

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 2 (12), ноябрь, 2022

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, белорусском и английском языках.
Распространяется на территории Республики Беларусь.

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

Подписано в печать 27.10.2022. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,00. Уч.-изд. л. 9,00.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014. Адрес: ул. Хлюпина, 16, 231800 г. Слоним, Гродненская обл.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (гл. ред. журн.), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, заслуженный работник образования Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

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

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

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

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

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

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

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

Дремук В. А., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**, доктор технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь; государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», Могилев, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь); **Карташевич А. Н.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клочков А. В., 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: Educational Institution
"Baranovichi State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichi.
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, Belorussian and English. The journal is
distributed on the territory of the Republic of Belarus.

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

Signed print 27.10.2022. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 14,00.
Acc.-pub. s. l. 9,00. Circulation of 100 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary
Enterprise "Slonim printing establishment". The state
registration certificate of the publisher, manufacturer and
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin Str., 231800 Slonim,
Grodno region.

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 (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

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

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

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

Горавский И. А., Жигалов А. Н., Винничек К. С. Технология и режимы аэродинамического звукового воздействия на осевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей

Кебец А. В., Кривонос Ю. И., Бучик Т. Ю., Паранин С. Н., Спирин А. В. Исследование модельных индукторных систем на основе волокнистого нанокompозита мелкодисперсного сплава медь-ниобий

Малеронюк В. В., Алифанов А. В., Милиукова А. М., Богданович И. А. Моделирование процесса магнитно-импульсной обработки с предварительным нагревом осевого режущего инструмента

Милиукова А. М., Алифанов А. В., Матяс А. Н., Толкачева О. А. Исследование физико-механических свойств ножей из стали 30X13 после магнитно-импульсной обработки

Патапау У. А., Русан С. І., Сіваченка Л. А. Камбінавані метад сілавого аналізу прывадного механізма ланцужага аграгата

Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Корольков А. С. Исследование влияния величины пробега легкового транспортного средства на плотность и температуру вспышки в открытом тигле моторных масел «Лукойл Люкс 5W-40» и «Нафтан Премьер 5W-40»

Шматов А. А. Многомерная оптимизация термогидрохимической обработки твердого сплава в гидрозоле оксидов цинка и молибдена

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Голубев В. С., Вегера И. И., Ходюш В. Е., Дробышевский П. С. Наплавка износостойких слоев на рабочие кромки противорежущих брусьев кормоуборочных комбайнов

Груданов В. Я., Ткачёва Л. Т., Белохвостов Г. И., Кунаш М. В. Новые направления в конструировании глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания

Китун А. В., Швед И. М., Бондарев С. Н., Скорб И. И. Оптимизация выбора оборудования для удаления навоза механическими стационарными средствами на животноводческих фермах и комплексах

Крупенин П. Ю., Крупенин Ю. А. Диагностирование доильной установки в переходных режимах работы

Михайлов К. М., Михайлов М. И. Влияние расположения ножей режущего барабана кормоуборочного комбайна на параметры его образующей

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

4 Goravskii I. A., Jigalov A. N., Vinnichak K. S. Technology and modes of aerodynamic sound impact on axial milling tools made of high-speed steels

16 Kebets A. V., Krivonos Y. I., Buchik T. Y., Paraniin S. N., Spirin A. V. Study of model inductor systems based on a fibrous nanocomposite of a finely dispersed copper-niobium alloy

24 Maleronok V. V., Alifanov A. V., Miliukova A. M., Bogdanovich I. A. Magnetic-pulsed process modeling with the axial cutting tool preheating

30 Miliukova A. M., Alifanov A. V., Matsias A. N., Tolkachova O. A. Study of physical and mechanical properties of knives made of 30X13 steel after magnetic pulse treatment

36 Potapov V. A., Rusan S. I., Sivachenko L. A. Combined method of force analysis of the chain unit drive mechanism

47 Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Korolkov A. S. The study of the influence of the mileage of a passenger vehicle on the density and flash point in an open crucible of Lukoil Lux 5W-40 and Naphthan Premier 5W-40 motor oils

53 Shmatov A. A. Multidimensional optimization of hard alloy thermo-hydrochemical treatment in zinc and molybdenum oxides hydrosol

PROCESSES AND MACHINES
OF AGROENGINEERING SYSTEMS

65 Golubev V. S., Vegera I. I., Khodziush U. E., Drobyshevsky P. S. Surfacing of wear-resistant layers on the working edges of anti-cutting bars of forage harvesters

74 Grudanov V. Ya., Tkacheva L. T., Belokhvostov G. I., Kunash M. V. New directions in the noise mufflers design of reciprocating internal combustion engines

85 Kitun A. V., Shved I. M., Bondarev S. N., Skorb I. I. Optimization of the equipment selection for manure removal by mechanical stationary means on livestock farms and complexes

94 Krupenin P. Y., Krupenin Y. A. Diagnosis of the milking machine in transient operation modes

100 Mikhailov K. M., Mikhailov M. I. Influence of the cutting drum knives position of a forage harvester on the parameters of its generator

УДК 621.9

И. А. Горавский¹,

А. Н. Жигалов^{1,2}, доктор технических наук, доцент, К. С. Винничек¹

¹ Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь

² Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов
Национальной академии наук Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев,
Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ И РЕЖИМЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОСЕВОЙ ФРЕЗЕРНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

Объяснен процесс образования эффекта упрочнения при использовании аэродинамической звуковой установки, экспериментально определена температура хладноломкости для быстрорежущих сталей трех марок, приблизительно равная 280 °С. Исследована зависимость частотно-амплитудных характеристик от длины выходного канала установки и давления подаваемого воздуха. Предложена технология и режимы обработки осевого фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей для достижения максимальной стойкости при использовании инструмента с ударными нагрузками за счет аэродинамического звукового воздействия: температура предварительного нагрева — 280 °С; время упрочнения — 3 мин; использование последовательно режима 1 и режима 2 работы установки для аэродинамического звукового воздействия, что позволяет обеспечивать повышение времени работы концевых фрез из быстрорежущих сталей в 1,55 раза, что является весьма эффективным для данного вида инструмента.

Ключевые слова: метод аэродинамического звукового упрочнения; инструмент из быстрорежущих сталей; стойкость; режимы обработки.

Рис. 9. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

I. A. Goravskii¹,

A. N. Jigalov^{1,2}, DSc in Technical Sciences, Associate Professor, K. S. Vinnichak¹

¹ Educational Institution “Baranovichi State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus

² State scientific institution “Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus”,
11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus, + 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

TECHNOLOGY AND MODES OF AERODYNAMIC SOUND IMPACT ON AXIAL MILLING TOOLS MADE OF HIGH-SPEED STEELS

The process of the hardening effect formation when using an aerodynamic sound installation is explained, the temperature of cold brittleness for high-speed steels of three grades, approximately equal to 280 °C, is experimentally determined. The dependence of the frequency-amplitude characteristics on the outlet channel length of the installation and the pressure of the supplied air is studied. A technology and processing modes for axial milling tool made of high-speed steels are proposed to achieve maximum tool life when using a tool with shock loads, due to aerodynamic sound effects: preheating temperature 280 °C; hardening time 3 min; the use of successively mode 1 and mode 2 of the installation for aerodynamic sound exposure, which makes it possible to increase the operating time of end mills made of high-speed steels by 1.55 times, which is very effective for this type of tool.

Key words: aerodynamic sound hardening method; tools made of high-speed steels; durability; processing modes.

Fig. 9. Table. 1. Ref.: 10 titles.

Введение. Обработка быстрорежущих сталей аэродинамическим звуковым методом, основанным на высокоэнергетическом низкотемпературном воздействии энергии, созданной резонансными акустическими волнами в звуковом спектре частот, обеспечивает устранение погрешности структуры в виде строчечности сориентированных вдоль оси деформации карбидных фаз из-за снижения структурной анизотропии, фазового наклепа, происходящих за счет релаксации структурных напряжений, плотности дислокаций, уменьшает размеры первичных карбидов с 7...15 до 3...8 мкм и сокращает их количество в 1,6 раза, что значительно улучшает однородность структуры быстрорежущих сталей [1], в связи с чем изучение метода аэродинамического звукового воздействия представляется весьма перспективным и актуальным.

Материалы и методы исследования. Метод аэродинамического звукового воздействия разработан доктором технических наук А. Н. Жигаловым [2; 3].

Принципиальные особенности процесса такого метода можно объяснить на следующей схеме установки для аэродинамического звукового воздействия (рисунок 1). Установка является разновидностью объёмного резонатора, представляет собой замкнутый прямоугольный контур, где параллельные более длинные стороны выполнены из металлических листов, способных по своим параметрам осуществлять колебательные движения, в отличие от боковых сторон, выполненных более жесткими.

В таком контуре возникают собственные синусоидальные волновые акустические колебания. Возбуждающиеся акустические волны внутри контура, распространяющиеся между колеблющимися стенками, через определенный частотный интервал образуют резонансные пики [3]. Установка выполняется в виде замкнутого прямоугольного контура с линейными размерами между колеблющимися стенками, причем параллельные более длинные стороны прямоугольника изготавливаются из металлических листов, способных по своим параметрам осуществлять колебательные движения, в отличие от боковых сторон и нижнего основания, не подверженных колебаниям. Возбуждающиеся акустические волны внутри контура устройства, распространяющиеся между колеблющимися стенками, образуют резонансные амплитудные пики.

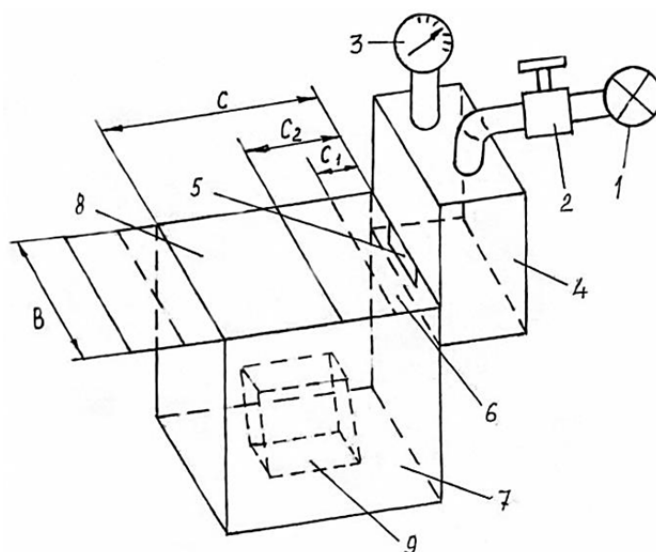


Рисунок 1. — Схема установки для аэродинамического звукового воздействия

Установка работает следующим образом. Камеру сглаживания пульсаций воздуха 4 подключают к сети генерации воздуха 1 через регулирующий вентиль 2. Изделия 9 помещаются в резонансную камеру 7 через выходной канал 6. Наладка установки на необходимый режим осуществляется посредством перемещения регулирующей заслонки 8 на размер C_1 или C_2 с последующей фиксацией заслонки 8.

После этого осуществляют подачу воздуха в камеру сглаживания пульсаций воздуха 4 через регулирующий вентиль системы 2 от источника генерации воздуха 1. При этом в рабочую камеру 7 поступает заданный объем воздуха при соответствующем давлении, который контролируется при помощи манометра 3. Воздух, проходя через щелевое сопло 5 шириной 0,5...0,9 мм, образует давление и частоту звукового поля, которые обеспечивают входение в резонанс боковых стенок резонансной камеры 7.

Резонанс в установке воздействия возникает от следующих комбинаций действий [3]. Через щелевое сопло 5 часть воздуха уходит наружу, а часть воздуха нагнетается в полость резонансной камеры 7, что происходит за счет рассекания воздушного потока клиновой частью регулирующей заслонки 8. Внутренний объем воздуха, находящегося в резонансной камере, зависит от положения регулирующей заслонки. При нагнетании в резонансную камеру воздуха давление в резонансной камере возрастает. Когда величина повышенного давления в камере превысит давление потока воздуха, поступающего из щелевого сопла, то повышенное давление заставляет воздух вытекать обратно из резонансной камеры. При выравнивании давлений внутри и снаружи воздух всё равно продолжит выходить наружу, поскольку поток воздуха, выходящий из резонансной камеры, обладает массой и скоростью, а значит, и кинетической энергией. Через некоторый промежуток времени воздух выйдет из резонансной камеры, при этом давление внутри резонансной камеры станет меньше, чем давление от воздушного потока, выходящего из щелевого сопла. Воздух снова устремится в резонансную камеру. Такие циклы будут повторяться неоднократно. При этом возникает явление резонанса Гельмгольца: стенки резонансной камеры под действием цикличности давления воздуха при совпадении частот колебаний воздуха в резонансной камере и снаружи камеры также начинают вибрировать с резонансной частотой [4; 5]. Так как внешняя сила воздушного потока, идущего от щелевого сопла наружу, возникает и исчезает с частотой, равной собственной частоте воздушного потока в полости резонансной камеры, то явление резонанса будет постоянно.

Процесс образования эффектов при аэродинамическом звуковом воздействии можно объяснить следующим образом [4]. При изготовлении сплавов под воздействием градиента (деформационного, температурного, силового и др.), а также с учетом неоднородности его распределения по объему материала и времени воздействия возникают дефекты кристаллического строения за счет нарушения в периодичности расположения атомов в кристаллической решетке, перемещения их в междоузлия и образования увеличенной концентрации вакансий, что вызывает напряжения в решетке и увеличение плотности дислокаций. Поэтому твердые сплавы имеют большое количество пор, образованных вакансионным пересыщением кристаллической решетки (рисунок 2).

Атомы, смещенные при изготовлении со своего положения, в котором находится вакансия, с одной стороны, имеют менее напряженное состояние из-за энтропийного рассеивания части своей внутренней энергии при перемещении в другое место, с другой — в новом положении на смещенные атомы воздействует большее количество сил от соседних атомов в связи с тем, что смещенные атомы защемлены в междоузлиях. Смещенные атомы, перемещение которых способствовало образованию дефектов и дислокаций, находятся в более неравновесном состоянии относительно несмещенных атомов.

При этом все атомы кристаллических решеток хотя и постоянно колеблются вокруг своих осей, но находятся в состоянии термодинамического равновесия. После нагрева твердых сплавов до температуры хладнотойкости увеличиваются колебания атомов кристаллической решетки и их запасенная потенциальная энергия.

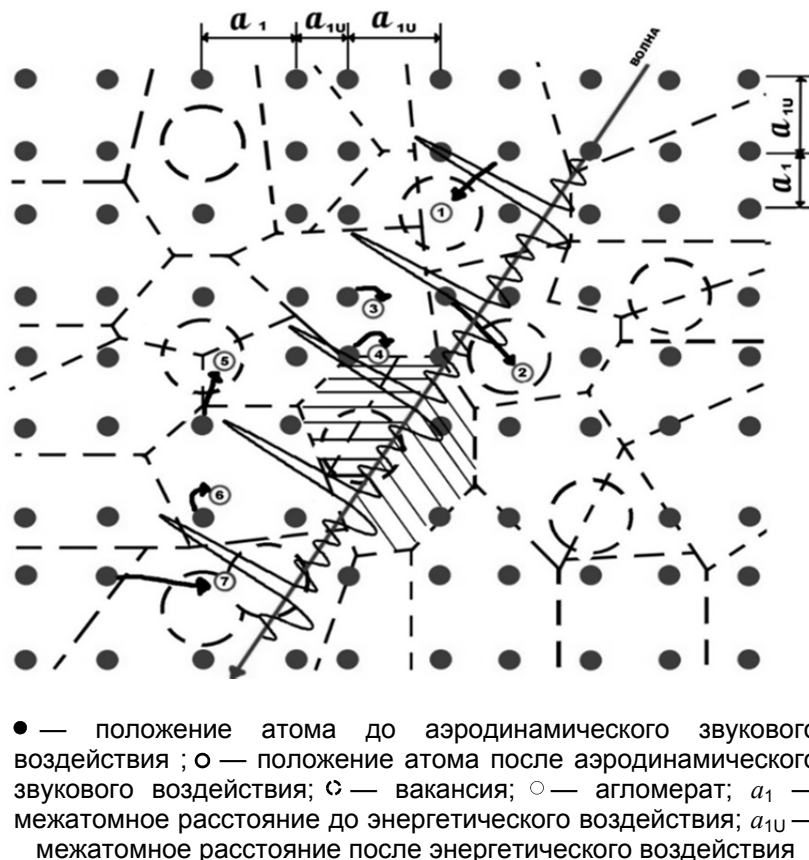


Рисунок 2. — Схема воздействия резонансных волн на кристаллическую решетку при аэродинамическом звуковом воздействии

Под действием последующего энергетического импульса энергии от воздействия резонансных звуковых волн, а также с учетом структуры звуковой волны, имеющей синусоидальный характер и действующей на твердое тело расклинивающим образом, происходит выбивание смещенных при изготовлении атомов из междоузлий, являющихся наиболее диффузионно подвижными, расположенных вблизи вакансий и имеющих наименьшее влияние потенциального барьера, созданного соседними атомами кристаллической решетки.

Выбитые атомы переходят на место существующих вакансий (на рисунке 2 показаны сплошной окружностью с цифрой внутри) и занимают упорядоченное положение в решетке из-за своей низкой энергии, рассеянной при перемещении, и действием сил межатомных связей соседних атомов. В результате происходит рекомбинация разноименных дефектов (взаимное исчезновение как вакансии, так и межузельного атома) и восстановление узла кристаллической решетки, ее релаксация, аннигиляция дислокаций.

Известно [4], что для установок аэродинамического звукового воздействия резонансная частота $\omega_{рез}$ определяется по формуле

$$\omega_{рез} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{B_{щ} H_{щ}}{(L_p - L_z) B_p H_p L_{щ}}}, \quad (1)$$

где c — скорость звука;

$B_{щ}$ — высота щелевого сопла;

$H_{щ}$ — толщина щелевого сопла;

L_p — длина рабочей части резонансной камеры;

L_z — длина выходного канала при заданном положении заслонки;

B_p — ширина рабочей части резонансной камеры;

H_p — высота рабочей части резонансной камеры;

$L_{щ}$ — длина щелевого сопла.

С учетом формулы (1), регламентирующей соотношение ряда конструкторских размеров, была разработана и изготовлена установка для аэродинамического звукового воздействия со следующими размерами: $B_{щ} = 0,0007$ м; $H_{щ} = 0,0013$ м; $L_p = 0,315$ м; $B_p = 0,09$ м; $H_p = 0,29$ м; $L_{щ} = 0,09$ м (рисунок 3).

Разработанная установка позволяет генерировать энергию за счет приведения волн звуковой частоты в резонансное состояние, что обеспечивает рекомбинацию разноимённых дефектов и восстановление узла кристаллической решётки, релаксацию структуры и аннигиляцию дислокаций.

