

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 2 (18), ноябрь, 2025

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» включен 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 Ю. А. Киселева
Компьютерная вёрстка С. М. Глушаков
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 10.11.2025. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10.20. Уч.-изд. л. 5,90.
Тираж 30 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь». Специальное разрешение (лицензия) на право осуществления полиграфической 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).

Сотник Л. Л. (гл. ред. сер.), кандидат технических наук, доцент (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 Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**, доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего 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 Y. A. Kiseleva
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 10.11.2025. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 10,20.
Acc.-pub. s. l. 5,90. Circulation of 30 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 Kalvariyskaya, 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).

Sotnik L. L. (*the series editor-in-chief*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (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

Веремейчик А. И., Сазонов М. И., Парфиевич А. Н., Онысько С. Р., Хвисевич В. М., Желткович А. Е., Хеук М. В., Мартынов А. В. Исследование стали Х12МФ после поверхностного плазменного упрочнения

Жигалов А. Н., Головков В. М., Земцов В. А., Сазоненко И. О., Кубраков И. В. Особенности процесса формирования плоских отливок из сталей типа 45ХН2МФА при кокильном литье двухфазной шлако-металлической струей

Жигалов А. Н., Черняков Ю. Д., Башаримов М. В., Головков В. М., Сазоненко И. О., Кубраков И. В. Теоретическое обоснование формирования слабых ударных волн в процессе аэродинамического звукового упрочнения

Лешок А. В., Козловский И. Л., Тарасик В. Н., Ционенко Д. А., Дубень И. В. Структура и технологические характеристики высоковязкой керамико-полимерной теплопроводящей диэлектрической пасты

Малевич А. В., Босяков М. Н., Сотник Л. Л. Ограничения в задаче управления процессом ионно-плазменного азотирования: сравнительный анализ с газовым азотированием

Малевич А. В., Сотник Л. Л., Богданович И. А. Влияние комбинированной обработки ионно-плазменным азотированием и магнитно-импульсной обработкой на макро- и микро напряжения в стали 38х2МЮА

Парфиевич А. Н., Сокол В. А., Саливончик Ю. Н. Нейросетевой подход к классификации технического состояния зубчатых передач в составе многовальных приводов на основе анализа акустического сигнала

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ
АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Китун А. В., Крупенин П. Ю. Обоснование количества координатных кормораздатчиков в составе автоматизированных систем кормления крупного рогатого скота

Кунаш М. В., Саевич К. Ф., Сацукевич И. А., Кольга Д. Ф., Молош Т. В. Пути снижения влияния выбросов транспортными средствами на состояние воздушной среды

Савчук С. В., Парфиевич А. Н., Медведев О. А. Создание модифицированного полунавесного почвообрабатывающе-посевного агрегата с пассивными рабочими органами шириной 6 м и внедрение его в условиях Брестской области

Шаршунов В. А., Сентюров Н. С., Цайц М. В. Технологические свойства вороха льнокостры как объекта переработки прессованием

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- 4 **Verameichyk A. I., Sazonov M. I., Parfievich A. N., Onysko S. R., Khvisevich V. M., Zheltkovich A. E., Heuk M. V., Martynov A. V.** Study of CR12MOV steel after surface plasma hardening
- 15 **Jigalov A. N., Golovkov V. M., Zemtsov V. A., Sazonenko I. O., Kubrakou I. V.** Features of the process of forming flat castings from 45KH2MFA steels by two-phase slag-metallic jet casting
- 22 **Jigalov A. N., Chernyakov Y. D., Basharimov M. V., Golovkov V. M., Sazonenko I. O., Kubrakov I. V.** Theoretical justification of the weak impact waves formation in the process of aerodynamic sound hardening
- 30 **Leshok A. V., Kozlovsky I. L., Tarasik V. N., Tsionenko D. A., Duben I. V.** Structure and technological characteristics of high-viscosity ceramic-polymer thermally conductive dielectric paste
- 37 **Malevich A. V., Bosyakov M. N., Sotnik L. L.** Limitations in the control of the ion-plasma nitration process: comparative analysis with gas nitration
- 44 **Malevich A. V., Sotnik L. L., Bogdanovich I. A.** Influence of combined ion-plasma nitration and magnetic-pulse treatment on macro- and microstresses in 38KH2MYUA steel
- 52 **Parfievich A. N., Sokol V. A., Salivonchik Yu. N.** A neural network approach to the classification of the technical condition of gear transmissions in multi-axis drives based on acoustic signal analysis

PROCESSES AND MACHINES
OF AGROENGINEERING SYSTEMS

- 61 **Kitun A. V., Krupenin P. Y.** Justification of the coordinate feed dispensers number in automated cattle feeding systems
- 69 **Kunash M. V., Saevich K. F., Satsukevich I. A., Kolga D. F., Molosh T. V.** Ways to reducing the impact of vehicle emissions on the air quality
- 76 **Savchuk S. V., Parfievich A. N., Medvedev O. A.** Creation of a modified semi-mounted soil-tilling and sowing unit with passive working tools 6 m in width, and its implementation in the conditions of Brest region
- 82 **Sharshunov V. A., Sentyurov N. S., Tsaits M. V.** Technological properties of flax bake heap as an object of pressing processing

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

УДК 621.785.5

А. И. Веремейчик, кандидат физико-математических наук, доцент,
М. И. Сазонов, доктор технических наук, профессор,
А. Н. Парфиевич, кандидат технических наук, доцент,
С. Р. Онысько, кандидат технических наук, доцент,
В. М. Хвисевич, кандидат технических наук, доцент,
А. Е. Желткович, кандидат технических наук, доцент,
М. В. Хеук, А. В. Мартынов

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»,
ул. Московская, 267, 224023 Брест, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЛИ X12МФ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Повышение ресурса работы штамповой оснастки, металлообрабатывающего инструмента, деталей машин и механизмов является актуальной проблемой. Одним из таких методов является использование термообработки поверхностей плазменными источниками нагрева, которые не требуют нагрева всей детали, а лишь модифицируют ее поверхностные слои, оставляя свойства сердцевины неизменными благодаря высоким скоростям нагрева-охлаждения. В статье проведены экспериментальные исследования влияния поверхностного плазменного упрочнения на свойства стали X12МФ. Определена микротвердость образцов, построены профилограммы и топография поверхности после обработки с оплавлением и без оплавления. Для определения температурного поля и установления оптимальных режимов термообработки выполнено компьютерное моделирование процесса поверхностного упрочнения в среде ANSYS Workbench. По результатам решения задачи теплопроводности получено распределение температуры в зоне термического влияния лазерного луча, зависимости температуры от времени и координат.

Ключевые слова: сталь; плазменное упрочнение; микротвердость; профилограмма; температурное поле; образец; моделирование.

Рис. 10. Табл. 1. Библиогр.: 13 назв.

A. I. Verameichyk, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,
M. I. Sazonov, DSc in Technical Sciences, Professor,
A. N. Parfievich, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
S. R. Onysko, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
V. M. Khvisevich, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. E. Zheltkovich, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
M. V. Heuk, A. V. Martynov

Educational Institution "Brest State Technical University",
267 Moskovskaya Str., 224023 Brest, the Republic of Belarus

STUDY OF CR12MOV STEEL AFTER SURFACE PLASMA HARDENING

Increasing the service life of stamping tooling, metalworking tools, machine parts, and mechanisms is a pressing issue. One such method is surface heat treatment using plasma heat sources, which do not require heating the entire part but merely modify its surface layers, leaving the core properties unchanged due to high heating and cooling rates. This article presents an experimental study of the effect of surface plasma hardening on the properties of CR12MOV steel. The microhardness of the samples was determined, and profilograms and surface topographies were constructed after processing with and without reflow. Computer modeling of the surface hardening process in ANSYS Workbench was

performed to determine the temperature field and establish optimal heat treatment conditions. Based on the thermal conductivity problem, the temperature distribution in the heat-affected zone of the laser beam, as well as the temperature dependence on time and coordinates, were obtained.

Key words: steel; plasma reinforcement; micro hardness; profiled graph; temperature field; sample; simulation.
Fig. 10. Table 1. Ref.: 13 titles.

Введение. Одним из наиболее широко применяемых методов поверхностного упрочнения металлов является плазменная обработка [1—8]. В отличие от традиционных способов термообработки воздействие концентрированной плазменной струи (дуги) включает одновременное тепловое, механическое и радиационное воздействие. Закалка сталей нагревом концентрированными потоками энергии заключается в образовании аустенитной структуры при нагреве и дальнейшем превращении ее в мартенсит на стадии охлаждения при высоких скоростях. Такое упрочнение характеризуется: глубиной закалки до 0,7...1,0 мм; значительно более высокой твердостью и износостойкостью поверхностного слоя, чем при объемной закалке; незначительными термическими деформациями металла благодаря локальности воздействия и высоким скоростям нагрева-охлаждения.

Методология и методы исследования. Для реализации упрочнения поверхностного слоя образцов из стали X12МФ методом локальной плазменной закалки использована установка МПУ-4. В таблице 1 приведен химический состав стали.

Обработка проводилась с помощью плазмотрона, приведенного на рисунке 1. Основными деталями плазмотрона являются катод 1, сопло 2, дополнительное сопло 4, кольцо закрутки рабочего газа 3, кольцо закрутки защитного газа 5, тогда как анодом дуги служит образец 6. В качестве катода использован вольфрамовый стержень диаметром 1,4 мм. Катод охлаждается потоком рабочего газа. Сопло 2 служит для формирования так называемой плазменной дуги (дуги, горящей в потоке аргоновой плазмы). Локальность нагрева и высокая плотность теплового потока в анодном пятне достигаются за счет интенсивного охлаждения водой медного сопла, причем внутренний диаметр сопла может варьироваться в пределах 0,8...1,9 мм.

Защита от окисления упрочняемого металла обеспечивается постановкой в плазмотроне дополнительного керамического сопла 4 с внутренним диаметром 18 мм, а между соплами 2 и 4 подается защитный газ (азот) с расходом 1,2...4,0 л / мин. Кроме того, за счет высокой скорости течения плазмы в дуге происходит эжекция азота в зону анодного пятна, что может привести к плазменному азотированию поверхностного слоя детали и подтверждается исследованиями физических свойств этого слоя [9].

Выпрямитель 8 включен между катодом 1 и упрочняемой деталью 6. Для поджига основной дуги использован высокочастотный генератор 7 малой мощности, включенный между катодом и соплом 2 плазмотрона. После поджига дежурной дуги по ее проводящему каналу загорается основная дуга между катодом и деталью-анодом. Перед включением плазмотрона в зону катода для его защиты подается аргон с расходом 1,2...4,1 л / мин, а для защиты детали в зоне анодного пятна от окисления через дополнительное сопло 4 — азот с расходом 0,8...2,4 л / мин.

Т а б л и ц а 1. — Химический состав стали X12МФ

Массовая доля элемента, %							
C	Si	Mn	Cr	Cu	V	Mo	Ni
1,45...1,65	0,1...0,4	0,15...0,45	11,0...12,5	До 0,3	0,15...0,30	0,4...0,6	До 0,35

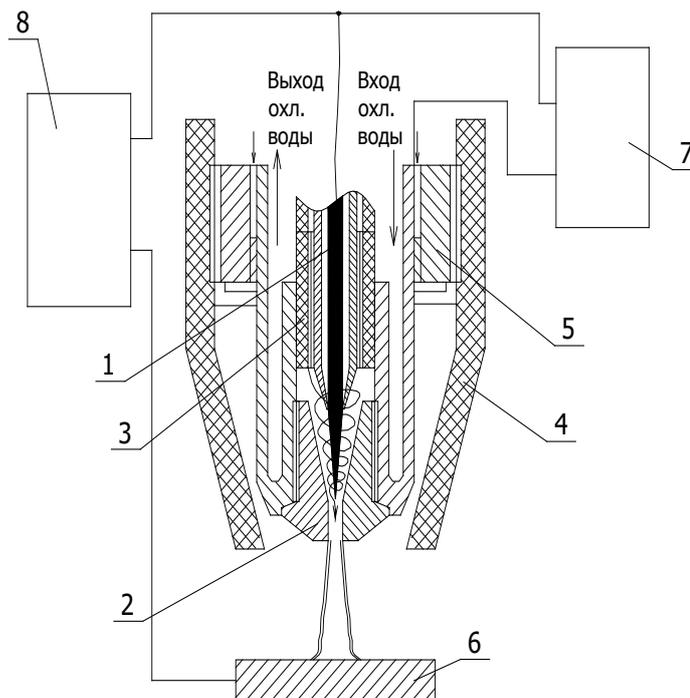


Рисунок 1. — Принципиальная схема плазмотрона

При закалке использовались аргон и азот высокой чистоты из баллонов при давлении газов 150 атм. Измерение расходов газов производится при помощи ротаметров типа РМ-0,025 и РМ-0,63.

Исследование вольт-амперных характеристик дуги, горящей в плазмотроне, проводили с применением вольтметра типа М42100, подключенного к катоду и упрочняемой детали (аноду), ток измеряли с помощью амперметра М42100. Расходы плазмообразующего газа (аргона) регистрировали расходомером типа РМ-063, а защитного газа (азота) — расходомером типа РМ-0063 ГУЗ. Измерение температуры холодной и подогретой в плазмотроне воды осуществляли термометром типа ТЛ-4.

Для обеспечения стабильной скорости и расстояния между соплом и обрабатываемым образцом, а также возможности быстрого и точного их изменения применялась экспериментальная установка, состоящая из роботизированного комплекса Advercut K6090T с разработанным к нему узлом крепления плазменного генератора (рисунок 2).

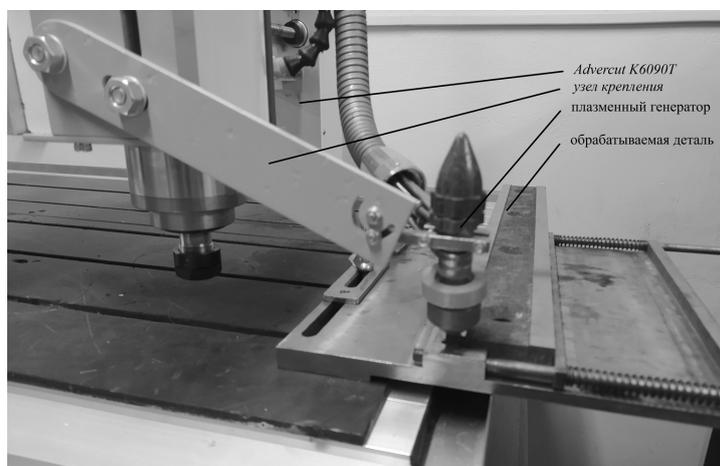


Рисунок 2. — Фрагмент экспериментальной установки для поверхностного плазменного упрочнения

Результаты исследования и их обсуждение. В результате скоростного локального нагрева поверхности плазменной дугой до высоких расчетных температур и дальнейшего охлаждения изделия, которое достигается высокоскоростным отводом тепла во внутренние его слои, в материале происходят структурные превращения. Так как объем нагреваемого под дугой металла мал, происходит быстрый отвод тепла в тело образца. Исследование скоростей нагрева и охлаждения в зависимости от режимов работы плазмотрона проведено в работе [10]. При воздействии высококонцентрированного источника тепла в зоне термического влияния образуется мартенситно-аустенитная структура. Следует отметить, что структурные превращения при плазменном упрочнении происходят в основном аналогично объемной закалке, однако высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к увеличению плотности дислокаций и термонапряжений в кристаллической решетке, что существенно увеличивает твердость поверхностного слоя. Основное достоинство плазменной закалки заключается в существенном увеличении твердости приповерхностного слоя изделия и сохранении исходных свойств металла в его внутренних слоях, что повышает сопротивление усталости и изнашиванию детали и что недостижимо при традиционных методах упрочнения. Процесс плазменного упрочнения может осуществляться с оплавлением и без оплавления поверхностного слоя. Во втором случае упрочненная зона не требует финишной обработки.

На рисунке 3 приведен образец после термообработки плазменной дугой.

На рисунке 4 показана микроструктура поверхности упрочненной зоны образца в зависимости от режимов плазменной закалки. На каждой дорожке произведено девять замеров микротвердости с помощью твердомера KASON-59-HV-W. Точки промеров распределены по длине следующим образом: по три точки вначале участка (слева), по центру (центр), в конце участка (справа).

Данные, полученные при измерении микротвердости в поперечном сечении дорожек, показаны на рисунке 4.

Результаты, полученные при измерении твердости в поперечном сечении дорожки и по глубине, показаны на графиках (рисунки 5—7).

Эксперименты показали, что микротвердость поверхности стали неоднородна, ее распределение по ширине зоны влияния плазменной дорожки подчинено определенному закону. Глубина упрочняемого слоя изменяется в пределах 0,15...0,70 мм в зависимости от параметров процесса. Увеличение скорости движения плазменной дуги приводит к уменьшению глубины упрочняемого слоя и наоборот.

Установлено, что на глубине около 0,6 мм находится граница зоны упрочнения, микротвердость находится в пределах 200...300 HV_{0,2}.

На рисунке 8 приведены профилограммы образца после упрочнения.

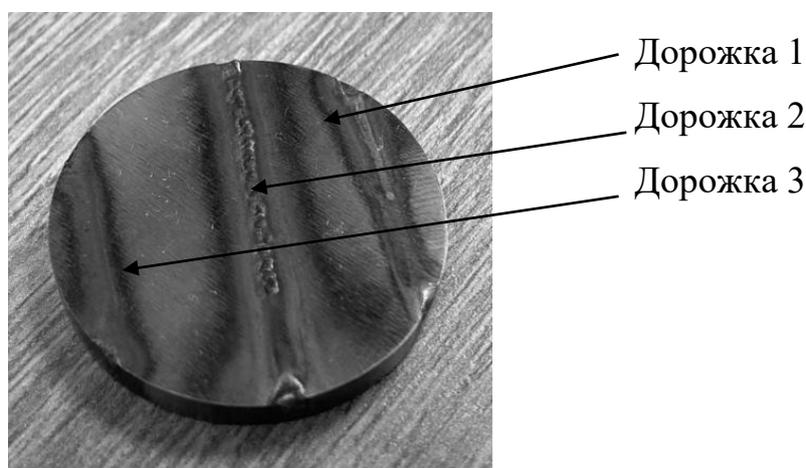
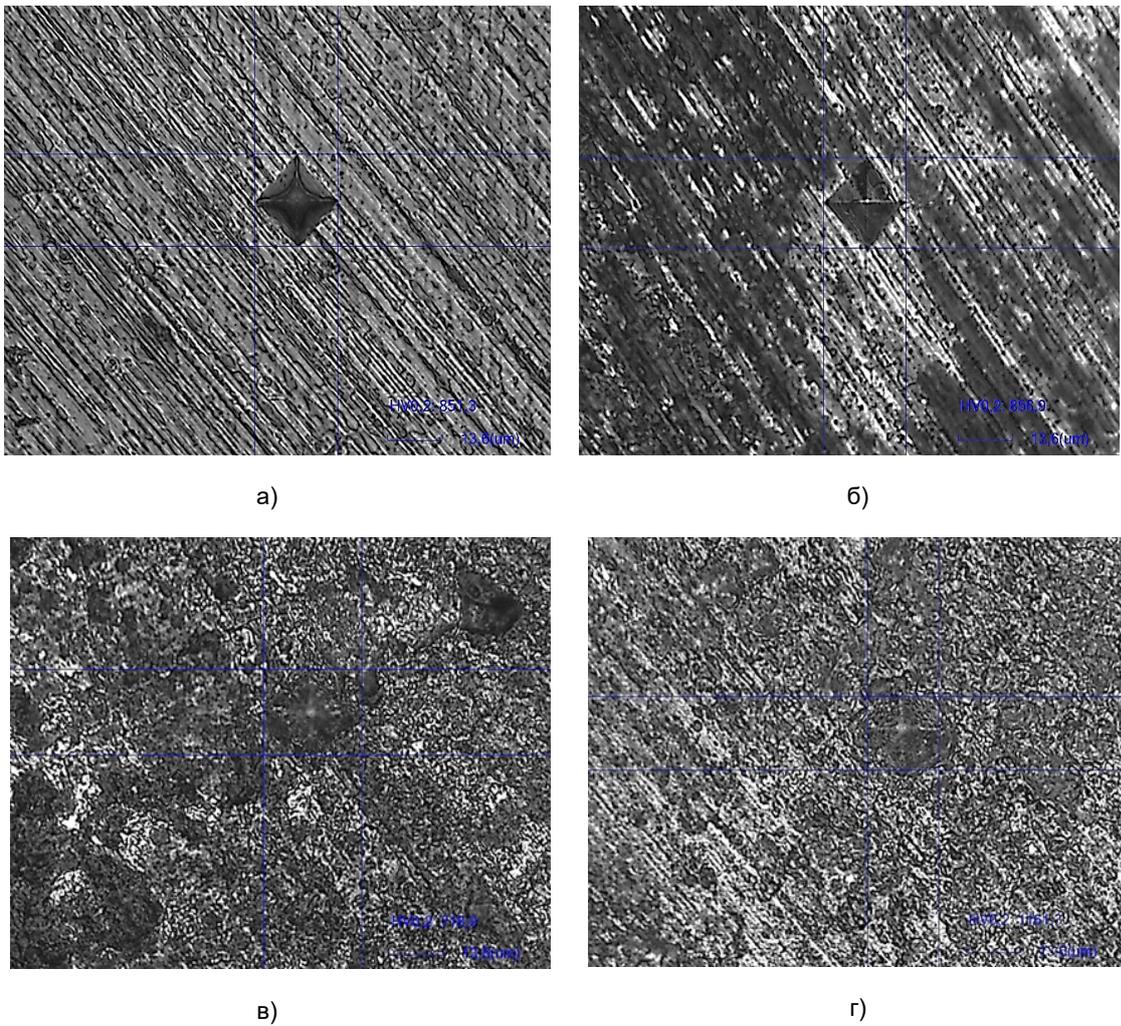


Рисунок 3. — Обработанный образец из стали X12МФ



а — необработанный образец; б — дорожка 1; в — дорожка 2; г — дорожка 3

Рисунок 4. — Замеры микротвердости образца

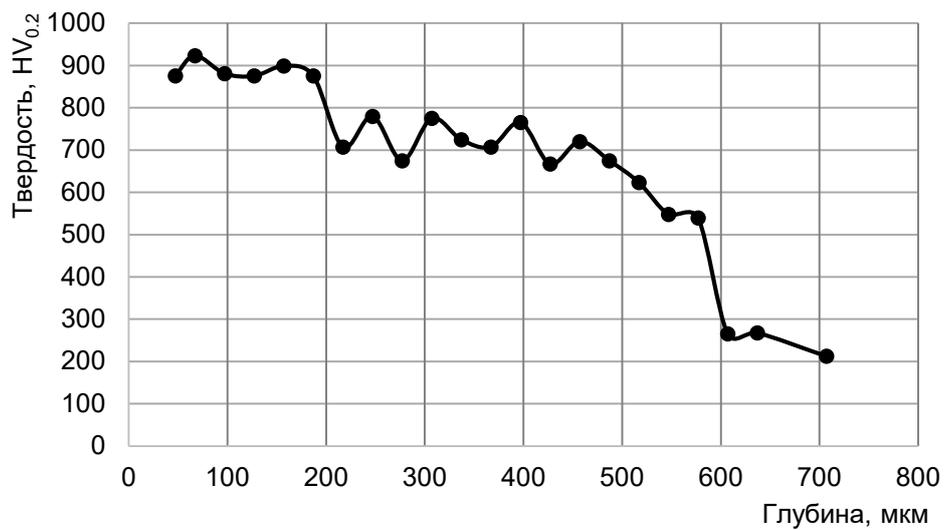


Рисунок 5. — Зависимость микротвердости от глубины для дорожки 2 с оплавлением поверхности

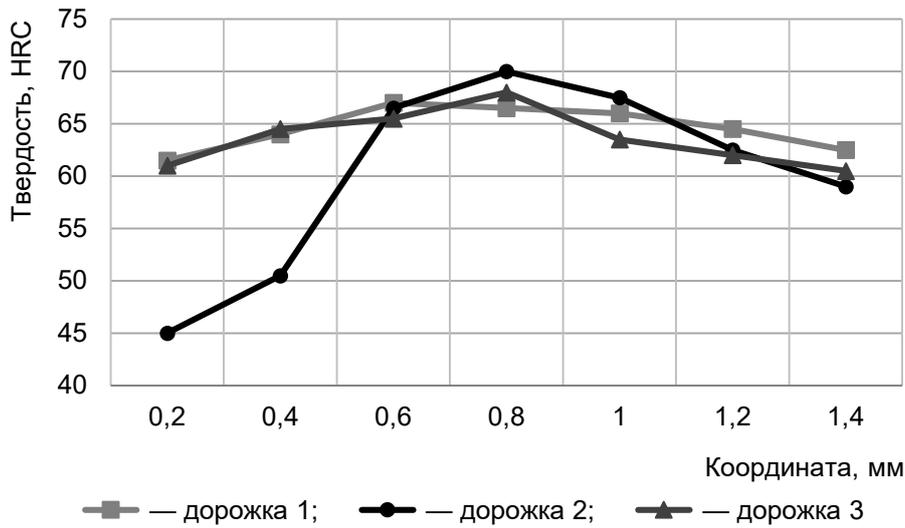


Рисунок 6. — Распределение твердости по ширине зоны влияния плазменной дуги, $I = 7A$, $V = 10 \text{ мм / с}$

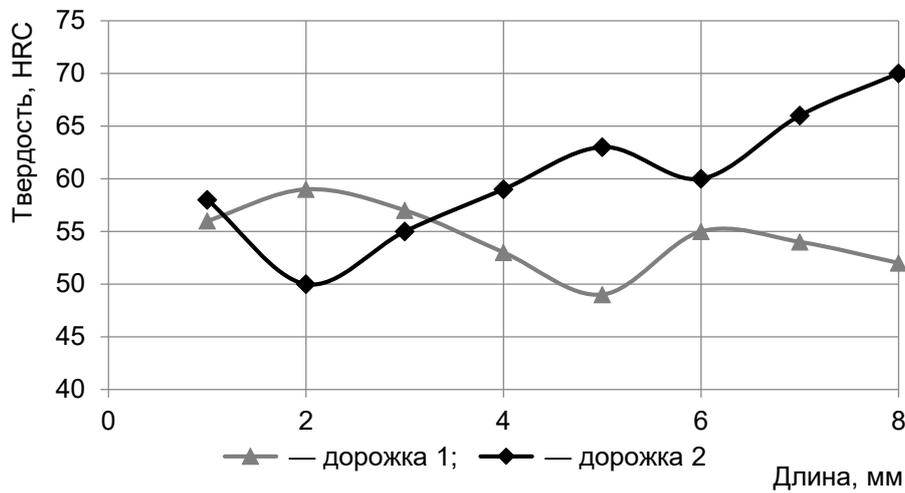
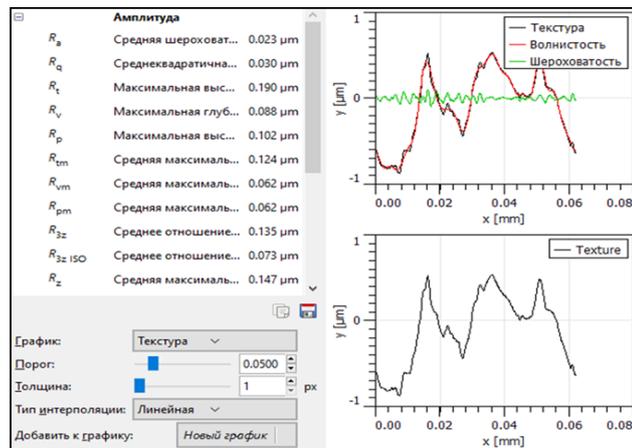


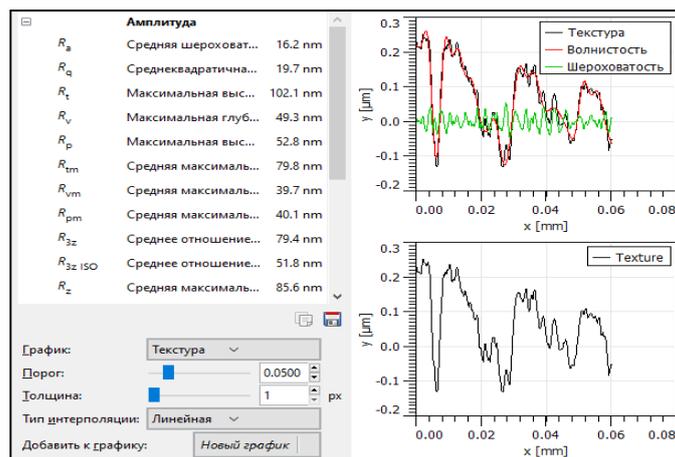
Рисунок 7. — Распределение твердости по длине дорожки, $V = 10 \text{ мм / с}$



а)

а — дорожка 2; б — дорожка 3

Рисунок 8. — Профилограммы поверхности образца из стали X12MФ после обработки



б)

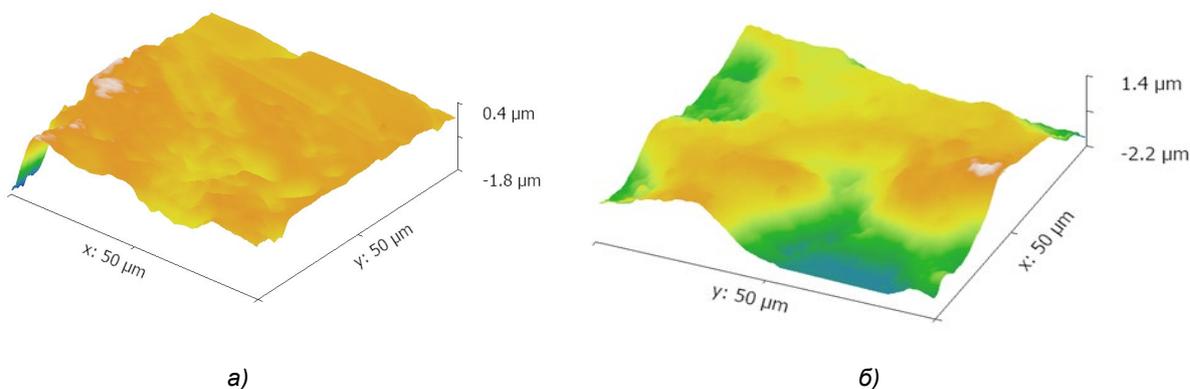
Окончание рисунка 8

Анализируя профилограммы, можно заключить, что шероховатость поверхности порядка $Ra = 0,2$ мкм после механической обработки образцов сохраняется такой же и после обработки плазменной дугой [11].

Поверхность образца с оплавлением имеет сложный рельеф, обусловленный системой впадин и гребней. Профилограмма такого образца вследствие высокой детализации и малой площади поверхности измерения (50×50 мкм), полученная на атомно-силовом микроскопе FM-Nanoview 1000 AFM, не отражает гребни и впадины (рисунок 9).

При упрочнении без оплавления наблюдается уменьшение шероховатости предположительно вследствие сглаживания микронеровностей под действием концентрированного источника тепла. По результатам экспериментальных исследований установлено, что при закалке поверхности в твердой фазе целесообразно применить аргон в качестве защитного газа, который в меньшей степени, чем азот, обжимает дугу. В результате снижается плотность потока энергии, которую поглощает поверхность, и температура поверхностного слоя металла получается ниже температуры его плавления.

Моделирование процесса термоупрочнения в ANSYS. Для разработки оптимальных режимов термообработки проведены исследования температурных полей при упрочнении образцов с помощью конечно-элементной расчетной платформы ANSYS Workbench 2019 R2. Построение геометрической модели детали выполнено с использованием графического модуля ANSYS SpaceClaim.



а)

б)

Рисунок 9. — Топография поверхности образца после упрочнения: а — без оплавления поверхности; б — с оплавлением поверхности

Сетка построена при помощи модуля Mesh. В зоне воздействия локального источника тепла, моделирующего процесс воздействия плазмы, с помощью команды Edge Sizing задается уплотненная сетка. Все физические и термодинамические свойства стали X12МФ (плотность $\rho = 7\,700 \text{ кг / м}^3$, удельная теплоемкость $c = 460 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{°C)}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 24 \text{ Вт / (м} \cdot \text{°C)}$) задавались с помощью модуля управления материалами, представленного в ANSYS Workbench элементом Engineering Data, входящим в структуру блока инженерного анализа.

Распределение температурных полей в образце при модифицировании поверхности движущимся источником нагрева определяется из уравнения Фурье:

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{grad}T) = q_v, \quad (1)$$

где $C_v = C_p \rho$ — удельная объемная теплоемкость, Дж / (м³ · °C), C_p — удельная массовая теплоемкость, Дж / (кг · °C), ρ — плотность материала, кг / м³;
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт / (м · °C);
 q_v — объемная плотность теплового потока источника тепла, Вт / м³.

При нагреве образца движущимся тепловым источником мощностью P радиуса r с учетом зависимости теплофизических характеристик материала от температуры, дифференциальное уравнение теплопроводности (1) примет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + v \rho C_p \text{grad}T - \text{div}(\lambda \text{grad}T) = q_v,$$

где v — скорость движения источника тепла, м / с.

Граничные условия вне зоны действия пятна теплообмена с окружающей средой:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_0 - T),$$

где α — коэффициент конвекции, Вт / (м² · °C);
 T_0 — температура окружающей среды, °C, $T_0 = 20 \text{ °C}$.

Начальная температура принималась равной температуре окружающей среды.

В соответствии со скоростью движения пятна нагрева к узлам конечно-элементной модели последовательно прикладывалась температурная нагрузка. Для моделирования распространения теплового поля вглубь образца создан макрос для ANSYS на параметрическом языке программирования APDL с учетом того, что тепловой поток распределяется по диаметру пятна нагрева по закону нормального распределения. В APDL-макросе для учета температурной нагрузки использована следующая зависимость [12]:

$$q = A q_H \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0-vt)^2}{r_H^2}\right],$$

где A — поглощательная способность материала, зависящая от свойств материала, состояния поверхности, температуры;
 q_H — плотность теплового потока на поверхности, Вт / м²;
 x, y — координаты центра пятна нагрева, м;
 x_0, y_0 — начальные координаты центра пятна нагрева, м;
 r_H — радиус пятна нагрева, м.

Начальная температура принималась равной 20 °С, эффективная мощность источника варьировалась в диапазоне 0,5...2,5 кВт. Оси x и y лежат в плоскости модели образца, причем ось y направлена в сторону движения источника нагрева, ось z — по направлению действия источника тепла. На всех поверхностях детали задавалась конвекция с различными коэффициентами теплоотдачи. Численный эксперимент проводился при следующих параметрах: диаметр пятна нагрева $d = 1...4$ мм, скорость движения пятна $v = 2...20$ мм / с.

В результате теоретических исследований динамической модели в широком диапазоне параметров были получены результаты решения задачи теплопроводности в виде линий уровня (изотерм), отражающих распределение температуры в образце. Некоторые результаты определения температурных полей при $P = 1\ 000$ Вт приведены на рисунках 10, 11.

Из рисунка 10 видно, что даже при температурах ниже температур плавления материала при подходе пятна нагрева к краю образца температура резко возрастает, что приводит к оплавлению края образца (см. рисунок 3).

По результатам исследований установлено, что на глубине 0,6 мм температура снижается на 200...350 °С по сравнению с температурой на поверхности, на глубине 1 мм — на 450...600 °С в зависимости от режимов обработки.

