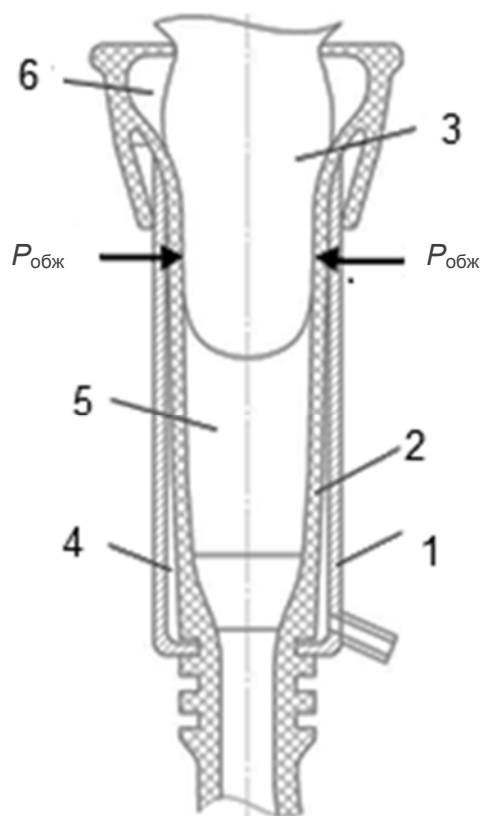
Для реализации такта «сжатие» из подсосковой камеры вакуумным насосом откачивается воздух — создается вакуум. В этом случае стенки сосковой резины начинают сжиматься (рисунок 2), на тело соска вымени коровы дополнительно действует сила сжатия $P_{\text{сж. тела}}$.

Силу сжатия тела $P_{\text{сж. тела}}$, Н, соска вымени коровы можно определить по формуле

$$P_{\text{сж. тела}} = E \frac{d_{\text{сж}}^2}{d_{\text{тела}}}.$$

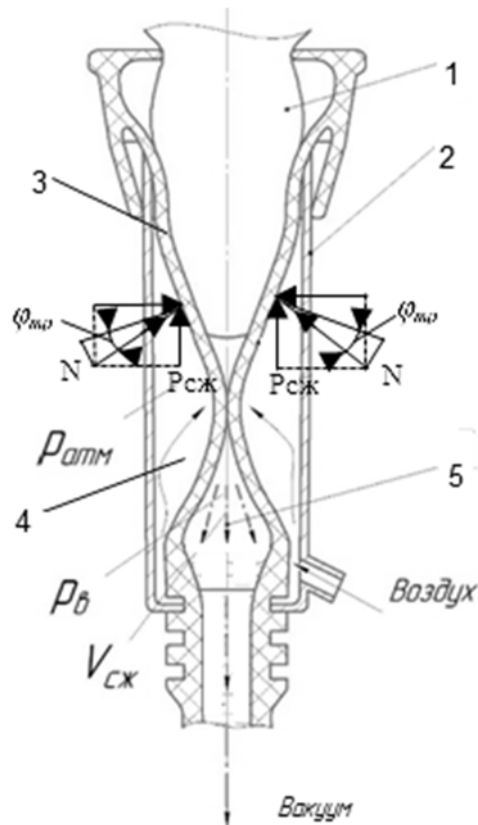
Таким образом, при такте «сжатие» на тело соска вымени коровы действует сумма сил:

$$P_{\text{тела}} = P_{\text{обж. тела}} + P_{\text{сж. тела}}.$$



1 — стакан; 2 — сосковая резина; 3 — сосок вымени коровы; 4 — межстенная камера; 5 — подсосковая камера; 6 — присосок сосковой резины

Рисунок 1. — Схема работы доильного стакана при такте «отдых»



1 — сосок вымени коровы; 2 — стакан; 3 — сосковая резина; 4 — межстенная камера; 5 — подсосковая камера

Рисунок 2. — Схема работы доильного стакана при такте «сжатие»

Таким образом, на тело соска вымени коровы при такте «сжатие» действует результирующая сила:

$$P_{\text{тело}} = \mu \frac{E}{2} \frac{d_{\text{сж}}^2}{d_{\text{тело}}} + \frac{E}{2} \frac{d_{\text{сж}}^2}{d_{\text{тело}}} = \frac{E}{2} \frac{d_{\text{сж}}^2}{d_{\text{тело}}} (\mu + 1).$$

Из формулы видно, что при такте «сжатие» результирующая сила сжатия соска вымени коровы в основном зависит от его диаметра до и после сжатия.