Эффективность процесса аэродинамического звукового упрочнения реализуется через повышенный ресурс работы упрочненного инструмента. Осевой фрезерный инструмент, используемый при процессах прерывистого резания, должен обладать как можно более высокой твердостью и ударной вязкостью.

Для запуска процесса аэродинамического звукового воздействия необходимо предварительно нагреть упрочняемое изделие до некоторой температуры, причем чем выше температура нагрева, тем более эффективнее будут происходить релаксационные изменения в изделии. Однако известно, что при нагреве быстрорежущих сталей происходит их структурный отпуск, в связи с чем необходимо установить такой режим температурного нагрева, при котором будут происходить максимальные релаксационные изменения в изделии и одновременно изделие не потеряет свою исходную твердость. Такая температура соответствует нижнему порогу температуры хладноломкости [4; 6].

Аналитический расчет температуры хладноломкости весьма сложен. В связи с этим представляется целесообразным определить величину температуры хладноломкости экспериментальным образом для конкретных инструментальных материалов из быстрорежущих сталей. Экспериментальное определение температуры хладноломкости определялось путем нагрева различных образцов из быстрорежущих сталей в диапазоне температур 100...500 °С, после чего на твердомере ММП ИТМ на каждом образце определялась средняя величина твердости. Результаты исследований приведены на рисунке 4.



Рисунок 3. — Установка для аэродинамического звукового воздействия

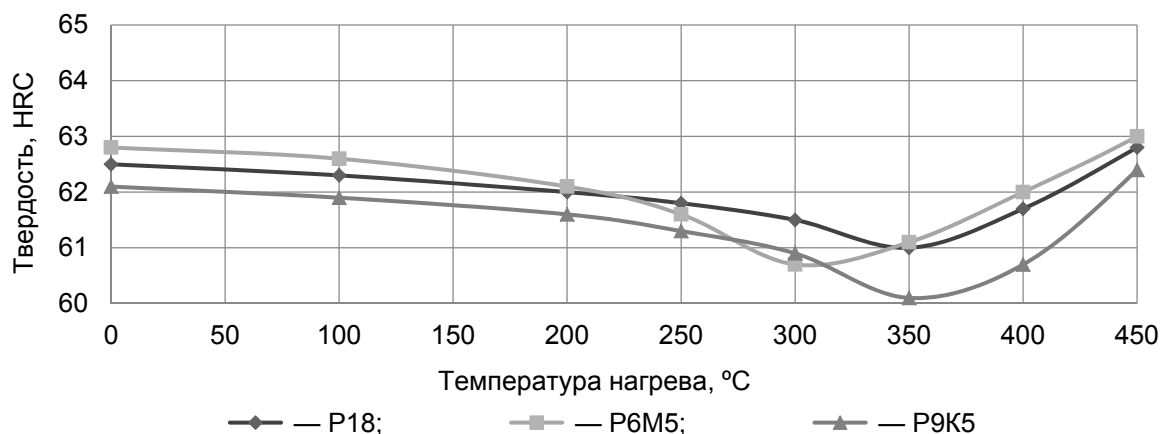


Рисунок 4. — Влияние температуры нагрева на твердость быстрорежущих сталей

Экспериментальные результаты исследований показывают, что температура хладноломкости для быстрорежущих сталей ориентировочно равна 280 °С. При таких температурах нагрева в быстрорежущих сталях будут происходить максимальные структурные релаксационные изменения и одновременно не произойдет снижение исходной твердости. Следовательно, при аэродинамическом звуковом воздействии на осевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей необходимо осуществлять предварительный нагрев инструмента до температуры хладноломкости быстрорежущих сталей, равной 280 °С.

Для достижения повышенного уровня ресурса инструмента из быстрорежущих сталей необходимо определить для установки аэродинамического звукового воздействия значения частот и амплитуд, при которых возникают резонансные эффекты.

Создание такого рода амплитудно-частотных характеристик обусловливается управляющими параметрами процесса аэродинамического звукового воздействия, к которым относятся величина поступающего в резонансную камеру объема и давления воздуха, а также длина выходного канала при заданном положении заслонки.

Результаты исследования и их обсуждение. Проведены исследования влияния длины выходного канала установки и давления подаваемого воздуха на создаваемые частотно-амплитудные характеристики, для чего в центре вибрирующих стенок установки виброанализатором сигналов СД-21 замерялись спектры виброперемещений (в мкм). Экспериментально установлено, что для разработанной установки для аэродинамического звукового воздействия резонансные эффекты возникают на частоте 154 Гц при амплитуде 130 мкм (рисунок 5) и на частоте 168 Гц при амплитуде 66 мкм.

Если произвести расчет резонансных частот по формуле (1) при длине выходного канала установки для АДУ $L_3 = 0,085$ м, то расчетная величина резонансной частоты $\omega_p = 153,8$ Гц, а при $L_3 = 0,12$ м $\omega_p = 167,1$ Гц. Разница расчетных данных от экспериментальных составляет 0,1...0,5 %, что позволяет сделать вывод о достаточно хорошем уровне сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Проведены экспериментальные исследования влияния давления поступающего в камеру воздуха на резонансную амплитуду колебания стенок установки, результаты которых (рисунок 6, а) показывают, что резонансные частоты и амплитуды возникают при давлении подающего воздуха, равном 0,16 МПа.

Проведены экспериментальные исследования при давлении воздуха 0,16 МПа влияния длины выходного канала установки для аэродинамического звукового воздействия на амплитудно-частотный коэффициент $K_{ачх} = \omega_{max} A_{max}$ (произведение частоты и амплитуды). Из полученных кривых (см. рисунок 6, б) видно, что резонансные частоты и амплитуды возникают при длинах выходного канала установки для аэродинамического звукового воздействия, равных 85 и 130 мм.

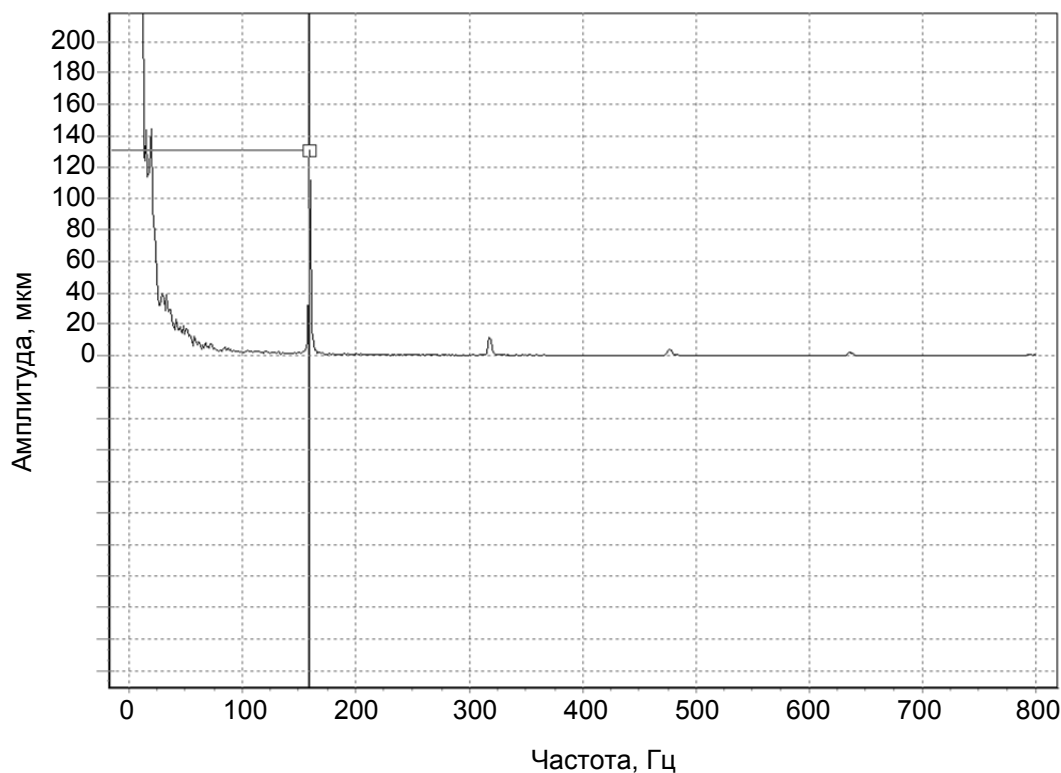
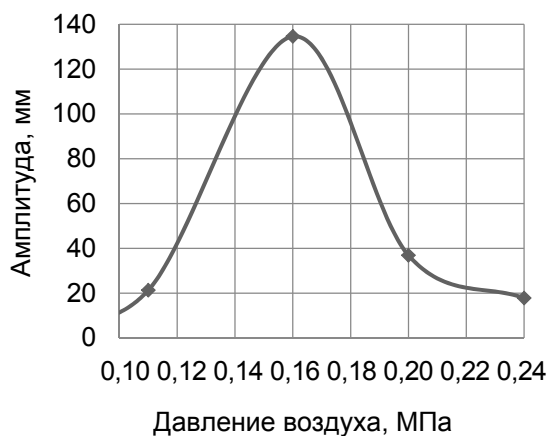


Рисунок 5. — Зависимости амплитудных виброперемещений от частоты на режиме 1



а)



б)

Рисунок 6. — Зависимости амплитуды от давления подаваемого воздуха (а) и частотно-амплитудных характеристик от длины выходного канала при заданном положении заслонки (б)

Таким образом, установлено, что для разработанной установки для аэродинамического звукового воздействия существуют два режима обработки, на которых возникают резонансные эффекты: режим 1 — создается амплитуда 130 мкм на частоте 154 Гц при размере длины выходного канала камеры 130 мм и давлении воздуха 0,16 МПа; режим 2 — создается амплитуда 66 мкм на частоте 168 Гц при размере длины выходного канала камеры 85 мм и давлении воздуха 0,16 МПа.

Объем подаваемого воздуха $Q_{\text{во}}$ в резонансную камеру установки для аэродинамического звукового воздействия зависит от подающего давления и длины выходного канала камеры и определяется по формуле [4]

$$Q_{\text{во}} = 60 \sqrt{\frac{2P_{\text{в}}}{\rho_{\text{во}}}} S_{\text{с}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{в}}$ — давление подаваемого воздуха;

$\rho_{\text{во}}$ — плотность воздуха;

$S_{\text{с}}$ — площадь сечения щелевого сопла.

Тогда, согласно (2), для разработанной установки аэродинамического звукового воздействия при давлении подаваемого воздуха $P_{\text{в}} = 0,16$ МПа, плотности воздуха $\rho_{\text{во}} = 1,2041$ кг / м³ и площади сечения щелевого сопла $S_{\text{с}} = 0,000063$ м² объем подаваемого воздуха в резонансную камеру $Q_{\text{во}} = 2,0$ м³ / мин. Данные значения давления подаваемого воздуха (0,16 МПа) и объема подаваемого воздуха в резонансную камеру (2,0 м³ / мин) следует учитывать при подборе компрессора.

Для исследования влияния воздействия аэродинамического звукового метода на износ фрез были обработаны аэродинамическим звуковым воздействием две фрезы из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром Ø12 мм, имеющие пять режущих зубьев, на режимах: предварительный нагрев — до 260 °С, выдержка в нагревательной печи — 60 мин [7]. После этого такими фрезами, а также фрезой без воздействия аэродинамическим звуковым методом производили фрезерование образцов из стали 45 на фрезерном станке модели 675 на режимах: скорость резания — 15,072 м / мин, подача на зуб — 0,032 мм / зуб, глубина резания — 1,0 мм, подача стола — 64 мм / мин, ширина фрезерования — 6 мм. По истечении каждых 10...15 мин обработки измеряли величину износа по задней поверхности h_z с помощью электронного микроскопа Galileomicroscan HV1AC. Результаты исследований представлены на рисунке 7.

Из графиков следует, что обработка аэродинамическим звуковым методом позволяет увеличить время работы концевых фрез Р6М5 между переточками на указанных режимах резания в 1,55 раза, что является весьма эффективным для данного вида инструмента.

Для повышения эффективности аэродинамического звукового воздействия на быстрорежущие стали необходимо установить оптимальное время воздействия и режимы обработки. Аналитическим расчетом определить такие параметры является весьма сложной задачей. В связи с этим представляется целесообразным провести исследования посредством эксперимента [8; 9].

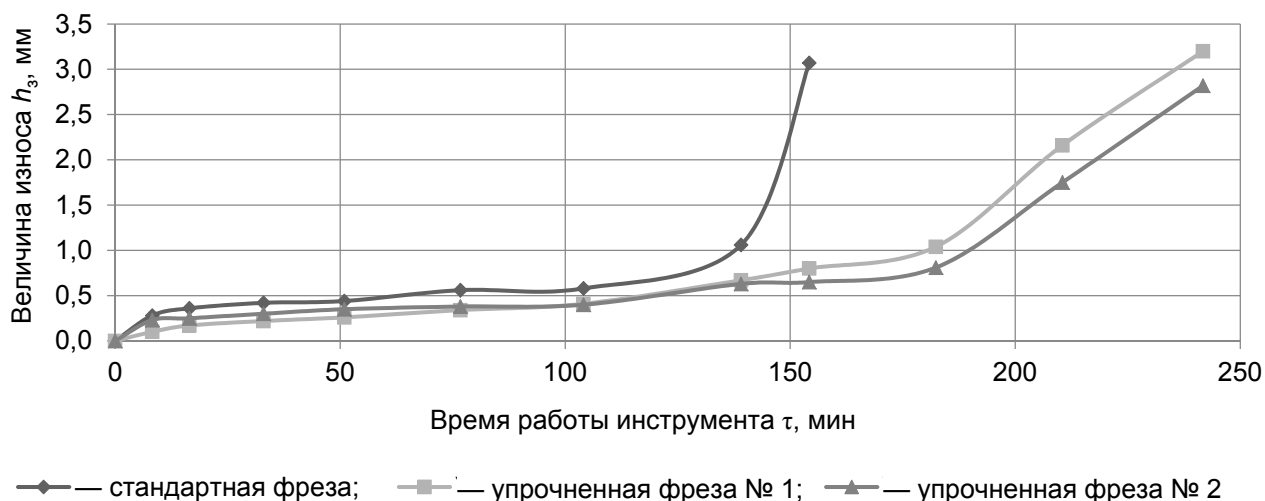


Рисунок 7. — Зависимости величины износа по задней поверхности фрез, обработанных аэродинамическим звуковым методом

Упрочнение концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5 осуществлялось по следующей технологии [8]. Производилось подключение экспериментальной установки для аэродинамического звукового воздействия (рисунок 8) к ресиверу компрессора AIRCAST 1 производительностью 1 680 л / мин через регулирующий вентиль 2. По три концевых фрезы из быстрорежущей стали Р6М5 Ø8,0 мм (ГОСТ 17025-71) закреплялись в поддерживающем устройстве, которое предварительно помещалось в термическую печь, разогретую до необходимой температуры, и выдерживались при такой температуре в течение 60 мин. После этого поддерживающее устройство с разогретыми концевыми фрезами перемещалось в рабочую камеру 7 через выходной канал 6. Регулирующая заслонка 8 устанавливалась на тот или иной размер, что соответствовало первому или второму режиму упрочнения, с последующей фиксацией заслонки. Затем осуществлялась подача воздуха в камеру сглаживания пульсации воздуха 4 через регулирующий вентиль 2 и трубопровод от ресивера компрессора. При этом в рабочей камере 7 давление попадающего воздуха выдерживалось в диапазоне 1,6 МПа, которое контролировалось при помощи стрелочного манометра 3 и регулировалось с помощью вентиля 2. При таком условии подачи воздуха в резонансной камере возникало звуковое давление, которое на определенных частотах звукового поля (168 или 154 Гц) образовывало резонансные амплитуды колебаний акустических волн.

Время звуковой обработки составило от 2,0 до 4,0 мин. После осуществления всех циклов упрочнения осуществлялся процесс старения, для чего упрочненные концевые фрезы помещались в термопечь, разогретую до температуры 160 °С, и выдерживались при такой температуре в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе до полного остывания.

Матрица режимов упрочнения при аэродинамическом звуковом воздействии для фрез из быстрорежущей стали Р6М5 Ø8,0 мм представлена в таблице 1. Режимы упрочнения устанавливались по методике [10].

За критерий эффективности упрочнения при аэродинамическом звуковом воздействии принимался износ по задней поверхности. Для этого тремя фрезами из быстрорежущей стали Р6М5 (упрочненными на одном режиме) проводилась обработка образцов из стали 45 по ГОСТ 1050 твердостью 187...207 НВ [3; 6].