Заключение. Проведены экспериментальные исследования свойств поверхностного слоя стали X12МФ после плазменного поверхностного упрочнения. Определена микротвердость образцов в зоне термического влияния, построены профилограммы, исследована топография поверхности после обработки с оплавлением и без оплавления, установлен характер распределения микротвердости по глубине. Глубина упрочненного слоя достигает 0,55...0,70 мм, ее значения в 2 раза выше значений микротвердости материала в исходном состоянии. Проведенные эксперименты показали, что подача азота позволяет значительно увеличить напряжение дуги и, соответственно, мощность плазмотрона и достичь плотности теплового потока в анодном пятне до $6 \cdot 10^7$ Вт / м² при диаметре пятна до 2,4 мм.

По результатам проведенных исследований температурного поля и компьютерного моделирования процесса поверхностного упрочнения в ANSYS Workbench установлены оптимальные режимы поверхностного упрочнения образцов.

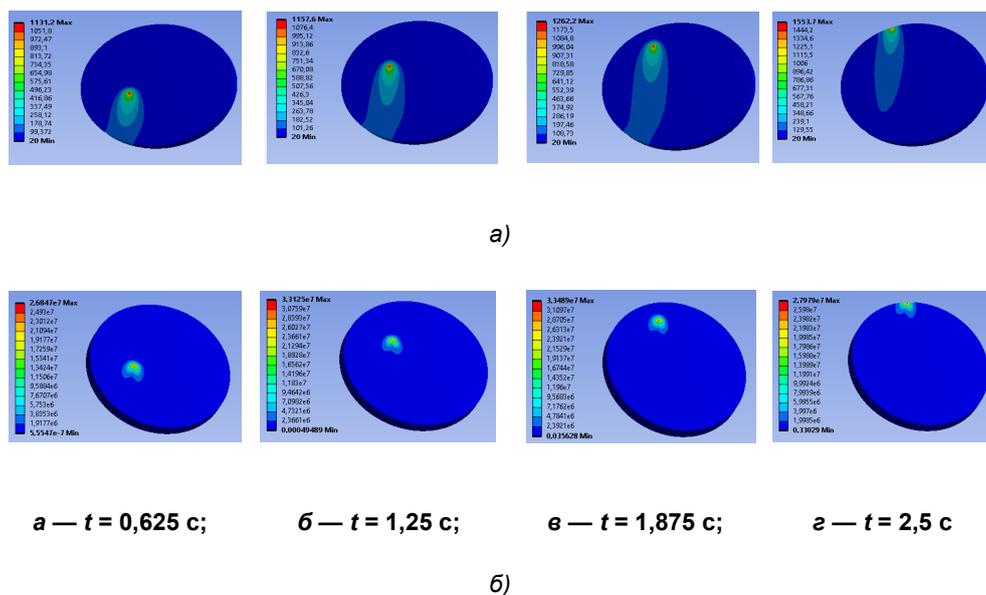


Рисунок 10. — Распределение полей температур (а) и суммарного теплового потока (б) на поверхности образца, $V = 10$ мм / с, $d = 2$ мм, $q_H = 6 \cdot 10^7$ Вт / м²

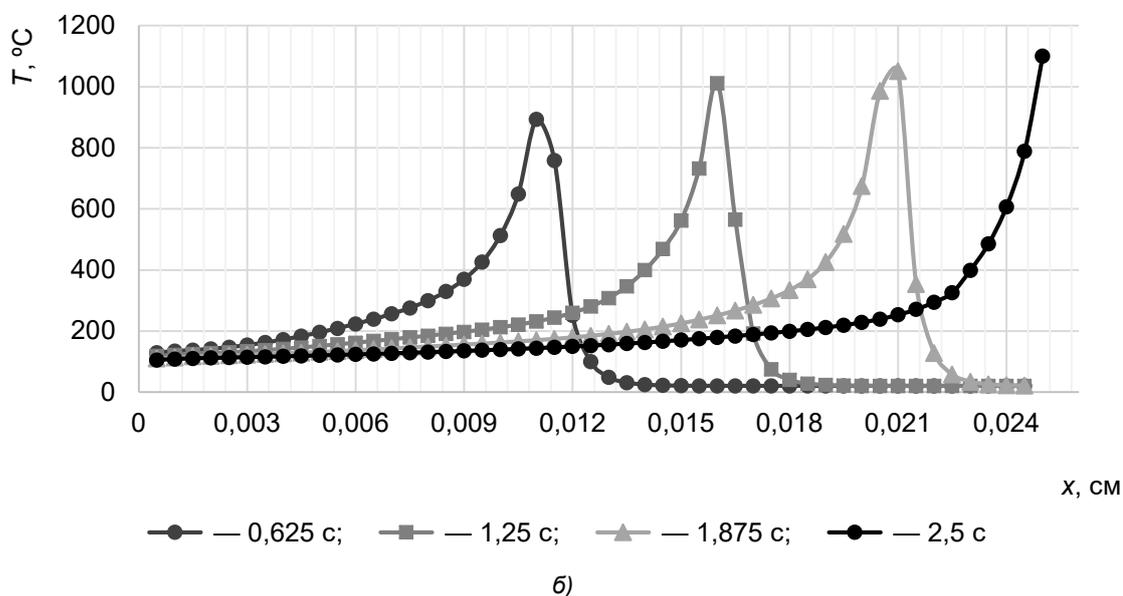
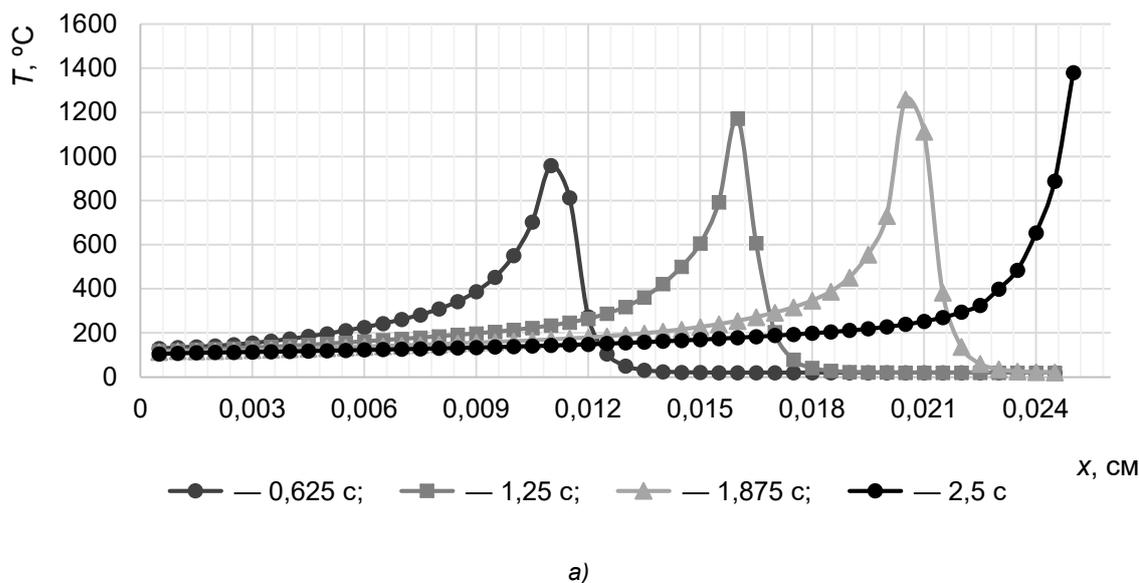


Рисунок 11. — Зависимость температуры от координаты для различных моментов времени по траектории движения центра пятна нагрева, $V = 10 \text{ мм / с}$, $d = 2,5 \text{ мм}$, $q_H = 6 \cdot 10^7 \text{ Вт / м}^2$ на поверхности (а) и глубине 0,5 мм (б)

Список цитируемых источников

1. Тюрин, Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин. — Киев : Наук. думка, 2008. — 215 с.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский [и др.] ; под общ. ред. Л. К. Лещинского. — Киев : Техніка, 1990. — 109 с.
3. Балановский, А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А. Е. Белановский. — Иркутск : ИрГТУ, 2006. — 180 с.
4. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. — Гомель, 2008. — Вып. 2. — С. 6—12.
5. Теоретические и экспериментальные исследования процесса поверхностного плазменного упрочнения режущего инструмента / М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик, В. В. Гарбачевский // Вестник Брестского государственного технического университета. — 2012. — № 4. — С. 28—31.

6. Overview of Surface Modification Strategies for Improving the Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels / M. Rezaayat [et al.] // *Metals*. — 2023. — No. 13. — 1268 p.
7. Effects of thermal plasma jet heat flux characteristics on surface hardening / Y. Xiang [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2015. — Vol. 226. — P. 238—246. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.22> (date of access: 19.09.2025).
8. Safonov, E. N. Plasma hardening hypereutectoid steel / E. N. Safonov, M. V. Mironova // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. — 2018. — 411. — 012069. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/411/1/012069>.
9. Поверхностное плазменное азотирование измельчителей древесных отходов / А. И. Веремейчик [и др.] // *Вестник БрГТУ*. — 2018. — № 4 (112). — С. 6—9.
10. Исследование механических свойств стали X12MФ после плазменного упрочнения / А. И. Веремейчик [и др.] // *Перспективные материалы и технологии : материалы междунар. симпозиума, г. Витебск, 25—29 авг. 2025 г. ; под ред. В. В. Рубаника*. — Минск : ИВЦ Минфина, 2025. — С. 239—241.
11. Веремейчик, А. И. Моделирование тепловых процессов в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно-распределенным тепловым потоком / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. — 2023. — Т. 68, № 4. — С. 318—330.
12. Веремейчик, А. И. Моделирование температурного поля при лазерной закалке сталей / А. И. Веремейчик // *Современное машиностроение: наука и образование : материалы 14-й Междунар. науч. конф., 18 июня 2025 г. ; под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича*. — СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. — С. 1033—1044.
13. Коротков, В. А. Поверхностная плазменная закалка / В. А. Коротков ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). — Н. Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2012. — 64 с.

Поступила в редакцию 03.10.2025.

УДК 669.15

А. Н. Жигалов¹, доктор технических наук, доцент,**В. М. Головков**², **В. А. Земцов**³, **И. О. Сазоненко**⁴, **И. В. Кубраков**⁵¹Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru^{1, 2, 3, 4, 5}Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев, Республика Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ ОТЛИВОК ИЗ СТАЛЕЙ ТИПА 45ХН2МФА ПРИ КОКИЛЬНОМ ЛИТЬЕ ДВУХФАЗНОЙ ШЛАКО-МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУЕЙ

Рассмотрены особенности макро- и микроструктуры отливок из стали типа 45ХН2МФА, полученных методом легирования стали 45 в процессе электрошлакового тигельного переплава с последующей совмещенной заливкой шлако-металлического расплава в металлические формы. Определено оптимальное значение высоты отливки для конкретного типоразмера металлической формы, позволяющей минимизировать объем последующей её механической обработки, обеспечивающей получение бездефектных заготовок, предназначенных для проведения в дальнейшем операции прокатки.

Ключевые слова: электрошлаковый тигельный переплав; литая сталь типа 45ХН2МФА; коэффициент использования материала.

Рис. 8. Табл. 3. Библиогр.: 8 назв.

A. N. Jigalov¹, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,**V. M. Golovkov**², **V. A. Zemtsov**³, **I. O. Sazonenko**⁴, **I. V. Kubrakou**⁵¹Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru^{1, 2, 3, 4, 5}State Scientific Institution “Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus”, 11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus

FEATURES OF THE PROCESS OF FORMING FLAT CASTINGS FROM 45KH2MFA STEELS BY TWO-PHASE SLAG-METALLIC JET CASTING

The features of the macro- and microstructure of castings made of 45KhN2MFA steel, obtained by alloying 45 steel in the process of electro slag cup remelting with subsequent combined pouring of the slag-metal melt into metal molds have been considered. The optimal value of the casting height for a specific type of metal mold, which minimizes the amount of subsequent mechanical processing and ensures the production of defect-free blanks suitable for further rolling operations has been determined.

Key words: electro slag cup refining; cast steel type 45KhN2MFA; material utilization factor.

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

Введение. В ИТМ НАН Беларуси в рамках работ по получению литых броневых материалов проводилось исследование процесса формирования отливок из стали типа 45ХН2МФА при их литье в металлические формы двухфазной струей. Цель проведения работ — определение оптимального значения высоты отливки, позволяющей минимизировать объем последующей её механической обработки, обеспечивающей получение бездефектных заготовок, предназначенных для проведения в дальнейшем операции прокатки.

Экспериментальные отливки получали заливкой в металлическую форму расплава металла и шлака, полученных в ходе проведения процесса электрошлакового тигельного переплава (далее — ЭШТП). Технология ЭШТП является разновидностью электрошлаковых процессов переплава, в которых расходуемый электрод, погруженный в расплавленный шлак, постепенно плавится, а капли расплава, стекая вниз, рафинируются при взаимодействии со шлаком. Шлак в разогретом состоянии находится за счет джоулевого тепла, возникающего при прямом прохождении электрического тока через жидкий шлак. Отличие

ЭШТП от процесса электрошлакового переплава в водоохлаждаемый кристаллизатор заключается в возможности накопления в плавильной емкости необходимого объема жидкого металла и шлака для последующего перелива в металлические формы [1—5].

Литье в металлические формы — широко распространенный в литейном производстве процесс [6; 7]. Металлическая форма, внутренний объем которой воспроизводит конфигурацию получаемой отливки, в литейном производстве чаще называют кокилем (фр. *coquille* раковина, скорлупа). Кокиль является постоянной формой, в которой можно получить не одну (как в песчаные формы), а множество отливок. Особенностью литья совмещенной двухфазной шлако-металлической струей в кокиль является хорошая защита жидкого металла при переливе его в форму (шлак, имея меньшую плотность, находится на поверхности жидкого металла), а также формирование на поверхности кокиля защитного шлакового гарнисажа, предотвращающего возможное взаимодействие расплавленного металла с материалом постоянной формы [8].

Материалы и методы исследования. Металлическая форма (рисунок 1) позволяла получать отливки длиной $565 \pm 1,5$ мм и шириной 133 ± 1 мм. Высота отливки регулировалась объемом (массой) заливаемого металла.

В таблице 1 приведены данные по массе расходуемых электродов и вводимых ферродобавок, использовавшихся при получении отливок из стали типа 45ХН2МФА методом легирования стали 45 в процессе ЭШТП.

Для проведения процесса ЭШТП использовалась смесь флюсов АНФ-295 и АНФ-6 в пропорции 50 : 50 в массовом соотношении. Масса используемого в процессе ЭШТП флюса составляла 3,5 кг на одну плавку.

Электрические параметры ЭШТП в процессе всех плавок не менялись: напряжение на источнике питания $U = 34 \pm 1$ В, сила тока в процессе переплава $I = 1\,800 \pm 150$ А.

Заливка шлако-металлического расплава в металлическую форму осуществлялась путем переворота на 180° плавильного тигля с закреплённой на нем формой (рисунок 2). Скорость вращения плавильной емкости с формой в процессе ее заливки в серии экспериментов оставалась постоянной и составляла $\omega = 0,209$ рад \cdot с $^{-1}$.

Химический состав отливок, полученных в ходе проведения работ по данному этапу, представлен в таблице 2.

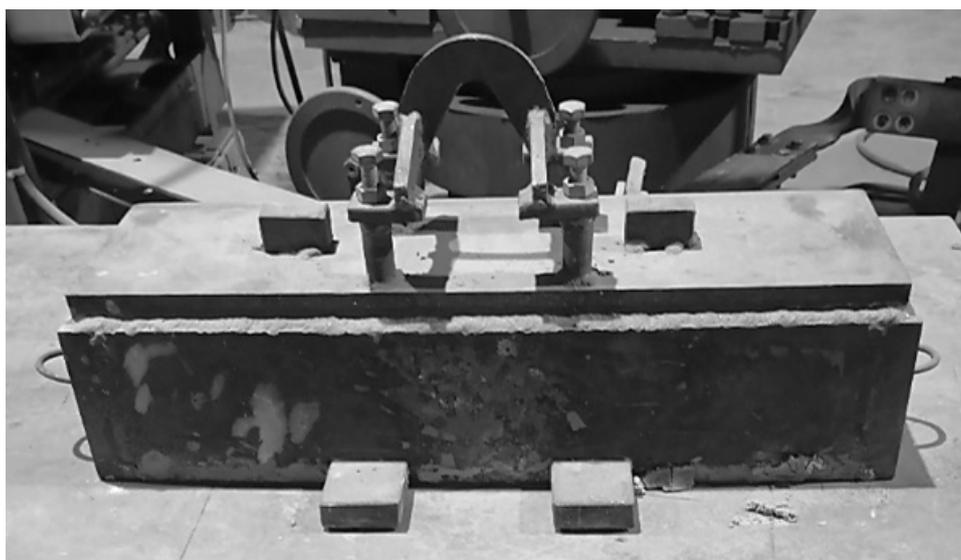
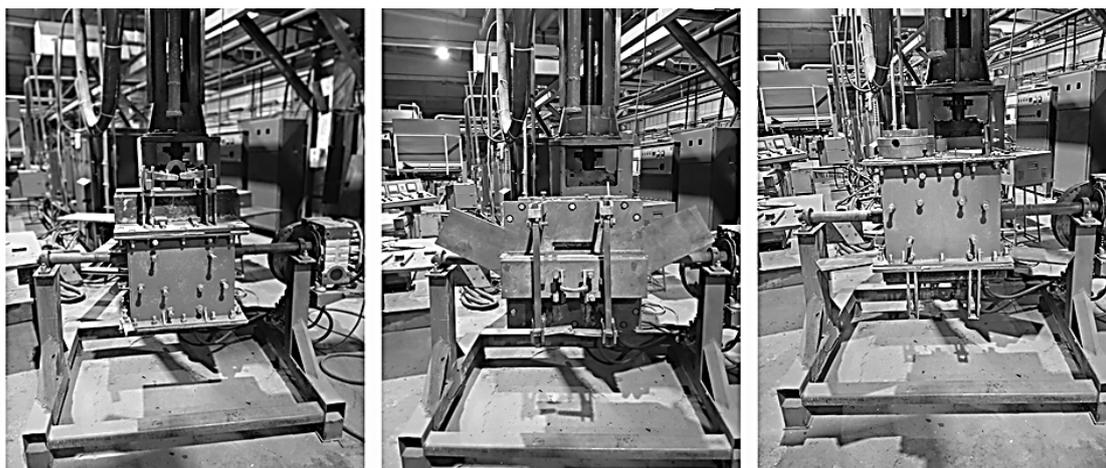


Рисунок 1. — Металлическая форма для литья двухфазной струей

Т а б л и ц а 1. — Шихтовый состав плавки, кг

Номер плавки	Шихтовые материалы						Всего
	Ст 45	Ферро-хром ФХ25	Никель Н1	Ферро-молибден ФМо60	Ферро-марганец ФМн78	Ферро-ванадий ФВн50	
1	9,67	0,15	0,15	0,05	0,037	0,025	10,080
2	19,33	0,30	0,30	0,10	0,075	0,050	20,155
3	29,00	0,45	0,45	0,15	0,112	0,030	30,162
4	38,65	0,60	0,60	0,20	0,150	0,100	40,300



а) — начало заливки; б) — заливка; в) — окончание заливки

а — начало заливки; б — заливка; в — окончание заливки

Рисунок 2. — Процесс заливки шлако-металлического расплава

Т а б л и ц а 2. — Химический состав отливок ЭШТП, %

Химический элемент									
С	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Fe
0,261	0,162	0,493	0,010	0,029	0,901	0,630	1,350	0,106	Остальное
0,235	0,090	0,466	0,004	0,027	0,892	0,629	1,232	0,105	
0,218	0,072	0,456	0,003	0,027	0,909	0,633	1,245	0,105	
0,210	0,107	0,460	0,004	0,026	0,812	0,621	1,220	0,107	

В целях оценки макроструктуры отливок из них вырезались темплеты, представленные на рисунке 3.

Для выявления дефектов макроструктуры темплеты протравливались 50 %-ным раствором соляной кислоты согласно ГОСТ 10243-75 «Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры». Температура травящего раствора находилась в пределах 65 ± 3 °С. Время травления — 2 700 с.

В целях уменьшения площади обработки нижняя часть темплетов, расположенных в стеклянной кювете для травления, находилась в слое парафина марки П-2 ГОСТ 23683-2021 (рисунок 4).

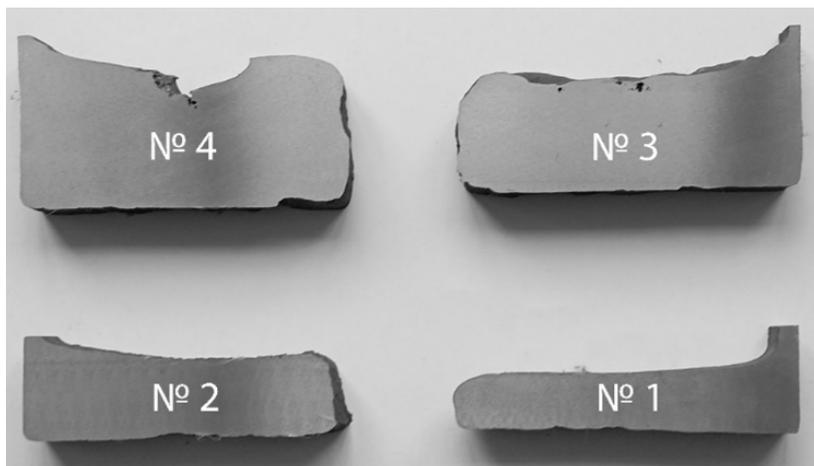


Рисунок 3. — Темплеты, полученные из отливок ЭШТП

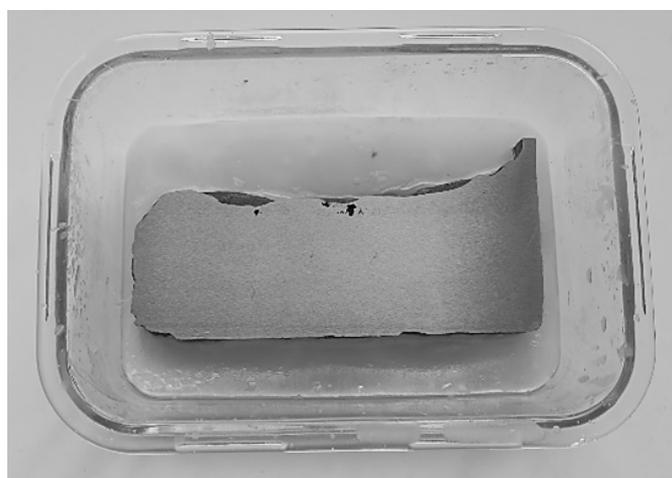
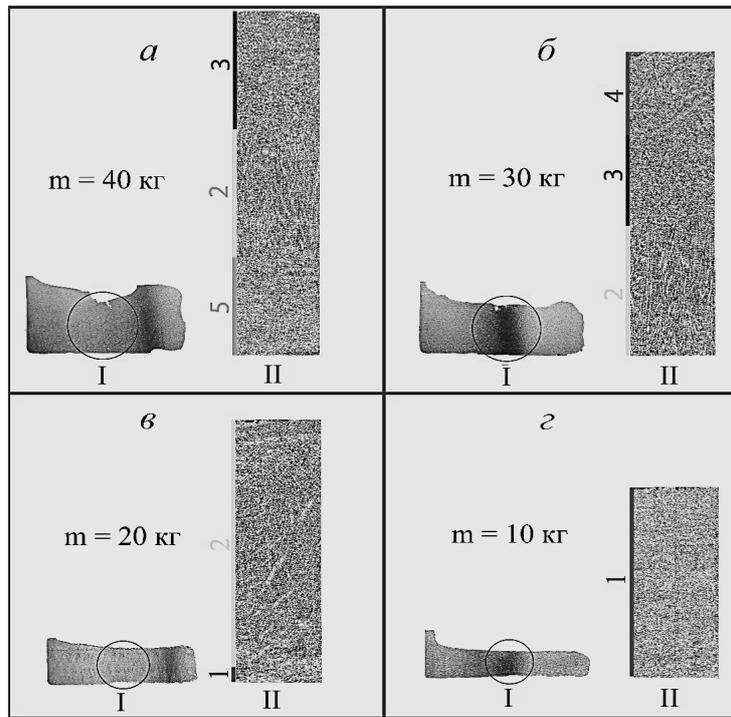


Рисунок 4. — Темплет в кювете для травления

Результаты исследования и их обсуждение. Осмотр поверхности протравленных темплетов не выявил наличие в отливках подсадочной рыхлоты в верхней части отливок. На поверхности темплетов наблюдалось равномерное травление, что свидетельствует об отсутствии местной ликвации в объеме отливок. На рисунке 5 (I) представлены темплеты, вырезанные из соответствующих отливок и прошедшие операцию травления. На рисунке 5 (II) представлена микроструктура отливок из зон, выделенных красным контуром.

Анализ микроструктуры показал, что для отливки массой 10 кг по всей высоте отливки (зона 1) наблюдалась равноосная мелкозернистая структура с характерным размером зерна до 150 мкм. Отливка массой 20 кг характеризуется наличием в нижней части отливки незначительной зоны (зона 1, $L \approx 2$ мм) с равноосной мелкозернистой структурой, вся остальная часть отливки (зона 2) имеет явно выраженную столбчатую структуру с максимальными размерами зерен до 8 000 мкм. В отливке массой 30 кг в нижней части находится столбчатая структура (зона 2, $L \approx 23$ мм) с максимальными размерами зерен до 18 000 мкм. Над ней находится зона 3 ($L \approx 11$ мм), содержащая равноосную крупнозернистую структуру с размерами зерен до 600 мкм. Выше (зона 4) наблюдается равноосная крупнозернистая структура с элементами столбчатой структуры. В нижней части отливки массой 40 кг (зона 5, $L \approx 23$ мм) столбчатая структура с максимальным размером зерен до 1 000 мкм. Зона 2 ($L \approx 13$ мм) представляет собой зону столбчатой структуры с максимальным размером зерен до 6 000 мкм. Остальная часть отливки с равноосной крупнозернистой структурой, размер зерна — до 600 мкм.



а — масса отливки 40 кг; б — масса отливки 30 кг; в — масса отливки 20 кг; г — масса отливки 10 кг; 1 — равноосная мелкозернистая структура; 2 — столбчатая структура; 3 — равноосная крупнозернистая структура; 4 — равноосная крупно-зернистая структура + столбчатая структура; 5 — столбчатая структура

Рисунок 5. — Темплеты (I) и микроструктура отливок (II)

Для определения объема материала, который необходимо удалить с отливок в целях получения бездефектных заготовок, предназначенных для проведения последующей операции прокатки, строилась 3D-модель на основе представленных выше темплетов. На первом этапе изображение темплетов обрабатывалось с помощью редактора растровой графики Adobe Photoshop для получения четкого контура темплета и формирования итогового файла в формате PSD. Далее файл изображения загружался в программный комплекс системы автоматического проектирования SolidWorks. На его основе строилась 3D-модель отливок без учета краевых условий теплоотвода, возникающих в реальных условиях при затвердевании отливок в металлической форме (рисунок 6).

В целях определения коэффициента использования материала ($K_{им}$) для случая получения из отливок заготовок, предназначенных для проведения последующей операции прокатки, в сечении 3D-модели строился профиль будущих заготовок, вписанный в контуры сечения отливки (рисунок 7).

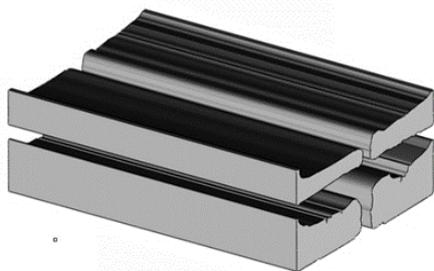


Рисунок 6. — 3D-модель отливок

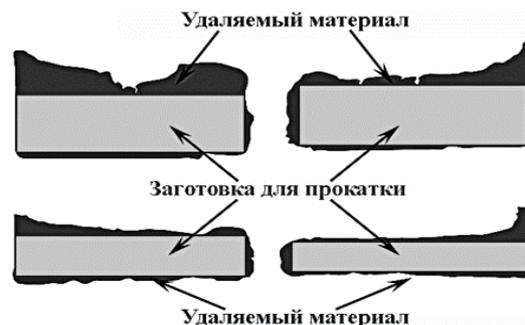


Рисунок 7. — Распределение удаляемого материала в отливках

В таблице 3 представлены расчетные значения объема удаляемого материала и $K_{им}$ при массах отливок 10, 20, 30 и 40 кг соответственно.

На рисунке 8 представлена зависимость коэффициента использования материала для отливок массой 10, 20, 30 и 40 кг при получении из них полуфабриката для последующей операции прокатки.

Заключение. Установлено, что при кокильном литье двухфазной шлако-металлической струей методом ЭШТП получают плоские отливки из стали 45ХН2МФА без подусадочных рыхлостей в верхней части отливок.

На поверхности темплетов, вырезаемых из плоских отливок из стали 45ХН2МФА, наблюдалось равномерное травление, что свидетельствует об отсутствии местной ликвации в объеме отливок. Отсутствие макродефектов в объеме отливок показывает, что литье двухфазной струей в металлические формы обеспечивает получение плотного беспористого литого материала.

Микроструктура плоских отливок характеризуется наличием дендритной структуры, что свидетельствует о наличии развитого процесса дендритной ликвации, влияние которого на физико-механические свойства металла возможно устранить с помощью последующей обработки давлением.

Анализ коэффициента использования материала для отливок массой 10, 20, 30 и 40 кг, предназначенных для получения из них полуфабрикатов, в последующем используемых при проведении операции прокатки, показал, что при данных геометрических размерах металлической формы наибольший коэффициент использования соответствует отливке массой 30 кг.

Литье в кокиль двухфазной шлако-металлической струей при методе ЭШТП обеспечивает формирование плоских бездефектных отливок из стали типа 45ХН2МФА заданного значения высоты, что позволяет минимизировать объем последующей её механической обработки перед проведением в дальнейшем операции прокатки.

Т а б л и ц а 3. — Коэффициент использования материала отливки

Масса отливки, кг	Масса удаляемого материала, кг	$K_{им}$
10	2,84	0,716
20	5,08	0,746
30	7,55	0,748
40	14,21	0,644

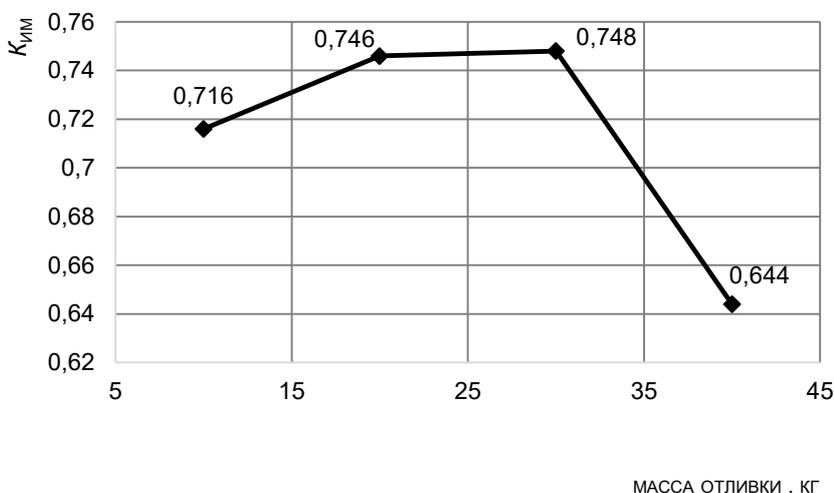


Рисунок 8. — Зависимость коэффициента использования материала от массы отливки

Список цитируемых источников

1. Целесообразность использования электрошлакового тигельного переплава для изготовления отливок из специальных среднелегированных сталей мелкими сериями / А. Н. Жигалов [и др.] // *Материалы и технологии*. — 2024. — № 1 (13). — С. 6—12.
2. Зависимость содержания легирующих элементов в отливке ЭШТП от их гранулометрического состава / А. Н. Жигалов, Л. А. Смирнов, М. С. Ковалёва [и др.] // *Металлургия сплавов — 2025* : сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 5—6 июня 2025 г. — Минск : Колоград, 2025. — С. 45—46.
3. Жигалов, А. Н. Зависимость содержания легирующих элементов в отливке ЭШТП от времени их ввода в шлаковую ванну / А. Н. Жигалов, М. С. Ковалёва, И. О. Сазоненко // *Металлургия сплавов — 2025* : сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 5—6 июня 2025 г. — Минск : Колоград, 2025. — С. 47—48.
4. Жигалов, А. Н. Определение влияния состава флюса на износ футеровки в процессе ЭШТП / А. Н. Жигалов, М. С. Ковалёва, И. О. Сазоненко // *Металлургия сплавов — 2025* : сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 5—6 июня 2025 г. — Минск : Колоград, 2025. — С. 49—50.
5. Качество отливки из стали 45, получаемой заливкой в металлическую форму после электрошлакового тигельного переплава // А. Н. Жигалов, В. А. Логвин, А. Д. Мешков, И. О. Сазоненко // *Технологическое обеспечение машиностроительных производств* : сб. стат. Междунар. науч.-тех. конф., Могилев, 21—22 марта 2024 г. / БРУ. — Могилев, 2024. — С. 85—90.
6. Гини, Э. Ч. Технология литейного производства: специальные виды литья : учеб. для студентов высш. учеб. заведений / Э. Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин ; под ред. В. А. Рыбкина. — М. : Академия, 2005. — 352 с.
7. Специальные способы литья : справочник / Б. А. Ефимов, Г. А. Анисович, В. Н. Бабич [и др.] ; под общ. ред. В. А. Ефимова. — М. : Машиностроение, 1991. — 436 с.
8. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. М. Мартын [и др.] ; под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев : Наук. думка, 1988. — 216 с.

Поступила в редакцию 14.10.2025.

УДК 621.9

А. Н. Жигалов¹, доктор технических наук, доцент,

Ю. Д. Черняков², М. В. Башаримов³, В. М. Головков⁴, И. О. Сазоненко⁵, И. В. Кубраков⁶

¹Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

^{1, 2, 3, 4, 5, 6}Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев, Республика Беларусь

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В ПРОЦЕССЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

Рассмотрены физические явления, возникающие в процессе аэродинамического звукового упрочнения. Показано, что распространение звуковой волны в резонаторе установки аэродинамического звукового упрочнения возможно только в режиме бегущей волны со множественными отражениями от боковых стенок. Данное явление приводит к увеличению как акустического давления в ней, так и колебательной скорости частиц среды по сравнению со случаем её свободного распространения. Наличие высокой колебательной скорости частиц среды в совокупности с интенсивным вихревым движением приводит к возникновению нелинейных эффектов в зоне резонатора. В результате происходит искажение первоначальных синусоидальных волн и образование слабых ударных волн.

Ключевые слова: процесс аэродинамического звукового упрочнения; нелинейные эффекты; слабые ударные волны.

Рис. 7. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.

A. N. Jigalov¹, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,

Y. D. Chernyakov², M. V. Basharimov³, V. M. Golovkov⁴, I. O. Sazonenko⁵, I. V. Kubrakov⁶

^{1, 2, 3}Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,
the Republic of Belarus, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

^{1, 4, 5, 6}State Scientific Institution “Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus”,
11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE WEAK IMPACT WAVES FORMATION IN THE PROCESS OF AERODYNAMIC SOUND HARDENING

The article examines the physical phenomena that arise during aerodynamic sound hardening (ASH). It is shown that sound wave propagation in the ASH resonator is possible only in the travelling wave mode with multiple reflections from the side walls. This phenomenon leads to an increase in both the acoustic pressure in the medium and the oscillatory velocity of the medium particles, compared to the case of free propagation. The presence of a high oscillatory velocity of the medium particles, combined with intense vortex motion, leads to the emergence of nonlinear effects in the resonator zone. As a result, the initial sinusoidal waves are distorted and weak shock waves are formed.