Проекцией указанных сил является нормальная сила (см. рисунок 2), которую можно выразить через угол трения и определить по формуле

$$N^2 = (P_{\text{обж. тела}}^2 + P_{\text{сж. тела}}^2) \cos \varphi_{\text{тр}}$$

или

$$N = \sqrt{\left[\frac{E}{2} \frac{d_{\text{сж}}^2}{d_{\text{тело}}} (\mu + 1) \right] \cos \varphi_{\text{тр}}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{тр}}$ — угол трения, град.

Из формулы (1) видно, что нормальная сила сжатия соска вымени коровы во время такта «сжатие» зависит от диаметра соска и внутренней поверхности сосковой резины.

Режим равномерного сжимания соска будет обеспечиваться, если его форма копирует внутреннюю поверхность сосковой резины. В противном случае усилие на тело соска вымени коровы распределяется неравномерно по его длине и не обеспечивает адекватное воздействие на молочную железу, что снижает молочную продуктивность коровы.

Особенно важно учитывать условие сжатия соска вымени коровы, поскольку соски изменяются с ее возрастом и имеют различную форму (рисунок 3) [2; 3].

Цилиндрическая форма сосков		Коническая форма сосков	
угловатое основание	воронкообразное основание	угловатое основание	воронкообразное основание
			

Рисунок 3. — Формы сосков у коров

Результаты исследования и их обсуждение. Решение проблемы адекватного воздействия на сосок вымени коровы возможно в перераспределении давления на тело соска при изменении его формы и размеров. В этом случае будет обеспечиваться полное копирование его рельефа, а следовательно, оптимальный режим машинного доения.

Заключение. На основании проведенных исследований установлено, что нормальная сила сжатия соска вымени коровы во время такта «сжатие» формируется из силы его обжатия сосковой резиной и сжатия при вакууме в подсосковой камере доильного стакана и атмосферном давлении межстенной камере.

Усилие действия нормальной силы сжатия соска вымени коровы во время такта «сжатие» зависит от диаметра соска и внутренней поверхности сосковой резины.

Решение проблемы адекватного воздействия на сосок вымени коровы возможно в перераспределении давления на тело соска при изменении его формы и размеров.

Список цитированных источников

1. Федоров, Д. Н. Гистология вымени коровы : учеб.-метод. пособие для студентов по специальностям 1-74 03 02 «Ветеринарная медицина» и 1-74 03 01 «Зоотехния» / Д. Н. Федоров. — Витебск : ВГАВМ, 2019. — 16 с.
2. Антошук, С. А. Сосковая резина — менять или обслуживать / С. А. Антошук, Э. П. Сорокин // Белорус. сел. хоз-во. — 2014. — С. 115—117.
3. Бондарев, С. Н. Методика подбора сосковой резины для дойного стада / С. Н. Бондарев, А. В. Китун // Агропанорама. — 2016. — № 6. — С. 39—41.

Поступила в редакцию 30.05.2023.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Научная концепция журнала предполагает публикацию современных достижений в области технических наук; представление результатов фундаментальных и прикладных исследований, а также результатов, полученных в производственных условиях областей, включая результаты национальных и международных исследований. Статьи аспирантов, докторантов и соискателей последнего года обучения публикуются вне очереди при условии их полного соответствия требованиям, предъявляемым к научным публикациям.

Публикация статей в журнале бесплатная на основании заключённого договора о передаче исключительных прав на объект авторского права (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках.

Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The scientific strategy of the journal suggests publishing modern achievements in the fields of Engineering sciences; presentation of the results of fundamental and applied research, as well as the results obtained under production conditions, both at the domestic and international level. Articles by postgraduate and doctoral students in their final year of traineeship are published out of turn if they are written in strict conformity with the specified requirements.

Publication of articles is free of charge in accordance with the existing contract on transfer of authority to the subject matter of copyright (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

Articles can be written in the Russian, Belarusian or English languages.

More detailed instructions for authors can be found on the official website of BarSU (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).