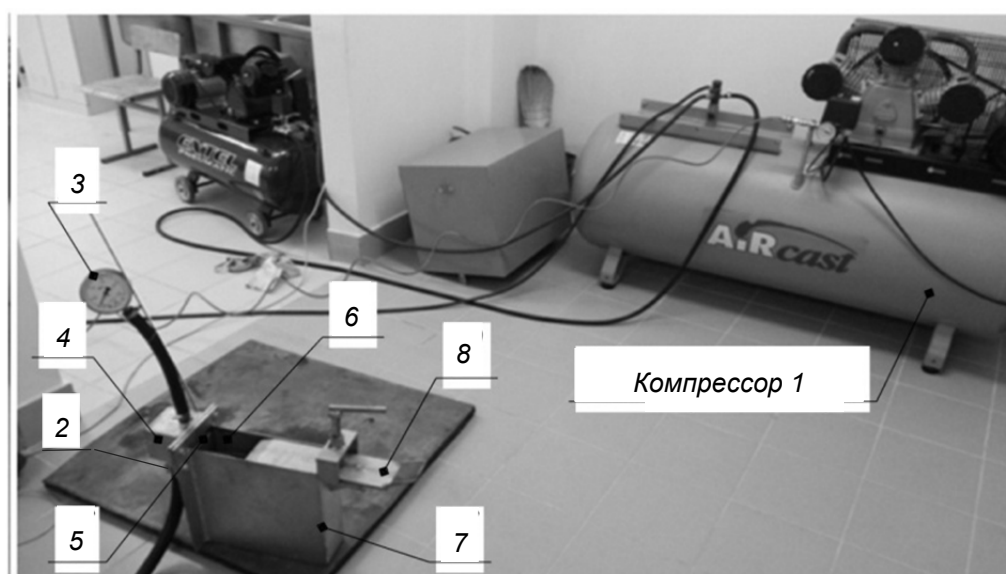


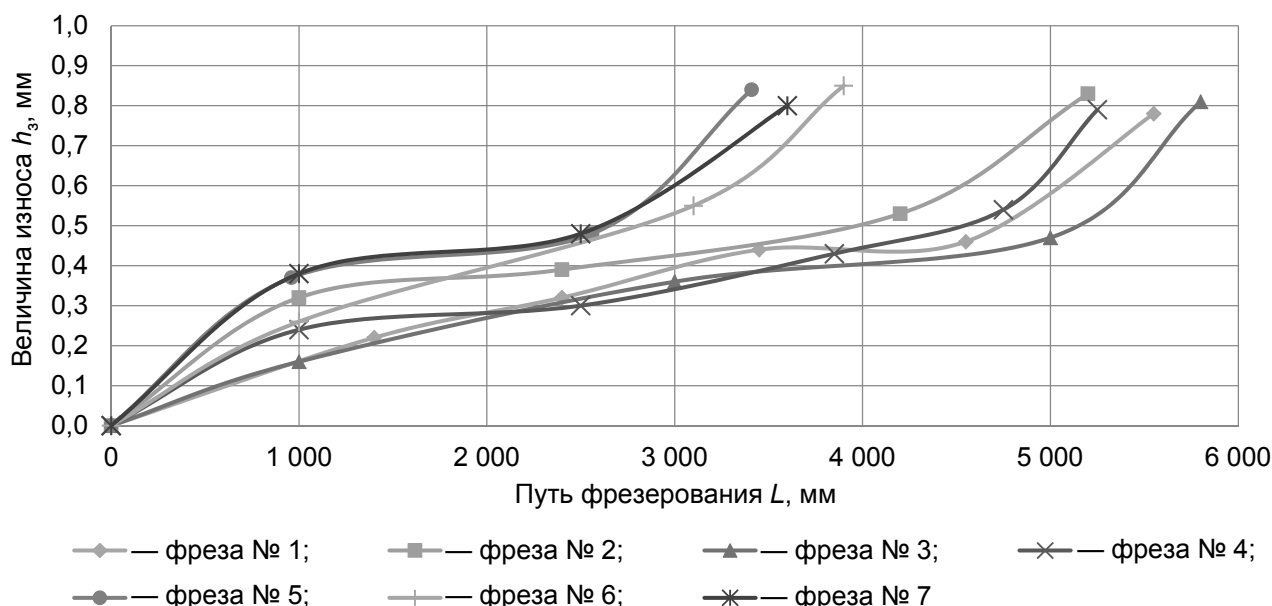
Рисунок 8. — Общий вид оборудования для проведения эксперимента

Т а б л и ц а 1. — Матрица режимов обработки при аэродинамическом звуковом воздействии для фрез $\varnothing 8,0$ мм из быстрорежущей стали Р6М5

Номер опыта	Температура нагрева T , °C	Время упрочнения τ , мин	Режим обработки
1	280	3,0	1
2	260	3,0	1 и 2
3	280	3,0	1 и 2
4	280	3,0	2
5	280	2,0	1 и 2
6	280	4,0	1 и 2
7	300	3,0	1 и 2

Фрезерование осуществлялось на фрезерном станке модели 675 при следующих режимах резания: скорость резания — 15,83 м / мин, подача на зуб — 0,0334 мм / зуб, глубина резания — 1,3 мм. Ширина фрезерования составляла 5 мм. По истечении каждых 1 000...1 500 мм пройденного пути фрезерования производились измерения величины износа по задней поверхности h_z на электронном микроскопе Galileomicroscan HV1AC, по средним значениям строились графики зависимости величины износа по задней поверхности от пути фрезерования для каждого режима упрочнения. Результаты износа зубьев фрез по задней поверхности h_z от пути фрезерования представлены на рисунке 9.

Как видно из рисунка 9, наименьший износ, а значит, и наибольшую стойкость показывают упрочненные аэродинамическим звуковым методом концевые фрезы из быстрорежущей стали Р6М5 $\varnothing 8,0$ мм из партии № 3 на режимах: температура предварительного нагрева — 280 °C, время упрочнения — 3 мин, режимы 1 и 2 работы установки.



1 — $T = 280$ °C, $\tau = 3,0$ мин, режим 1; 2 — $T = 260$ °C, $\tau = 3,0$ мин, режимы 1 и 2; 3 — $T = 280$ °C, $\tau = 3,0$ мин, режимы 1 и 2; 4 — $T = 280$ °C, $\tau = 3,0$ мин, режим 2; 5 — $T = 280$ °C, $\tau = 2,0$ мин, режимы 1 и 2; 6 — $T = 280$ °C, $\tau = 4,0$ мин, режимы 1 и 2; 7 — $T = 300$ °C, $\tau = 3,0$ мин, режимы 1 и 2

Рисунок 9. — Зависимости износа зубьев фрез, упрочненных в соответствии с номером опыта 1—7, по задней поверхности h_z от пути фрезерования при разных опытах

Таким образом, проведенные исследования износа фрез из быстрорежущей стали Р6М5 Ø8,0 мм, обработанных аэродинамическим звуковым воздействием на различных режимах, показали, что наибольшая стойкость инструмента обеспечивается при обработке аэродинамическим звуковым воздействием на следующих параметрах: температура предварительного нагрева — 280 °С, время упрочнения — 3 мин, использование последовательно режимов 1 и 2 работы установки.

Заключение. Разработана и изготовлена установка для аэродинамического звукового воздействия для обработки осевого фрезерного инструмента из быстрорежущих сталей, позволяющая генерировать энергию за счет приведения волн звуковой частоты в резонансное состояние, что обеспечивает рекомбинацию разноимённых дефектов и восстановление узла кристаллической решётки, релаксацию структуры и аннигиляцию дислокаций.

Экспериментально установлено, что при аэродинамическом звуковом воздействии на осевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей необходимо осуществлять предварительный нагрев инструмента до температуры хладноломкости быстрорежущих сталей, равной 280 °С, что позволит обеспечить максимальные структурные релаксационные изменения в материале и одновременно не произойдет снижение исходной твердости.

Установлено, что для разработанной установки для аэродинамического звукового воздействия существуют два режима обработки, на которых возникают резонансные эффекты: режим 1 — создается амплитуда 130 мкм на частоте 154 Гц при размере длины выходного канала камеры 130 мм и давлении воздуха 0,16 МПа; режим 2 — создается амплитуда 66 мкм на частоте 168 Гц при размере длины выходного канала камеры 85 мм и давлении воздуха 0,16 МПа.

Экспериментально установлено, что аэродинамическое звуковое воздействие позволяет увеличить время работы концевых фрез Р6М5 между переточками в 1,55 раза, что является весьма эффективным для данного вида инструмента.

Установлено, что наибольший эффект от аэродинамического звукового воздействия на осевой фрезерный инструмент обеспечивается на следующих режимах обработки: температура предварительного нагрева — 280 °С, время упрочнения — 3 мин, использование последовательно режимов 1 и 2 работы установки.

Список цитированных источников

1. Жигалов, А. Н. Экспериментальные исследования микроструктуры быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2022. — № 1 (11). — С. 14—23.
2. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головкин ; дата опубл.: 30.06.2017.
3. 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.
4. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.07 / А. Н. Жигалов. — Минск, 2021. — 382 л.
5. Helmholtz, H. On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music / H. Helmholtz. — London : Longmans, Green, and Co, 2010. — P. 44.
6. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1986. — 544 с.
7. Горавский, И. А. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на стойкость осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Наука — практике : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 15 мая 2020 г. : в 2 ч. / Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи, 2020. — Ч. 1. — С. 102—104.
8. Горавский, И. А. Определение оптимальных параметров аэродинамического звукового упрочнения осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дей-

хина // Наука — практике : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., 13 мая 2021 г. : в 3 ч. / Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи, 2021. — Ч. 2. — С. 28—29.

9. Горавский, И. А. Методика проведения аэродинамического звукового упрочнения осевого инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Векторы инновационного развития : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 дек. 2020 г. : в 2 ч. / Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи, 2020. — Ч. 1. — С. 64—66.

10. Жигалов, А. Н. Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2019. — № 7. — С. 49—63.

Поступила в редакцию 09.09.2022.

УДК 621.98.044.7; 669.2.017; 620.18

А. В. Кебец¹, Ю. И. Кривонос¹, Т. Ю. Бучик¹,**С. Н. Паранин²,** доктор технических наук, **²А. В. Спирин,** кандидат технических наук¹Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (44) 718 04 69, jury_kriv@mail.ru²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, ул. Амундсена, 106, 620016 Екатеринбург, Российская Федерация, +7 (343) 267 87 96

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВОЛОКНИСТОГО НАНОКОМПОЗИТА МЕЛКОДИСПЕРСНОГО СПЛАВА МЕДЬ-НИОБИЙ

Приведены результаты экспериментальных исследований прочностных и электропроводящих свойств материала для изготовления высокопрочных индукторных систем с использованием технологии прессования смесей элементов мелкодисперсного наноструктурного провода с порошком меди, спрессованных в компакт на магнитно-импульсном прессе с последующей термообработкой. Показана область применения индукторных систем на производстве. Результаты проведенных исследований на модельных индукторных системах при генерации сильного магнитного поля на разных частотах показали, что применение мелкодисперсного сплава Cu-Nb позволяет повысить стойкость токопровода в 3 раза по сравнению с токопроводом из медной шины и создавать индукторы с высоким ресурсом для обработки металлов давлением: штамповки тонколистовых материалов и формовки изделий сложной формы; процессы получения прочных, плотных и герметичных соединений трубчатых заготовок.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка; сильное импульсное магнитное поле; индуктор; наноккомпозит.

Рис. 6. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

A. V. Kebets¹, Y. I. Krivonos¹, T. Y. Buchik¹,**S. N. Paranin²,** DSc of Technical Sciences, **A. V. Spirin²,** PhD in Technical Sciences¹State scientific institution "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus"
10 Academician Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (44) 718 04 69, jury_kriv@mail.ru²The Institute of Electrophysics of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences
106 Amundsen Str., 620016 Yekaterinburg, Russian Federation, +7 (343) 267 87 96

STUDY OF MODEL INDUCTOR SYSTEMS BASED ON A FIBROUS NANOCOMPOSITE OF A FINELY DISPERSED COPPER-NIOBIUM ALLOY

The results of experimental studies of the strength and conductive properties of the material for the manufacture of high-strength inductor systems using the technology of elements pressing mixtures of fine nanostructured wire with copper powder pressed into a compact on a magnetic pulse press with subsequent heat treatment are presented. The inductor systems application area in production is shown. The results of the conducted research on model inductor systems when generating a strong magnetic field at different frequencies has showed that the use of a fine Cu-Nb alloy allows to increase the resistance of the current line in 3 times, compared with a copper bus bar current line and allows to create inductors with a high resource for metal processing by pressure: stamping of thin-sheet materials and molding of complex shape products; processes for obtaining strong, dense and hermetic joints of tubular blanks.

Key words: magnetic pulse processing; strong pulsed magnetic field; inductor; nanocomposite.

Fig. 6. Table. 1. Ref.: 7 titles.

Введение. В арсенале современных технологий обработки материалов давлением магнитно-импульсной обработке металлов (МИОМ) принадлежит определенное место прежде всего как методу бесконтактного силового воздействия на металл путем непосредственного преобразования электрической энергии в работу деформации.

Метод МИОМ с минимальными затратами на проектирование и изготовление формообразующего инструмента и короткими сроками освоения нового производства позволяет выполнять различные технологические операции листовой штамповки: вырубки-пробивки, формовки-вытяжки, отбортовки, чеканки-калибровки, резки, обжима и раздачи тонкостенных труб, а также операции получения неразъемных и подвижных соединений, сварки давлением разнородных металлов [1].

В Беларуси функционируют производственные участки МИОМ на ОАО «МЗКТ», ОАО «БелАЗ», ОАО «МАЗ», ОАО «БПОВЦ», оснащенные магнитно-импульсными прессами, разработанными в ФТИ НАН Беларуси, требующими эффективного, долговечного инструмента, в состав которого входит индукторная система, генерирующая импульсное магнитное поле необходимой напряженности, длительности и конфигурации.

Магнитно-импульсная обработка (далее — МИО) реализуется в результате взаимодействия импульсного магнитного поля индуктора-инструмента с наведенными в металлической заготовке вихревыми токами. Характерные значения индукции магнитного поля составляют 30...60 Тл, а длительность полупериода импульса поля — 5...100 мкс. Для генерации сильных импульсных магнитных полей (далее — СМП) с указанными параметрами используют индукторы трех типов: 1) многovitковые спиральные; 2) одновитковые соленоиды; 3) индукторы с концентратором магнитного потока.

Последние представляют собой модификацию импульсного трансформатора со вторичной обмоткой в виде массивного одновиткового соленоида — концентратора потока и используются для увеличения плотности магнитного потока в заданной области пространства. Спиральные соленоиды применяют чаще всего в процессах прессования, когда наилучший эффект достигается при длительности импульсов около 100 мкс [2]. Для получения импульсов магнитного поля с длительностью полупериода 5...20 мкс и амплитудой индукции 40...60 Тл применяют индукторы одновитковые или с концентратором потока и первичной обмоткой, имеющей малое число витков. Индуктор с концентратором потока позволяет конструировать большое разнообразие геометрических конфигураций и в работах по МИО встречается чаще всего [1]. Для формования листовых деталей применяют плоские индукторы со спиральной или произвольной укладкой витков. Ресурс индукторов в таких условиях оказывается невысоким, поскольку материал индуктора подвергается интенсивным термомеханическим нагрузкам.

При протекании импульсного тока через индуктор основная его часть концентрируется в поверхностном слое проводника — скин-слое, толщина которого определяется электропроводностью материала индуктора, формой и длительностью импульса тока. Закономерности распределения индукции магнитного поля, плотности тока, температуры и механических напряжений по глубине токонесущего слоя обусловлены диффузией магнитного поля. Корректное описание диффузии СМП требует учета нагрева проводника за счет выделения джоулева тепла. Решение данной задачи может быть получено только численными методами. Однако уже в работе [3] в рамках метода скин-слоя для среды с однородной электропроводностью показано, что плотность тепловой энергии, выделяемой в проводнике, примерно равна плотности энергии магнитного поля у его поверхности. При этом температура, до которой нагревается скин-слой, определяется теплоемкостью материала и в первом приближении не зависит от его начальной электропроводности. К примеру, в магнитном поле с индукцией 50 Тл и длительностью 15 мкс температура поверхности стального индуктора может достигать 600 °С за один импульс. Для массивного проводника, в котором ток протекает лишь в поверхностном слое, вызывая его нагрев, при неизменной температуре оставшейся части проводника термическое расширение и последующее охлаждение в поверхностном слое приводят к возникновению растягивающих усилий в стали, превосходящих предел прочности, и, как следствие, к растрескиванию поверхности. Величина температурных механических напряжений в поверхностном слое проводника может значительно превосходить «магнитное давление» и зависит от длительности и формы импульса индукции. При этом

пространственная область действия интенсивных температурных напряжений ограничена тонким слоем с толщиной порядка глубины проникновения поля. Процесс разрушения соленоида в своей начальной стадии происходит в приповерхностном слое и обусловлен периодически возникающими температурными напряжениями высокой интенсивности, достигающими предела прочности материала. Такой механизм разрушения хорошо известен как малоцикловая усталость — появление на поверхности микротрещин. В последующих актах генерации поля трещины стремительно развиваются вследствие известного в аппаратуре сильных токов «эффекта пилы» [4; 5].

Помимо высоких тепловых нагрузок рабочая поверхность соленоида (или концентратора) подвергается высоким механическим напряжениям, сопоставимым с уровнем перехода материала в состояние пластического течения. Например, магнитное поле индукцией 50 Тл создает давление до 1 ГПа. В совокупности данные факторы и определяют основные проблемы при генерации СМП: разрушение индуктора из-за пластической деформации металла в рабочей области, растрескивания в результате малоцикловой усталости, термического растрескивания (свойственно твердым материалам); все это к тому же сопровождается неоднородным высокотемпературным окислением [4; 5]. Проблема создания эффективных индукторных систем для получения сверхсильных импульсных магнитных полей возникла в начале прошлого века при исследовании многих разделов физики твердого тела, ядерной физики, при решении проблем термоядерного синтеза. Созданные в 50-е годы индукторные системы дали исследователям возможность получить магнитные поля с индукцией до 50 Тл, при которой большинство металлов теряют прочность и переходят в стадию плавления или испарения. В связи с этим проблема выбора или разработка нового материала индуктора является ключевой задачей.

Для многократной генерации коротких импульсов СМП материал индуктора должен оптимально сочетать различные свойства: высокую электропроводность, прочность, ударную вязкость, теплоемкость, температуру плавления и стойкость к окислению при высоких температурах, также важен низкий коэффициент термического расширения и высокие температуры термообработки, если таковые используются.

Низкие прочность и термическая стойкость индукторных систем с токопроводящими элементами из легированных бронз, имеющих высокое электросопротивление, являются основной причиной, сдерживающей широкое использование технологии МИО в производственной практике.

Материалы и методы исследования. В данной работе была поставлена задача использования проводов из волокнистого нанокompозита Cu-Nb для изготовления индукторов.

Из класса композитных материалов особый интерес по своим характеристикам представляет наноструктурный композит Cu-Nb с близкой к меди проводимостью (50...60 % IACS) и высоким сопротивлением разрыву (1,1—1,2 ГПа) [6; 7], разработанный и выпускаемый в виде шины с сечением 7,96 мм² в ООО «НПП «Нанoeлектро» (Москва), который совершил прорыв в мировой практике получения сверхсильных магнитных полей.

Для проведения прочностных испытаний использовались образцы из волокнистого нанокompозита в составе, заявленном производителем: Cu-18 масс.%Nb. Это состав сплава в исходной отливке, которую дальше многократно волочат в медных оболочках для формирования многожильной сотовой структуры провода. Для получения материала с последующим помолом был использован провод диаметром 0,18 мм от того же производителя и того же состава в исходном сплаве.

Для помола провода его необходимо было дезинтегрировать на фрагменты. Для этих целей был разработан и изготовлен лабораторный аппарат, работающий по принципу гильотины и выполненный на основе электромагнитного привода. Рабочими элементами аппарата

являются ножи из твердого сплава ВК8, один неподвижный, другой подвижный. Аппарат работает в автоматическом режиме с регулируемой частотой срабатывания ножа $1 \dots 10$ Гц и имеет механизм подачи провода со скоростью до 5 мм/с . Согласованное действие механизма подачи и гильотины обеспечивается драйвером на микроконтроллере. После рубки была получена сечка, состоящая из фрагментов провода длиной $0,5 \dots 1,0 \text{ мм}$, которая подвергалась механической очистке от загрязнений и отмывке в бензин-ацетоновой смеси в ультразвуковой ванне.

Далее полученную сечку провода подвергали помолу в шаровой мельнице планетарного типа.