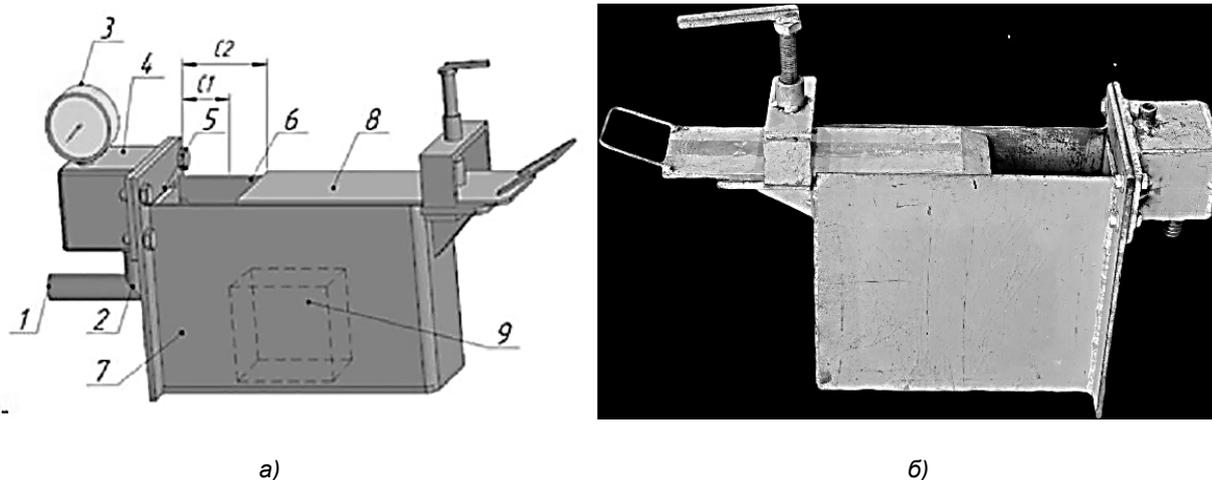
Key words: aerodynamic sound hardening process; nonlinear effects; weak shock waves.

Fig. 7. Table 1. Ref.: 8 titles.

Введение. В ИТМ НАН Беларуси разработали новые подходы к получению броневых материалов типа стали 45ХН2МФА с использованием метода легирования стали 45 в процессе электрошлакового тигельного переплава, термической обработки и аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ).

Проводились исследования явлений, сопровождающих процесс АДУ, обоснования возможности применения метода АДУ для повышения служебных свойств литых сталей типа 45ХН2МФА.

Материалы и методы исследования. Конструктивные особенности установки и методика АДУ подробно освещены в [1]. Конструктивная схема установки АДУ и её общий вид представлены на рисунке 1.



а — конструктивная схема; б — общий вид

Рисунок 1. — Экспериментальная установка АДУ

Принцип работы установки АДУ заключается в следующем. Подающийся от системы воздухоприготовления 1 воздух подается через воздуховод 2 в камеру сглаживания пульсаций воздуха 4. Давление воздуха контролируется манометром 3. Изделие 9 закрепляется на поддерживающем устройстве, которое устанавливается в резонансную камеру 7 через выходной канал 6, причем поддерживающее устройство, следовательно, и упрочняющий инструмент не должны касаться колеблющихся стенок камеры. Установка режимов обработки происходит путем настройки положения регулирующей заслонки 8 на размер $C1$ или $C2$ с последующей фиксацией заслонки 8 [2].

Исследования проводились путем анализа взаимодействия истекающего из сопла 5 потока воздуха с элементами конструкции установки АДУ. С использованием технологии построения твердотельных моделей программного комплекса САПР SolidWorks была создана 3D-модель установки. Моделирование процесса течения воздушного потока в установке АДУ осуществлялось с помощью встроенного модуля Flow Simulation данного программного комплекса.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты, полученные в ходе проведения моделирования, свидетельствуют о наличии двух этапов течения воздушных потоков в установке АДУ. При моделировании в обоих случаях задавалось одно и то же количество отображаемых траекторий, равное 15. Первый этап течения представлен на рисунке 2.

На данном этапе течения наблюдается поворот воздушного потока, поступающего в область резонатора установки АДУ, на 270° и его выход без рециркуляции потока в полости резонатора. Выходящий из резонатора обратный поток взаимодействует с потоком на входе, отклоняя его вверх. Отклонение потока, истекающего из щелевого сопла, вверх приводит к уменьшению объема воздуха, поступающего в полость резонатора установки АДУ. Далее течение в установке АДУ переходит ко второму этапу (рисунок 3), который сопровождается рециркуляцией части воздуха в полости резонатора.

Уменьшение объема воздуха, поступающего в полость резонатора, закономерно вызывает уменьшение потока на выходе из него. Воздействие на поток, истекающий из щелевого сопла, уменьшается, он отклоняется вниз, установка АДУ возвращается к первоначальному режиму течения. В результате циклического перехода из одного режима течения в другой появляется вертикальная модуляция вытекающего из щелевого сопла потока. Этот модулированный поток и является источником первичного возмущения в установке АДУ.

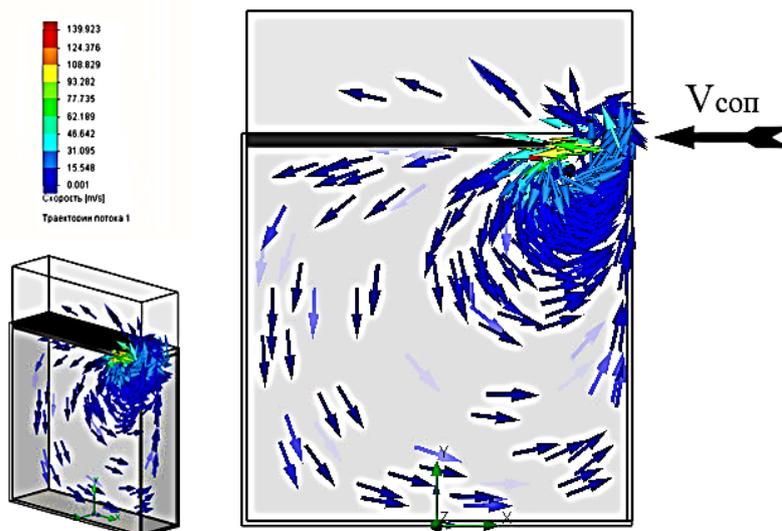


Рисунок 2. — Первый этап течения воздушного потока в установке АДУ

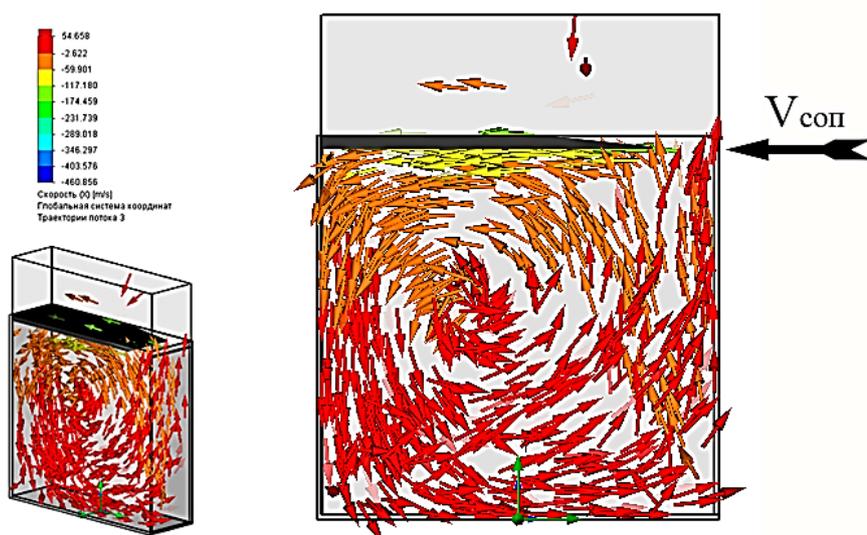


Рисунок 3. — Второй этап течения воздушного потока в установке АДУ

Модулированный поток, выходящий из щелевого сопла, сопровождается колебаниями давления в полости резонатора. Изменяющееся давление воздействует на боковые стенки резонатора, заставляя их совершать колебательные движения. Колебания боковых стенок вызывают возникновение в полости резонатора вторичных звуковых волн. При совпадении частоты модуляции потока, истекающего из щелевого сопла, с собственной частотой колебаний боковых стенок резонатора амплитуда их колебаний возрастает — наблюдается резонанс.

Моделирование колебательного процесса, возникающего на боковых стенках установки АДУ, осуществлялось с использованием модуля SolidWorks Simulation. На рисунке 4 представлены первые четыре моды собственных колебаний боковой стенки резонатора установки АДУ, а также эпюра перемещения боковых стенок, учитывающая конструктивные особенности установки АДУ. Для наглядности масштаб деформированного состояния выбран намного больше единицы.

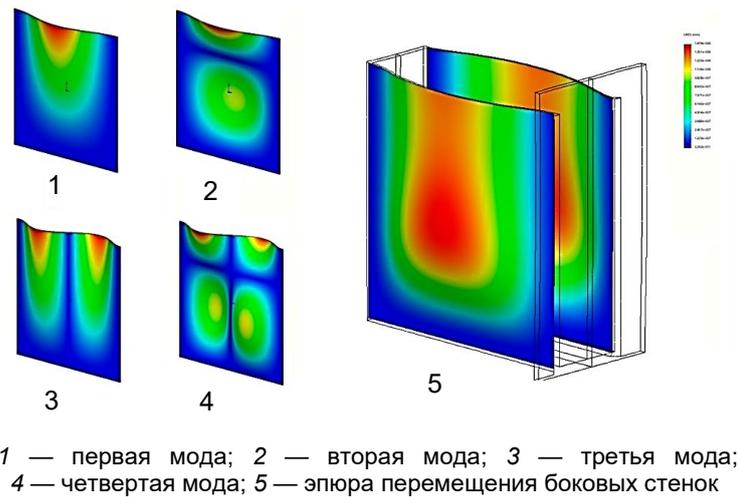


Рисунок 4. — Моделирование колебательного процесса боковых стенок резонатора установки АДУ

Частоты, соответствующие первым четырем модам колебаний боковых стенок резонатора установки АДУ, представлены в таблице 1.

Полученное расчетное значение частоты колебаний моды 1, равное 163,92 Гц, близко к частоте, указанной в источнике [1], — 160 Гц. Близость значений расчетной и действительной частот установки АДУ свидетельствует о корректно выполненном процессе моделирования.

Колебательное движение боковых стенок резонатора является вынужденным и происходит в противофазе. При этом синхронизация движения боковых стенок осуществляется по тому же типу синхронизации, которую описал Гюйгенс на двух маятниковых часах, установленных на упругой балке [3].

Боковые стенки резонатора, колеблющиеся синхронно в противофазе, являются источниками звуковых волн. Длина волны λ , излучаемая боковой стенкой, зависит от частоты ее колебаний [4]:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \tag{1}$$

где c — скорость звука;

f — частота.

Скорость звука в среде

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}},$$

где γ — коэффициент адиабаты (для воздуха $\gamma = 1,402$ при $T = 293$ °К и $p = 101\,325$ Па);

p — давление (для воздуха $p = 101\,325$ Па при $T = 293$ °К);

ρ — плотность среды (для воздуха $\rho = 1,205$ кг / м³ при $T = 293$ °К и $p = 101\,325$ Па).

Т а б л и ц а 1. — Значение частот первых четырех мод колебаний боковых стенок резонатора установки АДУ

Номер моды	Частота (рад / с)	Частота (Гц / с)	Период (с)
1	1 029,9	163,92	0,0061006
2	1 827,1	290,79	0,0034389
3	2 702,1	430,05	0,0023253
4	3 586,8	570,85	0,0017518

В нашем случае, согласно формуле (1), для первой моды колебания, возникающего в резонаторе установки АДУ, длина волны $\lambda = 2,09$ м, а четверть длины волны, соответственно, $\lambda / 4 = 0,523$ м.

Конструктивно расстояние между боковыми стенками резонатора установки АДУ составляет 0,09 м. С учетом того факта, что ширина резонатора меньше половины длины волны, распространение последней в объеме резонатора возможно только в режиме бегущей волны. При этом при прохождении половины волны в пределах области резонатора произойдет примерно двенадцать её отражений от боковых стенок. Согласно [5], при отражении звуковой волны на границе раздела сред, имеющих разные физические свойства, должно выполняться следующее условие:

$$+\tilde{p} = p' = \frac{2c'\rho'}{c'\rho' + c\rho} p(t), \quad (2)$$

где \tilde{p} — акустическое давление в отраженной волне;

p' — акустическое давление в прошедшей волне;

$c'\rho'$ — удельное акустическое сопротивление второй среды;

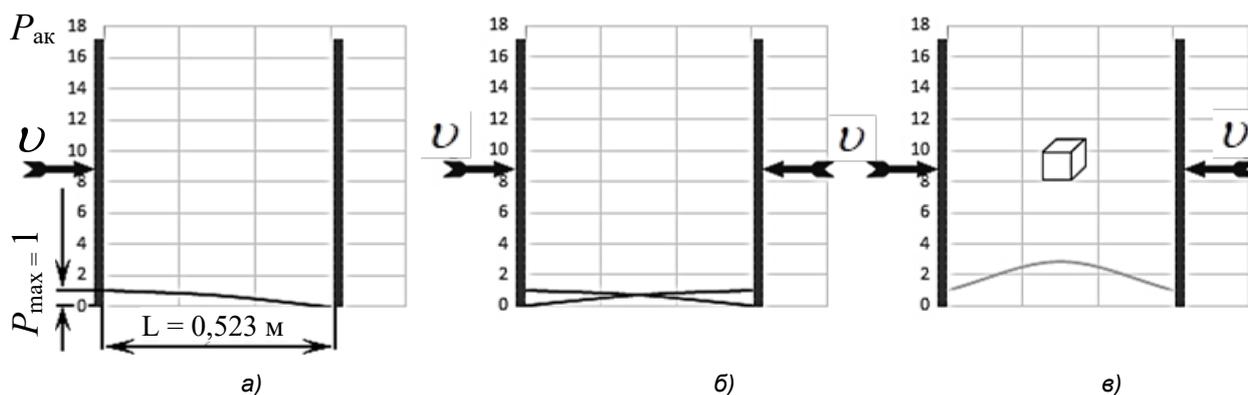
$c\rho$ — удельное акустическое сопротивление первой среды;

p — акустическое давление в падающей волне.

В нашем случае падающая и отражённая волны распространяются в среде с низким удельным акустическим сопротивлением (для воздуха $c\rho = 413$ Па · с / м при $T = 293$ °К и $p = 101\,325$ Па). Отражение происходит от среды с высоким удельным акустическим сопротивлением (для стали $c'\rho' = 45,6 \cdot 10^6$ Па · с / м). Тогда, согласно уравнению (2), акустические давления в падающей и отраженной волнах практически равны между собой. Такая ситуация наблюдается в случае, если граница неподвижна. В случае отражения волны от границы, которая является источником акустического давления, акустическое давление отраженной волны будет суммироваться с акустическим давлением от источника.

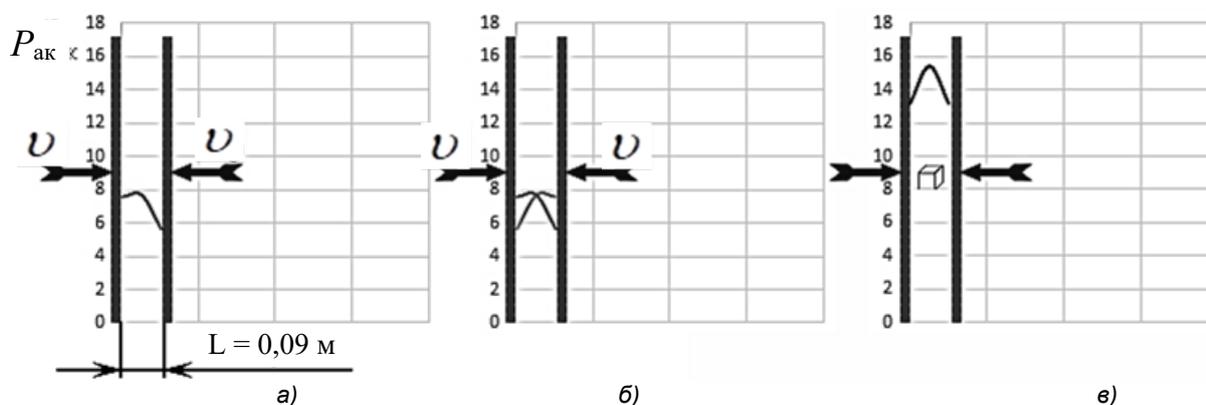
Основываясь на представленных выше предпосылках, были проведены расчеты распределения акустического давления в полости резонатора при расстоянии между боковыми стенками $L = 0,523$ м и $L = 0,09$ м. На рисунке 5, а, представлено распределение акустического давления в полости резонатора при $L = 0,523$ м для случая, когда источником акустической волны является только левая стенка. Боковые стенки совершают колебательное движение по закону $p = p_0 \sin(x \pm ct)$, для простоты представлений результатов расчетов принято $p_0 = 1$. Результаты распределения акустического давления представлены на момент времени $t = 0,001525$ с от начала движения боковой стенки из начального положения. На рисунке 5, б, дано распределение от волн, излучаемых двумя боковыми стенками без учета явления интерференции. На рисунке 5, в, дано распределение от двух волн с учетом явления интерференции и наличия в полости резонатора объекта, подвергающегося воздействию.

На рисунке 6 представлено распределение акустического давления в полости резонатора при расстоянии между боковыми стенками $L = 0,09$ м. В этом случае ситуация кардинально меняется. За четверть периода волны (в течение времени $t = 0,001525$ с) происходит шесть отражений волны от стенок, перемещающихся со скоростью v в противоположных направлениях навстречу друг к другу. При этом в соответствии с законом сохранения энергии при каждом отражении падающей волны, достигшей движущейся стенки, к акустическому давлению отраженной волны добавляется акустическое давление, возникающее на поверхности стенки и связанное с ее движением.



а — один источник акустического давления; б — два источника акустического давления без интерференции; в — два источника акустического давления + интерференция + объект воздействия

Рисунок 5. — Результаты расчета распределения акустического давления в полости резонатора при расстоянии между боковыми стенками $L = 0,523$ м и $t = 0,001525$ с



а — один источник акустического давления; б — два источника акустического давления без интерференции; в — два источника акустического давления + интерференция + объект воздействия

Рисунок 6. — Результаты расчета распределения акустического давления в полости резонатора при расстоянии между боковыми стенками $L = 0,523$ м и $t = 0,001525$ с

Как видно из приведенных выше расчетов, распространение волны в бегущем режиме в полости резонатора, размер которого в направлении распространения волны меньше $\lambda / 4$, сопровождается множественными отражениями волны от стенок. Это, в свою очередь, приводит к росту акустического давления в волне по сравнению с вариантом со стоячей волной в резонаторе, имеющем размеры, кратные $\lambda / 2$.

Все полученные результаты для акустического давления в той же мере справедливы и для колебательной скорости частиц газа v , так как, согласно [6],

$$V = \frac{p}{\rho c}$$

где V — скорость частицы.

Таким образом, в установке АДУ будет наблюдаться не только усиление акустического давления в полости резонатора, но и рост колебательной скорости. Если также учесть тот факт, что в резонаторе существует интенсивное вихревое движение, то процесс АДУ будет

характеризоваться более высоким значением акустического числа Рейнольдса по сравнению со свободным распространением волны. Согласно [7], число Рейнольдса для акустических процессов определяется следующим образом:

$$Re = \frac{V\lambda}{2\pi\nu},$$

где Re — число Рейнольдса;

ν — кинематическая вязкость.

В работе [7] указывается, что для интенсивного звука, распространяющегося в таких средах, как воздух и малопоглощающие жидкости, особенно для волн низких частот звукового и ультразвукового диапазонов, акустические числа Рейнольдса достаточно велики, нелинейные эффекты проявляются достаточно сильно. При достаточно больших числах Рейнольдса среда должна рассматриваться как невязкая. В невязкой среде волны косинусоидальной или синусоидальной формы будут искажаться и стремиться к пилообразной форме. В этом случае уравнения линейной теории звука неприменимы, необходимо использовать аппарат нелинейной теории звука. Тогда колебательная скорость v в звуковой волне будет описываться следующим образом [6]:

$$v = v_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c_0 + \varepsilon\gamma} \right),$$

где v_0 — колебательная скорость в невозмущенной среде;

ω — циклическая частота;

t — время;

x — координата;

c_0 — скорость звука в невозмущенной среде;

$\varepsilon = (\gamma + 1) / 2$.

На рисунке 7 представлена последовательная деформация профиля первоначально синусоидальной волны. Постепенно волна будет менять форму профиля, искажаться, профиль приобретет пилообразную форму.

В процессе искажения (заштрихованная часть рисунка) первоначально синусоидальной волны ее структура меняется, формируются слабые ударные волны с условием $(\rho_2 - \rho_1) / \rho_1 < 1$, (где ρ_2 — плотность за фронтом волны; ρ_1 — плотность перед фронтом волны) [8]. Формирование слабых ударных волн в процессе АДУ приводит к кумуляции части энергии волны на переднем фронте, что многократно увеличивает эффективность данного процесса.

Так как броневые стали типа 45ХН2МФА имеют повышенные физико-механические свойства, то прохождение релаксационных изменений структуры требует больших значений энергий, формирование которых и обеспечивают подходы с технологией АДУ.

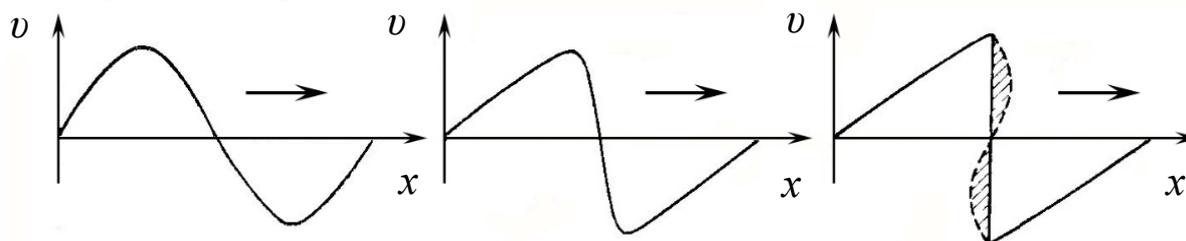


Рисунок 7. — Последовательная деформация профиля синусоидальной волны

Заключение. Использование в установке АДУ резонатора, у которого расстояние между боковыми стенками на порядок меньше, чем длина генерируемой волны, приводит к возможности распространения акустических волн только в режиме бегущей волны со множественными отражениями.

Использование в качестве материала для изготовления боковых стенок стали, которая имеет на несколько порядков более высокое удельное акустическое сопротивление по сравнению с воздухом, обеспечивает малые потери энергии при отражении. Коэффициент отражения по интенсивности $\alpha_{отр}$ в данном процессе близок к единице [4]:

$$\alpha_{отр} = \left| \frac{c\rho - c'\rho'}{c\rho + c'\rho'} \right|^2 = \left| \frac{413 - 45,6 \cdot 10^6}{413 + 45,6 \cdot 10^6} \right|^2 = 0,9998.$$

Использование многократного прохождения акустической волны между стенками резонатора, совершающей возвратно-поступательные движения, приводит к эффективному росту акустического давления и колебательной скорости частиц газа в объеме резонатора.

Рост колебательной скорости частиц воздуха в совокупности с наличием интенсивного вихревого движения в полости резонатора приводит к возрастанию значения акустического числа Рейнольдса, характеризующего данный процесс. Более высокое число Рейнольдса приводит к возникновению нелинейных эффектов при распространении акустических волн. В частности, происходит искажение изначально синусоидальной волны и формирование из нее волны с пилообразной формой.

Рост эффективности процесса АДУ основан на увеличении энергии акустических волн в зоне резонатора за счет:

- нахождения волны в процессе распространения в меньшем объеме пространства по сравнению со случаем свободного распространения;
- прохождения синусоидальных волн через среду с нелинейными свойствами, что приводит к их искажению, в результате чего возникают слабые ударные волны, на переднем фронте которых происходит кумуляция части энергии волны, многократно увеличивающая эффективность данного процесса.

Изложенный подход к получению броневых сталей типа 45ХН2МФА за счет введения дополнительно к процессу электрошлакового переплава и термообработки метода АДУ позволит сформировать необходимые физико-механические свойства для данного рода материалов.

Список цитируемых источников

1. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. — Могилев : МГУП, 2019. — 213 с.
2. Горавский, И. А. Энергетические процессы при аэродинамическом звуковом упрочнении концевой фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов // *Материалы и технологии*. — 2024. — № 2 (14). — С. 10—18.
3. Пиковский, А. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление / А. Пиковский, М. Роземблум, Ю. Куртс. — М. : Техносфера, 2003. — 496 с.
4. Акустика : справочник / А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков [и др.]. — М. : Радио и связь, 1989. — 336 с.
5. Исакович, М. А. Общая акустика / М. А. Исакович. — М. : Наука, 1973. — 496 с.
6. Красильников, В. А. Введение в физическую акустику / В. А. Красильников, В. В. Крылов. — М. : Наука, 1984. — 400 с.
7. Зарембо, Л. К. Введение в нелинейную акустику / Л. К. Зарембо, В. А. Красильников. — М. : Наука, 1966. — 520 с.
8. Уизем, Дж. Линейные и нелинейные волны / Дж. Уизем. — М. : Мир, 1977. — 638 с.

Поступила в редакцию 14.10.2025.

УДК 519.653

А. В. Лешок¹, кандидат технических наук,
И. Л. Козловский², кандидат технических наук, доцент,
В. Н. Тарасик³,

Д. А. Ционенко⁴, кандидат физико-математических наук, доцент,
И. В. Дубень⁵, кандидат технических наук, доцент

^{1, 2, 3}Общество с дополнительной ответственностью «Евролиния», пер. Козлова, 7А, 220037 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 344 56 42, eurolinia@mail.ru

⁴ Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 344 56 42, tsiond@tut.by

⁵ Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республики Беларусь, +375 (163) 64 06 73, duben_i_v@mail.ru

СТРУКТУРА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ КЕРАМИКО-ПОЛИМЕРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПАСТЫ

В работе обоснован выбор керамико-полимерной теплопроводящей диэлектрической пасты, который обеспечивает повышение коэффициента теплопроводности и существенное улучшение электроизоляционных свойств по отношению к пастам, в структуре которых присутствуют диэлектрические частицы наполнителя только одной фракции. Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований, связанные с анализом технологических свойств пасты КПТД-4.

Ключевые слова: теплопроводность; термическое (тепловое) сопротивление; композиционные материалы (композиты); эластичные диэлектрические материалы; теплопроводящие пасты.

Рис. 5. Библиогр.: 6 назв.

A. V. Leshok¹, PhD in Technical Sciences,
I. L. Kozlovsky², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
V. N. Tarasik³,

D. A. Tsionenko⁴, PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,
I. V. Duben⁵, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

^{1, 2, 3}ALC “Eurolinia”, 7A Kozlova Ave., 220037 Minsk, the Republic of Belarus,
 +375 (17) 344 56 42, eurolinia@mail.ru

⁴Institution of Education “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, 6 P. Brovki Str., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 344 56 42, tsiond@tut.by

⁵Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225401 Baranavichy, the Republic of Belarus, +375 (163) 64 06 73, duben_i_v@mail.ru

STRUCTURE AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF HIGH-VISCOSITY CERAMIC-POLYMER THERMALLY CONDUCTIVE DIELECTRIC PASTE

The work justifies the choice of composition for a ceramic-polymer thermally conductive dielectric paste, which ensures an increase in thermal conductivity and a significant improvement in electrical insulation properties compared to pastes whose structure contains dielectric filler particles of only one fraction. The results of experimental and theoretical research related to the analysis of the technological properties of CPTCD-4 paste are presented.

Key words: thermal conductivity; thermal (heat) resistance; composite materials; elastic dielectric materials; heat-conducting pastes.

Fig. 5. Ref.: 6 titles.

Введение. Современное оборудование машиностроительного производства, радиоэлектронные системы контроля и управления технологическими процессами, системы обработки, передачи и хранения информации характеризуются высокой энергонасыщенностью. При этом решение задачи, связанной с отводом тепловой энергии, выделяющейся в узлах

и элементах оборудования, приобретает особую актуальность. Важными элементами системы терморегуляции силовых установок и электронных систем управления являются теплопроводящие элементы, к которым предъявляются все более жесткие технологические требования, связанные как с обеспечением малого термического сопротивления, так и с рядом других технологических характеристик. Одним из решений, связанных с отводом тепла, является применение теплопроводящих паст.

Теплопроводящие пасты должны:

- обеспечивать эффективный отвод тепла от источника к приемнику;
- гарантировать требуемое значение диэлектрической прочности;
- не изменять микрогеометрию поверхности источника и приемника тепла при монтаже за счет пластической деформации микровыступов с образованием следов абразивного воздействия;
- не оказывать коррозионного воздействия на контактные поверхности;
- иметь длительный ресурс работы за счет минимальной потери массы органической связи;
- эффективно наноситься на поверхность и легко деформироваться с приложением усилия;
- не изменять свои физико-механические свойства в процессе эксплуатации (к примеру, снижать вязкость, которая может привести к ее растеканию).

Объектом исследования являются технологические характеристики керамико-полимерной теплопроводящей диэлектрической (далее — КПТД) пасты, разработанной и внедренной в производство многопрофильной производственной группой компаний «Номакон—Евролиния» (Минск, Республика Беларусь).

Цель работы — определение структуры пасты КПТД-4, обеспечивающей удовлетворение указанных выше технологических требований на основе экспериментальных и теоретических исследований, связанных с анализом ее свойств.

Материалы и методы исследования. Состав и структура теплопроводящего композита определяется в первую очередь дисперсным составом компонентов, объемной долей частиц и их пространственным расположением.

В соответствии с моделью [1] при увеличении объемной доли частиц наполнителя вплоть до критического значения, равного 0,524 для структур с кубической симметрией и 0,7405 для плотноупакованных структур, тепловое сопротивление образца должно резко возрастать. Оно должно приближаться к максимальному значению, которое характеризует элементарную ячейку композита [1; 2], и определяться только формой частиц наполнителя и коэффициентами теплопроводности чистого материала, связующего и чистого материала наполнителя. В рамках предложенной модели [1] рассматривается идеальная структура композита: сферические частицы наполнителя имеют одинаковый размер и расположены в узлах кубической решетки. При таких условиях максимальное значение эффективного коэффициента теплопроводности композита, используемого при производстве теплопроводящих прокладок, которое достигается при минимальном объемном содержании связующего в виде низкомолекулярного кремнийорганического полимера ($\lambda_{св} = 0,12 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$) и наполнителя в виде сферических частиц оксида алюминия ($\lambda_{св} = 40 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$), $\lambda_{пр} = 9,095 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$. При производстве теплопроводящей пасты обеспечение упругих свойств не требуется [2], количество связующего может быть уменьшено по сравнению с указанным выше критическим значением. Тогда при соприкосновении поверхностей частиц наполнителя ее эффективный коэффициент теплопроводности при условии однородности структуры $\lambda_{п} = 7,576 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$.

Полученные в рамках модели результаты являются несколько завышенными, поскольку в реальных композитах размеры частиц существенно отличаются друг от друга и частицы не располагаются в узлах периодической структуры. Даже незначительное отклонение в размерах частиц приводит к тому, что в некоторых областях композита будут возникать прослойки связующего или воздушные промежутки между частицами наполнителя, толщина которых существенно превосходит рассчитанную толщину, являющуюся при

равномерном распределении частиц в связующем минимальной [1]. Увеличение толщины прослойки между элементарными ячейками приводит к резкому уменьшению коэффициента теплопроводности.

Для описания отклонения структуры композита от идеальной в разработанной модели вводится корректирующий множитель, который учитывает отклонение в структуре композита от идеальной кубической или плотноупакованной (гексагональной или кубической гранецентрированной).

Размеры сферических частиц наполнителя в исследуемом образце являются случайными величинами и могут принимать значения в определенном диапазоне $[d_{\min}, d_{\max}]$. Пример распределения сферических частиц со средним диаметром $d_{\text{ср}} = 100$ мкм, полученного с использованием лазерного анализатора, показан на рисунке 1.

В качестве величины 3σ , определяющей интервал, в который укладываются 99,7 % всех частиц согласно закону нормального распределения, можно выбрать значение $3\sigma = d_{\text{ср}} / 2$, где $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр сферических частиц наполнителя. Учтем далее координационное число $n = 6$ для каждого узла в кубической решетке. Это значит, что когда частицы имеют различные размеры, то возможно смещение частиц малого размера относительно центра элементарной ячейки в каждом из шести направлений. Эффективное отклонение от идеальной структуры вводится по формуле

$$\delta_{\text{эф}} = \frac{\sigma}{n-1} = \frac{d_{\text{ср}}}{2 \cdot 3(6-1)} = \frac{d_{\text{ср}}}{30}.$$

Если композит является слабонаполненным, т. е. ширина прослоек связующего Δa будет больше, чем возможное отклонение частиц от узлов кубической решетки $\delta_{\text{эф}}$, то неидеальность структуры не влияет на теплопроводность. В этом случае для расчета коэффициента теплопроводности может применяться методика, разработанная в [1].

Для высоконаполненных композитов коэффициент теплопроводности определяется дефектами структуры. Так, если толщина прослоек связующего Δa между элементарными ячейками, построенными для частиц среднего размера $d_{\text{ср}}$, будет меньше, чем эффективное отклонение $\delta_{\text{эф}}$, то для расчета необходимо ввести корректирующий множитель. Значение корректирующего множителя выбирается на основе сравнения результатов расчета по модели с результатами измерений, и максимальное значение эмпирического корректирующего множителя выбирается $K_{\text{кор}} = 4$. При этом корректирующий множитель должен изменяться в зависимости от соотношения между толщиной прослоек связующего Δa и значением эффективного отклонения $\delta_{\text{эф}}$. В результате значение корректирующего коэффициента определим формулой

$$K_{\text{кор}} = \begin{cases} 1 & \text{при } \Delta a > \delta_{\text{эф}}; \\ T(\Delta a, \delta_{\text{эф}}) & \text{при } \delta_{\text{эф}} \geq \Delta a > 0; \\ 4 & \text{при } \Delta a = 0; \end{cases}$$

$$T(\Delta a, \delta_{\text{эф}}) = 1 + 9 \left(\frac{\Delta a}{\delta_{\text{эф}} - \Delta a} \right)^2 - 6 \left(\frac{\Delta a}{\delta_{\text{эф}} - \Delta a} \right)^3.$$

График зависимости корректирующего множителя от массовой доли наполнителя (сферические частицы) представлен на рисунке 2.