Получение компактных образцов методом магнитно-импульсного прессования. Компактирование образцов мелкодисперсного состава после помола полученной сечки осуществляли одноосным магнитно-импульсным прессованием в диски различного диаметра: 8 и 32 мм. Для этого использовали установку магнитно-импульсного прессования, представляющую собой генератор импульсных токов на основе емкостного накопителя, рабочий инструмент — индуктор. При протекании через индуктор импульсного тока под действием давления импульсного магнитного поля индуктора происходит ускорение проводящей части пресса — концентратора, формирующего импульс силы (давления), воздействующий на порошок — метод электромагнитного молота. Длительность импульса тока через индуктор для данной установки составляет 500 мкс, амплитуда давления в порошке достигает 1,5 ГПа и ограничивается в основном прочностью пресс-инструмента. Управление давлением в процессе прессования осуществляется варьированием энергии накопителя (амплитуды разрядного тока и, соответственно, амплитуды магнитного поля), определяемой зарядным напряжением. Прессование осуществляли в жестких матрицах из закаленной конструкционной стали.

На образцах размером $8 \times 12 \text{ мм}$ проводили измерения удельного сопротивления на сжатие до и после термической обработки. Из дисков диаметром 32 мм изготавливали образцы для испытаний на растяжение (рисунок 1).

Термическая обработка компактных образцов проводилась в вакуумной печи. Для изучения эволюции структурных, прочностных и электрических характеристик получаемых материалов отжиг компактных образцов из сечки провода и помольного состава производили при различных температурах: 700, 800, 850 и 900 °С, скорость нагрева — около 15 °С/мин с выдержкой на максимальной температуре 1 ч. Максимальная температура длительной обработки — 850 °С, кратковременной — до 950 °С, достигаемый уровень вакуума — 2×10^{-5} торр.

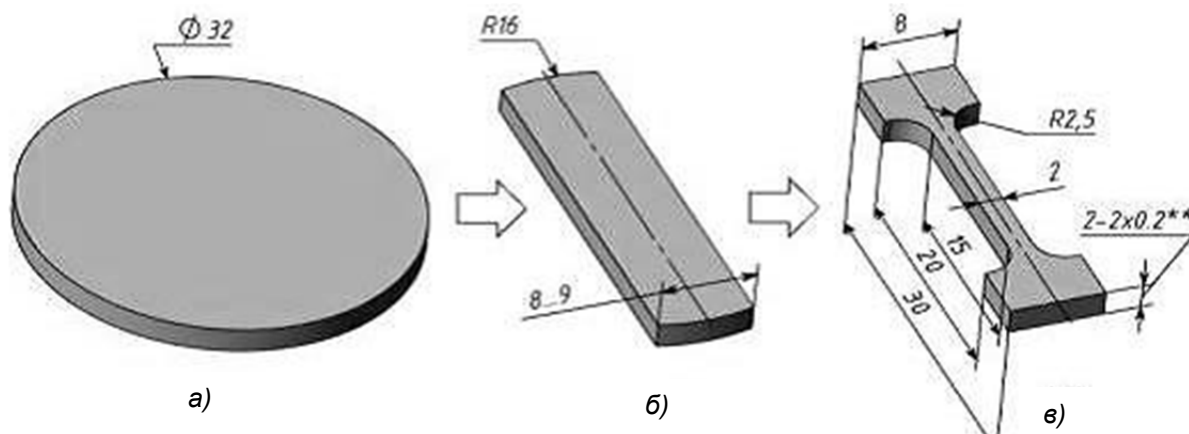


Рисунок 1. — Схема приготовления образцов для тестов на растяжение

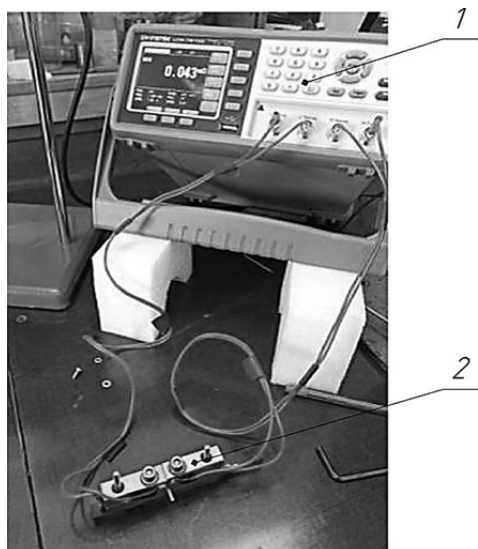


Рисунок 2. — Стенд для измерения удельного сопротивления

Методика измерения электрических характеристик образцов. Для измерения удельного электросопротивления шины, провода и плоских пластин использовали прецизионный измеритель импеданса LCR-76100 (GW Instek, Тайвань) 1 с пределом измерения сопротивления на постоянном токе и разрешением 10 мкОм. Базовая погрешность прибора составляет 0,05 %. Для измерения образцов малых размеров стандартные 4-зондовые клещи прибора были заменены на 4-контактный держатель образцов, выполненный из массивных латунных клеммников 2 прямоугольной формы (рисунок 2).

Токовые и потенциальные клеммы держателя изолированы друг от друга. Клеммы жестко закреплены на одном основании с возможностью варьирования расстояния между ними для подстройки под конкретный образец.

Исследование прочностных характеристик образцов. Применен разрушающий метод испытания на растяжение. Данный метод используется для оценки проч-

ности образцов в условиях нагружения, которые подобны нагрузкам при эксплуатации индукторов. Выбрана стандартная схема испытания образцов из высокопрочной шины Cu-Nb на растяжение по ГОСТ 1497.

Способность образцов противостоять разрушающей силе обеспечивает количественную меру пластичности и прочности материала.

Испытания экспериментальных образцов проводились на универсальной испытательной машине Time WDW-100E с регистрацией характеристик.

Испытанию подвергали экспериментальные образцы, изготовленные из дисков диаметром 32 мм, спрессованные из сечки провода до и после термической их обработки, в сравнении с образцами исходной шины производства ООО «НПП «Наноэлектро». Для сравнения также был исследован образец из меди той же геометрии.

По полученным значениям сопротивления образцов вычисляли прочностные характеристики материала.

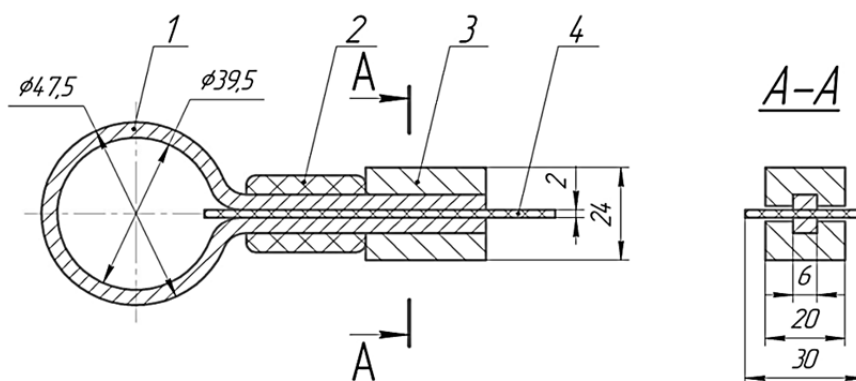
Индукторная система из высокопрочной шины. При разработке конструкции индукторных систем, основным элементом которой является одно- или многовитковая токопроводящая спираль, необходимо учитывать предельные режимы ее работы в момент прохождения по виткам импульса тока в десятки и сотни килоампер, сопровождаемого импульсами давления от электродинамических сил до 2...5 ГПа и выделением тепла на спирали.

Для исследования стойкости провода из мелкодисперсных сплавов Cu-Nb изготавливали модельные образцы одновиткового индуктора (рисунки 3, 4).

Испытания проводили на генераторе импульсных токов ГИТ-10, обеспечивающем приложении напряжения к испытываемым элементам модельных индукторов в диапазоне от 5 до 12 кВ с частотой разрядного тока от 5 до 30 кГц.

С учетом вышеизложенного разработана конструкция экспериментальной многовитковой цилиндрической индукторной системы рабочим диаметром 20 мм (рисунок 5).

При использовании технологических процессов МИО производительностью до 100 импульсов в минуту многовитковая спираль индуктора испытывает значительный разогрев до 200...300 °С, что является пределом электрической и механической стойкости межвитковой изоляции и может быть причиной выхода из строя индуктора. Для преодоления этого температурного порога приходится применять принудительное охлаждение спиралей — воздушное или жидкостное. В последнем случае провод спирали выполняется из волокнистого нанокompозита мелкодисперсного сплава Cu-Nb в виде полого провода квадратного сечения с содержанием ниобия (Nb) в сплаве на уровне 15...20 % с толщиной стенки 0,8 мм (рисунок 6).



1 — токопровод; 2 — силовой бандаж; 3 — выводы индуктора;
4 — изоляционная прокладка

Рисунок 3. — Эскиз одновиткового индуктора

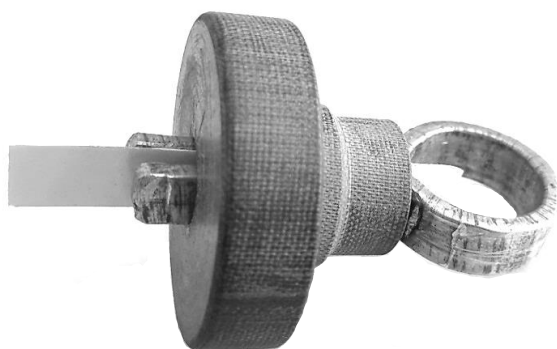


Рисунок 4. — Одновитковый
модельный индуктор

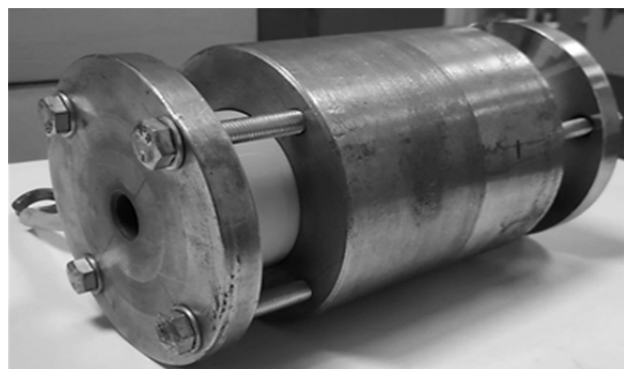


Рисунок 5. — Система индукторная

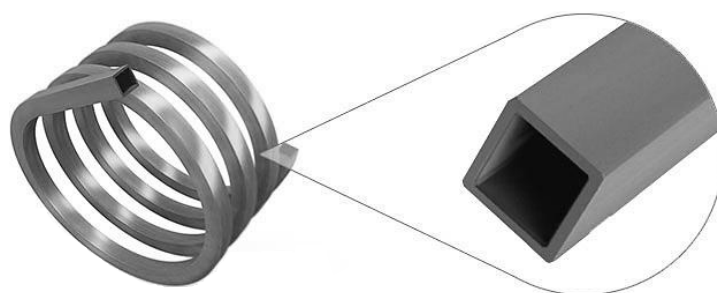


Рисунок 6. — Конструкция спирали из полого провода

Результаты исследования и их обсуждение. В соответствии с методикой измерения электрических характеристик образцов были получены следующие результаты. Величина измеряемого сопротивления составляла 0,6...0,7 мОм. Хотя прибор LCR-76100 имеет встроенную функцию установки «0» показаний, тем не менее была проведена коррекция его показаний при коротком замыкании клеммников, при этом показания прибора составили ~40 мкОм. На эту величину была проведена коррекция показаний прибора при измерениях образцов малого размера. Погрешность определения удельного сопротивления не превышала 0,5...1,0 % для образцов провода и шины, 4...5 % — для тонких пластин, изготовленных из компактного образца диаметром 32 мм.

Проведенные исследования механических свойств образцов полученного компакта Cu-Nb, а также шины представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1. — Результаты испытаний на растяжение образцов

Материал образца	Маркировка (номер) образца	Температура отжига $T_{отж}$, °C	Сечение образца A , мм ²	Усилие разрыва образца F_m , кН	Сопротивление разрыву $\sigma_{пр}$, МПа
Cu-18%Nb	6504 (001)	850	6,93	2,57	370
Cu-18%Nb	6505 (002)	850	6,26	2,87	460
Cu-18%Nb	6506 (003)	850	5,85	2,27	390
Cu-26%Nb	6297 (004)	850	5,74	6,39	1 110
Cu-26%Nb	6366 (005)	850	7,18	5,27	735
Шина Cu-18%Nb	Ш-2 (006)	—	9,40	10,81	1 150
Шина Cu-18%Nb	Ш-4 (007)	850	7,96	2,73	345
Шина Cu-18%Nb	Ш-5 (008)	850	7,96	2,87	360

Результаты механических испытаний мелкодисперсных образцов показали, что наибольшим сопротивлением разрыву характеризуется шина Cu-18%Nb ООО «НПП «Нано-электро» (Москва), ее сопротивление составило 1 150 МПа. Экспериментальные образцы, спрессованные из сечки провода, имели хрупкий характер разрушения.

Для решения этой проблемы была разработана новая технология изготовления образцов с добавлением в сечку медного порошка с последующим магнитно-импульсным прессованием и спеканием до компактного состояния.

Наибольшим сопротивлением разрыву характеризуется порошковый компакт Cu-26%Nb № 6297 (004), его прочность составила 1 110 МПа, что в 5 раз больше прочности образцов из меди, которую используют чаще всего для изготовления индукторных систем.

В ходе испытаний индукторная система из меди выдержала энергию разряда 3 кДж до разрушения, индукторная система на основе мелкодисперсного сплава Cu-Nb — 9 кДж до разрушения.

Оценка результатов проведенных исследований на модельных индукторных системах при генерации СМП на разных частотах показала, что применение мелкодисперсного сплава Cu-Nb при одинаковых энергетических характеристиках нагружения при частоте 10 кГц позволяет повысить стойкость токопровода в 3 раза по сравнению с токопроводом из медной шины.

Заключение. Примененный вариант метода магнитно-импульсного прессования и спекания композитного материала из смеси сечки нанокompозитного провода с медным порошком позволилкратно повысить прочность и дает возможность использовать композит Cu-Nb при изготовлении спиралей индукторных систем для магнитно-импульсной штамповки в виде многовитковых спиралей и концентраторов магнитного поля.

Полученные результаты позволят создавать индукторы с высоким ресурсом для МИО металлов давлением: штамповки тонколистовых материалов и формовки изделий сложной формы; процессы получения прочных, плотных и герметичных соединений трубчатых заготовок; проведение опрессовки кабельных наконечников многожильных проводов сечением до 300 мм² для изделий карьерной техники; получение сварных соединений разнородных материалов на твердотельном уровне; использование магнитно-плазменной сварки в сложных конструкциях автомобильной, аэрокосмической техники, в приборостроении, а также упрочнения металлических изделий на производственных участках МИО предприятий Беларуси.

Список цитированных источников

1. Белый, И. В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко. — Харьков : Вища шк., 1977. — 168 с.
2. Magnetic Pulsed Compaction of Nanosized Powders / G. Sh. Boltachev [et al.]. — NY : Nova Science Publishers, Inc., 2010. — 86 p.
3. Сахаров, А. Д. Взрывомагнитные генераторы / А. Д. Сахаров // УФН. — 1966. — Т. 88, вып. 4. — С. 725—734.
4. Кнопфель, Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. — М. : Мир, 1972. — 392 с.
5. Лагутин, А. С. Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте / А. С. Лагутин, В. И. Ожогин. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 198 с.
6. Bevk, J. Anomalous increase in strength of in-situ formed Cu-Nb multifilamentary composites / J. Bevk, J. P. Hardisson, J. L. Bell // J. Appl. Phys. — 1978. — Vol. 49, № 12. — P. 6031—6038.
7. Cu-Nb and Cu / Stainless Steel Winding Materials for High Field Pulsed Magnets / V. Patsyrny [et. al.] // IEEE Trans. on Appl. Supercond. — 2000. — Vol. 10, № 1. — 1263 p.

Поступила в редакцию 22.09.2022.

УДК 004.94; 621.373

В. В. Малеронок¹, А. В. Алифанов^{2,3}, доктор технических наук, профессор,**А. М. Милюкова²**, кандидат технических наук,**И. А. Богданович³**, кандидат технических наук, доцент¹Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», ул. Уборевича, 77, 220096 Минск, Республика Беларусь, s-tm.v.v@mail.ru, +375 (29) 561 28 88²Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь³Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, alifanov_aav@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВОМ ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Проведено имитационное моделирование процесса магнитно-импульсной обработки осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали с предварительным нагревом. Обнаружено, что для варианта полной загрузки сверла из стали Р6М5 диаметром 10 мм в индукторе предварительный нагрев составляет порядка 330...400 °С, а последующая обработка требует 2...3 импульса (10 кДж в каждом) в целях достижения температуры первичной рекристаллизации стали Р6М5 530...600 °С; при этом цикличность воздействия давления магнитного поля и тепловой энергии индукционного тока приведет к более полному завершению процессов, происходящих при магнитно-импульсной обработке (мартенситное превращение с образованием большого количества отпущенного мартенсита, движение дислокаций, формирование однонаправленной доменной структуры, увеличение дисперсности структуры, установление первичной стадии рекристаллизации).

При половинной загрузке сверла в индуктор целесообразно осуществлять подогрев до 500 °С и обработку проводить одним импульсом, так как последующие импульсы не приводят к увеличению температуры ввиду меньшего количества сообщенной тепловой энергии по сравнению с полной загрузкой сверла и сильного остывания изделия за время заряда конденсаторной батареи.

Кроме того, составлен алгоритм упрочнения осевого режущего инструмента на установках магнитно-импульсной обработки с предварительным нагревом, указаны оптимальные режимы обработки (количество энергии и импульсов, температура предварительного нагрева) для двух вариантов загрузки режущего инструмента — полной и половинной.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка; сверло; моделирование; программное обеспечение ANSYS; предварительный нагрев.

Рис. 1. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

V. V. Maleronok¹, A. V. Alifanov^{2,3}, DSc in Technical Sciences, Professor,**A. M. Miliukova²**, PhD in Technical Sciences, **I. A. Bogdanovich³**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor¹Educational Institution “Belarusian State Aviation Academy”, 77 Uborevicha Str., 220096 Minsk, the Republic of Belarus, s-tm.v.v@mail.ru, +375 (29) 561 28 88²State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 10 Academician Kuprevicha Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus³Educational Institution “Baranovichi State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, alifanov_aav@mail.ru

MAGNETIC-PULSED PROCESS MODELING WITH THE AXIAL CUTTING TOOL PREHEATING

Simulation modeling of the magnetic-pulsed process has been carried out. The axial cutting tool was used from high speed steel with preheating. It was found that for the option of fully loading a drill made of steel R6M5 with a 10 mm diameter in an inductor, preheating is about 330...400 °C. Subsequent processing requires 2...3 pulses (10 kJ each) in order to achieve the primary recrystallization temperature of R6M5 steel 530...600 °C. The cyclicity of the magnetic

field pressure impact and the induction current thermal energy will lead to a more complete processes completion occurring during magnetic-pulsed process (martensitic transformation with the formation of a larger amount of tempered martensite, the dislocations movement, of a unidirectional domain structure formation, an increase in the structure dispersion, the establishment of the primary stage of recrystallization).

When the drill is half loaded into the inductor, it is advisable to heat up to 500 °C. Processing must be carried out with one pulse, since subsequent pulses do not lead to an increase in temperature. This is due to a smaller amount of heat energy supplied, compared to a full drill load, and a strong cooling of the workpiece during the charge of the capacitor bank.

In addition, an algorithm for hardening the axial cutting tool on magnetic-pulsed processing units with preheating was compiled, the optimal processing modes (the amount of energy and pulses, the preheating temperature) were indicated for two options for loading the cutting tool — full and half.

Key words: magnetic-pulsed process; drill; modeling; Ansys software; preheating.

Fig. 1. Table. 1. Ref.: 6 titles.

Введение. Для оценки конструкторских решений и анализа результатов процессов обработки экономически выгодным и научно обоснованным решением является использование имитационного моделирования.

Использование программного обеспечения ANSYS для технического анализа и численного моделирования позволяет получать количественные результаты изучаемых процессов, обеспечивает понимание физики моделируемых процессов и высокий уровень наглядности [1].

В работе [2] выполнено имитационное моделирование процесса магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) осевого режущего инструмента (сверл диаметром 10 мм) по двум режимам: 1) с полной загрузкой (сверло устанавливается на всю длину индуктора) для обработки боковой поверхности (режущей ленточки); 2) с половинной загрузкой сверла (с установкой сверла режущими кромками в центральной части индуктора на середине) для обработки режущих кромок в торцевой части сверла. Моделирование проведено для конструкции установок без предварительного нагрева.

Так как в процессе обработки нагреву подвергается не только сверло, но и индуктор, то в целях недопущения его выхода из строя (теплового пробоя изоляции) и сокращения циклов МИО целесообразно предусмотреть предварительный нагрев обрабатываемого изделия до безопасной начальной температуры. Величина предварительного нагрева должна быть выбрана с учетом последующего нагрева от воздействия циклов МИО и не должна приводить к нагреву до температур вторичной рекристаллизации и отпуску закаленного металла.

Материалы и методы исследования. Для моделирования выбрана установка МИП-18 (аналог МИУ-2), работающая с цилиндрическим индуктором 13 мм (13,5 мм без изоляции) и длиной рабочей зоны 60 мм, обеспечивающая максимальную запасаемую энергию 15 кДж (возможность заряда конденсаторных батарей до 11,2 кВ при энергии 9,9 кДж). Установка сконструирована в Физико-техническом институте НАН Беларуси для проведения МИО [3].

В качестве обрабатываемого инструмента выбрано сверло диаметром 10 мм из стали Р6М5, выполнено построение его 3D-модели.

Моделирование выполнялось с использованием двух основных блоков ANSYS (№ 2017-б/140): Ansys Electronics Desktop (Maxwell) [4] — модуль для электромагнитного анализа (моделирование разряда при МИО и индукционных токов в изделии); Ansys Transient Thermal [5] — модуль для расчета тепловых процессов (нагрев сверла при разряде конденсатора установки МИО через индуктор и остывание между повторными разрядами).

Так, МИО моделировали по двум режимам: с полной и половинной загрузкой.

В лабораторных условиях предварительный нагрев инструмента осуществляется индукционными токами в дополнительном индукторе для нагрева, причем частота тока должна обеспечивать прогрев изделия на глубину, больше или равную толщине упрочненного слоя. При моделировании предварительный нагрев задается как исходная температура изделия перед МИО.

Результаты исследования и их обсуждение. Для варианта полной загрузки сверла из стали Р6М5 диаметром 10 мм предварительный нагрев составляет порядка 330...400 °С, а последующая обработка требует 3 импульса (10 кДж в каждом) до температуры первичной рекристаллизации стали Р6М5 530...600 °С (рисунок 1, а).

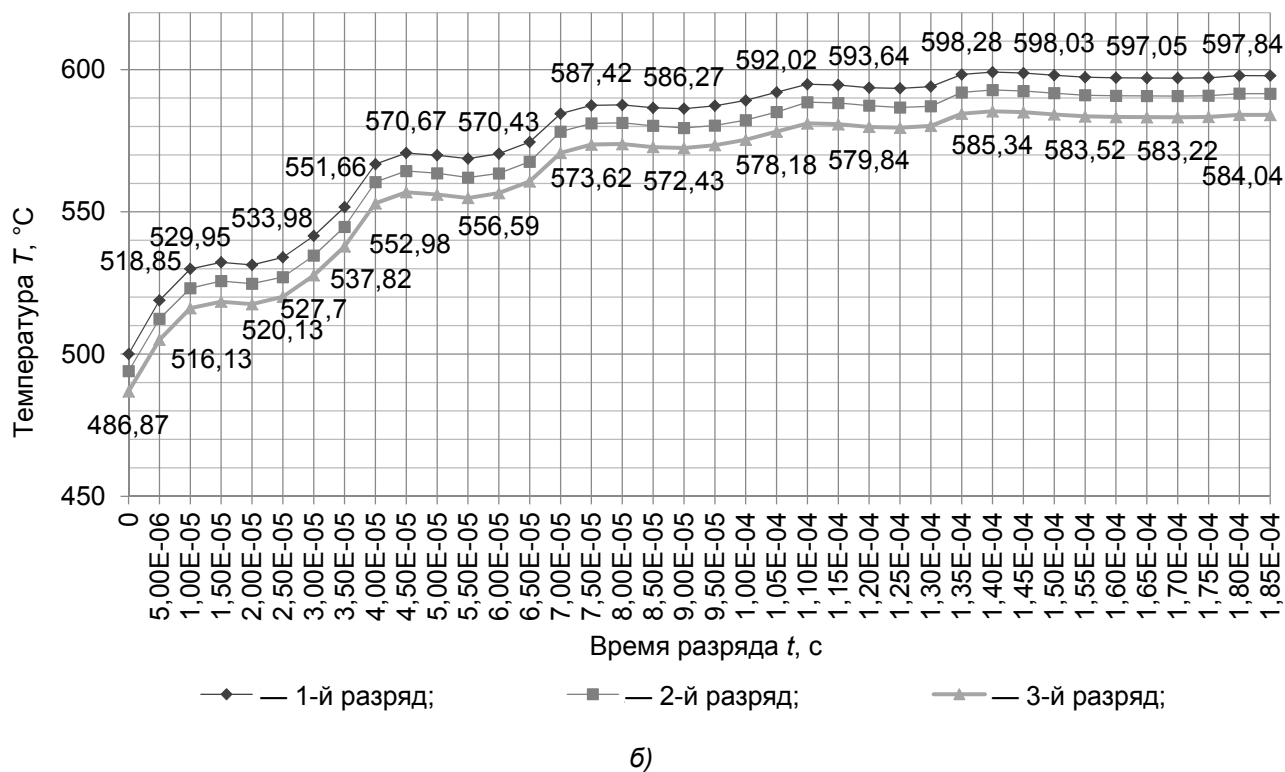
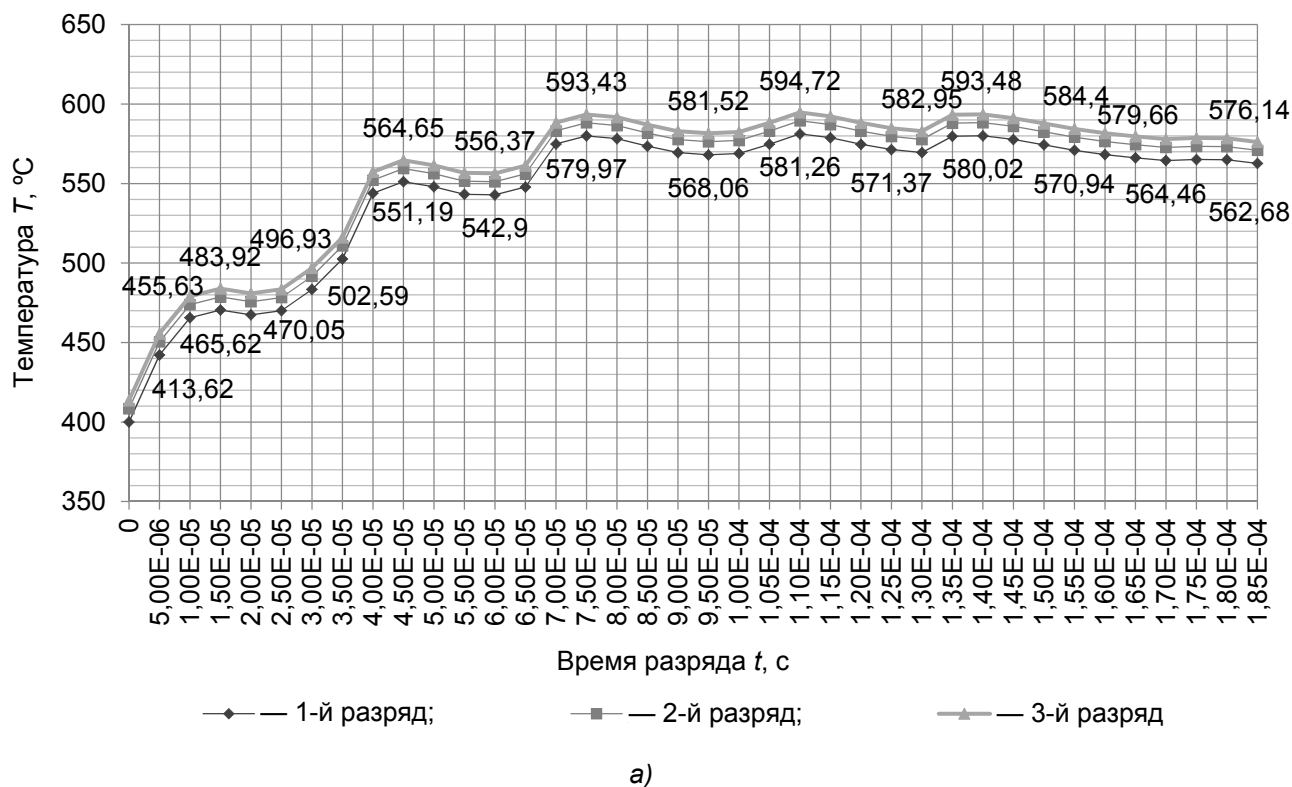


Рисунок 1. — Зависимость максимальной температуры нагрева от времени разряда:
 а — при полной загрузке сверла; б — при половинной загрузке сверла

Для тугоплавких и быстрорежущих сталей лучше придерживаться верхнего значения диапазона температуры рекристаллизации ($0,4...0,45T_{пл}$) из-за наличия тугоплавких легирующих элементов и их карбидов. При этом подогрев до температуры, меньшей температуры рекристаллизации ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$), и проведение несколько циклов обработки ($2...3$ разряда) являются более целесообразными, чем подогрев до температуры, близкой к температуре рекристаллизации ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$) с однократной обработкой разрядом в индукторе, так как цикличность воздействия давления магнитного поля и тепловой энергии индукционного тока приведет к более полному завершению процессов, происходящих при МИО (мартенситное превращение с образованием большего количества отпущенного мартенсита, движение дислокаций, формирование однонаправленной доменной структуры, увеличение дисперсности структуры, установление первичной стадии рекристаллизации).

При половинной загрузке сверла целесообразно осуществлять подогрев до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и обработку проводить одним импульсом (см. рисунок 1, б), так как последующие импульсы не приводят к увеличению температуры ввиду меньшего количества сообщенной тепловой энергии по сравнению с полной загрузкой сверла и большего остывания изделия за время заряда конденсаторной батареи.

На основании полученных результатов составлен алгоритм упрочнения МИО осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали диаметром $8...12$ мм в индукторе с рабочим диаметром 13 мм на магнитно-импульсных установках с запасаемой энергией до 10 кДж с предварительным нагревом:

- 1) выбрать для проведения обработки один из видов осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали (сверло, фреза, метчик, развертка и др.);
- 2) определить вариант МИО (I: торцевые режущие кромки; II: боковые режущие кромки);
- 3) обработку выполнить по выбранным параметрам (энергия, количество импульсов, температура предварительного нагрева), согласно таблице 1;
- 4) обеспечить выдержку эффективного зазора для проведения МИО между индуктором и изделием не более $\Delta_{\text{опт}} = 1...3$ мм, а также провести расчет минимально допустимого зазора в целях недопущения электрического пробоя между индуктором и изделием по формуле

$$\Delta_{\text{min}} = \frac{U}{E_{\text{пр}}},$$

где Δ_{min} — минимально допустимый зазор между индуктором и изделием;

U — напряжение, приложенное к индуктору;

$E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность диэлектрика (например, для воздуха — 2 кВ / мм , картона электротехнического — 20 кВ / мм).

Т а б л и ц а 1. — Эффективные режимы обработки осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали диаметром $8...12$ мм в индукторе с рабочим диаметром 13 мм на магнитно-импульсных установках с запасаемой энергией до 10 кДж с предварительным нагревом

Параметр	Вариант МИО	
	I: торцевые режущие кромки (сверло, концевая фреза, зенковка)	II: боковые режущие кромки (сверло, концевая фреза, зенкер, развертка, метчик)
Энергия обработки, кДж	9...10	7...10
Количество импульсов	1	2,3
Диаметр инструмента, мм	8; 9; 10; 11; 12	8; 9; 10; 11; 12

Окончание таблицы 1

Параметр	Вариант МИО	
	I: торцевые режущие кромки (сверло, концевая фреза, зенковка)	II: боковые режущие кромки (сверло, концевая фреза, зенкер, развертка, метчик)
Температура предварительного нагрева ($T_{\text{пред}} = T_{\text{рекр}} - T_1$), °C	488...493; 480...486; 472...477; 463...468; 455...460	422...458; 411...441; 398...427; 392...417; 385...405
Температура при воздействии первого разряда МИО (T_1), °C	82...87; 89...95; 98...103; 107...112; 115...120	117...153; 134...164; 148...177; 158...183; 170...190
Температура окончания процесса МИО (первичной рекристаллизации) ($T_{\text{рекр}}$), °C	540...610	540...610

Электрическая прочность твердых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого ее критического значения, когда наблюдается заметное снижение электрической прочности. В этом случае наступает электротепловой пробой, который связан с перенагревом изоляции в электрическом поле.

Тогда диапазон диаметров инструментов под конкретный индуктор выражается неравенством

$$D - 2\Delta_{\text{опт}} \leq d \leq D - 2\Delta_{\text{мин}},$$

где D — рабочий диаметр индуктора;

$\Delta_{\text{опт}}$ — эффективный зазор для проведения МИО (1...3 мм);

d — диаметр обрабатываемого инструмента;

$\Delta_{\text{мин}}$ — минимально допустимый зазор между индуктором и изделием;

5) выполнить все шаги упрочняющей МИО по выбранной схеме;

6) провести размагничивание инструмента, упроченного МИО, посредством выдержки на воздухе при комнатной температуре или внесением инструмента в слабое переменное магнитное поле с последующим уменьшением тока возбуждения до нуля [6].

Заключение. Обнаружено, что для варианта полной загрузки сверла из стали Р6М5 диаметром 10 мм в индукторе предварительный нагрев составляет порядка 330...400 °C, а последующая обработка требует 3 импульса (10 кДж в каждом) до температуры первичной рекристаллизации стали Р6М5 530...600 °C. При этом подогрев до температуры, меньшей температуры рекристаллизации (400 °C), и проведение несколько циклов обработки (2...3 разряда) являются более целесообразными, так как цикличность воздействия давления магнитного поля и тепловой энергии индукционного тока приведет к более полному завершению процессов, происходящих при МИО (мартенситное превращение с образованием большего количества отпущенного мартенсита, движение дислокаций, формирование однонаправленной доменной структуры, увеличение дисперсности структуры, установление первичной стадии рекристаллизации).

При половинной загрузке сверла в индуктор целесообразно осуществлять подогрев до 500 °C и обработку проводить одним импульсом, так как последующие импульсы не приводят к увеличению температуры ввиду меньшего количества сообщенной тепловой энергии по сравнению с полной загрузкой сверла и большого остывания изделия за время заряда конденсаторной батареи.

Составленный алгоритм упрочнения осевого режущего инструмента на установках МИО с предварительным нагревом указывает оптимальные режимы обработки (количество энергии и импульсов, температура предварительного нагрева) для двух вариантов загрузки режущего инструмента — полной и половинной, а также позволяет установить величину оптимального и минимально допустимого зазора между индуктором и обрабатываемым инструментом.

Список цитированных источников

1. Ansys [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ansys.com> . — Дата доступа: 03.10.2022.
2. Малеронок, В. В. Численное моделирование процесса магнитно-импульсной обработки осевого режущего инструмента в ANSYS / В. В. Малеронок, Д. А. Ционенко, А. В. Алифанов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. — 2022. — Т. 66, № 2. — С. 237—246.
3. Гордиенко, А. И. Инновационные разработки Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси / А. И. Гордиенко // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2014. — Вып. 2. — С. 34—39.
4. Ansoft. Maxwell 3D. Electromagnetic and Electromechanical Analysis [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf . — Дата доступа: 03.10.2022.
5. Transient Thermal Analysis in Ansys Mechanical Workbench: Dealing with Non-Physical Temperature Results [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://simutechgroup.com/transient-thermal-analysis-in-ansys-mechanical-workbench-dealing-with-non-physical-temperature-results> . — Дата доступа: 03.10.2022.
6. Каневский, И. Н. Неразрушающие методы контроля : учеб. пособие / И. Н. Каневский, Е. Н. Сальникова. — Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. — 243 с.

Поступила в редакцию 05.10.2022.

УДК 621.98.044.7

А. М. Милукова¹, кандидат технических наук,
А. В. Алифанов^{1, 2}, доктор технических наук, профессор,
А. Н. Матяс¹, О. А. Толкачева¹

¹Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 361 55 52, priemnaya@phti.by, annart@mail.ru

²Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, alifanov_aav@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НОЖЕЙ ИЗ СТАЛИ 30X13 ПОСЛЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

В статье изложены результаты исследования физических и механических свойств, а также микроструктуры поверхности коррозионно-стойкой стали 30X13. Эта марка стали широко применяется для изготовления режущих инструментов (в том числе хозяйственных ножей) и посуды. В целях повышения периода стойкости и качества режущего инструмента использована перспективная технология упрочняющей магнитно-импульсной обработки. Магнитно-импульсная обработка применяется на готовых металлических изделиях, а также для получения заготовок изделий путем формообразующих операций из листовых и трубных материалов (алюминиевые и стальные сплавы). В работе применены различные методы исследования свойств поверхности стали 30X13 до и после магнитно-импульсной обработки (металлографический анализ, экспресс-метод измерения импеданса скин-слоя, трибологические испытания).

Ключевые слова: режущий инструмент; ножи; режущая кромка; коррозионно-стойкая сталь; магнитно-импульсная обработка; свойства; упрочнение; стойкость.