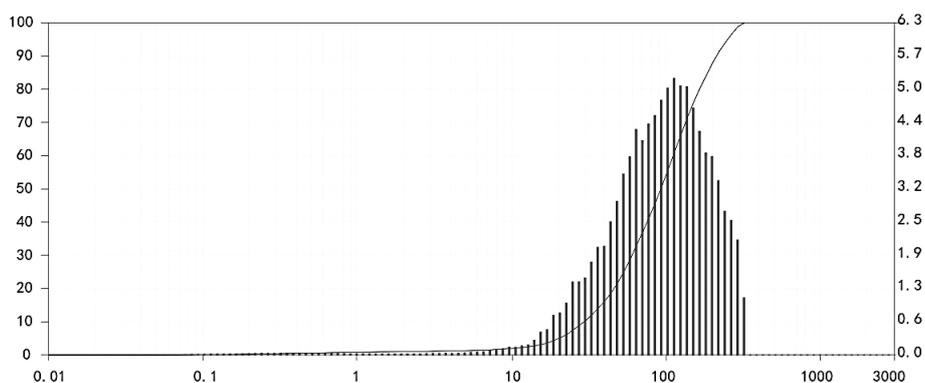


Рисунок 1. — Распределение сферических частиц наполнителя по размерам (гистограмма, шкала справа) и интегральная характеристика распределения (синяя линия, шкала слева) [3]

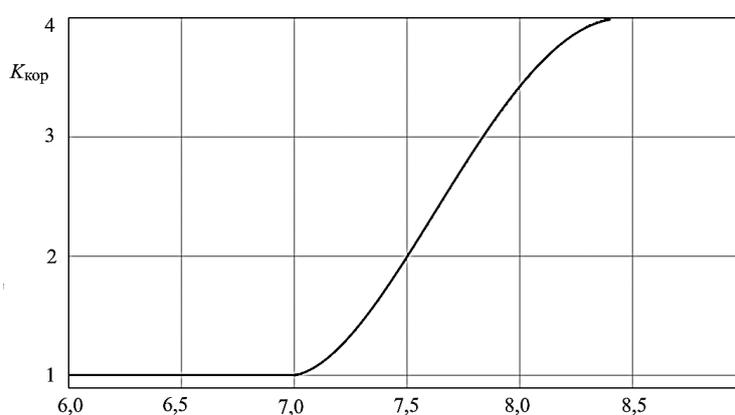


Рисунок 2. — Зависимость корректирующего множителя от массовой доли связующего, %

Увеличение коэффициента теплопроводности композита определяется минимизацией толщины прослоек связующего между частицами наполнителя. Этого можно добиться в случае, когда размеры сферических частиц композита отличаются на величину, меньшую $\delta_{эф}$. Однако обеспечение малого разброса в размерах частиц наполнителя является сложной технологической задачей. К тому же, поскольку толщина прослоек связующего мала, изделия в виде прокладок из такого материала будут хрупкими. Следовательно, используя подход, связанный с обеспечением малой толщины прослоек связующего, можно добиться больших значений коэффициента теплопроводности, но это приведет к потере эластичности и повышению вязкости материала.

Существует способ увеличения теплопроводности композита, связанный с увеличением коэффициента теплопроводности связующего. Как было установлено в [1], этого можно добиться, используя в качестве связующего не чистый полимер, а ненасыщенный композит с частицами наполнителя, размеры которых во много раз меньше, чем у частиц основной фракции. Этот подход к созданию материалов КПТД может обеспечить высокие значения коэффициента теплопроводности и позволит сохранить эластичность.

В этом случае толщина прослоек связующего должна быть достаточной, чтобы скомпенсировать различие в размерах частиц наполнителя как для крупной, так и мелкой фракции. Структура такого композита является ненасыщенной. При распределении размеров частиц наполнителя с $3\sigma = d_{cp} / 2$ необходимая толщина прослойки связки между элементарными ячейками должна быть равна среднему радиусу сферических частиц наполнителя: $\Delta a_{min} = d_{cp} / 2$ (м). Ширина дополнительного слоя композита, добавляемого к каждой грани элементарной ячейки, построенной вокруг частицы наполнителя, $\Delta a_0 = \Delta a_{min} / 2 = d_{cp} / 4$. При

этом следует учесть, что частицы мелкой фракции помещаются непосредственно в полимерную связку, а частицы крупной фракции — в ненасыщенный композит из полимера и мелких частиц. Чтобы малые частицы композита не мешали перемещению частиц основной фракции при перемешивании суспензии, их диаметры должны быть меньше, чем диаметры крупных частиц, как минимум в 7 раз, но оптимальным отношением средних диаметров крупных и мелких частиц будет отношение, меньшее 10.

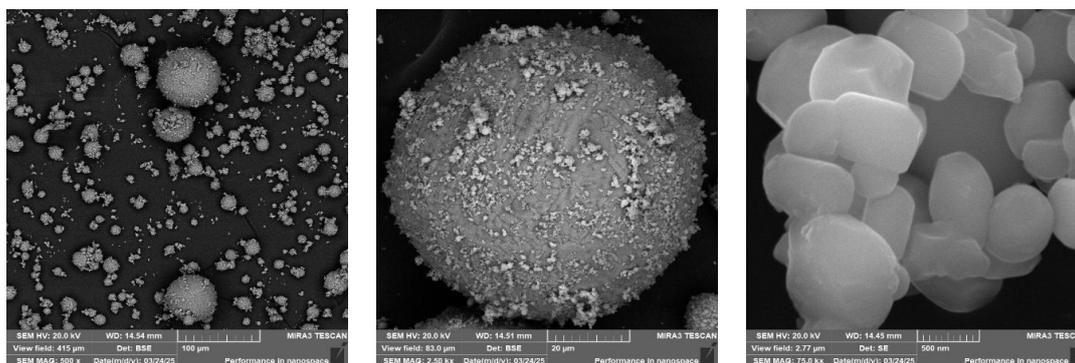
Обеспечение технологических свойств теплопроводящей пасты связано с минимизацией теплового сопротивления и повышением диэлектрической прочности.

Известно, что получение идеально сопрягаемых поверхностей со стопроцентной площадью контакта невозможно. Контакт осуществляется на микроуровне по выступам и впадинам, в которых присутствует воздух, имеющий коэффициент теплопроводности $0,025 \dots 0,035 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$, что значительно меньше, чем у наиболее применимых в качестве радиаторов меди и алюминия — $390 \dots 400$ и $200 \dots 230 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение. На основании методики, предложенной аккредитованной лабораторией ОДО «Евролиния», разработана и внедрена в производство высоковязкая теплопроводящая паста КПТД-4. Она обладает коэффициентом теплопроводности, равным $7,0 \dots 7,3 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$, близким к максимально достижимому в рассматриваемых условиях значению $\lambda_{\text{п}} = 7,576 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$.

Повышение эффективности отвода тепла при использовании данной пасты достигается за счет применения керамических порошков (рисунок 3, а) с оптимизированным гранулометрическим составом высокой степени чистоты. Крупнодисперсные порошки обеспечивают требуемое значение диэлектрической прочности, мелкодисперсные — заполнение объемов микровпадин. Отличительной особенностью состава высоковязкой пасты является применение крупного (см. рисунок 3, б) и мелкого (см. рисунок 3, в) порошков сферической формы, обеспечивающей максимальную плотность укладки и формирование наибольшего количества межчастичных контактов.

Применение мелкодисперсного порошка размером до 500 нм позволяет заполнить микровпадины на поверхности источника и радиатора (рисунок 4). Это приводит к формированию модифицированного слоя на поверхности, обладающего рядом положительных свойств. Во-первых, слой снижает количество воздушных полостей с низким коэффициентом теплопроводности. Во-вторых, поверхностный слой повышает механические свойства, минимизируя изменение топологии поверхностного слоя при нанесении и удалении слоя теплопроводящей пасты, в которой содержатся крупнодисперсные твердые керамические частицы.



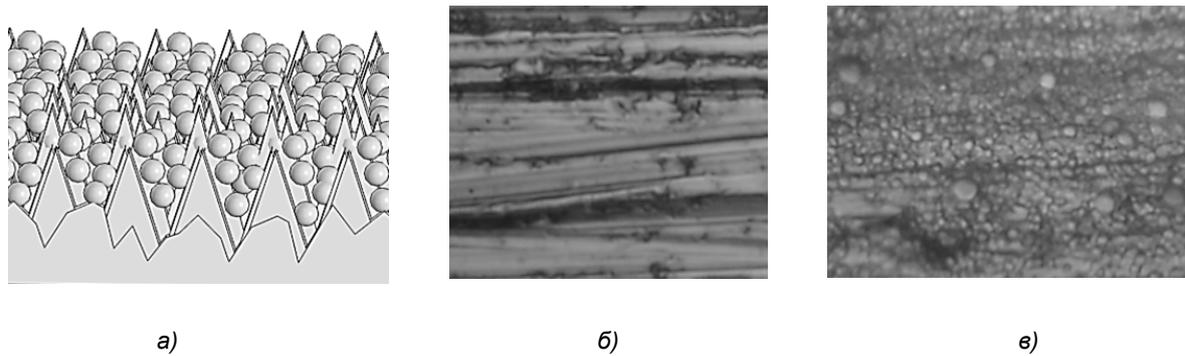
а)

б)

в)

а — оптимизированный гранулометрический состав; б — частицы крупной фракции;
в — частицы мелкой фракции

Рисунок 3. — Используемые порошки в высоковязкой теплопроводящей пасте КПТД-4



а — пространственная модель; б — фотография поверхности радиатора до нанесения пасты (увеличение $\times 600$); в — фотография поверхности радиатора с нанесенной пастой (увеличение $\times 600$)

Рисунок 4. — Образование модифицированного слоя на поверхности при нанесении пасты КПТД-4

Пробивное напряжение, измеренное согласно стандартному методу испытаний напряжения диэлектрического пробоя и диэлектрической прочности твердых электроизоляционных материалов на промышленных частотах [4], составляет не менее 3 кВ при толщине слоя 1 мм.

Важным свойством является вязкость теплопроводящей пасты и сохранение ее технологических свойств при эксплуатации, а также коррозионная стойкость. Определение вязкости рассматриваемых материалов осуществлялось методом пенетрации — путем измерения глубины проникновения конуса в исследуемый материал согласно [5], которая составила сотые доли миллиметра. Отличительной особенностью разработанного состава высоковязкой теплопроводящей пасты КПТД-4 является повышение вязкости с 186...189 до 199...203 МПа · с в интервале температур 20...50 °С при последующем снижении в интервале температур 50...90 °С до значений вязкости при комнатной температуре (рисунок 5). Стабильность вязкости пасты с повышением температуры позволяет применять ее при вертикальном расположении источника и приемника тепла, когда необходимо исключить ее вытекание при нагреве.

В качестве полимерного связующего в высоковязкой теплопроводящей пасте используется низкомолекулярный кремнийорганический полимер, отличительной особенностью которого является низкое количество летучих веществ. Это позволяет использовать его в течение длительного времени, исключая «высыхание», при котором между контактными поверхностями источника и приемника тепла остаются керамические частицы, между которыми располагается воздух.

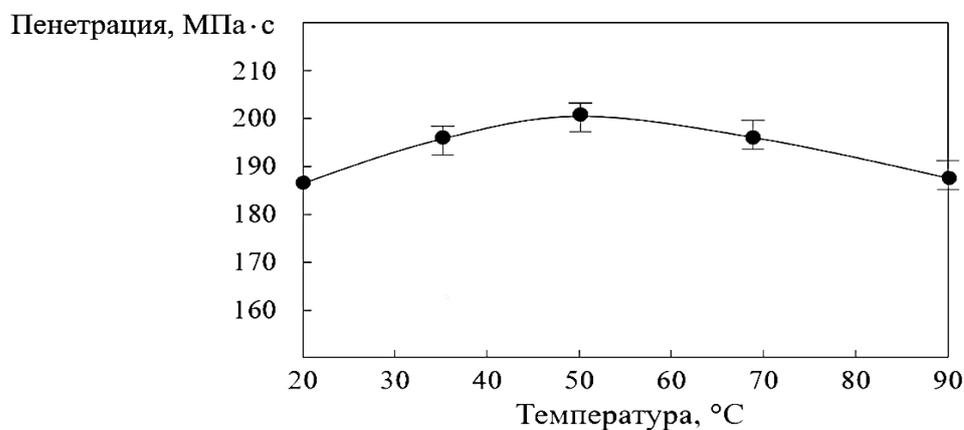


Рисунок 5. — Зависимость пенетрации высоковязкой теплопроводящей пасты КПТД-4 от температуры

Оценка коррозионного воздействия высоковязкой теплопроводящей пасты КПТД-4 на медную и алюминиевую поверхности осуществлялась согласно [6]. Установлено, что паста не оказывает коррозионного действия на медную и алюминиевую поверхности, отсутствуют очаги коррозии, потускнения, места потери блеска и участки с цветами побежалости.

Заключение. Паста КПТД-4 повышенной вязкости, теплопроводности и диэлектрической прочности, произведенная из мелкодисперсных порошков оксида алюминия с рекомендуемым составом и связующего в виде низкомолекулярного кремнийорганического полимера, рекомендуется к применению в случаях, когда необходимо обеспечить отсутствие вытекания пасты и выделения летучих веществ. Паста обеспечивает длительный срок службы без замены, в том числе в присутствии вибрационных нагрузок и условиях химически агрессивной среды.

Список цитируемых источников

1. Козловский, И. Л. Методика для расчета коэффициента теплопроводности композиционных материалов / И. Л. Козловский, Д. А. Ционенко // *Электроника: Наука. Технологии. Бизнес.* — 2024. — Вып. 2. — С. 53—61. DOI: 10.22184/1992-4178.2024.233.2.62.68.
2. Анализ механических и теплопроводящих свойств керамико-полимерных диэлектрических материалов / В. Н. Тарасик, И. Л. Козловский, Д. А. Ционенко, А. В. Лешок // *Электроника: Наука. Технологии. Бизнес.* — 2024. — Вып. 8. — С. 34—38. DOI: 10.22184/1992-4178.2024.239.8.94.100.
3. JINGXIN JL-1177 Automatic Laser particle sizer measurement range 0.02 μ m-2000 μ m [website]. — NBChao.Com, 2012—2024. — URL: <https://en.nbchao.com/p/9048> (date of access: 10.09.2025).
4. ASTM D149-20. Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies [website]. — ASTM International, 1996—2025. — URL: <https://store.astm.org/d0149-20.html> (date of access: 10.09.2025).
5. ASTM D217-21a. Standard Test Methods for Cone Penetration of Lubricating Grease [website]. — ASTM International, 1996—2025. — URL: <https://store.astm.org/d0217-21a.html> (date of access: 10.09.2025).
6. Изделия электронной техники. Метод оценки коррозионной стойкости : ГОСТ 27597-88. — Взамен ГОСТ 9.076-77 ; введ. 01.07.1989. — М. : Стандартиформ, 2006. — 19 с.

Поступила в редакцию 14.10.2025.

УДК 621.785.532

А. В. Малевич¹,**М. Н. Босяков²,** кандидат физико-математических наук, доцент,**Л. Л. Сотник³,** кандидат технических наук, доцентУчреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь, ¹+375 (29) 202 20 64, malevich-95@mail.ru

ОГРАНИЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С ГАЗОВЫМ АЗОТИРОВАНИЕМ

На основе анализа работы Т. А. Бенгиной, посвященной постановке задачи оптимального управления процессом газового азотирования, рассмотрена применимость её выводов к процессу ионно-плазменного азотирования. Показано, что часть ограничений (по концентрации азота в фазах, температурному режиму, термо-напряжениям) сохраняют свою актуальность и в условиях тлеющего разряда. В то же время ряд положений, связанных с азотным потенциалом атмосферы и ограничением теплового потока, требуют принципиальной корректировки. Обоснованы специфические ограничения для ионно-плазменного азотирования, связанные с устойчивостью разряда, диапазоном плотности тока, равномерностью распределения плазмы по поверхности детали и риском перехода в дуговой режим.

Ключевые слова: ионно-плазменное азотирование; тлеющий разряд; оптимальное управление; фазовые превращения; ограничения процесса.

Рис. 3. Библиогр.: 4 назв.

A. V. Malevich¹,**M. N. Bosyakov²,** PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,**L. L. Sotnik³,** PhD in Technical Sciences, Associate ProfessorInstitution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,
the Republic of Belarus, ¹+375 (29) 202 20 64, malevich-95@mail.ru

LIMITATIONS IN THE CONTROL OF THE ION-PLASMA NITRATION PROCESS: COMPARATIVE ANALYSIS WITH GAS NITRATION

Based on an analysis of T. A. Bengina's work on the optimal control problem for gas nitriding formulation, the applicability of her findings to ion-plasma nitriding (IPN) has been examined. It is shown that some limitations (regarding nitrogen concentration in the phases, temperature conditions, and thermal stresses) remain relevant even under glow discharge conditions. At the same time, several provisions related to the nitrogen potential of the atmosphere and heat flux limitations require fundamental adjustments. Specific limitations for IPN related to discharge stability, current density range, uniformity of plasma distribution over the part surface, and the risk of transition to arc mode are substantiated.

Key words: ion-plasma nitriding; glow discharge; optimal control; phase transformations; process limitations.

Fig. 3. Ref.: 4 titles.

Введение. Азотирование является одним из наиболее распространённых методов химико-термической обработки, обеспечивающих значительное повышение эксплуатационных свойств деталей машин. В результате диффузионного насыщения азотом формируется поверхностный слой с повышенной твёрдостью, износо- и коррозионной стойкостью, а также улучшенной усталостной прочностью. Наиболее изученным и традиционно применяемым процессом остаётся газовое азотирование, для которого разработаны математические модели тепломассопереноса, введено понятие азотного потенциала атмосферы и предложены методы управления формированием структуры слоя [1].

Согласно источнику [1] рассмотрены ограничения в задаче оптимального управления процессом газового азотирования. Автором выделены ключевые факторы, определяющие качество упрочнённых слоев: концентрационные градиенты азота в фазах, температурный

режим обработки, термонапряжения, а также ограничения по мощности нагрева и предельным значениям азотного потенциала. Эти выводы представляют собой важную основу для построения систем автоматизированного управления процессом химико-термической обработки.

В то же время в последние десятилетия все большее распространение получает технология ионно-плазменного азотирования (далее — ИПА), осуществляемая в условиях тлеющего разряда в газовой среде. В отличие от газового метода здесь перенос азота обеспечивается не только диффузией, но и ионной бомбардировкой поверхности, что существенно изменяет кинетику и термодинамику процесса. ИПА позволяет проводить обработку при относительно низких температурах (450...580 °С), формировать более равномерные и адгезионно прочные слои, однако одновременно предъявляет новые требования к системе управления: необходимо учитывать устойчивость тлеющего разряда, распределение плотности тока и возможность перехода в дуговой режим [2—4].

Возникает вопрос: в какой мере ограничения, сформулированные для газового азотирования, применимы к процессу ионно-плазменного? Часть положений (например, критичность температурного режима и предельные концентрации азота в фазах) сохраняют свою актуальность, в то время как другие (такие как азотный потенциал атмосферы или ограничения мощности нагрева) требуют пересмотра в условиях плазмы. Кроме того, для ИПА необходимо формулировать новые ограничения, отсутствующие в газовом процессе, включая стабильность разряда, диапазон допустимых токов и равномерность распределения плазмы по поверхности детали.

Цель настоящей работы заключается в сравнительном анализе ограничений, сформулированных для газового азотирования (по данным Т. А. Бенгиной), и их применимости к процессу ИПА. Сравнительная схема ограничений (диаграмма Венна) представлена на рисунке 1. Левая область — газовое азотирование (азотный потенциал, мощность печи); правая область — ИПА (устойчивость разряда, плотность тока, распределение плазмы); пересечение — общие ограничения (концентрации в фазах, температура, термонапряжения).

На основе такого сопоставления предлагается уточнить базовые условия постановки задачи оптимального управления ИПА, выделив общие и специфические факторы, влияющие на формирование структуры упрочненного слоя.

Материалы и методы исследования. Как отмечает Т. А. Бенгина [1], при газовом азотировании ключевую роль в формировании эксплуатационных характеристик детали играет распределение концентрации азота по глубине слоя. Появление фаз γ' (нитрид железа Fe_4N), ϵ (нитрид $Fe_{2-3}N$) и азотистого мартенсита $\alpha(N)$ связано с предельными значениями растворимости азота в соответствующих фазах. Нарушение этих границ приводит к образованию нестабильных структур, ухудшению механических свойств и возникновению внутренних напряжений.



Рисунок 1. — Сравнительная схема ограничений (диаграмма Венна)

Для ИПА данный фактор также имеет принципиальное значение, однако природа насыщения отличается. В условиях тлеющего разряда азот поступает на поверхность не только в результате диссоциации молекул, но и в виде ионов, ускоряющихся в катодном падении потенциала. Ионная бомбардировка вызывает активацию поверхности, образование дефектов кристаллической решётки и повышает коэффициент диффузии азота в приповерхностной зоне [2—4]. В результате фазовые превращения протекают быстрее, а слои γ' и ϵ стабилизируются при более низких температурах по сравнению с газовым процессом. Тем не менее ограничения по предельным концентрациям азота в фазах сохраняют свою актуальность. При чрезмерном насыщении азотированного слоя ϵ -фазой возрастает его хрупкость и риск отслоения при эксплуатации изделия, особенно на сталях с высоким содержанием легирующих элементов [5]. В то же время недостаточная концентрация азота в γ' -фазе не позволяет достичь требуемой твёрдости и износостойкости. Таким образом, диапазоны допустимых концентраций должны рассматриваться как универсальные ограничения, общие для всех видов азотирования.

Вместе с тем для ИПА необходимо учитывать, что концентрация азота на поверхности детали определяется не азотным потенциалом атмосферы, как при газовом азотировании, а совокупностью параметров разряда — давлением газа, напряжением и током, а также составом смеси (N_2 , Ar, H_2). Это требует иной постановки задачи управления: вместо регулирования химического потенциала насыщающей среды приходится обеспечивать баланс между ионной бомбардировкой, температурой и равномерностью распределения плазмы по поверхности детали.

Таким образом, ограничения по концентрациям азота в фазах, выделенные Т. А. Бенгиной для газового азотирования, полностью применимы к ИПА, но в условиях плазменного процесса требуют иной физической интерпретации и иного набора управляющих параметров.

Результаты исследования и их обсуждение. В классическом газовом азотировании температура процесса является определяющим фактором, влияющим как на скорость диффузии азота, так и на фазовый состав упрочнённого слоя. Источник [1] указывает, что отклонение температуры от оптимального диапазона (500...580 °С для конструкционных сталей) приводит к укрупнению зерна, росту хрупкости и формированию нежелательных фаз. Снижение температуры ниже минимально допустимой замедляет процесс диффузии и делает слой недостаточно глубоким, а её превышение повышает риск образования чрезмерно толстой ϵ -фазы и снижения вязкости материала.

Для ИПА температурный фактор играет не меньшую, а порой даже большую роль. Однако природа нагрева деталей в ИПА принципиально иная: он обеспечивается не столько внешними нагревателями, сколько энергией ионной бомбардировки. В зоне катодного падения потенциала ионы азота и аргона приобретают значительную кинетическую энергию и при ударе о поверхность детали преобразуют её в тепловую. В результате температура поверхности определяется комбинацией параметров разряда — плотностью тока, напряжением, давлением газа и составом смеси [2—4].

Это обстоятельство накладывает ряд специфических ограничений.

Риск локальных перегревов. При сложной геометрии деталей плотность плазмы распределяется неравномерно, что приводит к различию температур на разных участках поверхности. В локальных зонах перегрева формируются толстые хрупкие ϵ -слои, которые снижают износостойкость поверхности и могут вызывать их отслоение [5].

Необходимость непрямого контроля. В отличие от газового азотирования, где температура задается печью и контролируется термопарами в рабочем объёме, в ИПА измерение температуры осуществляется косвенными методами: пирометрией через смотровые окна или использованием контрольных образцов с установленными термопарами. Это требует более сложных систем регулирования. Зависимость свойств слоя от температуры процесса изображена на рисунке 2.

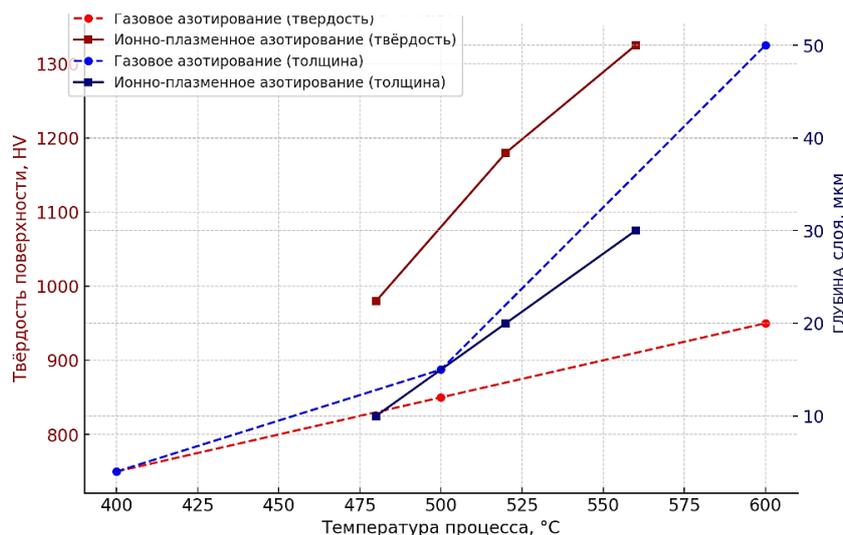


Рисунок 2. — Влияние температуры процесса на твердость и глубину слоя при газовом азотировании и ИПА

Таким образом, температурные ограничения, сформулированные для газового азотирования, сохраняют свою значимость и при ИПА, но приобретают дополнительное измерение, связанное с особенностями нагрева в тлеющем разряде. Для обеспечения воспроизводимости процесса в плазменных условиях необходимо учитывать распределение температуры по поверхности, динамику нагрева при изменении плотности тока и возможность перехода режима в область недопустимых температур.

Термонапряжения. В работе Т. А. Бенгиной [1] подчёркивается, что в процессе газового азотирования одним из критических факторов являются термонапряжения, возникающие при неравномерном нагреве и охлаждении детали. Основным источником этих напряжений — перепад температуры между поверхностным слоем и сердцевиной изделия. Превышение допустимого градиента приводит к образованию трещин и потере эксплуатационных свойств.

Для ИПА данное ограничение сохраняет актуальность, однако характер его проявления значительно сложнее. В условиях тлеющего разряда термонапряжения формируются под воздействием двух факторов:

1) температурный перепад между поверхностью и сердцевиной. Как и при газовом азотировании, при ИПА нагрев происходит поверхностной зоны деталей, покрытой свечением тлеющего разряда. Однако поскольку тепло вносится ионной бомбардировкой, локальные температурные пики могут быть более выраженными. При этом сердцевина детали прогревается медленнее, что создаёт условия для значительных термических напряжений;

2) структурные и фазовые превращения. При ИПА, как и при газовом азотировании, рост нитридных фаз (γ' , ϵ) сопровождается изменением удельного объёма искажённых областей кристаллической решётки. Эти изменения усиливаются за счёт высокой концентрации дефектов, индуцированных ионной бомбардировкой [2; 3]. В результате поверхностные напряжения оказываются выше, чем при газовом процессе.

Особое внимание следует уделять формированию ϵ -фазы. Известно, что её чрезмерное развитие приводит к образованию хрупкого слоя с внутренними растягивающими напряжениями [3; 4]. При ИПА это явление может проявляться более резко из-за высокой скорости насыщения. Если параметры разряда подобраны неправильно, существует риск возникновения трещин ещё на стадии упрочнения.

Кроме того, в плазменных условиях возможны дополнительные источники напряжений:

1) ионное распыление поверхности, при котором часть материала удаляется, формируя нестабильное состояние баланса;

2) эффект сложной геометрии детали, когда распределение плотности тока приводит к образованию зон с различной глубиной слоя и, как следствие, неоднородными напряжёнными состояниями. На рисунке 3 изображены распределения плазмы вокруг сложной детали (зубчатое колесо): видно, где концентрируется плазма (горячие зоны на вершинах зубьев) и где образуются «тенивые» участки с недонасыщением во впадинах. Это прямо иллюстрирует риски локального перегрева/недонасыщения и необходимость ограничений по плотности тока и геометрии подвеса.

Таким образом, хотя в основе ограничений по термонапряжениям лежат универсальные физические механизмы, общие для газового и плазменного азотирования, при ИПА они проявляются с большей интенсивностью и разнообразием. Для постановки задачи оптимального управления данным процессом необходимо учитывать не только температурный градиент, но и факторы, связанные с ионной активацией поверхности и фазовыми превращениями в условиях высоких локальных концентраций азота.

Ограничения по азотному потенциалу и параметрам среды. Одним из ключевых ограничений, выделенных в источнике [1] для газового азотирования, является азотный потенциал печной атмосферы. Эта величина напрямую связана с парциальными давлениями аммиака и водорода, определяет химический состав газовой среды и устанавливает условия равновесия между насыщаемым металлом и атмосферой. Управление процессом в газовой технологии, по сути, сводится к регулированию азотного потенциала и температуры, что позволяет задавать скорость и глубину диффузионного слоя. Изменение азотного потенциала достигается за счет увеличения/уменьшения расхода аммиака через печь.

При ИПА понятие азотного потенциала в классическом термодинамическом смысле отсутствует. Насыщение поверхности азотом осуществляется не через химическое равновесие газовой среды, а посредством ионной бомбардировки поверхности ионами азота с их последующей диссоциативной рекомбинацией с образованием двух атомов азота, а также поступления на поверхность атомов азота, образующихся в зоне катодного свечения разряда. Это фундаментальное отличие приводит к тому, что ограничения по азотному потенциалу оказываются неприменимыми.

Вместо этого для ИПА формулируются иные ограничения, определяющие режимы устойчивой работы тлеющего разряда:

1. Давление рабочего газа. Процесс азотирования устойчиво протекает в диапазоне давлений $p = 80 \dots 400$ Па. При давлениях ниже нижнего предела плотность тока разряда может оказаться недостаточной для генерации необходимой концентрации атомарного азота, а при превышении верхнего возникает вероятность, с одной стороны, перехода разряда из аномальной формы тлеющего в дуговой и, с другой стороны, перехода в нормальный, когда разряд может отсутствовать на некоторой части деталей, являющихся катодом.

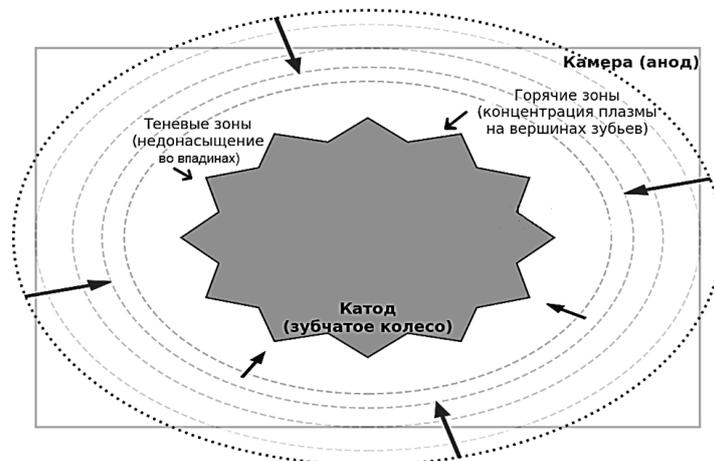


Рисунок 3. — Распределение плазмы вокруг сложной детали

2. Состав газовой смеси. Типичные смеси включают N_2 , Ar и H_2 . Добавление аргона повышает стабильность разряда и улучшает ионную активацию, а водород снижает вероятность окисления поверхности. Ограничения связаны с допустимой долей каждого компонента: избыток аргона ведёт к недостаточному насыщению азотом, а избыток водорода — к нежелательному травлению поверхности.

3. Плотность тока и напряжение разряда. Эти параметры напрямую определяют интенсивность ионной бомбардировки поверхности, а следовательно, скорость насыщения поверхности и её температуру. Слишком низкая плотность тока не обеспечивает формирование упрочнённого слоя, слишком высокая плотность вызывает перегрев и переход тлеющего разряда в дуговой режим.

4. Устойчивость тлеющего разряда. Для ИПА критически важно сохранять режим тлеющего разряда. Переход в искровой или дуговой разряд приводит к локальному разрушению поверхности, оплавлению детали и срыву всего процесса. Аналогичным образом повышение давления и уменьшение плотности тока могут привести к переходу разряда из режима аномального в нормальный, что также нежелательно.

Таким образом, если для газового азотирования главными управляющими параметрами выступают азотный потенциал и температура, то для ИПА — давление газа, состав смеси, напряжение и ток разряда. Эти параметры определяют устойчивость плазмы, интенсивность ионной бомбардировки и в конечном счёте качество формируемого слоя.

Следовательно, выводы автора работы [1] об ограничениях по азотному потенциалу атмосферы не могут быть напрямую перенесены в плазменную технологию. Вместо этого необходимо формировать новую систему ограничений исходя из закономерностей функционирования тлеющего разряда и взаимодействия ионов с поверхностью металла.

Ограничения по мощности нагрева. В газовом азотировании, как отмечает Т. А. Бенгина [1], мощность нагрева ограничивается возможностями оборудования: тепловым потоком печи, мощностью электрических нагревателей или производительностью радиационных горелок. Эти ограничения накладываются на процесс как внешние, определяя предельные значения температуры и скорость выхода на режим.

В ИПА характер ограничения принципиально иной. Поскольку нагрев деталей осуществляется в первую очередь за счёт энергии ионов, ускоряющихся в зоне катодного падения потенциала, мощность нагрева садки и удержания ее температуры на заданном значении тлеющего разряда процесса напрямую связана с параметрами разряда (напряжением и плотностью ионного потока), а также с параметрами теплообмена садки со стенками камеры. Таким образом, именно электрические характеристики плазмы (а не мощность внешних нагревателей) определяют пределы процесса [3; 4].

Можно выделить несколько ключевых ограничений:

1) недостаточная мощность разряда. При низкой плотности тока поверхность детали прогревается медленно, температура может не достигать уровня, необходимого для устойчивого формирования нитридных фаз. В результате азотирование протекает неэффективно: слой имеет малую глубину и пониженную твёрдость;

2) избыточная мощность разряда. Чтобы избежать слишком высокой плотности тока на стадии разогрева, обычно на начальной фазе, когда отток тепла от садки незначителен, скорость разогрева задается на уровне 2,5...4,0 градуса в минуту с постепенным ее снижением к фазе завершения разогрева. Для обеспечения однородности прогрева садки на заключительном этапе она может составлять всего 0,2...0,5 градуса в минуту;

3) неравномерное распределение мощности. В отличие от газового азотирования, где нагрев относительно равномерен по всему объёму печи, в ИПА локальные различия в распределении плазмы и плотности тока могут приводить к неравномерному нагреву различных участков детали. Это создаёт дополнительный фактор риска для формирования неоднородной структуры слоя и возникновения термонапряжений.

Таким образом, если в газовом азотировании мощность нагрева выступает как ограничение внешнего энергетического ресурса, то в ИПА — как ограничение устойчивости

самого разряда. Управление мощностью здесь сводится к поддержанию оптимального диапазона тока и напряжения, обеспечивающего достаточный прогрев без перехода в разрушительные режимы.

Следовательно, ограничения, описанные Т. А. Бенгиной для газового процесса, могут быть лишь частично применены к ИПА: общим остаётся сам факт необходимости контроля энергетического баланса, однако природа этого ограничения в плазменной технологии связана не с возможностями нагревателя, а с физикой взаимодействия компонент разряда с поверхностью.

Заключение. Сравнительный анализ показал, что ограничения, сформулированные Т. А. Бенгиной для задачи оптимального управления процессом газового азотирования, в значительной степени применимы и к ИПА, однако требуют иной трактовки. Универсальными остаются положения, связанные с предельными концентрациями азота в фазах, критичностью температурного режима и влиянием термонапряжений на качество упрочнённых слоёв. Вместе с тем в плазменном процессе природа этих факторов приобретает дополнительные особенности: температура регулируется параметрами разряда и может распределяться неравномерно, а напряжения формируются не только из-за градиента температуры, но и вследствие ионной бомбардировки и фазовых превращений в условиях высокой дефектности поверхности.