Рис. 5. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

A. M. Miliukova¹, PhD in Technical Sciences,
A. V. Alifanov^{1, 2}, DSc in Technical Sciences, Professor,
A. N. Matsias¹, O. A. Tolkachova¹

¹State Scientific Institution "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", 10 Academician Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 361 55 52, priemnaya@phti.by, annart@mail.ru

²Educational Institution "Baranovichi State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, alifanov_aav@mail.ru

STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF KNIVES MADE OF 30X13 STEEL AFTER MAGNETIC PULSE TREATMENT

The article presents the research results of physical and mechanical properties as well as the surface microstructure of corrosion-resistant steel 30X13. This steel grade is widely used for manufacturing cutting tools (utility knives) and houseware. In order to increase the durability period and the cutting tool quality, the perspective technology of hardening magnetic-pulse treatment has been used. The magnetic-pulse treatment is applied at finished metal products as well as for obtaining of the product billets by forming operations from sheet and piping materials (aluminum and steel alloys). The applied research methods of surface properties of 30X13 steel before and after the magnetic-pulse treatment (metallographic analysis, rapid method of measuring voltage in the skin layer, tribological tests) are given.

Key words: cutting tool; knives; cutting edge; corrosion-resistant steel; magnetic pulse treatment; properties; hardening; resistance.

Fig. 5. Table 1. Ref.: 11 titles.

Введение. Низкая износостойкость режущей кромки режущего инструмента приводит к необходимости частой заточки. При эксплуатации не следует доводить режущий инструмент до износа, превышающего установленные оптимальные значения, которые принимают за критерий износа. Необходимо следить за состоянием режущей части инструмента и своевременно его затачивать. Однако наибольший износ ножей происходит в результате очень частой заточки, что приводит к уменьшению их долговечности [1; 2]. На характер износа ре-

жущих кромок лезвия ножа влияет множество факторов. К основным факторам можно отнести следующие: физико-механические свойства материала режущего инструмента; материал, который подвергается резанию; режимы резания; параметры инструмента и исходное состояние режущих кромок.

Известно множество способов повышения эксплуатационных характеристик режущего инструмента — от применения дорогих высоколегированных сталей и сплавов и оригинальных конструкций до использования трудоемких и экологически грязных технологий: азотирование, цементация, нанесение различных покрытий и др.

В статье [3] изложены результаты сравнительных испытаний в производственных условиях дереворежущих ножей (сталь 6ХС) торцово-конических фрез фрезерно-брусующего станка, которые были изготовлены с использованием термической обработки, термической обработки в сочетании с магнитно-импульсной обработкой (далее — МИО), термической обработки с ионно-плазменным азотированием. Поверхностное упрочнение готовых ножей с использованием технологии МИО позволило получить технологическую стойкость, превосходящую на 20 % стойкость ножей, изготовленных по другим технологиям, и ножей импортного производства.

Упрочняющую МИО применяют на готовых металлических изделиях. Ее осуществляют воздействием импульсами электромагнитного поля определенной напряженности в специальной магнитно-импульсной установке (МИУ) с использованием индукторной системы и с возможностью управления технологическими режимами импульсной обработки. Известно, что МИО наиболее эффективна при воздействии на металлические поверхности с различными дефектами, появляющимися в результате технологических операций (термических, механических). Дефекты кристаллической решетки частично устраняются, выравниваются остаточные внутренние напряжения, в некоторых материалах меняется структурно-фазовый состав. При воздействии импульсов сильных магнитных полей может измельчаться структура поверхностного слоя металлического материала на глубину до 300 мкм; уменьшаются остаточные внутренние напряжения, соответственно, снижается трещинообразование, что обеспечивает повышение прочности изделий и увеличивает их срок эксплуатации. Упрочнение методом МИО непосредственно связано с неоднородностью материала стали, локальным выделением теплоты вблизи границ зерен при протекании индукционных токов, деформационными и магнитоотрицательными эффектами [4—6].

Многочисленные эксперименты и испытания в лабораторных условиях и на производстве показывают, что в результате МИО разнообразные инструменты, применяемые в деревообрабатывающей, машиностроительной, пищевой отраслях промышленности как на предприятиях Республики Беларусь, так и за рубежом, повышают свои эксплуатационные показатели до двух раз [7]. Известно, что применение МИО по сравнению с известными методами упрочнения имеет ряд преимуществ: не используется экологически небезопасное оборудование и материалы, геометрические параметры упрочненных изделий не меняются, при этом метод позволяет с высокой эффективностью повысить качество поверхности, что очень важно для режущего инструмента [8—11]. Использование метода МИО не предусматривает применение каких-либо покрытий или имплантации химических элементов, что обеспечивает соответствие необходимым гигиеническим нормам и безопасную работу режущего инструмента.



Рисунок 1. — Заготовки ножа универсального НУС-1 (ОАО «Красный металлист»)

Материалы и методы исследования. В целях проведения исследований микроструктуры, физических и механических свойств поверхности использованы заготовки ножей универсальных (рисунок 1), изготовленных из коррозионно-стойкой стали.



Рисунок 2. — Установка МИП-18 с запасаемой энергией в 15 кДж

Заготовки ножа разрезали на части в целях изготовления образцов различных размеров для проведения исследований: химического состава стали, твердости и микротвердости, микроструктуры, износостойкости и др.

Анализ химического состава на сертифицированном атомно-эмиссионном спектрометре СРЕКТРОТЕСТ показал, что заготовки ножей изготовлены из коррозионно-стойкой стали 30X13.

В целях повышения эффективности упрочнения коррозионно-стойких сталей использовалась разработанная в Физико-техническом институте НАН Беларуси полуавтоматическая МИУ МИП-18, представленная на рисунке 2, с максимально запасаемой энергией в 15 кДж. По сравнению с существующими МИУ она обладает меньшей длительностью и большей частотой импульса, что, соответственно, повышает коэффициент полезного действия. Так, МИП-18 позволяет увеличить эффективность магнитного воздействия на инструмент из коррозионно-стойких и тугоплавких марок стали.

Упрочнение режущей кромки плоского ножа толщиной 1 мм и длиной 300 мм проводили с использованием плоского индуктора диаметром 140 мм.

На металлографическом комплексе МГК-1 с оптическим микроскопом проведены исследования изменений микроструктуры поверхностного слоя подготовленных шлифов образцов. Было проведено травление реактивом Nital и фотографирование поверхности образцов в исходном состоянии и после МИО.

Проведены измерения микротвердости HV поверхности на компьютеризированном микротвердомере Duramin 5 (с погрешностью измерений 2 %).

Сравнительное исследование износостойкости проводили на машине трения TRIBO-3.

Результаты исследования и их обсуждение. В целях исследования влияния МИО на образцы из коррозионно-стойкой стали 30X13 применили энергию воздействия 10 кДж с различным количеством импульсов (таблица 1).

С использованием вышеуказанного оборудования проведены исследования образцов стали 30X13 до и после МИО в целях изучения изменения их физических и механических свойств и определения оптимального технологического режима МИО, который существенно увеличит долговечность режущих ножей.

Металлографические исследования показали на ряде образцов изменения микроструктуры поверхностного слоя после МИО (рисунок 3).

Микроструктура поверхности поперечного сечения образцов, обработанных при 10 кДж, показывает образование модифицированного уплотненного слоя с мелкодисперсной структурой глубиной до 40 мкм (см. рисунок 3, б).

Т а б л и ц а 1. — Технологические режимы МИО образцов стали 30X13

Маркировка образца	Энергия воздействия, кДж	Длительность воздействия, количество импульсов
1	10	1
2	10	2
3	10	3
4	10	4

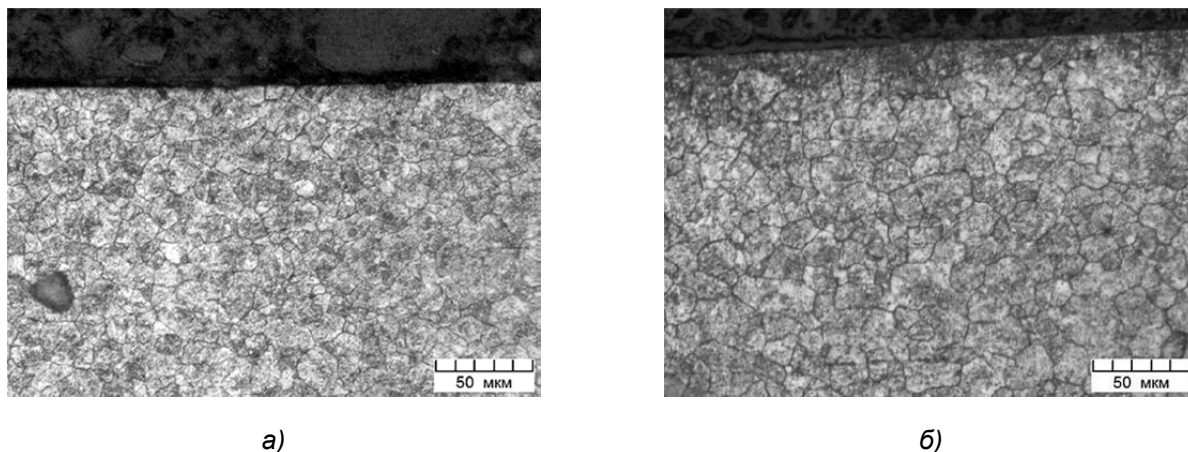


Рисунок 3. — Микроструктура поверхностного слоя образца стали 30X13 до (а) и после МИО (б) по режиму 4 импульса с энергией 10 кДж

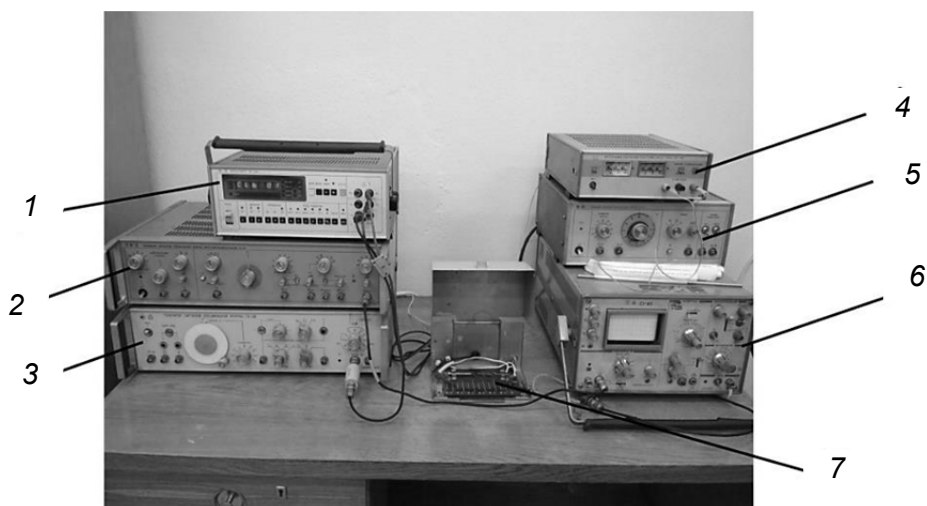
Среднее значение микротвердости HV_{50} поверхности до обработки было 4,7 ГПа, после МИО при 3 импульсах стало 6,4 ГПа (повышение на 35 %), а при 4 импульсах — 4,97 ГПа (относительно начального значения повышение на 5 %). Следовательно, оптимальным режимом МИО для повышения микротвердости является режим 3 импульса с энергией 10 кДж, а при 4 импульсах происходит перегрев образца и, соответственно, снижение микротвердости.

Сравнительное исследование износостойкости на машине трения стальным шариком диаметром 6 мм при нагрузке 20 Н со скоростью 155 мм / с необработанного образца и двух образцов после МИО (4 импульса 10 кДж) показало, что коэффициент трения увеличился на 50 %. Это свидетельствует об ухудшении трибологических свойств под воздействием примененного режима МИО, который привел к перегреву образца, как было указано выше.

В целях определения рационального технологического режима МИО применяли экспресс-метод исследования свойств поверхностного слоя, основанный на проявлении скин-эффекта при прохождении через металлический образец тока высокой частоты от 1,00 до 0,05 МГц. В результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется по сечению не равномерно, а преимущественно в поверхностном слое до 300 мкм. Поскольку при магнитно-импульсном упрочнении происходит воздействие именно на поверхность изделия, то анализ результатов скин-эффекта позволит говорить о качестве упрочнения (однородность, балл зерна и др.). На разработанном и внедренном в лаборатории магнитно-импульсных технологий электроизмерительном комплексе, представленном на рисунке 4, был реализован вышеуказанный метод.

Полученные экспресс-методом результаты представлены на рисунке 5. На графиках показано изменение импеданса (напряжения) при прохождении синусоидального тока по поверхности до и после МИО на различной глубине.

Из графиков зависимости напряжения от количества электромагнитных импульсов с энергией 10 кДж каждый (см. рисунок 5) видно, что после первого импульса происходит небольшое уменьшение напряжения, что говорит о снижении электросопротивления при прохождении синусоидального тока высоких частот в связи с уменьшением количества различных структурных дефектов и снижением остаточных внутренних напряжений. После второго импульса напряжение и, соответственно, электросопротивление возросли по причине мгновенного появления мелких зерен и увеличения количества межзеренных границ, что соответствует периоду первичной рекристаллизации. Однако уже после третьего импульса и последующих импульсов напряжение и электросопротивление уменьшились в связи с быстрым увеличением размеров зерен и уменьшением количества межзеренных границ, что свойственно периоду вторичной рекристаллизации.



1 — генератор сигналов специальной формы Г6-28; 2 — генератор сигналов специальной формы многофункциональный Г6-34; 3 — вольтметр В7-46; 4 — источник питания постоянного тока Б5-43; 5 — генератор сигналов специальной формы Г6-37; 6 — осциллограф С1-65; 7 — измерительная ячейка

Рисунок 4. — Электроизмерительный комплекс для исследования влияния режимов МИО на изменение импеданса (напряжения)

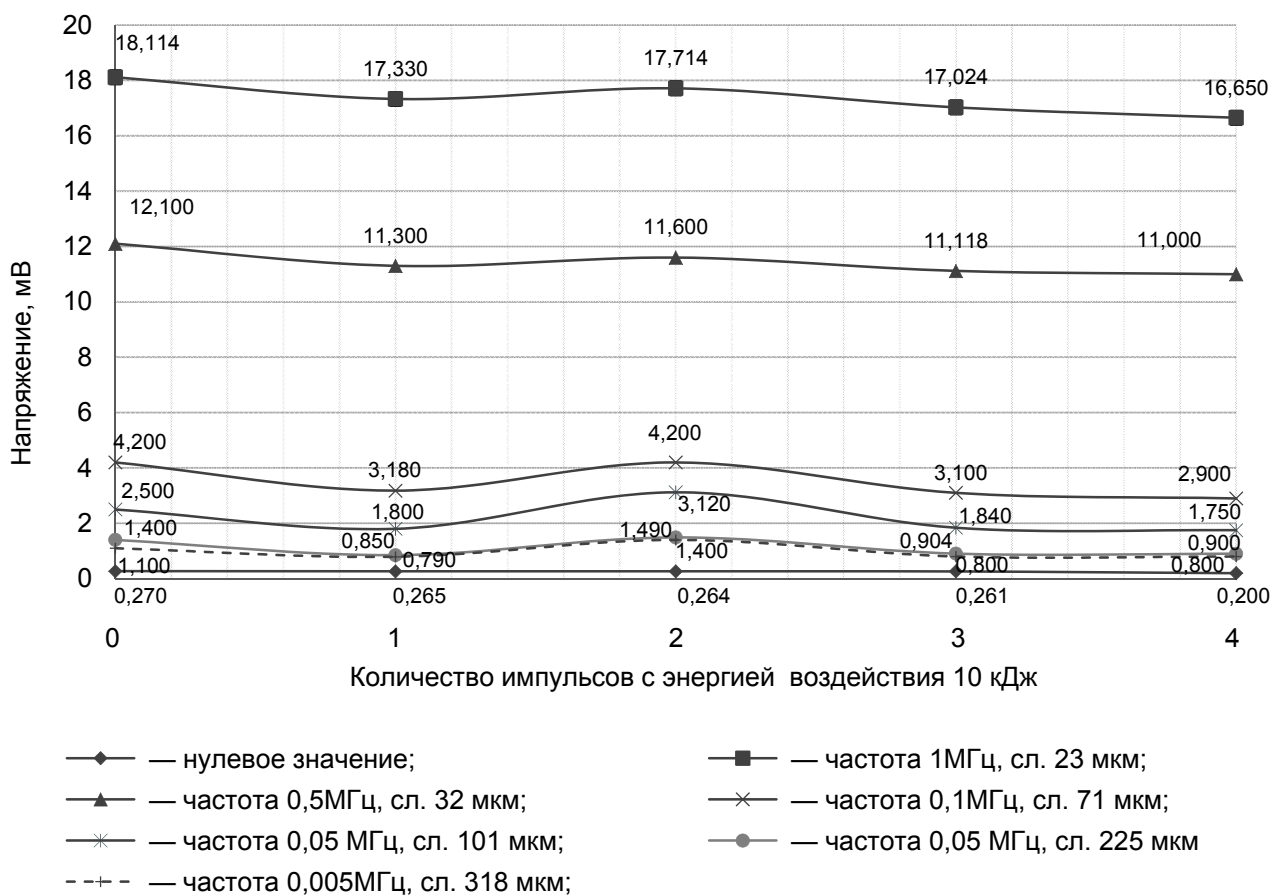


Рисунок 5. — Зависимость потенциала от длительности воздействия (при прохождении синусоидального тока по поверхности до и после МИО)

Полученные результаты показывают, что оптимальным режимом МИО является 2 импульса с энергией 10 кДж, так как именно мелкозернистая однородная структура обеспечивает поверхностные слои обрабатываемых изделий (в данном случае ножей из стали 30X13) максимальной прочностью и износостойкостью.

На основании проведенных исследований и полученных данных можно определить оптимальный технологический режим упрочнения МИО ножа НУС-1 из коррозионно-стойкой стали 30X13 с режущей кромкой, заточенной с двух сторон: с энергией воздействия 10 кДж, 2 импульса с каждой стороны с переворотом. Эти данные позволят разработать технологию упрочнения режущих инструментов, изготовленных из коррозионно-стойкой стали 30X13.

Заключение. Результаты проведенных исследований микроструктуры, физических и механических свойств поверхности коррозионно-стойкой стали 30X13 показали, что под воздействием МИО среднее значение микротвердости HV_{50} поверхности составило 6,4 ГПа (повышение на 35 %). На микроструктуре поверхностного слоя обнаружено образование модифицированного уплотненного слоя глубиной до 40 мкм с мелкодисперсной структурой. Полученные результаты показывают, что оптимальным режимом МИО является 2 импульса с энергией 10 кДж, так как именно мелкозернистая однородная структура обеспечивает поверхностные слои обрабатываемых изделий (в данном случае ножей из стали 30X13) максимальной прочностью и износостойкостью.