Принципиальное отличие заключается в том, что ключевое ограничение газового процесса — азотный потенциал атмосферы — не применимо к ИПА. Здесь определяющими параметрами выступают давление газа, состав смеси, напряжение и ток разряда, обеспечивающие устойчивость тлеющего разряда. Ограничения по мощности нагрева также приобретают иной характер: если при газовом азотировании они связаны с техническими возможностями печи, то в плазменном процессе определяются пределами стабильности разряда и риском перехода в дуговой режим.

Таким образом, подходы, предложенные Т. А. Бенгиной, могут быть использованы в качестве методологической базы, однако их применение в условиях плазменного азотирования требует корректировки и дополнения. Новизна проведённого анализа заключается в выявлении специфических факторов, ограничивающих процесс ИПА, и в уточнении критериев управления, что позволяет рассматривать данный метод обработки не только как технологическую альтернативу газовому азотированию, но и как объект для разработки адаптированных систем оптимального управления.

Список цитируемых источников

1. Бенгина, Т. А. Об ограничениях в задаче оптимального управления процессом газового азотирования / Т. А. Бенгина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». — 2016. — № 2 (50). — С. 178—183.
2. *Mittemeijer, E. J.* Fundamentals of nitriding and nitrocarburizing / E. J. Mittemeijer, M. A. J. Somers // ASM Handbook. Heat Treating. — Vol. 4A. — Materials Park, OH : ASM International, 2013. — P. 619—646.
3. *Menthe, E.* Structure and properties of plasma nitrided stainless steel / E. Menthe, K.-T. Rie // Surface and Coatings Technology. — 1999. — Vol. 116—119. — P. 199—204.
4. *Поболь, И. Л.* Ионное азотирование: твёрдость, выносливость, стойкость / И. Л. Поболь // Технологии материалов. — 2012. — № 6. — С. 17—21. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ionnoe-azotirovanie-tverdost-vynoslivost-stoykost> (дата обращения: 01.10.2025).

Поступила в редакцию 20.10.2025.

УДК 621.785.532

А. В. Малевич¹,**Л. Л. Сотник²,** кандидат технических наук, доцент,**И. А. Богданович³,** кандидат технических наук, доцентУчреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь, ¹+375 (29) 202 20 64, malevich-95@mail.ru

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ АЗОТИРОВАНИЕМ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ НА МАКРО- И МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ В СТАЛИ 38Х2МЮА

В данной работе исследовано влияние комбинированной обработки, включающей ионно-плазменное азотирование и последующую магнитно-импульсную обработку, на макро- и микронапряжения в стали 38Х2МЮА. Методами рентгеновской дифракции и микротвердости показано, что комбинированная обработка приводит к значительным изменениям напряженного состояния поверхностного слоя. Результаты демонстрируют снижение микронапряжений после магнитно-импульсной обработки, а также изменение микронапряжений, что свидетельствует о модификации дефектной структуры материала.

Ключевые слова: сталь 38Х2МЮА; ионно-плазменное азотирование; магнитно-импульсная обработка; микронапряжения; микронапряжения; рентгеновская дифракция.

Рис. 4. Табл. 3. Библиогр.: 7 назв.

A. V. Malevich¹,**L. L. Sotnik²,** PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**I. A. Bogdanovich³,** PhD in Technical Sciences, Associate ProfessorInstitution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,
the Republic of Belarus, ¹+375 (29) 202 20 64, malevich-95@mail.ru

INFLUENCE OF COMBINED ION-PLASMA NITRIDING AND MAGNETIC-PULSE TREATMENT ON MACRO- AND MICROSTRESSES IN 38KH2MYUA STEEL

In this paper the influence of combined treatment, including ion-plasma nitriding (IPA) and subsequent magnetic-pulse treatment (MPT), on macro- and micro stresses in 38Kh2MYuA steel has been investigated. X-ray diffraction and microhardness methods showed that combined treatment leads to significant changes in the stress state of the surface layer. The results demonstrate a decrease in macro stresses after MPT, as well as a change in micro stresses, which indicates a modification of the material defective structure.

Key words: 38Kh2MYuA steel; ion-plasma nitriding; magnetic pulse treatment; macro stresses; micro stresses; X-ray diffraction.

Fig. 4. Table 3. Ref.: 7 titles.

Введение. В современном машиностроении особое внимание уделяется повышению ресурса деталей и узлов машин, где решающую роль играют износостойкость и прочность материалов. Одним из перспективных направлений улучшения эксплуатационных характеристик сталей является применение комбинированных методов поверхностной обработки, сочетающих химико-термическое упрочнение и физическое воздействие. В частности, ионно-плазменное азотирование (далее — ИПА) позволяет формировать на поверхности материала диффузионные слои с повышенной твердостью и коррозионной стойкостью, в то время как магнитно-импульсная обработка (далее — МИО) способствует модификации дефектной структуры и релаксации остаточных напряжений [1; 2].

Сталь 38Х2МЮА, обладающая высокой прочностью и термостойкостью, широко применяется в ответственных узлах машин и механизмов [2]. Однако ее эксплуатационные свойства могут быть дополнительно улучшены за счет целенаправленного формирования рационального структурно-фазового состояния поверхностного слоя. В данной работе исследуется влияние комбинированной обработки, включающей ИПА и последующую МИО, на макро- и микронапряжения в поверхностном слое этой стали.

Практическая значимость работы связана с поиском способов контролировать напряженно-деформированное состояние материала для увеличения срока службы деталей. Известно, что остаточные напряжения играют ключевую роль в сопротивлении материала усталостному разрушению, а их перераспределение под воздействием импульсных магнитных полей остается малоизученным [3; 4].

Целью данной работы является анализ изменений макро- и микронапряжений в стали 38Х2МЮА после комбинированной обработки ИПА и МИО. Для достижения этой цели были проведены рентгеноструктурные исследования, измерена микротвердость и проанализированы изменения дефектной структуры поверхностного слоя. Полученные результаты позволяют глубже понять механизмы влияния комбинированной обработки на свойства материала и открывают новые возможности для управления его эксплуатационными характеристиками.

Исследование проводилось с использованием современного оборудования, включая дифрактометр GNR Explorer, что обеспечило высокую точность измерений. Результаты работы представляют интерес для специалистов в области материаловедения, машиностроения и поверхностной инженерии, а также могут быть использованы при разработке технологических процессов упрочняющей обработки сталей.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования служила сталь 38Х2МЮА со следующим химическим составом (таблица 1).

Образцы стали размерами 20 × 20 × 7 мм (рисунок 1) были разделены на следующие 4 группы:

- 1) из образцов 1, 2 — исходное состояние (контроль);
- 2) из образцов 3, 4 — ИПА;
- 3) из образцов 5, 6, 7, 8 — только МИО (10 кДж);
- 4) из образцов 9, 10 — ИПА + МИО (6 кДж).

Т а б л и ц а 1. — Химический состав материала 38Х2МЮА, % [1]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Al	Cu
0,35...0,42	0,20...0,45	0,3...0,6	До 0,3	До 0,025	До 0,025	1,35...1,65	0,15...0,25	0,7...1,1	До 0,3



Рисунок 1. — Внешний вид исследуемых образцов из стали 38Х2МЮА

Методы обработки. Ионно-плазменное азотирование проводилось на установке УДА-400/400 при следующих параметрах: температура — 550 °С, газовая смесь: 70 % Ar, 25 % N₂, 5 % H₂, давление — 200 Па, длительность — 12 ч. После обработки на поверхности формировался азотированный слой толщиной ~ 450 мкм с повышенной твердостью (рисунок 2).

Магнитно-импульсная обработка выполнялась на установке МИУ-3 с параметрами: индуктор — плоский, диаметр — 150 мм, индуктивность — 14,2 мГн, энергия импульса: 6 кДж (образцы 3, 9, 10) и 10 кДж (образцы 5, 6, 7, 8), количество импульсов — 3.

Методы анализа. Для обеспечения корректности получаемых результатов были проведены повторные измерения (по три замера на каждом образце) с последующим усреднением. Для каждого параметра рассчитывалось стандартное отклонение и доверительный интервал при уровне значимости 95 %. Погрешность измерения макронапряжений на дифрактометре GNR Explorer составляла ± 0,03 ГПа, микротвердости — ± 5 HV, глубины азотированного слоя — ± 10 мкм.

Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре GNR Explorer (CuKα-излучение, λ = 1,5406 Å) с параметрами: шаг сканирования — 0,20; время на точку — 3 с; диапазон углов 2θ — 30...90°. Макронапряжения определялись по смещению пиков рентгеновской дифракции относительно эталона. Микронапряжения рассчитывались по уширению пиков с учетом поправки на инструментальный вклад.

Определяемые параметры:

– макронапряжения (σ) — по смещению пика относительно эталона:

$$\sigma = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\Delta d}{d_0},$$

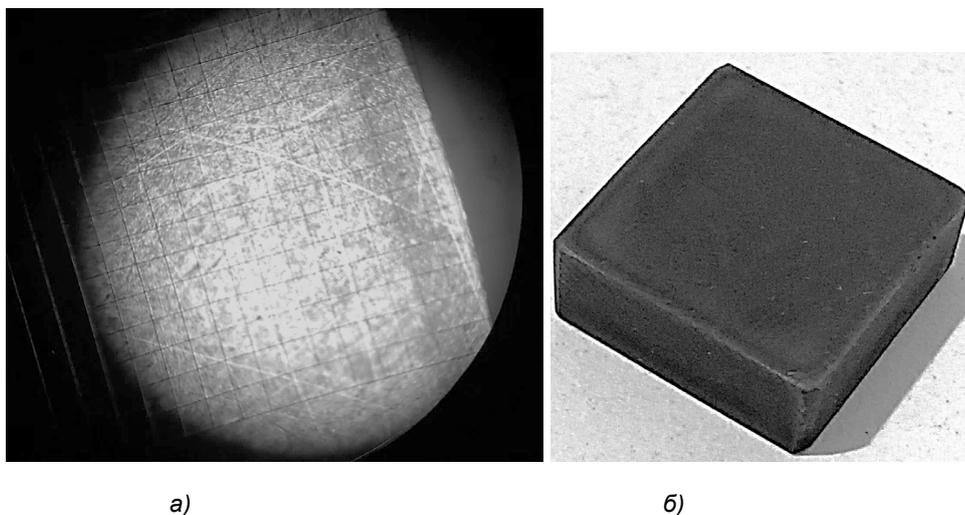
где $E = 201$ ГПа — модуль Юнга;

$\nu = 0,25$ — коэффициент Пуассона;

– микронапряжения (ε) — по уширению пиков:

$$\varepsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4 \sin \theta},$$

где β — полуширина пика.



а — азотированный слой под увеличением микроскопа Stemi200; б — общий вид образца

Рисунок 2. — Азотированный слой на образцах 3, 4, 9, 10

Для получения распределения микротвердости использовали цифровой микротвердомер Microscan AC+ (нагрузка на индентор — 100 гс). Измерение глубины азотированного слоя осуществлялось методом измерения распределения микротвердости на поперечном шлифе образца-свидетеля от поверхности к центру. Для обеспечения правильной формы четырёхгранного отпечатка пирамиды под действием приложенной нагрузки первый отпечаток индентора выполняется на расстоянии 20 мкм от края образца. Перемещение индентора от исследуемой поверхности в глубь образца осуществляется в шахматном порядке. Значения микротвёрдости определяются как средние арифметические значения трёх измерений, полученных на одинаковом удалении от исследуемой поверхности. При анализе микроструктуры использовался оптический микроскоп Stereo после травления образца в 5 %-ном растворе азотной кислоты HNO₃.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты макро- и микронапряжений после измерений на дифрактометре GNR Explorer (CuK α -излучение, шаг — 0,20°, время интеграции — 3 с) (таблица 2), изменение микронапряжений и макронапряжений изображено на графике (рисунок 3).

Т а б л и ц а 2. — Результаты макро- и микронапряжений после измерений на дифрактометре GNR Explorer

Образец	Макронапряжения, ГПа			
	Состояние	До МИО	После МИО	Изменение
1	Исходный	-1,0435	—	—
2	Исходный	-1,0432	—	—
5	МИО 10 кДж	+0,0012	-0,4013	Снижение
6	МИО 10 кДж	-1,4448	+0,0805	Релаксация
7	МИО 10 кДж	-0,1605	-0,3212	Увеличение
8	МИО 10 кДж	-0,6421	-0,4019	Снижение
Микронапряжения, % от модуля упругости				
3	ИПА	-0,250	-0,240	Незначительное
4	ИПА	-0,250	-0,240	Незначительное
9	ИПА + МИО 6 кДж	0,173	0,222	Незначительное
10	ИПА + МИО 6 кДж	0,173	0,222	Незначительное

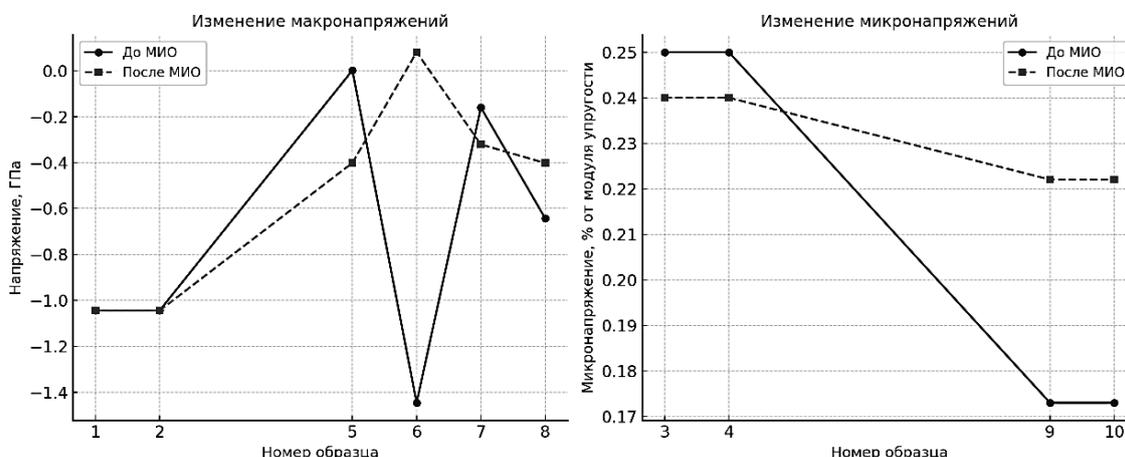


Рисунок 3. — Графики изменений макронапряжений и микронапряжений

На исследуемых образцах после ИПА эффективная глубина упрочнённого слоя составила около 450 мкм. Определение глубины проводилось по профилю микротвёрдости, рассчитываемому по соответствующей методике:

$$h = \frac{\Delta HV}{\left(\frac{dHV}{dx}\right)},$$

где h — эффективная глубина слоя;

ΔHV — разница твёрдости между поверхностью и основой;

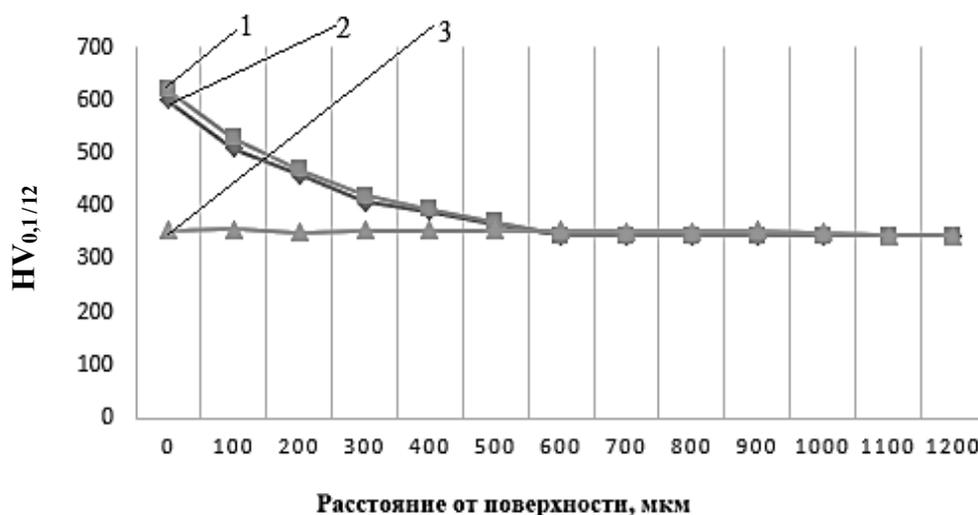
$\frac{dHV}{dx}$ — градиент изменения твёрдости.

У поверхности микротвёрдость достигает 605...620 $HV_{0,2}$, постепенно снижаясь до 320 $HV_{0,2}$ в зоне перехода к основному металлу (рисунок 4).

Средние значения микротвёрдости различных групп образцов приведены в таблице 3. Из данных видно, что азотирование существенно увеличивает поверхностную твёрдость по сравнению с исходным состоянием. В то же время воздействие только МИО практически не изменяет микротвёрдость (значения близки к исходным), тогда как комбинированная обработка (ИПА + МИО) обеспечивает сохранение и даже незначительное повышение твёрдости по сравнению с азотированными образцами.

Т а б л и ц а 3. — Микротвёрдость образцов

Образец	Состояние	Микротвёрдость, $HV_{0,2}$
1, 2	Исходный	355
3, 4	Азотирование	605
5	МИО 10 кДж	355
6	МИО 10 кДж	356
7	МИО 10 кДж	378
8	МИО 10 кДж	350
9, 10	Азотирование + МИО	615



1 — образцы группы 3, 4; 2 — образцы группы 9, 10; 3 — образцы группы 1, 2, 5...8

Рисунок 4. — Распределение микротвёрдости по глубине азотированного слоя после ИПА образцов из стали 38Х2МЮА

Зафиксированная релаксация макронапряжений после МИО (особенно заметная для образца 6: переход от сжимающих к растягивающим) качественно согласуется с результатами, приведёнными в работе Алифанова и соавторов [4], где для конструкционных и инструментальных сталей показана эффективность импульсного магнитного воздействия в снижении остаточных напряжений поверхностных слоёв. Подобно нашим наблюдениям, авторы [3; 4] отмечают, что интенсивность релаксации возрастает с увеличением энергии импульса и числа воздействий, что объясняется активацией дислокационных механизмов и частичной аннигиляцией дефектов кристаллической решётки.

Для азотированных образцов (группы 3, 9, 10) более слабый отклик макронапряжений на МИО сопоставим с представлениями о повышенной структурной устойчивости насыщенных азотом слоёв и формировании нитридных фаз с высокой упругой жёсткостью. Этот факт согласуется с обзором по плазмохимическому упрочнению [5] и с общими положениями о рентгенографическом анализе напряжений в упрочнённых слоях [5; 6], где подчёркивается влияние фазового состава и текстуры на восприимчивость к релаксации.

Полученные изменения микронапряжений (незначительное снижение после МИО для образцов 3, 4 и умеренное увеличение для 9, 10) также соответствуют закономерностям, обсуждаемым в фундаментальных работах по нитрированию и фазовым превращениям при химико-термической обработке [3]. В частности, сочетание упрочняющих фаз (γ' -Fe₄N, ϵ -Fe₂₋₃N) и дефектной субструктуры, сформированной при ИПА, может ограничивать глубину эффекта импульсного поля, оставляя доминирующим вклад локальной перераспределённой дислокационной плотности.

Суммарно наши данные подтверждают общую тенденцию, отражённую в работе [4]: МИО эффективно снижает/перераспределяет остаточные напряжения в исходных (неазотированных) состояниях и оказывает более мягкое действие на предварительно упрочнённые (нитрированные) слои. Новизна представленных результатов заключается в количественной оценке этих эффектов для стали 38Х2МЮА и в демонстрации различий отклика при двух уровнях энергии импульса (6 и 10 кДж).

Практическое следствие совпадает с выводами литературы: оптимизация МИО должна учитывать предшествующее состояние поверхностного слоя (структурно-фазовый состав после ИПА), а также энергию и кратность импульсов для достижения целевого баланса между релаксацией напряжений и сохранением высокой твёрдости.

Изменения напряжённого состояния и твёрдости после комбинированной обработки связаны с конкретными структурными превращениями в поверхностном слое — перераспределением дислокаций и частичным разупрочнением зоны насыщения. Исходное состояние образцов характеризовалось значительными остаточными напряжениями сжатия (–1,0435 ГПа), что типично для сталей после механической обработки. Применение МИО привело к существенной релаксации этих напряжений, что особенно заметно в случае образца 6, где произошла даже смена знака напряжений с –1,4448 до +0,0805 ГПа. Механизм такого изменения связан с воздействием мощных электромагнитных импульсов, вызывающих микроскопические токи Фуко в поверхностном слое материала. Эти токи создают локальные магнитные поля, взаимодействующие с дислокациями и другими дефектами кристаллической решетки. В результате происходит перераспределение и частичная аннигиляция дислокаций, что приводит к снижению внутренних напряжений. При этом более высокая энергия импульса (10 кДж) оказалась эффективнее в релаксации напряжений по сравнению с режимом 6 кДж. Интересно отметить, что в образцах, подвергнутых предварительному ИПА (группы 3, 9, 10), изменения макронапряжений были менее выраженными. Вероятно, это связано с тем, что в азотированном слое формируются фазы нитридов железа и легирующих элементов, которые заметно повышают сопротивление пластической деформации. Однако даже в этом случае наблюдалось некоторое снижение микронапряжений (например, с 0,298 до 0,280 % в образце 3), что свидетельствует о частичной релаксации напряжений в поверхностном слое. Увеличение микротвёрдости после МИО, особенно заметно в образцах без предварительного азотирования (например, с 352 до 378 HV_{0,2} в группе 7), может

быть связано с образованием более однородной и плотной дислокационной структуры. Импульсное воздействие способствует перераспределению дислокаций, уменьшая их плотность в одних областях и создавая более упорядоченные структуры в других. Этот эффект особенно выражен при более высоких энергиях импульса. В случае комбинированной обработки (ИПА + МИО) наблюдался сложный баланс между процессами релаксации напряжений и упрочнением. Азотированный слой, обладающий высокой твердостью и хрупкостью, ограничивал глубину проникновения эффектов МИО, но при этом сам подвергался некоторой модификации, что проявлялось в изменении микронапряжений. Это указывает на то, что оптимальные параметры обработки для азотированных образцов могут отличаться от параметров для исходного материала. Особого внимания заслуживает поведение образца 6, где произошла не только релаксация, но и смена знака напряжений. Это может быть связано с особенностями исходной дислокационной структуры данного образца или с локальными неоднородностями в распределении напряжений до обработки. Такое поведение требует дополнительного исследования, так как переход от напряжений сжатия к напряжениям растяжения может влиять на усталостные характеристики материала.

Заключение. Исследование комбинированной обработки стали 38X2MЮА выявило несколько ключевых закономерностей, характеризующих влияние МИО на остаточные напряжения. Наиболее значимым результатом стало подтверждение эффективности МИО для управления остаточными напряжениями в поверхностном слое материала. Обработка при энергии 10 кДж продемонстрировала выраженный релаксирующий эффект, особенно заметный в образцах без предварительного азотирования, где наблюдалось не только снижение, но и смена знака макронапряжений.

Проведенные исследования комбинированной обработки стали 38X2MЮА методом ИПА с последующей МИО позволили установить следующие закономерности.

1. Магнитно-импульсное воздействие эффективно снижает уровень остаточных напряжений: при энергии 10 кДж величина макронапряжений уменьшается в среднем на 0,4...0,6 ГПа, что в отдельных случаях приводит к изменению их характера от сжимающих к растягивающим (образец 6: от $-1,44$ до $+0,08$ ГПа).

2. При более низкой энергии (6 кДж) релаксационный эффект выражен слабее и составляет не более 0,15...0,2 ГПа, что указывает на нелинейную зависимость степени релаксации от энергии импульса.

3. Поверхностная микротвердость после ИПА достигает 600...620 HV_{0,2}, а при комбинированной обработке сохраняется на уровне 610...615 HV_{0,2}, что свидетельствует о возможности снижения напряжений без потери упрочняющего эффекта.

4. Оптимальными параметрами МИО для предварительно азотированных слоев можно считать энергию импульса в пределах 6...10 кДж при кратности воздействия не менее 3 импульсов, что обеспечивает баланс между релаксацией напряжений и сохранением высокой твердости.

Перспективы дальнейших исследований. Проведенное исследование открывает несколько важных направлений для будущих научных изысканий. Наиболее перспективным представляется углубленное изучение влияния параметров МИО на структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях азотированной стали. Особый интерес представляет исследование зависимости между энергией импульса, количеством воздействий и степенью релаксации остаточных напряжений, что позволит оптимизировать технологический процесс.

Значительный научный и практический интерес представляет изучение влияния комбинированной обработки на эксплуатационные характеристики материала, в частности, на усталостную прочность, износостойкость и коррозионную стойкость. Дальнейший интерес представляет управление структурой переходной зоны между азотированным слоем и основным металлом посредством МИО, что потенциально повысит сцепление слоя и устойчивость покрытия.

Особого внимания заслуживает разработка математических моделей, описывающих процессы, происходящие в материале при комбинированной обработке. Создание таких моделей позволит не только глубже понять физическую природу наблюдаемых явлений, но и перейти к целенаправленному проектированию свойств поверхностного слоя. Перспективным представляется также исследование возможности применения предложенной технологии обработки для других конструкционных сталей и сплавов.

Важным направлением дальнейших работ является изучение влияния комбинированной обработки на релаксацию напряжений в условиях эксплуатационных нагрузок и температурных воздействий. Это позволит оценить стабильность достигнутых улучшений свойств в реальных условиях работы деталей. Особый интерес представляет исследование возможности локального применения МИО для выборочного регулирования напряжённого состояния в критических зонах деталей сложной конфигурации.

Список цитируемых источников

- 1.Metalloprodukcija iz konstrukcionnoj legirovannoj stali. Tehniicheskie uslovija : GOST 4543-2016. — Vzaмен GOST 4543-71 ; введ. 01.10.2017. — М. : Стандартиформ, 2019. — 53 с.
2. *Гольдштейн, М. И.* Специальные стали / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. — М. : Металлургия, 1985. — 408 с.
3. *Новиков, И. И.* Теория термической обработки металлов : учебник / И. И. Новиков. — М. : Металлургия, 1978. — 391 с.
4. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов, А. В. Акулов, Ж. А. Попова, А. С. Демянчик // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 3 (66). — С. 77—82.
5. *Буркин, С.* Металлургия. Остаточные напряжения в металлопродукции : учеб. пособие для СПО / С. Буркин, Г. Шимов, Е. Андрюкова. — М. : Юрайт ; Екатеринбург : Изд-во Ур. ун-та, 2018. — 247 с.
6. *Уманский, Я. С.* Рентгенография металлов и полупроводников / Я. С. Уманский. — М. : Металлургия, 1969. — 496 с.
7. *Cullity, B. D.* Elements of X-Ray Diffraction / B. D. Cullity, S. R. Stock. — 3rd Ed. — Prentice Hall, 2001. — 664 p.

Поступила в редакцию 21.10.2025.

УДК 621.891:681.51.08

А. Н. Парфиевич, кандидат технических наук, доцент,**В. А. Сокол, Ю. Н. Саливончик**Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»,
ул. Московская, 267, 224017 Брест, Республика Беларусь, +375 (162) 32 17 52, lstrector@bstu.by

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ В СОСТАВЕ МНОГОВАЛЬНЫХ ПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

В статье представлен нейросетевой подход к диагностике состояния зубчатых передач в составе много-вальных приводов на основе анализа акустического сигнала. Предложена комплексная система, объединяющая аппаратно-программный комплекс для регистрации и обработки акустических сигналов и многослойную нейронную сеть с элементами самоорганизующейся карты Кохонена для классификации состояний. В ходе экспериментов исследовались пять состояний зубчатого колеса: от эталонного до полного отсутствия зуба, включая промежуточные дефекты (25 % длины зуба отсутствует, 50 % длины зуба отсутствует, 75 % длины зуба отсутствует). Для каждого состояния проведено по 25 измерений, сформирован обучающий набор из 125 примеров с 60 диагностическими признаками, извлеченными из спектра сигнала. Признаки включают амплитуды низкочастотных составляющих, кратных частоте вращения валов, частот зацепления и их боковых полос. Сеть была обучена с использованием размеченных данных, а её архитектура позволила эффективно кластеризовать и классифицировать состояния. Экспериментальные результаты показали высокую общую точность классификации — 92,2 %. Наилучшие результаты достигнуты для промежуточных дефектов (100 %), несколько ниже — для эталонного состояния и полного отсутствия зуба. Выявлено, что недостаточная однородность обучающей выборки для крайних состояний влияет на точность. Работа демонстрирует эффективность применения нейронных сетей с самоорганизацией для автоматизации диагностики, повышения достоверности и оперативности выявления дефектов в сложных механических системах.

Ключевые слова: диагностика; зубчатые передачи; акустический сигнал; искусственная нейронная сеть; самоорганизующаяся карта; классификация.

Рис. 4. Табл. 2. Библиогр.: 12 назв.

A. N. Parfievich, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**V. A. Sokol, Yu. N. Salivonchik**Institution of Education “Brest State Technical University”, 267 Moskovskaya Str., 224017 Brest,
the Republic of Belarus, +375 (162) 32 17 52, lstrector@bstu.by

A NEURAL NETWORK APPROACH TO THE CLASSIFICATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF GEAR TRANSMISSIONS IN MULTI-AXIS DRIVES BASED ON ACOUSTIC SIGNAL ANALYSIS

The article presents a neural network approach to diagnosing the condition of gear pairs within multi-shaft drives based on acoustic signal analysis. A comprehensive system is proposed, combining hardware and software for the registration and processing of acoustic signals with a multi-layer neural network featuring elements of a self-organizing Kohonen map for state classification. During the experiments, five states of the gear were investigated: from the benchmark condition to complete tooth loss, including intermediate defects (25 %, 50 % and 75 % of tooth length missing). For each state, 25 measurements were taken, creating a training set of 125 examples with 60 diagnostic features extracted from the signal spectrum. The features include amplitudes of low-frequency components, multiples of the shaft rotation frequency, engagement frequencies, and their sidebands. The network was trained using labeled data, and its architecture allowed for effective clustering and classification of states. Experimental results showed a high overall classification accuracy of 92.2 %. The best results were achieved for intermediate defects (100 %), while slightly lower accuracy was noted for the benchmark condition and complete tooth loss. It was found that insufficient homogeneity of the training sample for extreme states affects accuracy. This work demonstrates the effectiveness of using self-organizing neural networks for automating diagnostics, enhancing reliability, and improving the promptness of defect detection in complex mechanical systems.

Key words: diagnostics; gear transmissions; acoustic signal; artificial neural network; self-organizing map; classification.

Fig. 4. Table 2. Ref.: 12 titles.

Введение. Современные промышленные объекты, такие как станки, транспортные механизмы, подъёмно-транспортное оборудование и энергетические установки, всё чаще оснащаются сложными многовальными зубчатыми приводами, обеспечивающими передачу крутящего момента между различными исполнительными органами. Надёжная и бесперебойная работа таких систем напрямую зависит от технического состояния их ключевых элементов — зубчатых передач. Даже незначительные дефекты, такие как микротрещины, выкрашивание, износ или сколы зубьев, могут со временем прогрессировать, приводя к полному выходу из строя узла, остановке технологического процесса, повреждению сопряжённых деталей, значительным финансовым потерям и в ряде случаев аварийным ситуациям. В этой связи своевременная и достоверная диагностика технического состояния зубчатых передач приобретает особую актуальность как важнейший элемент систем технического обслуживания и предиктивной диагностики.

Традиционные методы диагностики, основанные на анализе вибрационных или акустических сигналов, зачастую требуют глубокой экспертной интерпретации, длительной обработки данных и высокой квалификации персонала, что делает их трудоёмкими, субъективными и малоприменимыми для автоматизации [1; 2]. Кроме того, в условиях многовальных приводов спектр сигнала становится чрезвычайно насыщенным и сложным, поскольку содержит частотные составляющие от нескольких пар зацеплений, валов и подшипников, что затрудняет выделение информативных признаков, однозначно указывающих на наличие и характер дефекта.

В последние годы всё большее распространение получают методы технической диагностики, основанные на применении искусственных нейронных сетей (далее — ИНС) [3—6]. Так, ИНС обладают способностью к обучению на примерах, самоорганизации и распознаванию образов, что позволяет им эффективно обрабатывать большие объёмы зашумленных данных, выявлять скрытые закономерности и классифицировать состояния оборудования с высокой точностью. Особый интерес представляют архитектуры с использованием самоорганизующихся карт (Self-Organizing Maps, SOM), предложенных Т. Кохоненом, которые не только классифицируют данные, но и визуализируют их структуру, формируя топологически корректные кластеры. В данной работе представлено исследование по разработке и внедрению нейросетевой системы для акустической диагностики многовальных зубчатых приводов, сочетающей аппаратно-программный комплекс для извлечения диагностических признаков и многослойную нейронную сеть с элементами Кохонена для классификации состояний.

Методология и методы исследования. Искусственная нейронная сеть представляет собой математическую, программную или аппаратную модель, имитирующую принципы функционирования биологических нейронных сетей мозга. Она состоит из большого числа взаимосвязанных вычислительных элементов — искусственных нейронов, которые обрабатывают информацию и передают её по синаптическим связям. Каждый нейрон получает входные сигналы, взвешивает их с помощью коэффициентов (весов), суммирует и передаёт результат через нелинейную активационную функцию, формируя выходной сигнал. Эта структура позволяет сети моделировать сложные нелинейные зависимости между входными и выходными данными, что делает ИНС мощным инструментом для решения задач, которые трудно формализовать традиционными алгоритмами.

Ключевые свойства ИНС: способность к обучению, самоорганизации, адаптации к изменениям окружающей среды и распознаванию зашумленных или неполных образов. Эти качества делают их идеальными кандидатами для решения задач классификации, распознавания образов, прогнозирования и аппроксимации функций, что особенно актуально в области технической диагностики, где требуется высокая устойчивость к помехам и вариативности условий эксплуатации [4].

Одним из наиболее распространённых подходов в задачах диагностики является обучение с учителем (supervised learning). В этом случае нейронная сеть обучается на размеченном наборе данных, где каждому входному вектору (например, набору амплитуд

частотных составляющих акустического сигнала) сопоставлен правильный ответ — класс, к которому он принадлежит (например, «норма», «скол 25 %», «отсутствие зуба»). В процессе обучения сеть корректирует свои весовые коэффициенты в целях минимизации ошибки между предсказанным и истинным выходами. После завершения обучения сеть способна обобщать полученные знания и классифицировать новые, ранее неизвестные данные.

Среди множества архитектур ИНС для решения поставленной задачи была выбрана многослойная сеть прямого распространения с одним скрытым слоем, где в качестве скрытого слоя использованы нейроны Кохонена. Этот выбор обусловлен необходимостью не только классифицировать состояния, но и выявить внутреннюю структуру данных, сгруппировать схожие признаки и снизить размерность входного пространства. Нейроны Кохонена являются основой самоорганизующихся карт [7]. В отличие от традиционных слоёв с фиксированными весами, нейроны Кохонена обучаются по конкурентному принципу: на каждом шаге только один нейрон — «победитель» — активируется и корректирует свои веса, приближаясь к входному вектору. Этот процесс позволяет сети формировать топологически корректное отображение входных данных, где близкие по значению векторы активируют соседние нейроны на карте. Такой подход особенно эффективен при анализе сложных многомерных данных, таких как акустические спектры, где требуется выделение кластеров, соответствующих определённым техническим состояниям [9—11].

Кроме того, нейронные сети обладают рядом достоинств по сравнению с классическими методами: высокая степень параллелизма обработки информации, способность к обобщению, устойчивость к шумам и частичной потере данных, а также возможность адаптации к изменяющимся условиям работы оборудования [8]. Учитывая эти преимущества, использование ИНС с элементами самоорганизации представляет собой перспективное направление для создания автоматизированных систем диагностики, способных работать в реальном времени и обеспечивать высокую достоверность результатов.