Список цитированных источников

1. Башков, В. М. Испытание режущего инструмента на стойкость / В. М. Башков, П. Г. Кацев. — М. : Машиностроение, 1985. — 136 с.
2. Гринь, С. А. Улучшение эксплуатационных характеристик куттеров путем создания новой конструкции ножей / С. А. Гринь, О. М. Филенко, А. А. Телюк // Вісн. НТУ «ХПІ». Сер.: «Нові рішення в сучасних технологіях». — Харків: НТУ «ХПІ». — 2012. — № 66 (972). — С. 14—19.
3. Динамика технологической стойкости ножей с модифицированной поверхностью фрезерно-брусующей машины в условиях производства / И. К. Клепацкий [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. ; редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2020. — Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки С. 97—104.
4. Алифанов, А. В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. — Витебск : ВГТУ, 2017. — Гл. 2. — С. 31—52.
5. Малыгин, Б. В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
6. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // Вес. Нац. акад. наук. Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
7. Милюкова, А. М. Прогрессивные технологии упрочнения магнитно-импульсным воздействием металлических изделий для различных отраслей промышленности / А. М. Милюкова // Технологии. Оборудование. Качество : сб. докл. симп. 2 семинара в рамках Беларус. промышл. форума 2018, Минск, 29 мая — 1 июня 2018 г. / В. С. Харитончик [и др.]. — Минск : Бизнесофсет, 2018. — С. 164—168.
8. Особенности влияния электромагнитного импульсного поля на тонколистовые стальные изделия / А. М. Милюкова [и др.] // Сб. науч. тр. ФТИ НАН Беларуси : в 3 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2018. — Кн. 1. — С. 182—189.
9. Улучшение эксплуатационных характеристик стальных режущих инструментов сложного профиля, упрочнённых комбинированной магнитно-импульсной обработкой / А. М. Милюкова [и др.] // Механ. оборудование металлург. заводов. — 2018. — № 2. — С. 17—22.
10. Матяс, А. Н. Повышение работоспособности куттерных ножей методом магнитно-импульсной обработки / А. Н. Матяс, А. М. Милюкова, Н. В. Бурносов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / редкол.: А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. — Минск : ФТИ НАН Беларуси. — 2022. — Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. — С. 151—158.
11. Матяс, А. Н. Исследование влияния магнитно-импульсного воздействия на шероховатость поверхности инструментальной стали / А. Н. Матяс, А. И. Горчанин, А. М. Милюкова // Сб. науч. тр. ФТИ НАН Беларуси. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2019. — С. 246—254.

Поступила в редакцию 10.10.2022.

УДК 531.312+531.213:621.926.9

У. А. Патапаў¹, С. І. Русан², кандыдат тэхнічных навук, дацэнт,Л. А. Сівачэнка³, доктар тэхнічных навук, прафесар^{1,2}Установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт», вул. Войкава, 21, 225404 Баранавічы, Рэспубліка Беларусь, ¹+375 (29) 225 76 26, vladimir-potapov-1990@mail.ru ,²+375 (44) 466 75 46, rusan33@mail.ru³Міждзяржаўная адукацыйная ўстанова вышэйшай адукацыі «Беларуска-Расійскі ўніверсітэт», пр-т Міру, 43, 212000 Магілёў, Рэспубліка Беларусь, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru

КАМБІНАВАНЫ МЕТАД СІЛОВОГА АНАЛІЗУ ПРЫВАДНОГА МЕХАНІЗМА ЛАНЦУЖНАГА АГРЭГАТА

Аб'ектам даследавання ў артыкуле з'яўляецца прывадны механізм аднаго з перспектывных шматфункцыянальных агрэгатаў, якія называюцца ланцужнымі (па назве іх рабочых органаў — ланцужных палотнаў). У пошуках альтэрнатывы аўтары адышлі ад класічнага метаду, які заснаваны на прынцыпе Даламбера, ці агульным ураўненні дынамікі, а выкарысталі камбінаваны метада: частка невядомых сілавых фактараў знаходзіцца з дапамогай прынцыпу Даламбера—Лагранжа, другая — класічным (ці тыпавым) метадам кінэстатыкі. У выніку для вызначэння патрэбных сілавых фактараў атрымалі ўраўненні з адным невядомым. Камбінаваным метадам знойдзены ўсе неабходныя ў сілавым аналізе механічныя характарыстыкі чатырохзвенніка: ураўнаважвальны момант на крывашыпе і сілы ўзаемадзеяння ва ўнутраных і знешніх кінематычных парах. Дадзены метада можа эфектыўна прымяняцца і ў механіцы матэрыялаў, у прыватнасці, для разліку бэляк, ферм, рам.

Ключавыя словы: чатырохзвенны механізм; ланцужны агрэгат; сілавы аналіз; прынцып Даламбера—Лагранжа; метада кінэстатыкі; ураўнаважвальны момант; кінематычныя пары; сілы ўзаемадзеяння.

Рис. 9. Бібліягр.: 8 назваў.

V. A. Potapov¹, S. I. Rusan², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,L. A. Sivachenko³, DSc in Technical Sciences, Professor^{1,2}Educational Institution “Baranovich State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranovich, the Republic of Belarus, ¹+375 (29) 225 76 26, vladimir-potapov-1990@mail.ru ,²+375 (44) 466 75 46, rusan33@mail.ru³Inter-State Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University”, 43 Mira Ave., 212000 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru

COMBINED METHOD OF FORCE ANALYSIS OF THE CHAIN UNIT DRIVE MECHANISM

The object of study in the article is the drive mechanism of one of the promising multifunctional units, called chain (by the name of their working bodies — chain canvases). In the search of an alternative, the authors moved away from the classical method based on the d'Alembert principle, or the general equation of dynamics, and used a combined method — some of the unknown force factors are found using the d'Alembert—Lagrange principle, the other — by the classical (or typical) kinetostatics method. As a result, equations with one unknown were obtained to determine the necessary force factors. The combined method was used to find all the mechanical characteristics of the four-link mechanism necessary in the force analysis: the balancing moment on the crank and the interaction forces in the internal and external kinematic pairs. This method can be effectively applied in the mechanics of materials, in particular, for the calculation of beams, trusses and frames.

Key words: four-link mechanism; chain unit; force analysis; d'Alembert—Lagrange principle; kinetostatic method; balancing moment; kinematic pairs; interaction forces.

Fig. 9. Ref.: 8 titles.

Уводзіны. Ланцужныя агрэгаты адносяцца да новага віду машын, якія могуць быць выкарыстаны для перапрацоўкі сыравінных матэрыялаў, такіх як мел, гліна, мергель і іншых неаднародных і складаных па структуры і ўласцівасцях матэрыялаў [1; 2]. У якасці прываднога механізма ў іх выкарыстоўваецца чатырохзвеннік (рысунак 1).

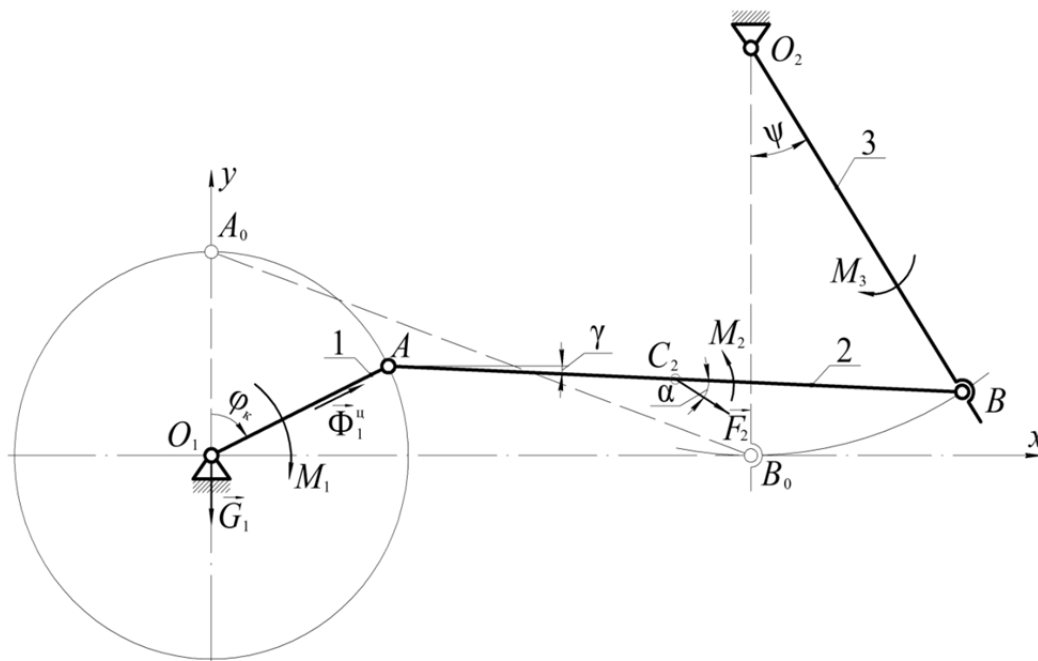


Рисунок 1. — Схема механизма с действующими на него внешними силами

Паводле тэрміналогіі, прынятай у тэарэтычнай механіцы і тэорыі механізмаў і машын, звенні механізма маюць наступныя назвы: 1 — кривашып, 2 — шатун, 3 — каромысел. Восі вярчэння O_1 , O_2 разам утвараюць нерухомае зв'язно, якое называецца ў тэорыі механізмаў і машын стойкай. Рухомыя звенні злучаны паміж сабою і са стойкай пры дапамозе ідэальных шарніраў A , B , O_1 , O_2 (утвараюць кінематычныя пары без трэння). У працэсе сілавого аналізу механізма будзем вызначаць ураўнаважвальную сілу (ці адпаведны ёй момант), прыкладзеную да кривашыпа падчас руху механізма, і рэактыўныя сілы ўзаемадзеяння ў шарнірах.

Матэрыялы і метады даследавання. Камбінаваны метады сілавого аналізу. Найбольш распаўсюджаным метадам сілавого аналізу механізмаў у практыцы праектавання і ў вучэбным працэсе застаецца даўно распрацаваны метады кінетастатикі, заснаваны на прынцыпе Даламбера. Паводле яго да дзеючых на механізм механічных сіл далучаюцца сілы інерцыі, далей задача дынамікі рашаецца, як задача статыкі. Безальтэрнатыўнае прымяненне метаду кінетастатикі дазваляе лічыць яго тыпавым (ці класічным). Агульнавядомыя недахопы тыпавага метаду: неабходнасць рашэння сістэм алгебраічных ураўненняў і звязаная з гэтым павышаная верагоднасць памылак.

У працэсе пошуку альтэрнатывы ва ўстанове адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» быў распрацаваны арыгінальны перспектыўны метады сілавого аналізу на падставе агульнага ўраўнення дынамікі, інакш — прынцыпу Даламбера—Лагранжа. Яго сутнасць і перавагі падрабязна выкладзены ў артыкуле [3]. Новы метады можа эфектыўна прымяняцца і ў механіцы матэрыялаў, у прыватнасці, для разліку бэляк, ферм, рам. У нашым даследаванні вышэй апісанага механізма выкарыстоўваецца камбінаваны метады — частка невядомых сілавых фактараў знаходзіцца з дапамогай прынцыпу Даламбера—Лагранжа, другая — тыпавым метадам кінетастатикі. Пры гэтым захоўваецца згаданая вышэй перавага першага метаду — кожная невядомая сіла вызначаецца з аднаго ўраўнення. Методыка даследавання выкладаецца ў працэсе сілавого аналізу чатырохзвенніка. Лічым, што яго ўласцівасці адпавядаюць вымогам, якія накладваюцца на даследуемую механічную сістэму: усе яе сувязі ідэальныя, стацыянарныя, двухбаковыя.

Вынікі даследавання і іх абмеркаванне. Знешняе сілавое ўздзеянне на звенні прываднога механізма. Сілавому аналізу папярэднічае кінематычны разлік механізма [4], у выніку якога вызначаюцца паскарэнні, неабходныя для вылічэння сіл інерцыі, што дзейнічаюць на звенні механізма. Сілы інерцыі змяняюцца па велічыні і напрамку, гэта значыць з'яўляюцца функцыямі вугла павароту φ_k крывашыпа. У сілавым разліку яны падсумоўваюцца з пастаяннымі сіламі цяжару звенняў.

На рысунку 1 знешнія сілы паказаны ў падсумаваным выглядзе. Мяркуецца, што крывашып 1 забяспечаны процівагай. Гэта азначае, што адцэнтрабежная сіла інерцыі Φ_1^n ураўнаважана такой жа сілай процілеглага напрамку, а лінія дзеяння сілы цяжару G_1 праходзіць праз вось вярчэння O_1 і ўраўнаважваецца рэакцыяй апоры (на рысунку не паказана). Неўраўнаважаным на крывашыпе застаецца толькі вярчальны момант M_1 рухавіка. Але і ён падчас усталяванага раўнамернага вярчэння крывашыпа ўраўнаважваецца сіламі, прыкладзенымі да іншых звенняў. Сілавое ўздзеянне на шатун 2 прыводзіцца да сілы F_2 , прыкладзенай у яго цэнтры цяжару C_2 , і моманту M_2 . Пры гэтым

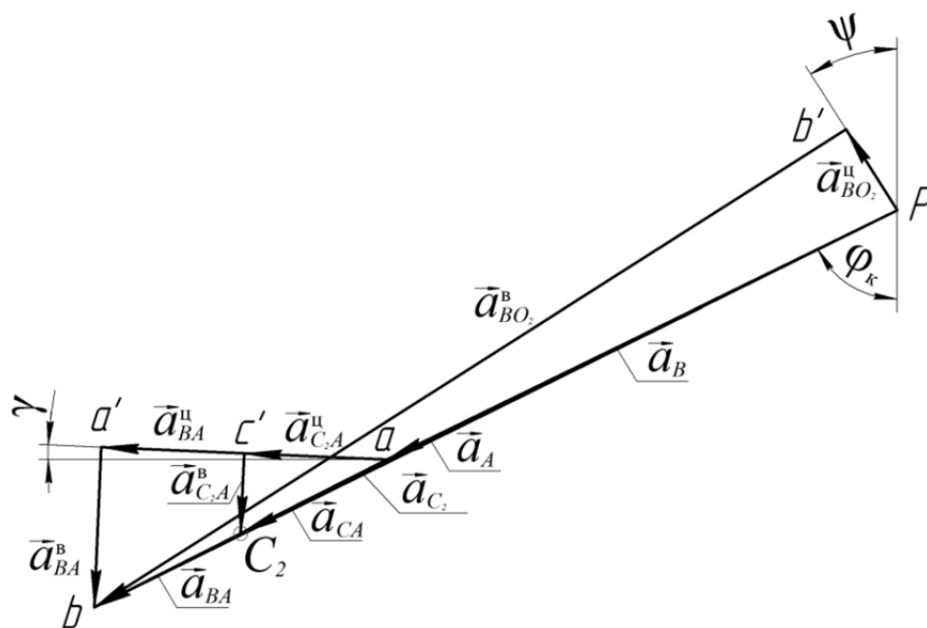
$$\vec{F}_2 = \vec{G}_2 + \vec{\Phi}_2,$$

дзе G_2 — сіла цяжару шатуна;

$\vec{\Phi}_2 = -m_2 \vec{a}_{C_2}$ — яго галоўны вектар сіл інерцыі (m_2 — маса шатуна; a_{C_2} — паскарэнне цэнтры мас C_2 , вызначанага раней у кінематычным аналізе механізма) [4].

Пажадана набліжаная праверка паскарэння a_{C_2} выконваецца графічна з дапамогай вектарнай дыяграмы (рысунак 2), пабудаванай на падставе наступных формул:

$$\vec{a}_{C_2} = \vec{a}_A + \vec{a}_{C_2A}^B + \vec{a}_{C_2A}^n; \quad \vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{BA}^B + \vec{a}_{BA}^n; \quad \vec{a}_B = \vec{a}_{BO_2}^B + \vec{a}_{BO_2}^n.$$



Рысунак 2. — Вектарная дыяграма для праверкі паскарэння a_{C_2}

Тут a_A, a_B, a_{C_2} — паскарэнні пунктаў A, B, C_2 ; $a_{C_2A}^B, a_{BA}^B, a_{BO_2}^B$ — вярчальныя паскарэнні пунктаў C_2 і B адносна цэнтраў A і O_2 ; $a_{C_2A}^H, a_{BA}^H, a_{BO_2}^H$ — дацэнтрабежныя паскарэнні тых жа цэнтраў. На дыяграме P — яе адвольна выбраны полюс; φ_k — вугал павароту крывашыпа. Вуглы ψ і γ вызначаюцца ў кінематычным аналізе механізма [4]. Каромысел 3 разам з ланцужнымі палотнамі і штангай уяўляе прасторавую канструкцыю, якая ў разліковай схеме замяняецца на плоскую. Знешняе ўздзеянне на каромысел дакладна паказана на рысунку 3 і вызначаецца шматкампанентным момантам M_3 (гл. рысунак 1):

$$M_3 = -M_{O_2}(\vec{G}_3) - M_{O_2}(\vec{G}_{ш}) + M_{O_2}(\vec{\Phi}_k^B) + M_{O_2}(\vec{\Phi}_{ш}^B) - M_{O_2}(\vec{F}_л') - M_{O_2}(\vec{F}_л''),$$

дзе $G_3, G_{ш}$ — сілы цяжару каромысла і штангі;

$\Phi_k^B, \Phi_{ш}^B$ — раўнадзейная размеркаваных па даўжыні каромысла тангенцыяльных (вярчальных) сіл інерцыі і тангенцыяльная сіла інерцыі штангі;

$F_л', F_л''$ — сілы ўзаемадзеяння каромысла з левым і правым ланцужнымі палотнамі, прымацаванымі ў пункце Л (які можа сумяшчацца з пунктам Ш).