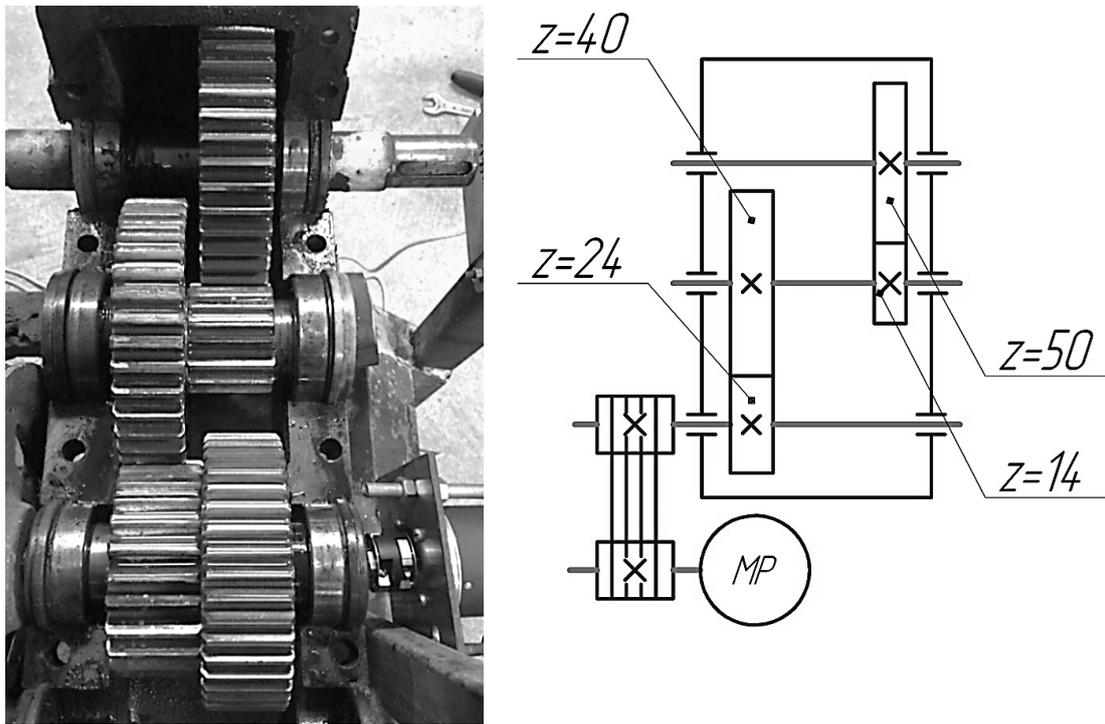
Результаты исследования и их обсуждение. В качестве объекта исследования был выбран горизонтальный редуктор с цилиндрическими прямозубыми колесами (рисунок 1). Для получения акустических данных использовался аппаратно-программный комплекс [1], который включал измерительный микрофон с капсулем M101. Сигналы с микрофона записывались и обрабатывались в реальном времени. Для точного определения частот вращения валов и частот, характерных составляющих сигнала, применялись преобразователи угловых перемещений.

На одном из колес редуктора моделировался локальный дефект — скол зуба (рисунок 2). Исследования проводились для пяти различных состояний:

- 1) зубчатое колесо без дефекта (эталон);
- 2) зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 25 % от полной длины зуба;
- 3) зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 50 % от полной длины зуба;
- 4) зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 75 % от полной длины зуба;
- 5) зубчатое колесо с полным отсутствием зуба (дефект 100 %).

Для каждого состояния было проведено по 25 измерений, что позволило накопить достаточный объем экспериментальных данных (125 измерений). Результаты, полученные с эталонной шестерней, были приняты за базу сравнения.

Спектр анализируемого сигнала, полученный с помощью микрофона, представляет собой чрезвычайно насыщенную информационную структуру, содержащую множество частотных компонент, порожденных всеми элементами привода. Прямое ручное извлечение всех значимых характеристик практически невозможно из-за высокой сложности и объема данных.



а)

б)

а — общий вид редуктора; б — кинематическая схема редуктора

Рисунок 1. — Цилиндрический двухступенчатый редуктор:



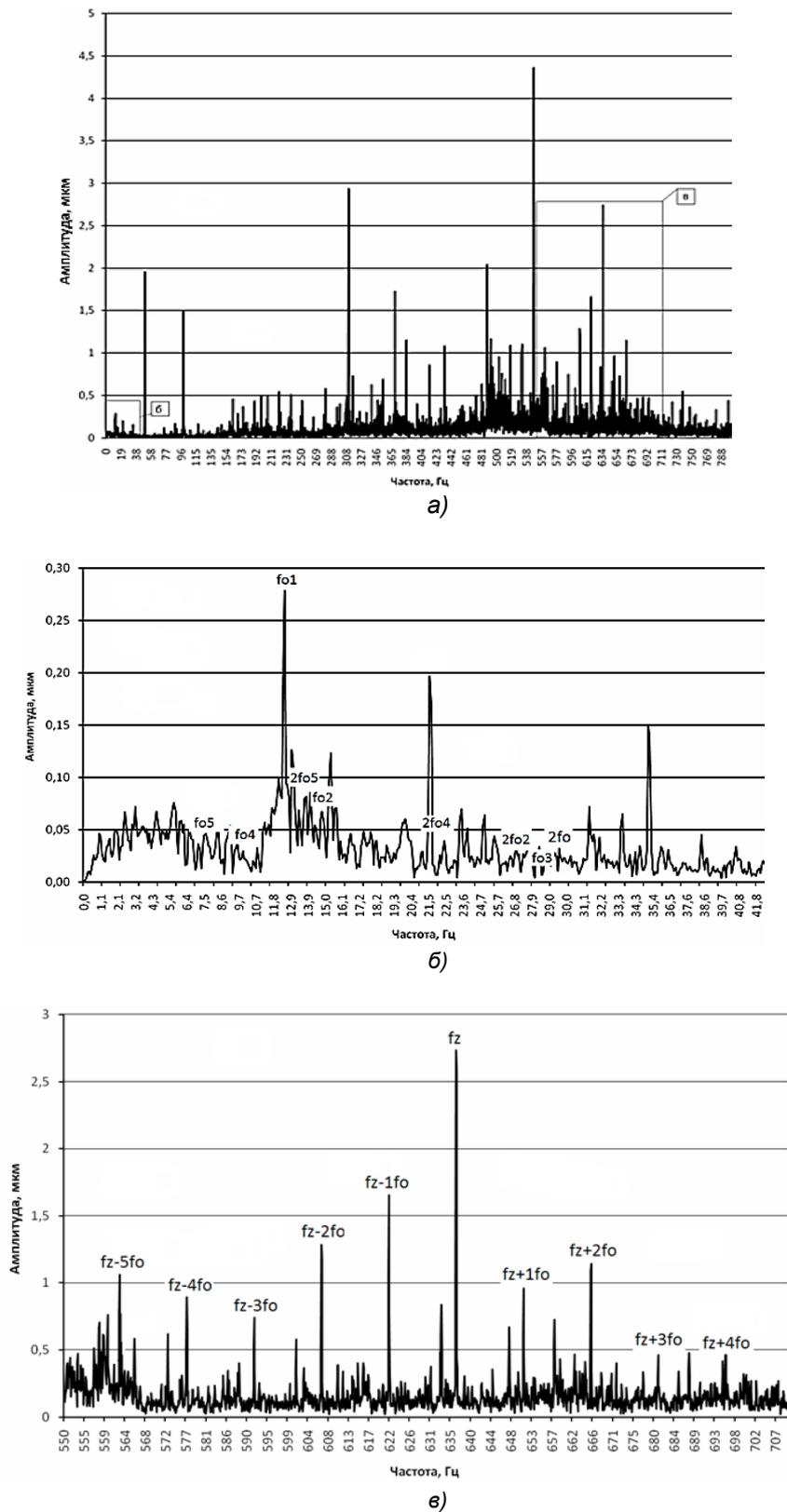
Рисунок 2. — Общий вид исследуемой шестерни с локальным дефектом в виде скола зуба

На основе анализа литературных источников [2; 3; 11] была определена совокупность ключевых частотных составляющих, несущих информацию о состоянии зубчатой передачи (рисунок 3):

1) низкочастотные составляющие, кратные частоте вращения валов (f_0 , Гц). Эти спектральные компоненты соответствуют частотам, кратным частоте вращения валов ($f_0 = n / 60$, где n — частота вращения вала, мин⁻¹). Они возникают вследствие периодических сил, обусловленных вращением элементов многовального привода и циклическим характером передачи крутящего момента. Каждый раз, когда зуб шестерни проходит мимо зуба колеса, возникает небольшой импульс нагрузки, повторяющийся с частотой вращения вала. Эти циклические изменения вызывают модуляцию акустического сигнала, что проявляется в виде выраженных пиков на частотах f_0 , $2f_0$, $3f_0$ и т. д. в спектре сигнала. Амплитуда этих гармоник может возрастать в зависимости от дефектов зубчатых колес, поскольку любые геометрические или массовые неоднородности усиливают периодические колебания. Таким образом, анализ уровня и динамики изменения амплитуд низкочастотных составляющих позволяет выявлять макроскопические нарушения в работе привода и оценивать общее техническое состояние роторной системы, что делает их важным диагностическим признаком;

2) высокочастотные составляющие с частотами пересопряжения зубьев всех пар (f_z) и их кратными значениями. Частота пересопряжения (или частота зацепления) f_z определяется как произведение частоты вращения шестерни на число её зубьев ($f_z = f_0 z$, Гц). Это одна из наиболее информативных частот в спектре сигнала зубчатой передачи. Она соответствует частоте, с которой происходит контакт (вход в зацепление и выход из него) отдельных зубьев шестерни и колеса. При каждом таком контакте возникает ударный характерный импульс, генерирующий высокочастотные колебания в акустическом и вибрационном поле. В спектре эти процессы проявляются в виде доминирующих пиков на частоте f_z и её гармониках ($2f_z$, $3f_z$ и т. д.). Эти компоненты являются прямыми индикаторами механических взаимодействий в зацеплении и чрезвычайно чувствительны к изменениям в состоянии зубьев. При наличии дефектов, таких как сколы, выкрашивание, износ или трещины, амплитуда частоты зацепления и её гармоник существенно возрастают, а форма импульсов становится более сложной. Кроме того, появление дополнительной энергии на этих частотах может свидетельствовать о нарушении условий смазки, увеличении зазоров или потере жесткости в передаче. Таким образом, мониторинг амплитуд высокочастотных составляющих позволяет оперативно выявлять локальные повреждения и оценивать интенсивность износа зубчатого зацепления;

3) комбинированные (модулированные) частоты вида $lf_z \pm nf_0$, где l, n — целые числа, например: 1, 2, 3 и т. д. Эти частоты, часто называемые боковыми полосами, возникают в результате амплитудной и (или) фазовой модуляции сигнала зацепления. Модуляция происходит вследствие переменных контактных сил, вызванных нестационарными факторами, характерными для поврежденных или изношенных зубьев. Например, при наличии локального дефекта (такого как скол или трещина) каждый раз, когда поврежденный зуб входит в зацепление, происходит резкий скачок нагрузки, что приводит к кратковременному увеличению амплитуды сигнала зацепления. Этот процесс эквивалентен модуляции основной частоты зацепления f_z низкочастотным сигналом f_0 . В результате в спектре появляются дополнительные составляющие на частотах вида $f_z \pm f_0$, $f_z \pm 2f_0$, $2f_z \pm f_0$ и т. д. Наличие и рост амплитуды таких боковых полос является ярким признаком существования локального дефекта и считается одним из наиболее достоверных диагностических признаков. Анализ структуры боковых полос (их количества, ширины и амплитуды) позволяет не только обнаружить дефект, но и оценить его размер, локализацию и стадию развития. Особенно информативны такие составляющие при анализе сложных многовальных приводов, где традиционные методы могут быть недостаточно чувствительными. Таким образом, комбинированные частоты служат ключевым индикатором нестационарных процессов в зацеплении и играют решающую роль в ранней диагностике дефектов зубчатых передач.



а — фрагмент спектра акустического сигнала многовального привода с разрешением спектра 524 000; б — фрагмент спектра акустического сигнала в области оборотных частот f_0 ; в — фрагмент исходного спектра в области частот $(f_z - kf_0) - (f_z + kf_0)$ шестерни $z_2 = 43$

Рисунок 3. — Результат обработки спектра акустического сигнала с помощью функции аппаратно-программного комплекса «Анализ гармоник»

Для автоматизации процесса извлечения этих параметров была разработана и реализована в программной части комплекса новая функция — «Анализ гармоник», которая автоматически выделяет и фиксирует амплитуды указанных выше частотных компонент, формируя набор диагностических признаков.

На основе извлеченных диагностических признаков был сформирован обучающий набор данных, включающий 60 параметров (амплитуд различных частотных компонент), полученных с помощью функции «Анализ гармоник» для каждого из 125 измерений. Данные были размечены по пяти классам, соответствующим пяти экспериментально моделируемым состояниям зубчатого колеса: зубчатое колесо без дефекта (эталон), зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 25 % от полной длины зуба, зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 50 % от полной длины зуба, зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 75 % от полной длины зуба, зубчатое колесо с полным отсутствием зуба (дефект 100 %). Этот набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 4 : 1, что обеспечило адекватную оценку обобщающей способности модели.

Структура разработанной многослойной нейронной сети (рисунок 4) представляет собой классическую архитектуру прямого распространения сигнала и состоит из трех последовательных слоев. Входной слой формируется 60 нейронами, каждый из которых принимает на вход одну из амплитудных характеристик спектра, составляющих вектор признаков. Этот вектор подвергается предварительной нормализации в диапазоне [0, 1] для устранения влияния масштаба и ускорения процесса сходимости обучения.

Скрытый слой реализован в виде самоорганизующейся карты Кохонена, содержащей 30 нейронов. В отличие от слоев в традиционных сетях, нейроны в карте Кохонена обучаются по принципу конкурентного обучения (*winner-take-all*). При подаче входного вектора на каждом шаге вычисляются Евклидовы расстояния между ним и весовыми векторами всех 30 нейронов. Нейрон с минимальным расстоянием объявляется «победителем». Только его весовые коэффициенты обновляются по правилу $\omega_{ci}(t+1) = \omega_{ci}(t) + \alpha(X_i - \omega_{ci}(t))$, где α — коэффициент скорости обучения, постепенно уменьшающийся во времени, а X_i — компонента входного вектора. Этот процесс позволяет карте Кохонена кластеризовать входные данные, формируя топологически корректное представление, где близкие по признакам состояния активируют соседние нейроны на двумерной карте. Это свойство особенно ценно для визуализации структуры данных и выявления закономерностей.

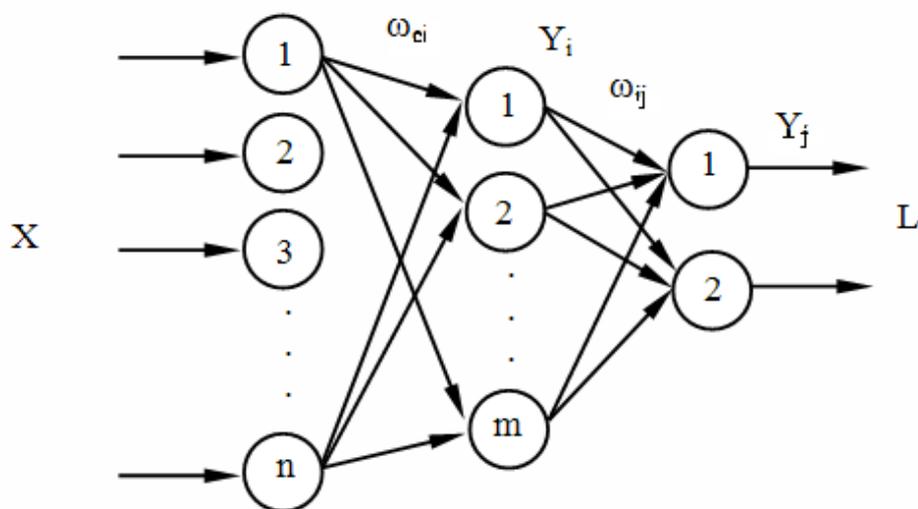


Рисунок 4. — Структура нейронной сети

Выходной слой состоит из пяти нейронов, каждый из которых соответствует одному из классов состояния шестерни. Связи между скрытым и выходным слоями настраиваются в процессе обучения, сопоставляя кластеры на карте Кохонена с конкретными классами. После завершения обучения на выходе сети активируется только один нейрон, соответствующий наиболее вероятному классу, что обеспечивает четкую интерпретацию результата. Обучение сети продолжалось до достижения стабильной карты кластеров и минимальной ошибки классификации на обучающей выборке.

Обучение сети продолжалось до достижения желаемой степени согласованности между входными данными и весовыми векторами. Общая средняя квадратичная ошибка обучения составила 0,00533, что свидетельствует о достаточно высокой степени адаптации сети к данным.

После завершения обучения нейронная сеть была протестирована на независимом тестовом наборе данных. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Общая точность классификации составила 92,2 %. Анализ результатов показывает, что сеть отлично справляется с распознаванием состояний с умеренными дефектами (25, 50, 75 %) и эталонного состояния. Однако точность распознавания самого экстремального состояния — отсутствия зуба — оказалась значительно ниже (72,7 %).

Более детальный анализ процесса обучения (таблица 2) выявил причину этого недостатка. В ходе обучения сеть не смогла корректно научиться классифицировать образы из пятого класса, хотя на тестовом наборе она показала более высокую точность (93,3 %). Это указывает на то, что обучающая выборка для этого класса была недостаточной или неоднородной, что привело к тому, что сеть не смогла сформировать надежный кластер для данного типа дефекта [5; 10—12].

Заключение. В ходе проведенного исследования была разработана и экспериментально апробирована нейросетевая система акустической диагностики состояния зубчатых передач в многовальных приводах. Предложенный подход, сочетающий использование специализированного аппаратно-программного комплекса для извлечения диагностических признаков и многослойной нейронной сети с применением элементов самоорганизующихся карт Кохонена для классификации, показал высокую эффективность. Общая точность распознавания состояний шестерни составила 92,2 %, что подтверждает работоспособность и перспективность метода.

Т а б л и ц а 1. — Результаты решения задачи классификации, %

Зубчатое колесо без дефекта (эталон)	Зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 25 % от полной длины зуба	Зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 50 % от полной длины зуба	Зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 75 % от полной длины зуба	Зубчатое колесо с полным отсутствием зуба (дефект 100 %)
88,9	100,0	100,0	100,0	72,7

Т а б л и ц а 2. — Результаты обучения нейросетевого классификатора, %

Зубчатое колесо без дефекта (эталон)	Зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 25 % от полной длины зуба	Зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 50 % от полной длины зуба	Зубчатое колесо с локальным дефектом длиной 75 % от полной длины зуба	Зубчатое колесо с полным отсутствием зуба (дефект 100 %)
20,0	20,0	20,0	20,0	18,7

Полученные результаты демонстрируют, что ИНС, в особенности архитектуры с элементами самоорганизации, являются мощным инструментом для автоматизации процесса диагностики и способны значительно повысить достоверность и оперативность выявления дефектов по акустическим сигналам. Наиболее выраженный результат достигнут при распознавании промежуточных стадий повреждения (от 25 до 75 %), тогда как для крайнего состояния (полное отсутствие зуба) точность оказалась ниже, что указывает на необходимость расширения обучающей выборки и её тщательной балансировки.

Таким образом, разработанная система представляет собой перспективное решение для создания автоматизированных систем мониторинга технического состояния сложных механических приводов, способных работать в реальном времени и снижать риск аварийных ситуаций. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование алгоритмов извлечения признаков, включая применение методов глубокого обучения, и на адаптацию системы для диагностики других типов дефектов и более сложных кинематических схем.

Список цитируемых источников

1. Новые аппаратно-программные средства для исследования и диагностики механических систем / А. В. Драган, И. П. Стецко, Д. А. Ромашко, Н. В. Левкович // Вестник Брестского государственного технического университета. — 2006. — № 4. — С. 17—26.
2. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. — URL: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm> (дата обращения: 01.04.2025).
3. Diagnosing Gear Transmission Using a New Condition Monitoring Method for Rotating Equipment / Anil Jacob, Dr. Y. I. Sharaf-Eldeen. — URL: http://www.vibration.ru/d_zub_peredach.shtml (date of access: 01.04.2025).
4. Головкин, В. А. Нейронные сети: обучение, организация, применение / В. А. Головкин // Нейрокомпьютеры и их применение : учеб. пособие. — М., 2001. — 256 с.
5. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. — М. : Вильямс, 2006. — 1104 с.
6. Chen, J. Deep Learning-Based Fault Diagnosis of Gearboxes Using Acoustic Signals / J. Chen, Z. Wang, Q. Zhao // Sensors. — 2021. — Vol. 21, no. 10. — P. 3456. — DOI: 10.3390/s21103456.
7. Kohonen, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps / T. Kohonen // Biological Cybernetics. — 1982. — Vol. 43, no. 1. — P. 59—69.
8. Haykin, S. Neural Networks and Learning Machines / S. Haykin; 3rd ed. — Pearson Education, 2014. — 1080 p.
9. Gao, R. X. Wavelet Theory and Its Applications for Machinery Condition Monitoring / R. X. Gao, R. Yan. — Springer, 2015. — 342 с.
10. Zhang, X. Application of Artificial Neural Networks in Gearbox Fault Diagnosis: A Review / X. Zhang, B. Li, H. Liu // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. — 2020. — Vol. 14, no. 1. — P. 4567—4583. — DOI: 10.15282/jmes.14.1.2020.01.0485.
11. Lu, Y. A Hybrid Method of Feature Extraction and Classification for Gear Fault Detection Using Neural Networks / Y. Lu, W. Yang // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2019. — Vol. 104, no. 5—8. — P. 1897—1909. — DOI: 10.1007/s00170-019-03744-6.
12. Sun, Y. Research on the Application of SOM in Mechanical Fault Diagnosis / Y. Sun, M. Xu, L. Wang // Proceedings of the 2017 International Conference on Intelligent Manufacturing Systems. — IEEE, 2017. — P. 112—116. — DOI: 10.1109/ICIMS.2017.8081245.

Поступила в редакцию 06.10.2025.

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 636.084.74

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

П. Ю. Крупенин², кандидат технических наук, доцент

¹Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, ktmg@batu.edu.by

²Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, pavel@krupenin.com

**ОБОСНОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА КООРДИНАТНЫХ КОРМОРАЗДАТЧИКОВ
В СОСТАВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОРМЛЕНИЯ
КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА**

В процессе автоматизации процесса кормления животных кормораздатчики занимают особое место. Кормораздатчики могут быть оснащены различными системами управления, что позволяет оптимизировать процесс кормления, в том числе с учетом потребностей животных в разные сезоны, а также диетических требований. Координатные кормораздатчики — передвижные машины, перемещающиеся по механически или программно заданной траектории. Наиболее часто используются в составе автоматизированных систем кормления крупного рогатого скота и позволяют реализовать в зависимости от способа содержания животных как индивидуальное, так и групповое кормление.

В ходе анализа конструктивно-технологических схем автоматизированных систем кормления крупного рогатого скота установлено, что их использование в технологическом процессе позволяет снизить затраты труда, повысить качество выполнения технологических операций и улучшить показатели продуктивности животных, однако их внедрение на животноводческих предприятиях требует высоких начальных капиталовложений, модернизации животноводческих помещений и обучения обслуживающего персонала.

В статье предложена методика выбора количества координатных кормораздатчиков, основывающаяся на масштабах фермы, способе содержания животных и экономической целесообразности.

Ключевые слова: координатный кормораздатчик; автоматизированная система кормления; кормовая смесь; автоматизация; робот-кормораздатчик; крупный рогатый скот.

Рис. 5. Библиогр.: 9 назв.

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

P. Y. Krupenin², PhD in Technical Sciences, Associate Professor

¹Institution of Education “Belarusian State Agrarian Technical University”,
99 Nezalezhnosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, ktmg@batu.edu.by

²Institution of Education “Belarusian State Agricultural Academy”,
5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus, pavel@krupenin.com

**JUSTIFICATION OF THE COORDINATE FEED DISPENSERS NUMBER
IN AUTOMATED CATTLE FEEDING SYSTEMS**

Feed dispensers occupy a special place in the automation of animal feeding. Feed dispensers can be equipped with various control systems, what allows optimizing the feeding process, taking into account animal needs during different seasons and dietary requirements. Coordinate feed dispensers — mobile machines that move along a mechanically or programmatically predetermined trajectory — are most often used in automated cattle feeding systems and allow both individual and group feeding, depending on the animal housing method.

Analysis of the design and process flow diagrams of automated cattle feeding systems revealed that their use in the process reduces labor costs, improves the quality of process operations, and enhances animal productivity. However, their implementation on livestock farms requires significant initial capital investment, modernization of livestock facilities, and service personnel training.

This article proposes a method for selecting the coordinate feed dispensers number based on the farm's size, animal housing method, and economic feasibility.

Key words: coordinate feed dispenser; automated feeding system; feed mixture; automation; robotic feed dispenser; cattle.

Fig. 5. Ref.: 9 titles.

Введение. Одним из ключевых факторов продуктивности крупного рогатого скота является сбалансированное питание. Правильная организация раздачи кормов животным имеет важное значение. По трудоемкости она составляет 30...40 % от общих трудовых затрат по уходу за животными [1].

В процессе автоматизации процесса кормления животных кормораздатчики занимают особое место. Кормораздатчики могут быть оснащены различными системами управления, что позволяет оптимизировать процесс кормления, в том числе с учетом потребностей животных в разные сезоны, а также диетических требований. По степени подвижности кормораздатчики, эксплуатируемые в составе автоматизированных систем приготовления и раздачи кормов, могут быть стационарными или координатными — передвижными машинами, перемещающимися по механически или программно заданной траектории. В качестве механических средств, задающих траекторию движения координатных кормораздатчиков, применяют закладные элементы, направляющие салазки, рельсовые и монорельсовые пути, программных — RFID-транспондеры, системы позиционирования и машинного зрения [2; 3].

Современные автоматизированные системы кормления позволяют точно дозировать корм в соответствии с физиологическими потребностями животных, исключая перекармливание или дефицит питательных веществ. Система может регулировать количество и состав кормов для каждой группы животных или даже для отдельных особей, что особенно актуально в молочном скотоводстве [4].

Методология и методы исследования. Конструктивно-технологическую схему автоматизированной линии раздачи кормов крупному рогатому скоту выбирают в соответствии со схемой подготовки кормов и способом их скармливания: раздельным, в виде полнорационной кормовой смеси или комбинированным [5].

Раздельный способ скармливания заключается в раздельной, последовательной выдаче животным кормов. Данный производственный процесс весьма энерго- и металлоемок, так как для выдачи кормов необходимо различное оборудование — от механизированных транспортных средств до ручных тележек. Существенным недостатком данного способа является и увеличение периода процесса кормления, что ухудшает аппетит животных.

Способ скармливания кормов в виде полнорационной кормовой смеси заключается в одновременной раздаче всех видов кормов в смешанном виде. Он позволяет повысить продуктивность животных за счет взаимодополняющего действия компонентов смеси и увеличения поедаемости кормов на 5...9 % у молочных коров и на 10...15 % у молодняка на откорме, а также на 10...15 % снизить потери кормов. Скармливание кормов в виде полнорационной кормосмеси значительно упрощает организацию процесса кормления. В этом случае разные по физико-механическим свойствам корма превращаются в однородную смесь, что позволяет механизировать ее раздачу одним типом кормораздатчиков [6].

Комбинированный способ предполагает скармливание объемистых кормов (силос, сенаж, сено и т. д.) с базовой дозой концентратов в виде кормовой смеси, в дополнение к которой животные отдельно получают порции концентратов, объем которых рассчитывается на основании их индивидуальных особенностей (молочная продуктивность, масса животного, физиологическое состояние и др.). Для беспривязного содержания молочного стада крупного рогатого скота существуют два способа индивидуального кормления концентрированными кормами: кормление в доильном зале и кормление в стойловом помещении. Выдача кормов в доильном зале осуществляется с помощью стационарного кормораздатчика с ручной или

автоматической идентификацией животных, в стойловом помещении — с помощью кормовых станций, обеспечивающих идентификацию животных, дозирование и индивидуальную выдачу порции комбикорма.

К кормораздающим устройствам автоматизированных линий предъявляются следующие зоотехнические требования: 1) отклонение дозы по массе в расчете на одну голову крупного рогатого скота должно составлять для стебельчатых кормов — не более 10 %, для комбикормов и добавок — не более 5 %; 2) кормораздатчики должны быть универсальными в отношении возможности выдачи всех видов кормов, иметь высокую производительность и возможность регулирования нормы выдачи от минимальной до максимальной; 3) кормораздатчики не должны создавать излишнего шума и запыленности в помещении; 4) бункера кормораздатчиков должны максимально полно очищаться от остатков корма; 5) автоматизированные линии раздачи кормов должны быть надежными в работе [7].

Результаты исследования и их обсуждение. Современные роботизированные системы раздачи кормов крупному рогатому скоту оснащаются сенсорами и программным управлением, позволяющими анализировать потребление корма, отслеживать изменения в аппетите животных и при необходимости вносить корректировки в нормы выдачи кормов.

Для кормления животных при привязном содержании животных фирмой Pellon Group OY (Финляндия) разработан координатный робот-кормораздатчик Pellon Combi (рисунок 1), конструктивное исполнение которого и возможности системы управления позволяют осуществлять индивидуальное кормление животных в соответствии с запрограммированным рационом [2; 3].

Отличительная особенность робота Pellon Combi — реализованный в его конструкции способ приготовления кормосмеси: смешивание производится с помощью поперечного раздаточного ленточного транспортера, оснащенного системой электронного взвешивания. На транспортер дозаторами (работают в согласованном с системой взвешивания режиме) из соответствующих бункеров подается необходимая порция объемистых и концентрированных кормов. Смешивание ингредиентов кормовой смеси начинается еще в процессе их подачи на поверхность транспортера. Готовая порция кормосмеси транспортером выгружается конкретному животному в кормушку или на кормовой стол (раздача может осуществляться на обе стороны).



Рисунок 1. — Робот-кормораздатчик Pellon Combi

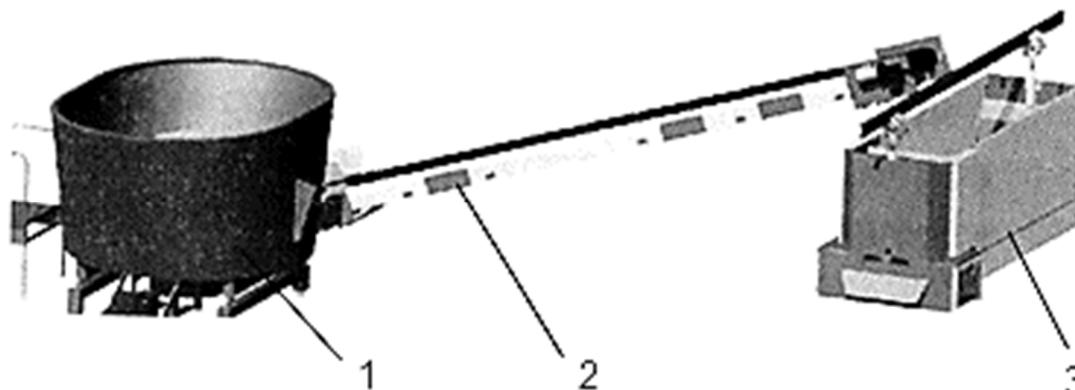
При беспривязном содержании животных Pellon Group OY предлагает использовать варианты исполнения автоматизированной системы кормления животных, в которых основным элементом является робот-кормораздатчик Pellon TMR 3 (рисунок 2).

Фирма Mullerup (Дания) предлагает потребителям варианты автоматизированных систем кормления животных с координатными кормораздатчиками. Конструкция роботов-кормораздатчиков Mix Feeder позволяет выполнять приготовление кормосмеси и ее раздачу в животноводческих помещениях с различными системами содержания животных в автоматическом режиме под управлением компьютера MIT или вручную [2; 3].

Для кормления молочного стада с большим поголовьем (до 1 000 коров) при беспривязном содержании фирма GEA Farm Technologies (Германия) разработала систему MIX & CARRY, состоящую из координатного робота-кормораздатчика и стационарного смесителя MVM для приготовления кормосмесей (рисунок 3).

Координатные роботы-кормораздатчики MIX & CARRY, выпускающиеся с объемом бункера 2 или 3 м³, могут обслуживать до 20 групп животных, выдавая им до 30 рационов кормосмесей, перемещаясь при этом по монорельсу со скоростью 8...16 м / мин.

Фирмой DeLaval (Швеция) разработана система Optimat II Master (рисунок 4), используемая для кормления различных групп коров с определенным рационом для каждой из них. Компоненты автоматически дозируются, смешиваются, после чего кормовая смесь многократно раздается животным в течение суток.



1 — смеситель CutMix; 2 — ленточный конвейер; 3 — робот-кормораздатчик Pellon TMR

Рисунок 2. — Автоматизированная система кормления животных фирмы Pellon Group OY

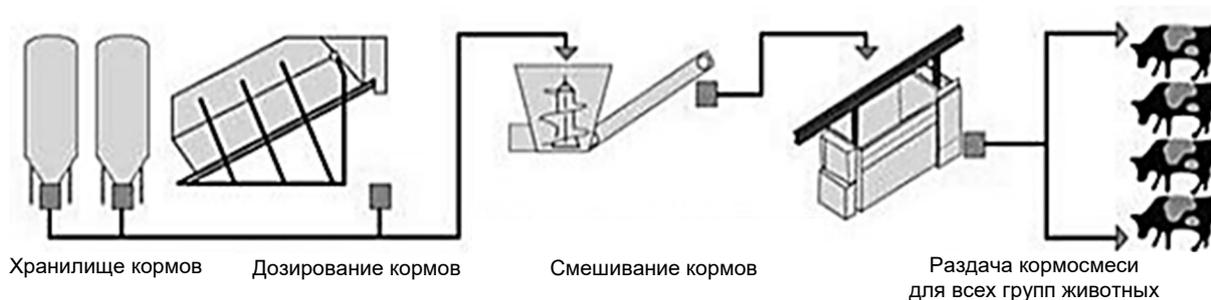


Рисунок 3. — Элементы автоматизированной системы кормления MIX & CARRY

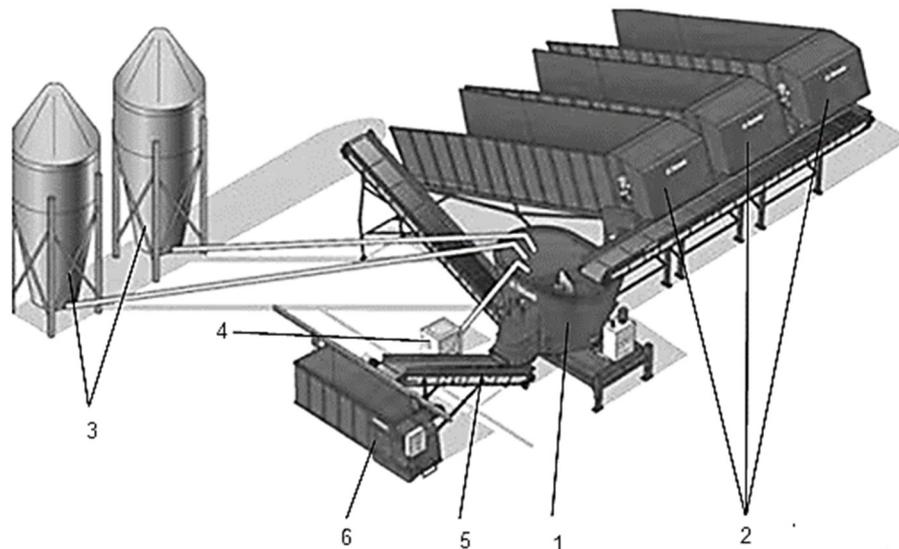


Рисунок 4. — Автоматизированная система приготовления и раздачи кормов Optimat II Master

В установленное время стационарный смеситель 1 загружается компонентами корма из бункеров стебельчатых кормов 2, концентратов 3 и минеральных добавок 4. После приготовления корма в смесителе 1 готовая кормовая смесь загружается наклонным транспортером 5 в кормораздатчик 6, который транспортирует смесь в животноводческое помещение и распределяет по кормовому столу. Система Optimat II Master может использоваться для кормления различных групп коров с конкретным рационом для каждой из групп. Рационы автоматически смешиваются и раздаются животным в заданное время.

В последнее время получают развитие автоматизированные системы кормления животных, оснащаемые координатными кормораздатчиками на колесном ходу, при создании которых за основу были взяты мобильные смесители-раздатчики кормов.

Фирмой Schuitemaker Machines B. V. (Нидерланды) разработан автоматический погрузчик-смеситель-раздатчик кормов Innovado (рисунок 5).

В конструкции кормораздатчика Innovado выемка силоса из траншейных хранилищ и его загрузка в бункер установки осуществляются резчиком силосных блоков, размещенным на стреле с регулируемой длиной вылета. Смешивание ингредиентов производится в бункере кормораздатчика с помощью вертикального шнека. Раздача корма ведется ленточным поперечным транспортером на левую или правую сторону.

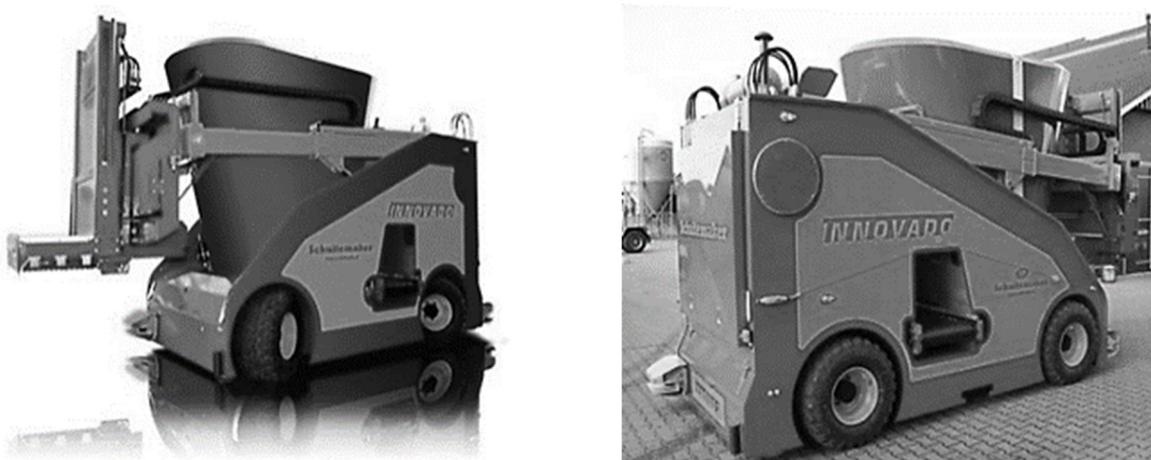


Рисунок 5. — Автоматический погрузчик-смеситель-раздатчик кормов Innovado

Безопасная эксплуатация кормораздатчика Innovado обеспечивается за счет установленного на нем лидара, который сканирует близлежащее пространство на предмет присутствия людей, животных и других объектов. При обнаружении препятствия на маршруте движения робот немедленно останавливается. Программное обеспечение системы управления позволяет осуществлять загрузку кормами из нескольких хранилищ, обслуживая при этом различные группы животных в разных помещениях и приготавливая им кормовые смеси соответствующих рационов.

Автоматические системы кормления позволяют оптимизировать процессы раздачи кормов, повысить продуктивность животных и снизить затраты на ручной труд [8; 9]. Эти технологии обеспечивают:

- точность дозирования — системы обеспечивают равномерное распределение кормов, что снижает отклонения в питании и предотвращает потери;
- снижение затрат на рабочую силу — автоматизация процессов кормления минимизирует потребность в ручном труде, что особенно важно на крупных фермах;
- повышение продуктивности животных — стабильный и сбалансированный рацион способствует увеличению привесов и молочной продуктивности, снижает риски заболеваний;
- экономию кормов — точное распределение кормовой смеси позволяет избежать перерасхода и потерь, что положительно сказывается на себестоимости продукции;
- гибкость и адаптацию — системы могут настраиваться под различные рационы и группы животных, учитывая их потребности в питательных веществах.

При автоматической раздаче кормов молочная продуктивность коров увеличивается на 10...15 % за счет более равномерного и своевременного поступления питательных веществ, что снижает стрессы и повышает усвоение рациона. В мясном животноводстве точное кормление способствует ускоренному набору массы и сокращению периода откорма, снижая расход кормов на единицу продукции.

Несмотря на то, что автоматизированные системы кормления позволяют снизить затраты труда, повысить качество выполнения технологических операций и улучшить показатели продуктивности животных, они не лишены недостатков:

- высокая стоимость внедрения — закупка и установка автоматических систем требуют значительных инвестиций, что может быть неподъемно для небольших хозяйств;
- техническая сложность и зависимость от сервисного обслуживания — при сбоях в системе неизбежны задержки в раздаче кормов, что негативно сказывается на продуктивности животных;
- необходимость в квалифицированном персонале — для обслуживания и настройки систем требуются соответствующие специалисты, что увеличивает затраты на их обучение;
- ограниченная адаптация на фермах с нестандартными объемно-планировочными решениями — внедрение автоматизированных систем может потребовать существенной перепланировки животноводческих помещений;
- риски неправильных настроек — ошибки в программировании могут привести к перерасходу кормов или падению продуктивности.

При автоматизации процесса раздачи кормов животным важным является определение количества координатных раздатчиков кормов. Для решения данной задачи необходимо учесть их грузоподъемность, длительность одного рейса (цикла), объемно-планировочное решение животноводческого помещения и количество раздаваемого корма.

Грузоподъемность координатного кормораздатчика (количество корма, которое можно доставить и раздать за один рейс)

$$m_6 = V_6 k_3 \rho_k ,$$

где V_6 — вместимость бункера-кормораздатчика, м³;

k_3 — коэффициент заполнения бункера, $k_3 = 0,8...1,0$;

ρ_k — плотность корма, кг / м³.

Количество циклов, которые может выполнить один кормораздатчик за время раздачи,

$$i_{\text{ц}} = \frac{T_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}},$$

где $T_{\text{р}}$ — допустимое время кормления (предопределяется распорядком дня на животноводческом предприятии), с;

$t_{\text{ц}}$ — длительность одного цикла раздачи, с.

Длительность одного цикла раздачи определяется как сумма затрат времени на отдельные операции этого цикла:

$$t_{\text{ц}} = (t_{\text{x}} + t_{\text{з}} + t_{\text{с}} + t_{\text{т}} + t_{\text{р}}) k_{\text{у}},$$

где t_{x} — время перемещения пустого кормораздатчика, с;

$t_{\text{з}}$ — время загрузки кормораздатчика, с;

$t_{\text{с}}$ — время на смешивание кормов в бункере кормораздатчика, с;

$t_{\text{т}}$ — время перемещения загруженного кормораздатчика, с;

$t_{\text{р}}$ — продолжительность раздачи кормов, с;

$k_{\text{у}}$ — коэффициент, учитывающий затраты времени на управление кормораздатчиком и согласование работы загрузочных устройств, $k_{\text{у}} = 1, 1, \dots, 1, 2$.

Время перемещения пустого кормораздатчика к месту его загрузки кормами определяется по формуле

$$t_{\text{x}} = \frac{L}{v_{\text{x}}},$$

где L — среднее расстояние от животноводческого помещения до места загрузки кормов, м;

v_{x} — скорость движения пустого раздатчика, м / с.

Время загрузки кормораздатчика определяется по формуле

$$t_{\text{з}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{Q_i},$$

где m_i — масса порции i -го корма, загружаемой в кормораздатчик, кг;

Q_i — производительность загрузчика i -го корма, кг / с.

Время переезда загруженного кормораздатчика к месту раздачи кормов

$$t_{\text{т}} = \frac{L}{v_{\text{т}}},$$

где $v_{\text{т}}$ — скорость движения загруженного кормораздатчика, м / с.

Время, затрачиваемое на раздачу кормов животным, можно определить по формуле

$$t_{\text{р}} = \frac{\Pi_{\text{ж}} L_{\text{ф.к}}}{v_{\text{р}}},$$

где $\Pi_{\text{ж}}$ — количество животных, обслуживаемых за один цикл, гол.;

$L_{\text{ф.к}}$ — ширина фронта кормления на одно животное, м;

$v_{\text{р}}$ — скорость движения кормораздатчика при раздаче кормов, м / с.

Общее количество циклов (рейсов) координатного раздатчика для обслуживания всего поголовья зависит от количества выдаваемого за одно кормление корма:

$$i_3 = \frac{m_\Sigma}{m_6},$$

где m_Σ — масса корма, используемого для одного кормления всего поголовья, кг.

Потребное для животноводческого предприятия количество координатных кормораздатчиков определяется отношением

$$n_p = \frac{i_3}{i_{\text{ц}}}.$$

Полученный результат расчета n_p округляют до целого числа в сторону увеличения и принимают как количество координатных раздатчиков для фермы.

Заключение. Автоматизированные системы кормления позволяют снизить затраты труда, повысить качество выполнения технологических операций и улучшить показатели продуктивности животных, однако их внедрение на животноводческих предприятиях требует высоких начальных капиталовложений, модернизации животноводческих помещений и обучения обслуживающего персонала.

Технические возможности эксплуатируемых в составе автоматизированных линий кормления крупного рогатого скота координатных кормораздатчиков позволяют реализовать в зависимости от способа содержания животных как индивидуальное, так и групповое кормление.

Выбор количества координатных кормораздатчиков должен основываться на масштабах фермы, способе содержания животных и экономической целесообразности, чтобы автоматизация процесса кормления приносила максимальную выгоду.

Список цитируемых источников

1. Китун, А. В. Анализ и обоснование технологических параметров стационарных систем кормления крупного рогатого скота / А. В. Китун, П. Ю. Крупенин // Вестник БарГУ. Серия «Технические науки». — 2025. — № 1 (17). — С. 60—68.
2. Роботизированные системы в животноводстве : учеб. пособие / А. А. Науменко [и др.] ; Харьк. нац. техн. ун-т сел. хоз-ва им. Петра Василенка. — Харьков : ХНТУСХ им. Петра Василенка, 2015. — 171 с.
3. Технические системы точного животноводства : учеб. пособие / П. Ю. Крупенин, Ю. А. Крупенин, А. В. Китун. — Горки : БГСХА, 2025. — 128 с.
4. Китун, А. В. Техничко-экономический анализ автоматизированных систем приготовления и раздачи кормов крупному рогатому скоту / А. В. Китун, Ю. А. Крупенин, П. Ю. Крупенин // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2025. — № 1. — С. 120—125.
5. Мишуров, Н. П. Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока / Н. П. Мишуров. — М. : Росинформагротех, 2010. — 152 с.
6. Хазанов, Е. Е. Технология и механизация молочного животноводства : учеб. пособие / Е. Е. Хазанов, В. В. Гордеев, В. Е. Хазанов. — СПб. : Лань, 2016. — 352 с.
7. Проектирование инновационных механизированных процессов в животноводстве : учеб. пособие / А. В. Китун, В. И. Передня, Н. Н. Романюк, П. Ю. Крупенин. — Минск : БГАТУ, 2025. — 204 с.
8. Tangorra, F. M. Energy consumption and technical-economic analysis of an automatic feeding system for dairy farms: Results from a field test / F. M. Tangorra // Journal of Agricultural Engineering. — 2018. — Vol. 49. — P. 228—232.
9. Купреенко, А. И. Автоматическая система кормления КРС на базе подвешенного роботизированного кормораздатчика / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, С. М. Михайличенко // Техника и технологии в животноводстве. — 2021. — № 3 (43). — С. 5—9.

Поступила в редакцию 22.10.2025.

УДК 621.43.065.001.57

М. В. Кунаш¹,
К. Ф. Саевич², доктор биологических наук, профессор,
И. А. Сацкевич³,
Д. Ф. Кольга⁴, кандидат технических наук, доцент,
Т. В. Молош⁵, кандидат технических наук, доцент

¹Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (0163) 66 53 74, marinavainilovich@mail.ru

^{1, 2, 3}Учреждение образования «Белорусский государственный экономический университет», пр-т Партизанский, 26, 220070 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 209 88 16

^{4, 5}Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 267 47 71

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫБРОСОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА СОСТОЯНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

В статье рассмотрены вопросы загрязнения воздушной среды при эксплуатации городских транспортных средств, связанные с выбросами автомобильных двигателей. Предлагаются мероприятия по снижению выбросов автомобилей для улучшения экологической обстановки в городе Минске и снижения их негативного влияния на здоровье населения.

Ключевые слова: воздушная среда; выбросы; двигатель; мероприятия; транспорт; экологическая обстановка; здоровье.

Рис. 2. Библиогр.: 13 назв.

M. V. Kunash¹,
K. F. Saevich², DSc in Biological Sciences, Professor,
I. A. Satsukevich³,
D. F. Kolga⁴, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
T. V. Molosh⁵, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

¹Institution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus, +375 (0163) 66 53 74, marinavainilovich@mail.ru

^{1, 2, 3}Institution of Education "Belarusian State University of Economics", 26 Partizansky Ave., 220070 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 209 88 16

^{4, 5}Institution of Education "Belarusian State Agrarian Technical University", 99 Nezavisimosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 47 71

WAYS TO REDUCING THE IMPACT OF VEHICLE EMISSIONS ON THE AIR QUALITY

The article discusses the issues of air pollution caused by the operation of urban vehicles and the emissions from automobile engines. Measures to reduce automobile emissions in order to improve the environmental situation in Minsk and reduce their negative impact on public health are proposed.

Key words: air environment; emissions; engine; activities; transportation; environmental situation; health.

Fig. 2. Ref.: 13 titles.

Введение. В начале прошлого века трудно было предположить, что через 100 лет гигантские масштабы автомобилизации будут представлять реальную опасность для жизнедеятельности человека. Опасность воздействия выбросов транспортных средств увеличивается вследствие того, что вредные компоненты этих газов поступают непосредственно в атмосферный воздух в населенных пунктах, где естественный обмен воздуха ограничен вследствие плотной застройки, что сказывается на здоровье человека: усиливает нервную напряженность людей, представляющую опасность для участников дорожного движения,

снижает их внимательность, производительность труда, а также эффективность отдыха населения. Кроме того, повышается вероятность возникновения нервных, сердечно-сосудистых, дыхательных, желудочных и других заболеваний.

В связи с этим выполнялись исследования по оценке воздействия загрязняющих веществ от автомобильного транспорта, тракторов и другой коммунальной техники на состояние воздуха и здоровье жителей города Минска [1; 2].

Для этого решались следующие задачи:

- 1) определить основные загрязняющие вещества при выбросе транспорта;
- 2) провести оценку состояния атмосферного воздуха города Минска и изучить характер воздействия автомобильного транспорта на окружающую среду и здоровье человека;
- 3) разработать предложения по снижению влияния выбросов автотранспорта на воздушную среду и здоровье населения.

Актуальность данной проблемы обусловлена возрастающим количеством транспорта, а также влиянием его воздействия на качество городской среды и здоровье жителей городов.

Материалы и методы исследования. Транспорт городов, выполняя свою важнейшую социально-экономическую функцию, потребляет большое количество топливно-энергетических и других ресурсов. При производстве и эксплуатации транспортных средств окружающей среде и обществу наносится значительный экологический ущерб: выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух и на почвенные экосистемы, транспортный шум и вибрация, загрязнение живого надпочвенного покрова и водных ресурсов, образование отходов, изъятие земельных и лесных ресурсов при строительстве транспортной инфраструктуры и производственных мощностей машиностроения.

Общий мировой парк автомобилей в настоящее время насчитывает более 2 млрд единиц, из которых 83...85 % составляют легковые автомобили, а 15...17 % — грузовые и автобусы. Транспорт, с одной стороны, потребляет из атмосферы кислород, с другой — выбрасывает в нее отработавшие газы, картерные газы и углеводороды вследствие испарения их из топливных баков и негерметичности систем подачи топлива. Транспорт также является активным потребителем кислорода воздуха: в городах он поглощает кислорода больше, чем все их население [3].

Кроме недостатка кислорода существует другая проблема: воздух городов насыщен вредными веществами автомобильных выхлопов, которые загрязняют атмосферный воздух на высоте человеческого роста, а маленькие дети дышат этими выбросами на уровне выхлопной трубы. Выбросы от транспорта распространяются непосредственно на улицах города вдоль дорог, оказывая прямое вредное воздействие на пешеходов, жителей расположенных рядом домов и растительность. Выявлено, что зоны с превышением предельно допустимой концентрации по диоксиду азота и оксиду углерода иногда охватывают до 90 % городской территории, особенно в период установления смога.

В проведенной работе в результате анализа данных Белгидромета выявлена динамика концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города Минска, а также изучены основные методы снижения отрицательного воздействия транспорта на атмосферный воздух города Минска [4; 5].

Объектом исследования являлся атмосферный воздух города Минска, предметом — воздействие транспорта на окружающую среду.

В основном были использованы следующие методы:

- стационарный (данные были предоставлены Белгидрометом);
- наблюдение (для получения данных и описания состояния атмосферного воздуха города Минска);
- сравнительный (были проанализированы данные о концентрациях загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в различных районах города Минска);
- исторический (для изучения динамики концентрации загрязняющих веществ в городе Минске);

– моделирование (для оценки воздействия различных механизмов на уменьшение загрязнения атмосферного воздуха города Минска).

По тому, как меняются показатели исследуемого объекта, можно судить о его состоянии на данный момент, а также выявить тенденции к изменению его состояния, скорости, размеров и направление этих изменений.

Результаты исследования и их обсуждение. В процессе эксплуатации транспорта в атмосферный воздух попадает большое количество загрязняющих веществ, содержащихся в отработавших газах силовых установок. Наиболее канцерогенными из них являются: оксид углерода, диоксида азота и серы, сажа, альдегиды, соединения тяжелых металлов, углеводороды (рисунок 1).

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух включают выбросы от мобильных и стационарных источников выбросов [6].

Мобильные источники выбросов — транспортные средства, самоходные машины, работа двигателей которых влечёт за собой выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Стационарные источники выбросов — источники выбросов, перемещение которых без демонтажа невозможно и местоположение которых может быть определено с применением единой государственной системы координат либо которые могут быть перемещены посредством транспортного или иного передвижного средства, но требуют неподвижного (стационарного) положения в процессе их эксплуатации [6].

За период с 2005 по 2023 год количество автомобилей в республике возросло на 75 %, при этом доля личных автомобилей за указанный период составила более 83 % с постоянной тенденцией к увеличению. При этом 21 % автопарка республики сосредоточен в городе Минске. В настоящее время проблема загрязнения атмосферного воздуха постоянно обостряется в связи с резким ростом парка транспортных средств, суммарной мощности двигателей и, соответственно, расхода топливно-энергетических ресурсов [7].

Наиболее вредное воздействие транспортной системы на окружающую среду в целом и атмосферный воздух в частности оказывает автомобильный транспорт, тракторы и коммунальная техника. Их доля в общем объеме выбросов вредных веществ в атмосферный воздух от мобильных источников загрязнения составляет более 80 %.



Рисунок 1. — Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух в Республике Беларусь (тыс. т) [6]

Рост парка транспортных средств и потребления топлива сказывается на увеличении объемов выбросов загрязняющих веществ от мобильных источников в городе Минске при относительной их стабилизации в последние годы. Доля выбросов от мобильных источников в валовом объеме выбросов загрязняющих веществ Республики Беларусь в последние годы составляет 78 %. Однако по некоторым направлениям отмечается сокращение выбросов загрязняющих веществ мобильными источниками: это происходит за счет обновления парка транспортных средств, ужесточения государственного экологического контроля, увеличения объемов использования газообразного топлива и электрической энергии.

Совместно с Белгидрометом было проведено изучение состояния атмосферного воздуха. В результате определены средние концентрации ($\text{мг} / \text{м}^3$) загрязняющих веществ (оксида углерода, диоксида азота, аммиака и свинца) в разных частях города Минска за 2021—2022 годы. Исследования проводились на участке, ограниченном улицами Судмалиса, Бобруйской, М. Богдановича, Щорса (рисунок 2).

В районе дома № 16 на улице Судмалиса среднемесячное значение содержания оксида углерода в атмосферном воздухе города Минска было превышено. В июле 2018 года оно составило $500 \text{ мг} / \text{м}^3$, в августе и сентябре 2019 года — 527 и $523 \text{ мг} / \text{м}^3$ соответственно, в июне и сентябре 2021 года — 515 и $521 \text{ мг} / \text{м}^3$ соответственно.

В районе дома № 8 на улице Бобруйской среднемесячное значение содержания оксида углерода в атмосферном воздухе города Минска также превысило в январе 2017 года ($506 \text{ мг} / \text{м}^3$) допустимые значения.

На улице Челюскинцев, дом № 22, среднемесячное значение содержания оксида углерода в атмосферном воздухе города Минска также превысило норму в январе, марте, июле и декабре 2017 года — 502 , 523 , 547 и $548 \text{ мг} / \text{м}^3$ соответственно; в январе, июле, августе и октябре 2018 года — 519 , 662 , 589 и $628 \text{ мг} / \text{м}^3$ соответственно; в апреле 2019 года — $587 \text{ мг} / \text{м}^3$.

В районе улицы М. Богдановича, дом № 254, среднемесячное допустимое содержание оксида углерода в атмосферном воздухе города Минска было превышено в январе, феврале, марте, августе, сентябре, ноябре и декабре 2017 года — 692 , 504 , 569 , 522 , 615 , 633 и $564 \text{ мг} / \text{м}^3$ соответственно; в январе, феврале, марте, апреле, мае, октябре, ноябре и декабре 2018 года — 523 , 558 , 523 , 632 , 542 , 748 , 630 и $558 \text{ мг} / \text{м}^3$ соответственно; в феврале, марте и августе 2021 года 558 , 748 и $506 \text{ мг} / \text{м}^3$ соответственно.

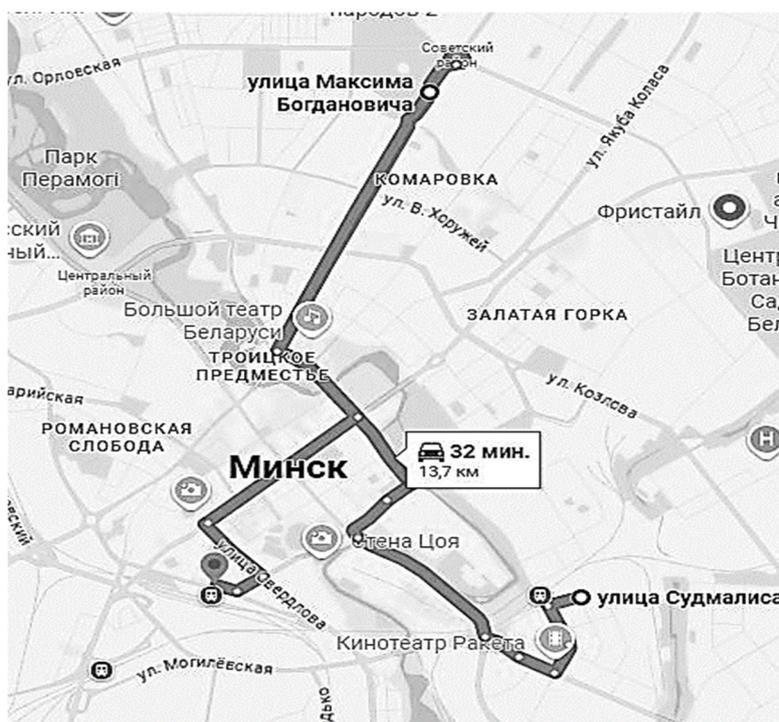


Рисунок 2. — Участок исследования

Стоит отметить, что среднегодовое превышение допустимого содержания оксида углерода в атмосферном воздухе в районе улицы М. Богдановича за 2017, 2018, 2021 и 2022 годы было больше нормы на 26, 46, 37 и 30 мг / м³ соответственно. В 2019—2022 годах отметилась тенденция к уменьшению концентрации оксида углерода в атмосферном воздухе.

В районе улицы Щорса, дом № 5, среднемесячное значение содержания оксида углерода в атмосферном воздухе города Минска было превышено в январе и ноябре 2017 года — 578 и 502 мг / м³ соответственно; в феврале, марте, мае, июне, июле, августе, сентябре, октябре, ноябре и декабре 2018 года — 583, 542, 554, 639, 860, 828, 808, 737, 656 и 582 мг / м³ соответственно; в марте, июне, августе и октябре 2021 года — 824, 749, 804 и 669 мг / м³ соответственно.

Выполнение измерений было проведено с помощью газоанализатора переносного ГАНК-4 Ех.

Значительный рост парка транспортных средств влечет за собой увеличение потребления дизельного топлива при практически неизменном росте потребления бензина. В последние годы отмечается значительное развитие технологий дизельных двигателей, что привело к изменению уровня выбросов и состава выхлопных газов. Выхлопные газы дизельных двигателей представляют собой сложную смесь газообразных и твердых частиц, образующихся при сгорании дизельного топлива. Их количество и состав зависят от типа, состояния и наличия технического обслуживания двигателя, состава и свойств топлива, а также применяемых методов последующей обработки выхлопных газов.

Основными газообразными компонентами отработанных газов дизельного топлива являются диоксид углерода, кислород, азот, водяной пар, окиси азота и окись углерода. Кроме того, в газовой фазе может выделяться диоксид серы и различные органические соединения, такие как низкомолекулярные карбонилы, карбоновые кислоты, алканы, алкены и ароматические вещества. Помимо газов и паров, выхлопные газы содержат мельчайшие частицы, которые образуются в процессе сгорания и последующей конденсации соединений газовой фазы. Выхлопные частицы дизельного топлива легко вдыхаются. Из-за своего небольшого размера частицы могут достигать легочных альвеол — чувствительной газообменной области легких. Выхлопные газы дизельного двигателя обладают неприятным запахом. Их воздействие на организм может вызвать раздражение глаз, носа и горла, а также изменения в функции кровеносных сосудов, профессиональное заболевание легких [8; 9].

В июне 2012 года Международное агентство по изучению рака (МАИР) обновило свою оценку канцерогенности дизельных выхлопных газов и переклассификации дизельных выхлопных газов как канцерогенных для человека (группа 1). В связи с проводимой в стране программой широкой дизелизации транспортно-тяговых средств наиболее существенными являются вопросы защиты атмосферы от загрязнения токсичными компонентами отработавших газов дизельных двигателей. Необходима дополнительная информация о фактических уровнях воздействия на рабочих местах, где используются новые технологии дизельных двигателей. Техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним» (ТР ТС 031/2012), работающих на дизельном топливе, установлены следующие требования: выбросы вредных веществ, содержащихся в отработавших газах двигателей, не должны превышать установленных значений в соответствии с диапазоном их мощности:

- E2 — до 31 января 2024 года*;
- D, G — до 1 января 2025 года;
- E1, F — до 1 октября 2025 года;
- K, J — с 1 января 2025 года;
- H, I — с 1 октября 2025 года.

*Данные требования были установлены с 24 мая 2024 года (решение Совета ЕЭК от 12.04.2024 № 32 «О внесении изменений в технический регламент Таможенного союза “О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним” (ТР ТС 031/2012)»).

В связи с увеличением спроса населения на транспортные услуги при обеспечении экологической безопасности транспортного комплекса страны имеется ряд нерешенных проблем: наблюдается тенденция старения парка транспортных средств; требует развития техникий уровень транспортной техники и оборудования; необходимо совершенство взаимодействия различных отраслей, связанных с разработкой, производством, эксплуатацией и утилизацией транспортных средств [10—12].

Существуют примеры успешных практик из других городов мира, которые смогли существенно снизить уровень загрязнения воздуха:

– Копенгаген (Дания) — город активно развивает велосипедную инфраструктуру. Более 60 % жителей используют велосипеды для передвижения, что способствует снижению выбросов и улучшению качества воздуха;

– Барселона (Испания) — в городе внедрена программа «Суперблоки» (Superblocks), ограничивающая движение автомобилей в определённых районах. Это создало больше пространства для пешеходов и велодорожек, улучшив качество воздуха;

– Сингапур — использует систему «платного въезда» (Electronic Road Pricing), которая взимает плату за въезд в централизованные зоны в часы пик;

– Лондон (Великобритания) — внедрены зоны низких выбросов (Ultra-low Emission Zone), где действуют строгие требования к автомобилям. Это способствовало значительному снижению загрязняющих веществ;

– Стокгольм (Швеция) — реализовал систему «платного въезда» и активно развивает общественный транспорт. В результате город смог сократить выбросы углекислого газа и улучшить качество воздуха;

– Берлин (Германия) — развивает электрический общественный транспорт и внедряет программы по переходу на экологически чистое топливо для автобусов.

Эти примеры показывают, как различные города мира применяют разнообразные стратегии для снижения загрязнения воздуха и улучшения экологической ситуации.

Очень важно установить баланс между экономической и социальной пользой транспорта и отрицательными последствиями его эксплуатации для общества и окружающей среды с учетом как международных обязательств Республики Беларусь, так и реальной социально-экономической обстановки в стране. Одним из недавних достижений в области охраны окружающей среды в Беларуси стало принятие «Стратегии в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2035 года» [13].

Заключение. Проблемы, связанные с воздействием транспорта на окружающую среду, носят комплексный характер и должны решаться совместными усилиями специалистов в области машиностроения, технической эксплуатации транспортных средств, организации транспортных перевозок, безопасности дорожного движения, дорожного строительства для минимизации воздействия транспорта на атмосферный воздух.

Решение этих проблем связано с внедрением следующих мероприятий:

– модернизация и организация новых технологий, а также проектирование и производство мобильной техники с учетом требований экологической безопасности;

– переход на более чистые виды топлива с улучшенными экологическими характеристиками;

– экономичность и экологичность использования топлива в процессе эксплуатации транспортных средств;

– увеличение площадей зелёных насаждений.

Снижение загрязнения воздуха городов может быть достигнуто при использовании электрического общественного транспорта. В Беларуси в настоящее время развиваются различные виды транспорта на электрической тяге: велосипеды, байки, мотоциклы, автомобили, автобусы, электропоезда. Электрический общественный колесный транспорт (электробусы) способен перевозить значительные объемы пассажиров при минимальном воздействии на окружающую среду.

Список цитируемых источников

1. *Голицын, А. Н.* Промышленная экология и мониторинг загрязнения природной среды / А. Н. Голицын. — М. : Оникс, 2010. — 336 с.
2. *Денисов, В. И.* Проблемы экологизации автомобильного транспорта / В. И. Денисов, В. А. Роголев. — СПб. : МАПЭБ, 2005. — 312 с.
3. *Подгорнова, Н. А.* Экологические проблемы автомобильного транспорта и пути решения / Н. А. Подгорнова // Молодой ученый. — 2016. — № 22.2 (126.2). — С. 48—50.
4. *Шишков, Ю. А.* Хрупкая экосистема Земли и безответственное человечество / Ю. А. Шишков // Наука и жизнь. — 2004. — № 12. — С. 2—11.
5. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь : стат. сб. // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. — Минск, 2021. — URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 20.09.2025).
6. Загрязнение атмосферного воздуха и разрушение озонового слоя. — URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/sovmestnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii/2/a-zagryaznenie-atmosfernogo-vozduha-i-razrushenie-ozonovogo-sloya/a-1-vybrosy-zagryaznyayuschih-veschestv-v-atmosferny-i-vozduh/> (дата обращения: 20.09.2025).
7. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2020 г. / под общ. ред. Е. П. Богодяж. — Минск : Респ. центр по гидрометеорологии, контролю радиоактив. загрязнения и мониторингу, 2021. — 591 с., ил. 576. — URL: <https://nsmos.by/publikacii/2020> (дата обращения: 20.09.2025).
8. *Челноков, А. А.* Безопасность жизнедеятельности / А. А. Челноков, В. Н. Босак, Л. Ф. Ющенко. — Минск : Выш. шк., 2023. — 407 с.
9. *Босак, В. Н.* Безопасность жизнедеятельности человека / В. Н. Босак, З. С. Ковалевич. — Минск : РИВШ, 2023. — 404 с.
10. Обеспечение безопасности жизнедеятельности на современном этапе развития общества / В. Н. Босак [и др.]. — Горки : БГСХА, 2020. — 152 с.
11. *Графкина, М. В.* Экология и экологическая безопасность автомобиля : учеб. для студентов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» / М. В. Графкина, В. А. Михайлов, К. С. Иванов ; под общ. ред. М. В. Графкиной. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2016. — 320 с.
12. *Собгайда, Н. А.* Методы контроля качества окружающей среды : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и 20.03.01 «Техносферная безопасность» / Н. А. Собгайда. — М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2016. — 112 с.
13. Стратегия в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2035 года : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 24 янв. 2021 г. № 370 : утв. приказом М-ва природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 24.12.2021 № 370-ОД. — URL: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/2021/strategija-oxr.okr.sredy-do-2035g..pdf> (дата обращения: 20.09.2025).

Поступила в редакцию 06.10.2025.

УДК 631.371

С. В. Савчук, кандидат технических наук, доцент,
А. Н. Парфиевич, кандидат технических наук, доцент,
О. А. Медведев, кандидат технических наук, доцент

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», ул. Московская, 267,
224017 Брест, Республика Беларусь, +375 (162) 32 17 44, mashin@bstu.by

СОЗДАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛУНАВЕСНОГО ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕ-ПОСЕВНОГО АГРЕГАТА С ПАССИВНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ ШИРИНОЙ 6 М И ВНЕДРЕНИЕ ЕГО В УСЛОВИЯХ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

Разработан модифицированный полунавесной почвообрабатывающе-посевной агрегат АМПШ-6 «Берестье» шириной захвата 6 м для условий Брестской области. Целью исследования является устранение недостатков серийного агрегата АППМ-6 и повышение эффективности посевных работ. Выявлены ключевые проблемы: высокое удельное давление на почву, малый объём семенного бункера, неэффективная система уплотнения и отсутствие интеграции с системами точного земледелия. Предложены технические решения: шахматное расположение уплотняющих колёс увеличенных размеров, повышающее проходимость и снижающее сопротивление; увеличение объёма бункера до 4 200 л для роста коэффициента использования рабочего времени; внедрение электронной системы управления с GPS-навигацией и режимом изменяемой нормы высева; гидравлическая регулировка глубины обработки и усовершенствованная система подачи семян. Агрегат обеспечивает снижение себестоимости работ на 15...18 %, рост урожайности — на 5...7 %, экономию топлива и импортозамещение. Конструкция адаптирована к тяжёлым и переувлажнённым почвам, способствует снижению антропогенной нагрузки. АМПШ-6 «Берестье» представляет собой перспективное решение для развития отечественного сельскохозяйственного машиностроения и может стать основой новой линейки высокотехнологичной посевной техники.

Ключевые слова: АМПШ-6 «Берестье»; модернизация; полунавесной агрегат; пассивные рабочие органы; точное земледелие; электронное управление; гидравлическая регулировка; импортозамещение.

Рис. 1. Библиогр.: 10 назв.

S. V. Savchuk, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. N. Parfievich, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
O. A. Medvedev, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Institution of Education “Brest State Technical University”, 267 Moskovskaya Str., 224017 Brest,
the Republic of Belarus, +375 (162) 32 17 44, mashin@bstu.by

CREATION OF A MODIFIED SEMI-MOUNTED SOIL-TILLING AND SOWING UNIT WITH PASSIVE WORKING TOOLS 6 M IN WIDTH AND ITS IMPLEMENTATION IN THE CONDITIONS OF BREST REGION

A modified semi-mounted tillage-seeding aggregate AMPSH-6 “Berestyie” with a 6 m working width has been developed for the conditions of Brest Region. The purpose of the research is to eliminate the drawbacks of the serial APPM-6 unit and improve the efficiency of sowing operations. Key problems have been identified: high specific soil pressure, small seed hopper capacity, inefficient compaction system, and lack of integration with precision farming systems. Proposed technical solutions include: staggered arrangement of larger-sized press wheels, improving passability and reducing resistance; increasing hopper capacity to 4 200 liters to improve operational time utilization; introduction of an electronic control system with GPS navigation and variable rate seeding mode; hydraulic depth adjustment; and an improved seed delivery system. The unit ensures a 15...18 % reduction in operating costs, a 5...7 % increase in crop yields, fuel savings, and import substitution. The design is adapted to heavy and waterlogged soils and helps reduce anthropogenic impact. The AMPSH-6 “Berestyie” represents a promising solution for the development of domestic agricultural machinery and can become the basis for a new line of high-tech seeding equipment.

Key words: AMPSH-6 “Berestyie”; modernization; semi-mounted unit; passive working elements; precision farming; electronic control; hydraulic adjustment; import substitution.

Fig. 1. Ref.: 10 titles.

Введение. Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность сельскохозяйственного производства, является качество и своевременность выполнения технологических операций по обработке почвы и посеву сельскохозяйственных культур. В современных условиях аграрного сектора Республики Беларусь и Брестской области в частности растёт потребность в высокопроизводительной, надёжной и технологически совершенной посевной технике, способной обеспечить высокую культуру земледелия при минимальных трудовых и энергетических затратах.

Современные тенденции в сельскохозяйственном машиностроении направлены на интеграцию операций обработки почвы и посева в едином агрегате, что позволяет сократить сроки полевых работ, снизить количество проходов по полю, уменьшить уплотнение почвы и сэкономить топливо [1; 2]. Особое внимание уделяется комбинированным почвообрабатывающе-посевным агрегатам, которые объединяют в себе функции рыхления, выравнивания, уплотнения и высева семян [3]. В Беларуси широкое распространение получили полунавесные агрегаты с пассивными рабочими органами, такие как АППМ-6 производства ОАО «Брестский электромеханический завод». Эти машины зарекомендовали себя как надёжные и производительные, однако в процессе длительной эксплуатации в различных почвенно-климатических условиях были выявлены определённые конструктивные недостатки, снижающие их эффективность [4].

Несмотря на высокий уровень технического оснащения сельскохозяйственных предприятий, сохраняется зависимость от импортной сельскохозяйственной техники, особенно в сегменте машин, оснащённых системами точного земледелия [5; 6]. Это обуславливает актуальность разработки отечественных аналогов, не уступающих по своим характеристикам зарубежным образцам, но адаптированных к местным условиям и более доступных по стоимости.

Целью настоящего исследования является разработка и внедрение модифицированного полунавесного почвообрабатывающе-посевного агрегата с пассивными рабочими органами шириной захвата 6 м, устраняющего недостатки существующих моделей и отвечающего современным требованиям к производительности, качеству посева и энергоэффективности. Основными задачами являются: анализ эксплуатационных недостатков серийных агрегатов, разработка технических решений по их устранению, проектирование и создание опытного образца, оценка его функциональных и экономических показателей, обоснование целесообразности внедрения в сельскохозяйственных организациях Брестской области.

Работа выполнена на базе сотрудничества специалистов ОАО «Брестский электромеханический завод» и учёных учреждения образования «Брестский государственный технический университет» с привлечением данных полевых испытаний и отзывов сельхозпроизводителей. Результаты исследования направлены на повышение конкурентоспособности отечественной сельскохозяйственной техники, импортозамещение и устойчивое развитие аграрного сектора региона.

Методология и методы исследования. В настоящее время в сельскохозяйственных предприятиях Брестской области и других регионах Республики Беларусь широко используются полунавесные почвообрабатывающе-посевные агрегаты АППМ-6 различных модификаций. Эти машины, производимые ОАО «Брестский электромеханический завод», зарекомендовали себя как надёжные и производительные, что подтверждается их массовым внедрением в рамках государственных программ развития аграрного комплекса, особенно в период 2005—2012 годов. Однако, как показала практика эксплуатации, конструкция данных агрегатов имеет ряд недостатков, ограничивающих их эффективность в определённых условиях [4].

Одним из наиболее значимых недостатков является система задних уплотняющих колёс. В базовой модели используются несколько пар близко расположенных колёс небольшого диаметра и ширины. При работе на тяжёлых суглинистых и чернозёмных почвах это приводит к сгуживанию почвы перед колёсами, что вызывает повышенное сопротивление движению, снижает производительность и качество уплотнения. Кроме того, скопление

влажной почвы между колёсами затрудняет их вращение и может привести к подклиниванию, что требует частой остановки для очистки. Этот фактор особенно критичен при работе на переувлажнённых почвах, где эксплуатация агрегата становится затруднительной [7].

Ещё одним ограничивающим фактором является высокое удельное давление на почву. Небольшая площадь опорной поверхности колёс в сочетании с общей массой агрегата (до 4,5 т) приводит к глубокому проваливанию колёс в мягкий грунт, что увеличивает тяговое сопротивление, расход топлива и способствует переуплотнению корнеобитаемого слоя почвы. Это негативно сказывается на аэрации почвы и развитии корневой системы растений [1; 2].

Объём семенного бункера составляет 3 000 л, что ниже, чем у многих современных зарубежных аналогов. При рабочей скорости до 12...14 км / ч и норме высева 200...300 кг / га агрегат требует загрузки каждые 1,5...2 часа, что снижает коэффициент использования сменного времени и в конечном итоге уменьшает сменную выработку. Особенно остро эта проблема стоит при посеве на крупных полях, где время на переезды и загрузку становится значительной долей рабочего цикла.

Ещё одной слабой стороной является высевающая система с механической связью. Она не позволяет точно регулировать норму высева на высоких скоростях и не обеспечивает равномерную подачу семян при увеличении нормы (например, при посеве на бедных почвах с пониженной балльностью, где требуется норма свыше 300 кг / га). Механический привод подвержен износу, требует регулярного технического обслуживания и имеет ограниченную совместимость с цифровыми системами управления [3; 4].

Наконец, отсутствие интеграции с системами точного земледелия делает агрегат устаревшим с точки зрения современных агротехнологий. Зарубежные производители (например, John Deere, Amazone, Lemken и др.) активно внедряют GPS-навигацию, автоматическое управление высевом, мониторинг параметров посева в реальном времени [5; 6; 8]. Аналогичные решения на отечественных машинах отсутствуют, что снижает их конкурентоспособность как на внутреннем, так и на внешнем рынке [9; 10].

Результаты исследования и их обсуждение. Для устранения выявленных недостатков была разработана концепция модернизации агрегата, получившего обозначение АМПШ-6 «Берестье» (агрегат модифицированный полунавесной широкозахватный). Основной задачей было создание машины, соответствующей по своим параметрам мировым аналогам, но с учётом специфики белорусских условий и возможностей отечественного производства.

1. Оптимизация системы уплотнения. В новой конструкции применены задние уплотняющие колёса увеличенного диаметра (800 мм) и ширины (400 мм), установленные в шахматном порядке. Это позволило:

- увеличить опорную площадь на 45 %;
- снизить удельное давление на почву с 0,32 до 0,18 МПа;
- исключить сгруживание почвы перед колёсами;
- обеспечить равномерное уплотнение по всей ширине захвата;
- расширить диапазон применения на переувлажнённых и тяжёлых почвах;
- снизить тяговое сопротивление на 12...15 %, что приводит к экономии топлива [1; 2].

Кроме того, такая компоновка упрощает доступ к колёсам при техническом обслуживании и замене, сокращая время простоя.

2. Увеличение объёма бункера и улучшение системы подачи. Объём семенного бункера увеличен до 4 350 л, что на 40 % больше, чем у базовой модели. Это позволяет:

- сократить количество загрузок на 30...40 %;
- повысить коэффициент использования сменного времени с 0,7 до 0,85;
- увеличить сменную выработку на 10...12 га (в среднем до 55...80 га за смену при работе на полях площадью более 50 га).

Для работы на высоких скоростях (до 18 км / ч) внедрена модернизированная система подачи семян, включающая: усовершенствованную запирающую крышку бункера с пневматическим приводом; оптимизированные семяпроводы с антиадгезионной технологией изготовления; вентилятор принудительной подачи семян, обеспечивающий равномерную подачу даже при увеличенной норме высева.

3. Внедрение электронной системы управления. Для обеспечения перехода к технологии точного земледелия предусмотрена возможность установки электрического привода высевающего аппарата с сенсорным управлением. Система включает:

- электродвигатели для каждого секционного высевающего устройства;
- блок управления с ЖК-дисплеем в кабине трактора;
- датчики контроля нормы высева, скорости и глубины заделки;
- интерфейс для подключения GPS/GLONASS-модулей [4; 6].

Это позволяет реализовать режим переменной нормы высева (VRA), адаптируя посев под плодородие участков поля, что повышает экономическую эффективность и снижает расход семян на 8...12 % [10].

4. Модернизация почвообрабатывающих органов. В качестве рабочего органа для первичной обработки используется дисковая борона с двумя рядами дисков, обеспечивающая качественное рыхление и измельчение пожнивных остатков. Важным новшеством является гидравлическая система регулировки глубины обработки, управляемая из кабины трактора. Это позволяет оператору оперативно адаптировать агрегат к изменяющимся условиям поля без необходимости остановки и ручной настройки [3; 4].

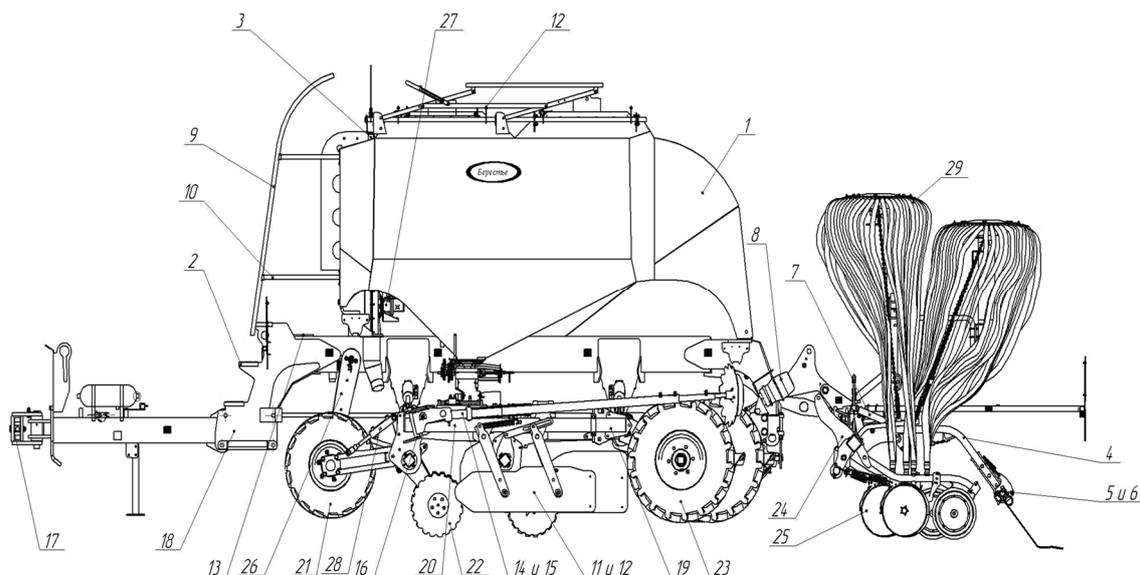
Все рабочие органы — сошники, катки, диски — унифицированы и выполнены по единому стандарту, что повышает ремонтпригодность и снижает затраты на запасные части.

5. Конструктивные улучшения. Передние опорные колёса увеличены по ширине и оснащены гидравлической системой регулировки положения, что улучшает устойчивость агрегата на неровных участках поля. Установлен передний пакерный каток для предварительного уплотнения, что способствует лучшему контакту семян с почвой. Улучшена эргономика: добавлены лестницы, поручни, ограждения и площадки для безопасного доступа к узлам обслуживания. Внедрена автоматическая система контроля высева, фиксирующая пропуски и блокировки семяпроводов [8].

Агрегат АМПШ-6 «Берестье» (рисунок 1) представляет собой полунавесную машину шириной захвата 6 м, предназначенную для одновременной обработки почвы и посева зерновых, зернобобовых и кормовых культур. Основные узлы:

- семенной бункер 1 объёмом 4 350 л с опцией формирования в нем избыточного давления;
- лестницы 2, 3 и поручни 9, 10 для безопасного доступа;
- навески загортчных устройств 5, 6 и тормозная система 8;
- прицепное устройство с дышлом 17 для транспортировки;
- рама центральной секции 18 и рамы боковых секций 19, 20;
- передний пакерный каток 21 для предварительного уплотнения;
- дисковая борона 22 с гидрорегулировкой;
- задний пакерный каток 23 в шахматной компоновке;
- сошники с прикатывающими катками 25;
- приводное колесо 26, передающее движение на высевающий аппарат;
- высевающая часть с вентилятором 27;
- гидравлическая система 28;
- автоматическая система контроля высева 29.

Устройство агрегатируется с тракторами класса 5 (от 300 л. с.), рабочая скорость — 8...18 км / ч, глубина обработки — 4...9 см, норма высева — 3...350 кг / га.



1 — бункер семенной; 2, 3 — лестница; 4, 5, 6 — навеска загортачных устройств; 7, 8 — система тормозная; 9, 10 — поручень; 11, 12 — кожух; 13 — ступень; 14, 15 — рычаг; 16 — пружина; 17 — дышло; 18 — рама центральной секции; 19, 20 — рамы боковых секций; 21 — каток передний пакерный; 22 — борона дисковая; 23 — каток задний пакерный; 24 — каток; 25 — сошники с прикатывающими катками; 26 — колесо приводное; 27 — часть высеивающая с вентилятором; 28 — система гидравлическая; 29 — система автоматическая контроля высева

Рисунок 1. — Общий вид АМПШ-6 «Берестье»

6. Экономическая и экологическая эффективность. Внедрение АМПШ-6 «Берестье» в сельхозорганизациях Брестской области позволит достичь следующих эффектов:

1) снижение себестоимости посевных работ на 15...18 % за счёт экономии топлива (до 15 %), уменьшения простоев и повышения производительности [1; 2];

2) рост урожайности на 5...7 % за счёт равномерного посева, оптимальной глубины заделки и улучшенного уплотнения почвы [5; 6];

3) сокращение потребности в импортной технике, что позволяет сэкономить валютные средства;

4) создание новых рабочих мест на предприятии-изготовителе и в сервисных службах;

5) расширение экспортного потенциала за счёт конкурентоспособной техники с функциями точного земледелия [9; 10];

6) экологически агрегат способствует снижению антропогенной нагрузки на почву за счёт уменьшения числа проходов, снижения уплотнения и рационального использования ресурсов [1; 2].

Заключение. Разработка и внедрение модифицированного полунавесного почвообрабатывающе-посевного агрегата АМПШ-6 «Берестье» представляет собой важный шаг в развитии отечественного сельскохозяйственного машиностроения. Устранение выявленных недостатков базовой модели АППМ-6 позволило создать машину, соответствующую современным требованиям к производительности, качеству и технологичности [4].

Предложенные технические решения — шахматное расположение уплотняющих колёс, увеличенный бункер, гидравлическая регулировка, электронная система управления — обеспечивают значительные преимущества в условиях реальной эксплуатации. Агрегат демонстрирует высокую адаптивность к различным типам почв, включая тяжёлые и переувлажнённые, что особенно актуально для Брестской области [7].

АМПШ-6 «Берестье» не только повышает эффективность сельхозпроизводителей, но и способствует импортозамещению, развитию инноваций и укреплению технологического суверенитета. Его внедрение позволит снизить затраты, повысить урожайность и улучшить культуру агропроизводства.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку версии агрегата с активными рабочими органами, интеграцию с системами искусственного интеллекта для анализа состояния поля, создание энергосберегающих модификаций с гибридным приводом.

Таким образом, представленный агрегат является перспективным решением для современного сельского хозяйства и может стать основой для новой линейки отечественной посевной техники.

Список цитируемых источников

1. Лукомец, В. Н. Энергосберегающие технологии в растениеводстве / В. Н. Лукомец, А. А. Сидоров // Тракторы и сельхозмашины. — 2019. — № 7. — С. 3—8. — DOI: 10.31953/2073-7599-2019-7-3-8.
2. O'Donoghue, T. Fuel Efficiency in Agricultural Machinery: A Review / T. O'Donoghue, M. B. Woods // Biosystems Engineering. — 2021. — Vol. 209. — P. 1—15. — DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.05.003.
3. Киреев, В. И. Сельскохозяйственные машины : учеб. для вузов / В. И. Киреев, В. А. Кузнецов, А. Н. Романов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : КолосС, 2020. — 528 с.
4. Яроцкий, Я. У. Многомашинные посевные агрегаты / Я. У. Яроцкий // Современные проблемы освоения новой техники, технологии, организации технического сервиса в АПК. — Минск, 2015. — С. 31—41.
5. Технология точного земледелия : науч. тр. / под ред. К. А. Шевченко. — Минск : НПЦ НАН Беларуси по земледелию. — 2022. — Вып. 15. — 184 с.
6. Горбачев, А. В. Современные технологии точного земледелия / А. В. Горбачев, И. А. Лебедев. — Минск : Беларус. навука, 2021. — 248 с.
7. Шестаков, В. А. Адаптация сельскохозяйственной техники к переувлажнённым почвам / В. А. Шестаков, Е. В. Козлов // Земледелие и агрохимия. — 2021. — № 5. — С. 30—35.
8. John Deere. ExactEmerge™ Planter Operation Manual / John Deere. — 5th ed. — Moline : John Deere Publishing, 2022. — 142 p.
9. Bakker, T. W. Precision Agriculture: An Overview / T. W. Bakker, J. A. Mullins, K. A. Sudduth // Computers and Electronics in Agriculture. — 2020. — Vol. 173. — P. 105438. — DOI: 10.1016/j.compag.2020.105438.
10. Hofstetter, A. R. Design and Performance of a Variable-Rate Seeding System for Planters / A. R. Hofstetter, J. F. Reid // Transactions of the ASABE. — 2019. — Vol. 62, no. 4. — P. 875—885. — DOI: 10.13031/trans.13125.

Поступила в редакцию 07.10.2025.

УДК 631.361.026:633.521

В. А. Шаршунов¹, доктор технических наук, профессор,
Н. С. Сентюров²,

М. В. Цайц³, кандидат технических наук

¹Учреждение образования «Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий», пр-т Шмидта, 3, 212027 Могилев, Республика Беларусь, 8 (0222) 64 82 27

^{2,3}Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213410 Горки, Республика Беларусь, +375 (25) 906 37 38, baa_bgd@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОРОХА ЛЬНОКОСТРЫ КАК ОБЪЕКТА ПЕРЕРАБОТКИ ПРЕССОВАНИЕМ

В результате переработки сельскохозяйственных культур остается огромное количество растительных отходов, которые пригодны для вторичного использования. Одной из подотраслей сельского хозяйства Республики Беларусь, обладающей потенциалом роста из-за большого количества получаемой льняной костры, является льноводство. В результате переработки тонны льняной тресты получают от 0,5...0,6 льняной костры, пригодной для приготовления пеллет и брикетов.

Производство пеллет предполагает измельчение и прессование вороха льнокостры, при этом наличие в ней льняного волокна выводит из строя измельчающие устройства, а механические примеси увеличивают скорость изнашивания и приводят к отказам рабочих органов прессования из-за абразивного износа. Повысить эффективность работы механизмов прессования возможно путем предварительной обработки (очистки) вороха льняной костры, что требует более полного изучения фракционного состава вороха льнокостры и размерно-массовых характеристик его компонентов, а также физико-механических свойств компонентов вороха.

В статье приводятся результаты исследований содержания массовой доли компонентов вороха льнокостры. Установлено, что в ней содержатся целые и дробленые семена льна и сорных растений, пучки пакли, разрушенные семенные коробочки, механические примеси в виде песка и частиц металла, льняная костра, остатки стеблей льна и сорных растений. Получены результаты размерно-массовых характеристик компонентов вороха, а также фракционные свойства и насыпная плотность.

Ключевые слова: лен; ворох льнокостры; компоненты; льняное волокно; механические примеси; разрушенные семенные коробочки; семена льна.

Табл. 1. Библиогр.: 13 назв.

V. A. Sharshunov¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
N. S. Sentyurov²,

M. V. Tsaits³, PhD in Technical Sciences

¹Institution of Education "Belarusian State University of Food and Chemical Technologies", 3 Schmidt Ave., 212027 Mogilev, the Republic of Belarus, 8 (0222) 64 82 27

^{2,3}Institution of Education "Belarusian State of the Order of October Revolution and the Red Banner of Labor Agricultural Academy" 5 Michurina Str., 213410 Gorki, the Republic of Belarus, +375 (25) 906 37 38, baa_bgd@mail.ru

TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF FLAX BAKE HEAP AS AN OBJECT OF PRESSING PROCESSING

The processing of agricultural crops leaves behind a huge amount of plant waste suitable for recycling. Flax farming is a subsector of Belarusian agriculture with growth potential due to the large quantities of flax shives produced. Processing a ton of flax straw yields 0.5 to 0.6 tons of flax shives, suitable for pellets and briquettes.

Pellet production involves crushing and pressing flax shives. The presence of flax fiber in the flax shives can cause the crushing equipment to malfunction, while mechanical impurities increase wear rates and lead to abrasive failures of the pressing mechanisms. Improving the efficiency of pressing mechanisms is possible through pre-treatment (cleaning) of the flax shives, which requires a more comprehensive study of the flax shives fractional composition, the size and mass characteristics of their components, and the physical and mechanical properties of the shives. This article presents the results of a study of the mass fraction of flax husk components. It has been established that the bale

contains whole and crushed flax and weed seeds, tow bundles, broken seedpods, and mechanical impurities such as sand and metal particles, flax shives, and flax stem and weed residues. The size and mass characteristics of the husk components, as well as their frictional properties and bulk density have been determined.

Key words: flax; flax husk; components; flax fiber; mechanical impurities; broken seedpods; flax seeds.

Table 1. Ref.: 13 titles.

Введение. Сельское хозяйство является одной из самых проблемных отраслей в части загрязнения окружающей среды. В результате переработки сельскохозяйственных культур остается огромное количество растительных отходов, большая часть которого — ценное сырье, пригодное для вторичного использования. Современные технологии переработки сельскохозяйственных отходов могут обеспечить большую выгоду производителям, соответственно, повысить конкурентоспособность.

Одной из подотраслей сельского хозяйства Республики Беларусь, обладающей потенциалом роста из-за большого количества получаемой льняной костры, является льноводство. Ежегодно в Беларуси убирается порядка 50 тыс. га посевов льна, а валовый сбор льнотресты достигает 60 тыс. т [1]. В результате переработки тонны льняной тресты получают от 0,5...0,6 т льняной костры.

Льняная костра применяется как экологичный утеплитель в строительстве и звукоизоляции, как мульча и удобрение для улучшения почвы в садоводстве, как подстилка для животных, а также как сырье для производства топливных пеллет и брикетов, компонентов для композитных материалов. Производимые из костры топливные брикеты и пеллеты являются эффективным твердым топливом для котлов и печей [2]. Около 30...40 % образующейся костры льна используется для получения тепла в котельных [3]. Однако ее значительная часть остается невостребованной, скапливается на территориях льнозаводов и является источником пожароопасности и экологического загрязнения. Одним из сдерживающих факторов роста производства топливных гранул и брикетов из льняной костры является эксплуатационная надежность используемого оборудования и его дороговизна. Прежде всего это обусловлено наличием в ворохе льняной костры механических примесей, приводящих к износу органов прессования — самых дорогостоящих узлов [4].

Одним из путей повышения эффективности эксплуатационных показателей оборудования для производства брикетов и пеллет из льняной костры является ее предварительная очистка от механических примесей. При этом следует учитывать фракционный состав вороха льнокостры и размерно-массовые характеристики его компонентов, а также физико-механические свойства компонентов вороха.

Изучением теплоизоляционных свойств льняной костры занималась О. Е. Смирнова [5]. Ею изучено влияние фракционного состава льняной костры на свойства прессованного материала. Установлено повышенное содержание лигнина в костре льна 44...46 %. Изучению свойств льняной костры как наполнителя прессованных древесных плит посвящены работы Д. А. Кожевникова [6] и С. А. Угрюмова [7]. В работе М. Содомона [8] льняная костра описывается как измельченные и обработанные стебли льна-долгунца длиной 1...10 мм и толщиной 0,3...1,5 мм, имеющие заостренную форму. Отмечается, что этот материал после тщательной сушки абсолютно лишен влаги. Вместе с тем свойства вороха льнокостры как объекта переработки прессованием остаются неизученными.

Материалы и методы исследования. Исследуемые образцы льняной костры отбирались из отвала на открытой площадке ОАО «Горкилен», формируемой линией первичной переработки льна МТА-2Л, а также на специально оборудованном хранилище ОАО «Ореховский льнозавод» из массы вороха льнокостры, формируемой линией первичной переработки льна Van Dommele. Для сокращения объема экспериментальной работы и получения достоверных результатов исследований необходимый объем выборки n_b определялся по зависимости [9]

$$n_b = \frac{t_c^2 \sigma^2}{\Delta^2},$$

где t_c — критерий Стьюдента. В расчетах принимался $t_c = 2,447$;

σ — среднее квадратическое отклонение, %, $\sigma = 0,5$ [10];

Δ — возможная ошибка средней величины, %.

Для определения содержания минеральных примесей в ворохе льнокостры образцы проб были переданы в химико-экологическую лабораторию БГСХА, где обработка данных для определения минеральных примесей проводилась золообразованием [4].

При определении размерно-массовых характеристик вороха льнокостры производилось его разделение на компоненты: целые и дробленые семена льна и сорных растений, пучки пакли, разрушенные семенные коробочки, минеральные примеси, льняная костра, остатки стеблей льна и сорных растений.

Размерные характеристики льняной костры, разрушенных семенных коробочек, целых и дробленых семян льна и сорных растений, остатков стеблей льна и сорных растений определялись с помощью лупы измерительной ЛИ-3-10×, соответствующей требованиям ТУ РБ-14541426.020-99 с точностью до 0,1 мм, и при помощи электронного штангенциркуля с точностью до 0,01 мм. Размерные характеристики минеральных примесей определялись методом микроскопического анализа по известной методике. Размер частиц минеральных примесей (площадь проекции) и их количество определялись в программе PhotoM 1.21 [11].

Частицы минеральных примесей обычно имеют неправильную форму, свойственную обломкам твердых тел. Некоторые частицы имеют пластинчатую или волокнистую форму. Поэтому на этапе цифровой обработки фотографий с помощью компьютерной программы сделаны некоторые допущения: так как размер частицы выражается диаметром шарообразной частицы, а на практике встречаются в основном частицы неправильной геометрической формы, то для выражения размера частицы часто пользуются понятием «эквивалентный диаметр».

Расчет эквивалентного диаметра производился на основе формулы

$$d_{\text{эKB}} = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}},$$

где S — площадь проекции, мкм².

При исследовании фрикционных свойств вороха льнокостры определялись коэффициенты внутреннего и статического трения с учетом влияния на них влажности материала.

Коэффициент внутреннего трения определялся по зависимости

$$f_b = \text{tg}\varphi_0 = \frac{h_k}{r_d},$$

где φ_0 — угол внутреннего трения материала, град;

h_k — высота конуса, м;

r_d — радиус диска, м.

Для определения статического трения на пластину укладывался слой вороха льнокостры, затем пластину плавно поворачивали с помощью винтовой пары, изменяя при этом угол наклона к горизонту до тех пор, пока ворох льнокостры начнет движение. Угол наклона металлической пластины, соответствующий началу движения вороха льнокостры, фиксировался с помощью угломера.

Насыпная плотность вороха льнокостры в рыхлом состоянии определялась по зависимости

$$\rho_{в.л} = \frac{m_{e2} - m_{e1}}{V_e},$$

где m_{e2} — масса мерной емкости с ворохом льнокостры, кг;

m_{e1} — масса мерной емкости, кг;

V_e — объем мерной емкости, м³.

Результаты исследования и их обсуждение. По результатам проведенных исследований установлено, что наибольшее количество минеральных примесей содержится в нижней части отвала и составляет 58,1...221,8 г / кг, так как тяжелые минеральные примеси оседают. Среднее значение массовой доли минеральных примесей в ворохе льнокостры составляет 43,2...129,8 г / кг. В ходе исследований также было зафиксировано присутствие мелких металлических частиц, являющихся продуктом износа рабочих органов мяльно-трепального механизма линии первичной переработки льна.

Основная масса целых и дробленых семян льна и сорных растений имеет усредненные размеры частиц: по длине — 2,1...3,26 мм, по ширине — 0,71...1,16 мм, толщине — 0,62...0,72 мм [12].

Основная масса льняной костры имеет усредненные размеры частиц: по длине — 9,08...20,92 мм, по ширине — 0,96...1,32 мм, толщине — 0,33...0,42 мм.

Более 85 % массы разрушенных коробочек льна имеет усредненные размеры частиц: по длине — 3,24 мм, по ширине — 1,33 мм, толщине — 1,68 мм.

Основная масса минеральных примесей имеет усредненные размеры частиц: по эквивалентному диаметру — 176,1...593,9 мкм. Также в результате исследования было установлено, что подавляющее число частиц минеральных примесей (около 85 %) состоит из земли, песка, камушков, а остальные частицы — из железа, являющиеся продуктами износа рабочих органов линии переработки льна [12].

Преобладающая масса остатков стеблей льна и сорных растений имеет усредненные размеры частиц: по длине — 16,14...34,70 мм, диаметру — 1,28...1,35 мм.

Существенная масса пучков пакли имеет усредненные размеры частиц: по массе — более 1,92 г.

По результатам проведенных исследований были получены процентные содержания компонентов, входящих в состав вороха льнокостры (таблица 1).

В результате изучения фрикционных свойств вороха льнокостры установлено, что изменение влажности от 6 до 40 % не оказывает существенного влияния на изменение значения коэффициентов внутреннего и статического трения. Коэффициент внутреннего трения возрастает на 11 % (с 0,94 до 1,04), коэффициент статического трения: по поверхности полимер — на 15 % (с 0,52 до 0,60), по металлической поверхности — на 11 % (с 0,71 до 0,79). Значительное влияние влажность оказывает на коэффициент динамического трения. Коэффициент динамического трения возрастает: по поверхности полимер — на 65 % (с 0,26 до 0,39), по металлической поверхности — на 62 % (с 0,29 до 0,47) [13].

Полученная в результате исследований насыпная плотность вороха льнокостры имеет среднее значение: $\rho_{в.л} = 124,3$ кг / м³.

Т а б л и ц а 1. — Структура вороха льнокостры

Компоненты вороха льнокостры	Содержание по массе, %
Целые и дробленые семена льна и сорных растений	1,4...2,9
Пучки пакли	4,0...19,6
Разрушенные коробочки льна	2,3...5,4
Минеральные примеси	4,2...16,0
Льняная костра	68,0...84,0
Остатки стеблей льна и сорных растений	3,1...11,0

Заключение. В результате исследований определена многокомпонентность вороха льняной костры. Массовая доля компонентов вороха льняной костры варьируется в следующих диапазонах: целые и дробленые семена льна и сорных растений — 1,4...2,9 %; пучки пакли — 4,0...19,6 %; разрушенные коробочки льна — 2,3...5,4 %; механические примеси с преобладающим содержанием минеральных включений — 4,2...16,0 %; льняная костра — 68,0...84,0 %; остатки стеблей льна и сорных растений — 3,1...11,0 %.

Основная масса (около 85 %) минеральных примесей имеет усредненные размеры частиц: по эквивалентному диаметру — 176,1...593,9 мкм.

Влажность вороха льняной костры, размещенной на открытых площадках, находится в диапазоне 6...40 %, а складываемой в специально оборудованных навесах — не превышает 8 %.

Установленная при влажности вороха 8...12 % насыпная плотность составила 124,3 кг/м³, коэффициент внутреннего трения — 0,94...0,97, коэффициент статического трения — 0,52...0,55.

Список цитируемых источников

1. Шаршунов, В. А. Анализ обеспеченности льносеющих хозяйств Республики Беларусь техническими средствами для уборки льна-долгунца / В. А. Шаршунов, В. А. Кожановский, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2022. — № 4. — С. 150—156.
2. Сентюров, Н. С. Стадии производства пеллет из растительных остатков / Н. С. Сентюров // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. — Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2024. — С. 144—147.
3. Круглень, В. Е. Подготовка льняной костры для производства топливных гранул / В. Е. Круглень, А. С. Алексеенко, Н. С. Сентюров // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. — 2014. — № 3. — С. 49—51.
4. Шаршунов, В. А. Определение засоренности льняной костры минеральными примесями и способы их выделения / В. А. Шаршунов, В. Е. Круглень, Н. С. Сентюров // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2013. — № 2. — С. 120—124.
5. Смирнова, О. Е. Теплоизоляционные материалы на основе костры льна : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Смирнова Ольга Евгеньевна. — Новосибирск, 2007. — 137 л.
6. Кожевников, Д. А. Формирование древесных материалов на основе измельченной древесины и костры льна : дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Кожевников Дмитрий Александрович. — СПб., 2013. — 156 л.
7. Угрюмов, С. А. Совершенствование технологии производства композиционных материалов на основе древесных наполнителей и костры льна : дис. ... д-ра техн. наук : 05.21.05 / Угрюмов Сергей Алексеевич. — М., 2009. — 288 л.
8. Содомон, М. Биостойкий теплоизоляционный материал на основе модифицированного недревесного растительного сырья : дис. ... канд. техн. наук : 2.1.5 / Содомон Марк. — М., 2024. — 164 л.
9. Бочаров, П. П. Теория вероятностей. Математическая статистика : учеб. пособие / П. П. Бочаров, А. В. Печенкин. — М. : Гардарики, 1998. — 328 с.
10. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. — Л. : Колос, 1980. — 168 с.
11. Гаврилова, Н. Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов : учеб. пособие / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров, О. В. Яровая. — М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. — 52 с.
12. Шаршунов, В. А. Определение размерных характеристик компонентов вороха льняной костры / В. А. Шаршунов, Н. С. Сентюров, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2020. — № 3. — С. 169—175.
13. Сентюров, Н. С. Зависимость коэффициентов трения вороха льняной костры от влажности / Н. С. Сентюров // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / Белорус. гос. с.-х. акад. — Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2021. — Вып. 6. — С. 151—154.

Поступила в редакцию 20.10.2025.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Научная концепция журнала предполагает публикацию современных достижений в области общей биологии и агрономии; 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.

Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках.

*Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ по URL:
<https://publish.barsu.by/index.php/vestnik-sn>*

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The scientific strategy of the journal suggests publishing modern achievements in the field of general biology and agronomical science; 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..

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:
<https://publish.barsu.by/index.php/vestnik-sn>*

ДЛЯ ЗАМЕТОК