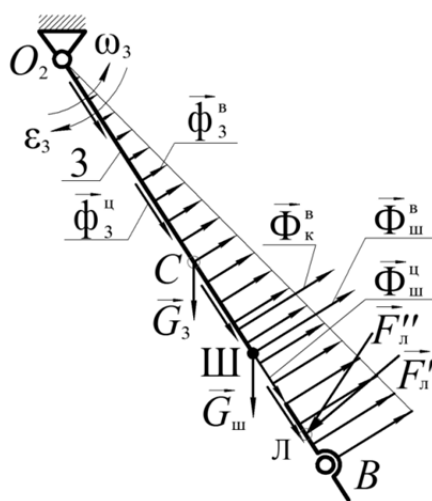
Вызначэнне ўраўнаважвальнага моманту на крывашыпе. Паводле тэрміналогіі, усталяванай у тэорыі механізмаў і машын [5; 6], момант на крывашыпе, неабходны для яго раўнамернага вярчэння падчас руху механізма, называюць ураўнаважвальным. Яго велічыня залежыць ад усіх сіл, што дзейнічаюць на звенні механізма. Запісваем агульнае ўраўненне дынамікі ў скарачаным выглядзе:

$$\sum_{i=1}^n \delta A_i = 0, \quad (1)$$

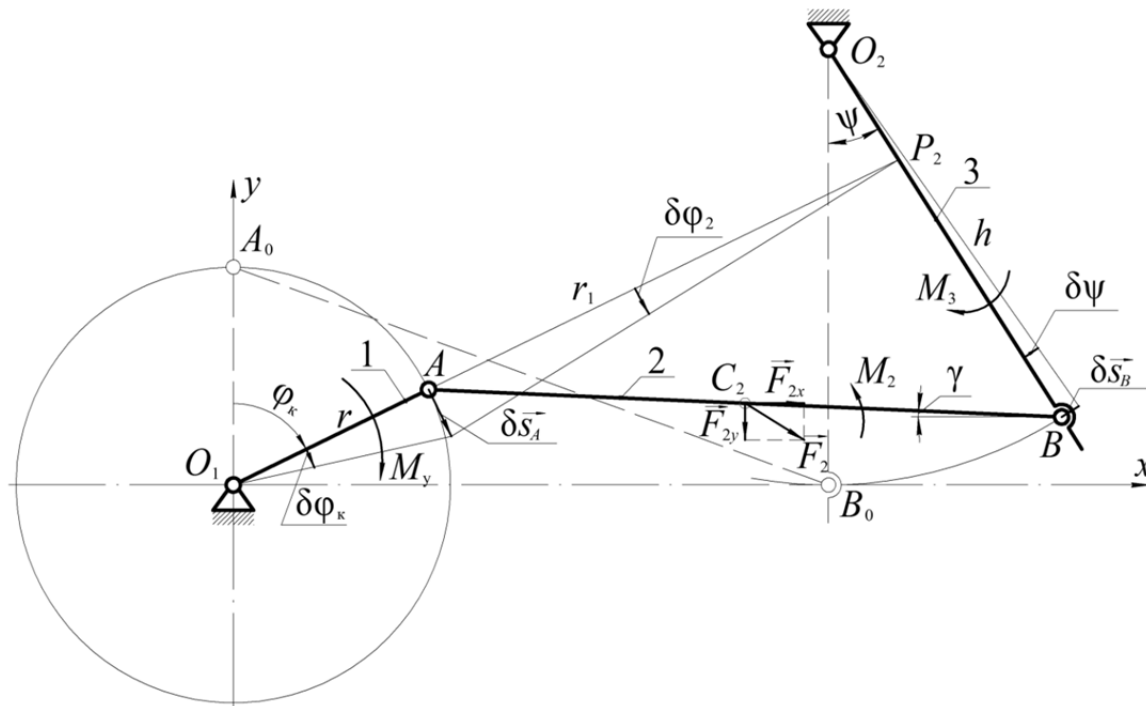
дзе n — колькасць сіл, што дзейнічаюць на звенні механізма ці разглядаемай яго часткі;

δA_i — магчымая элементарная работа сілы F_i (ці моманту M_i), прыкладзенай да звяна механізма.

Каб скласці ўраўненне (1), прымяняем методыку прынцыпу магчымых перамяшчэнняў [3; 7; 8]. Далей усюды ўлічваем, што звенні 1, 3 выконваюць вярчальны рух, звяно 2 — плоскапаралельны. Рух звяна 2 можна разглядаць і як вярчальны вакол рухомага цэнтра павароту P_2 (рысунак 4).



Рысунак 3. — Знешнія нагрузкі на каромысел

Рисунок 4. — Разлікова схема для визначення M_y

Для визначення моменту M_y у якості незалежного припустимо вуглове переміщення $\delta\varphi_k$ криваша. Магчимі переміщенні інших зв'язків і кінематичних пар абазначимо як $\delta\varphi_2$, $\delta\psi$, δs_A , δs_B . Запишемо урівняння (1) у розгорнутому вигляді:

$$M_y \delta\varphi_k + M_{P_2} (\vec{F}_{2x}) \delta\varphi_2 + M_{P_2} (\vec{F}_{2y}) \delta\varphi_2 + M_2 \delta\varphi_2 - M_3 \delta\psi = 0. \quad (2)$$

Користаючись рисунком 4, виражаємо магчимі переміщенні $\delta\varphi_2$, $\delta\psi$ праз незалежне $\delta\varphi_k$:

$$\delta\varphi_2 = \delta s_A / AP_2 = r \delta\varphi_k / r_1 = c_1 \delta\varphi_k; \quad \delta\psi = \delta s_B / h = \delta\varphi_2 h_1 / h = h_1 r \delta\varphi_k / r_1 h = c_2 \delta\varphi_k,$$

дзе $r_1 = AP_2$; $c_1 = r / r_1$; $h_1 = BP_2$; $c_2 = r h_1 / r_1 h$.

Підставляємо атримані $\delta\varphi_2$, $\delta\psi$ ва урівняння (2) і вносимо за дужки $\delta\varphi_k$:

$$\left[M_y + c_1 M_{P_2} (\vec{F}_{2x}) + c_1 M_{P_2} (\vec{F}_{2y}) + c_1 M_2 - c_2 M_3 \right] \delta\varphi_k = 0. \quad (3)$$

Паколькі ў роўнасці (3) $\delta\varphi_k \neq 0$, то

$$M_y + c_1 M_{P_2} (\vec{F}_{2x}) + c_1 M_{P_2} (\vec{F}_{2y}) + c_1 M_2 - c_2 M_3 = 0.$$

Адсюль

$$M_y = -c_1 M_{P_2} (\vec{F}_{2x}) - c_1 M_{P_2} (\vec{F}_{2y}) - c_1 M_2 + c_2 M_3.$$

Пры выліченні адлеглостей r_1 , h_1 вуглы γ і ψ запазычаюцца з кінематичного разліку [4].

Визначення сил взаємодіяння в внутрішніх кінематичних парах A , B . Сувязі A і B накладвають на взаємне переміщення зв'язок, які являють собою злучення, по два обмеження. Тому їх називають двохвалентними. На розрізових схемах (рисунки 5—8) обмеження будемо моделювати короткими взаємнаартаганальними стрижнями. Шукаємо сили взаємодіяння в кінематичних парах роїння реакціям даних стрижнів.

На рисунку 5 для визначення сил взаємодіяння в шарнірі A розглядаємо уможовнювальну праву (адносно шарніра A) частку механізму.

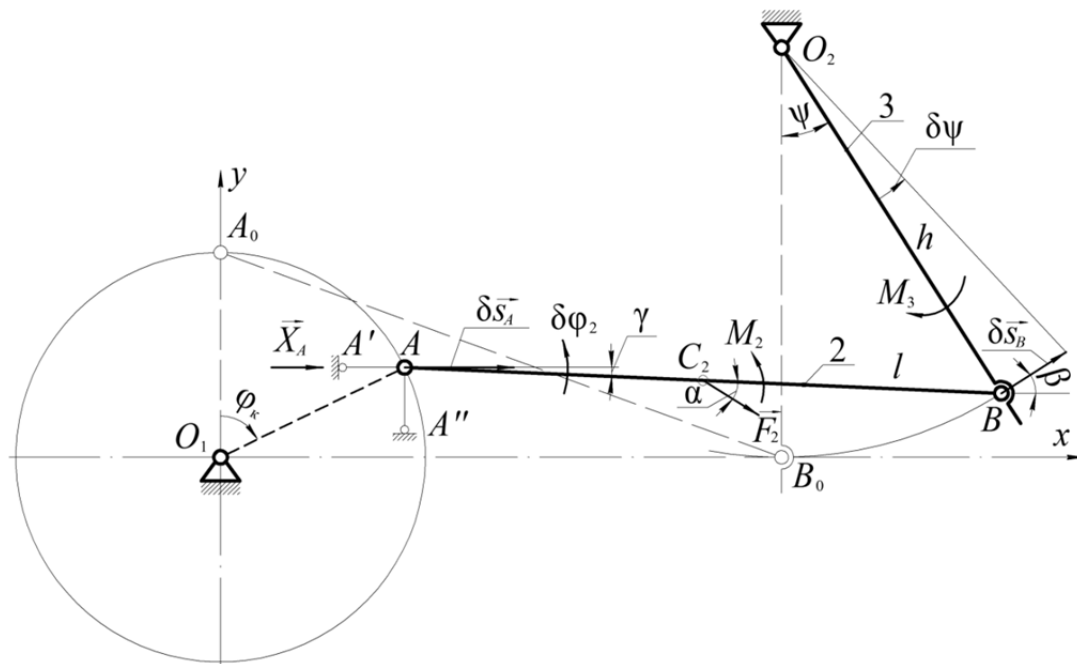


Рисунок 5. — Разрізова схема для визначення компонента X_A

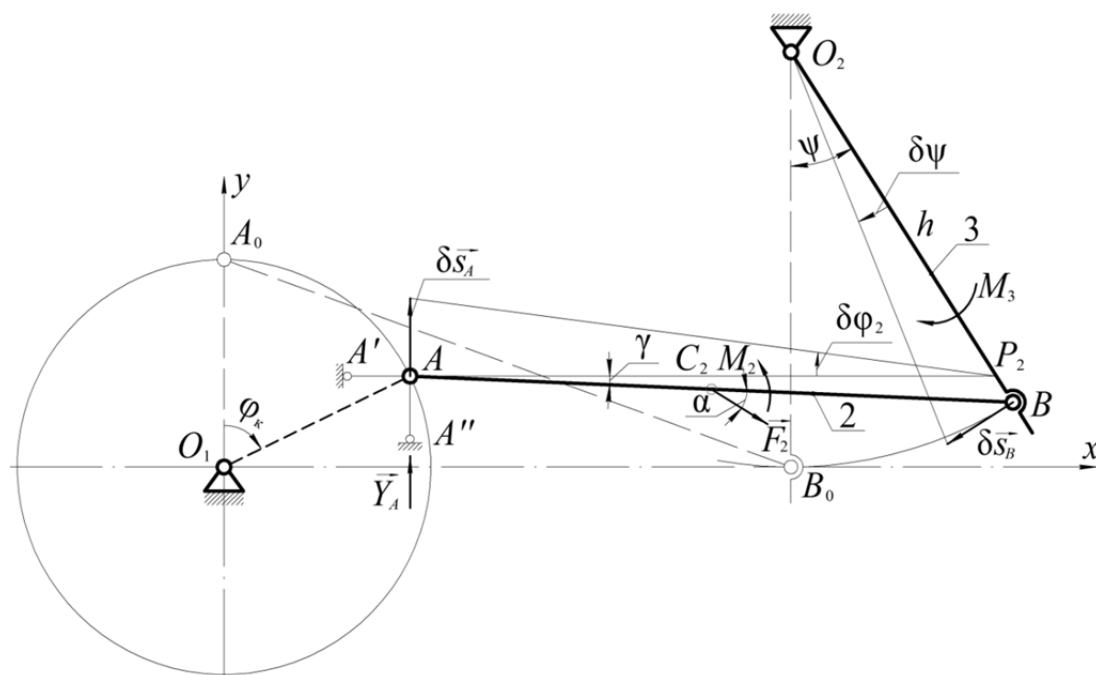
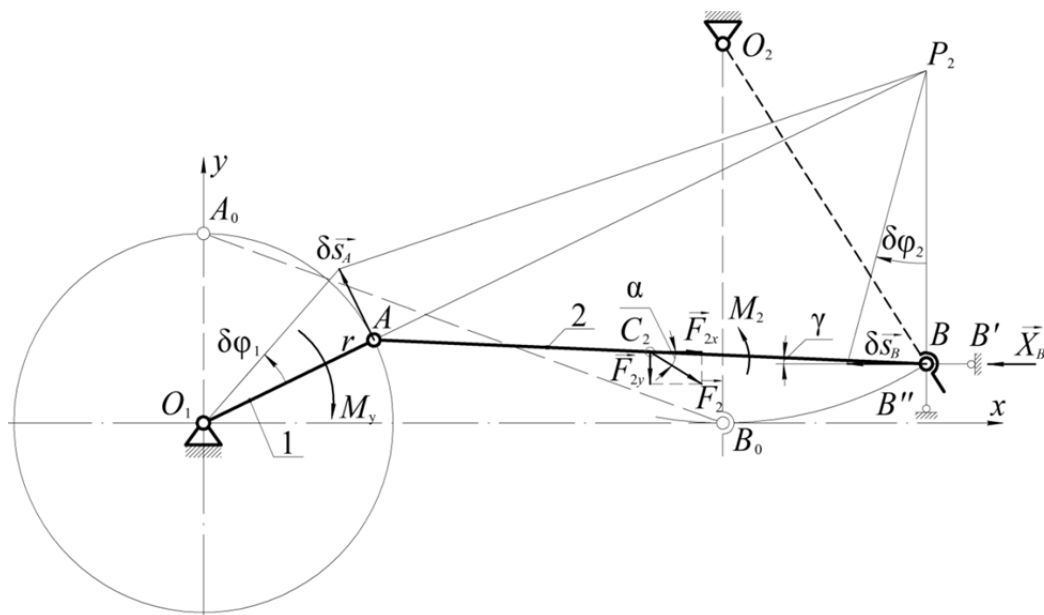
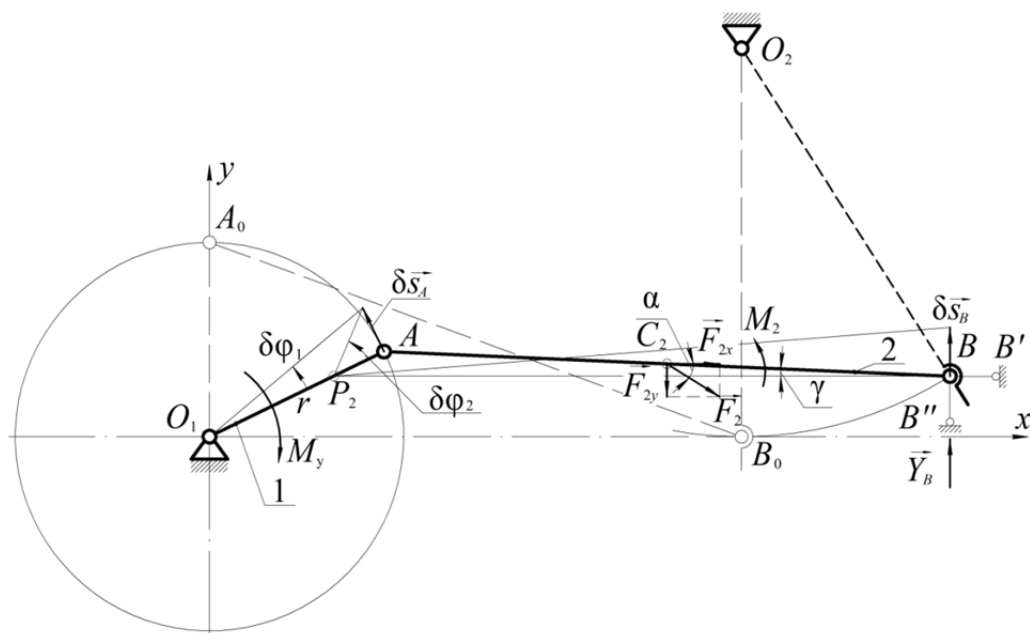


Рисунок 6. — Разрізова схема для визначення компонента Y_A

Рисунок 7. — Разліковая схема для визначення компонента X_B Рисунок 8. — Разліковая схема для визначення компонента Y_B

Каб визначити горизонтальну силу, уявно вивільяємося від сув'язі AA' , а це дієння на праву частку механізму заміняємо реакцією X_A , яку знаходимо за принципом магичного переміщення. У якості незалежного магичного переміщення приймаємо δs_A . Далі при визначенні магичної роботи сили F_2 будемо улічувати, що плоскопаралельний рух шатуна, до якого вона прикладена, уявляє сукупність поступального руху (як полюс A) і вгортального вколо A . Таму і $\delta A(F_2)$ запишемо у вигляді відповідної суми:

$$\delta A(\vec{F}_2) = F_2 \cos(\alpha + \gamma) \delta s_A - M_A(\vec{F}_2) \delta \varphi_2.$$

На рисунку 5, у адрозненне ад рисунка 4, імгненны цэнтр павароту шатуна P_2 знаходзіцца за межамі фармату рысунка. Таму выкарыстоўваем іншыя суадносіны з тэарэтычнай механікі:

$$\delta s_B \cos \beta = \delta s_A \cos \gamma; \quad \delta \varphi_2 = (\delta s_B \sin \beta - \delta s_A \sin \gamma) / l,$$

дзе $l = AB$.

Адсюль вызначаем:

$$\begin{aligned} \delta s_B &= (\cos \gamma / \cos \beta) \delta s_A; & \delta \varphi_2 &= c_3 \delta s_A; \quad \delta \psi = c_4 \delta s_A; \\ c_3 &= (\cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta - \sin \gamma) / l; & c_4 &= \cos \gamma / h \cos \beta. \end{aligned}$$

Запісваем ураўненне работ (1):

$$X_A \delta s_A + F_2 \cos(\alpha + \gamma) \delta s_A - M_A(\vec{F}_2) \delta \varphi_2 + M_2 \delta \varphi_2 - M_3 \delta \psi = 0.$$

Падстаўляем сюды магчымыя перамяшчэнні $\delta \varphi_2$, $\delta \psi$, выносім за дужкі δs_A і ўлічваем, што $\delta s_A \neq 0$. Атрымліваем ураўненне ўмоўнай раўнавагі правай часткі механізма, з якога вызначаем гарызантальную кампаненту сілы ўзаемадзеяння:

$$X_A = -F_2 \cos(\alpha + \gamma) + c_3 [M_A(\vec{F}_2) - M_2] + c_4 M_3, \quad (4)$$

дзе $M_A(\vec{F}_2) = l F_2 \sin \alpha / 2$.

Аналагічна вызначаем вертыкальную скадовую Y_A (рысунак 6).

Уяўна вызваляемся ад сувязі AA'' . Яе дзеянне на шарнір A замяняем рэактыўнай сілай Y_A . Зноў разглядаем умоўную раўнавагу правай часткі механізма. Яна атрымала адну ступень свабоды. Надаем шарніру A незалежнае магчымае перамяшчэнне δs_A . У выніку іншыя звенні і шарнір B атрымаюць перамяшчэнні $\delta \varphi_2$, $\delta \psi$ і δs_B . Імгненны цэнтр павароту шатуна знаходзіцца ў пункце P_2 . Запісваем ураўненне работ (1):

$$Y_A \delta s_A - M_{P_2}(\vec{F}_2) \delta \varphi_2 - M_2 \delta \varphi_2 + M_3 \delta \psi = 0. \quad (5)$$

Ва ўраўненні (5)

$$\begin{aligned} \delta \varphi_2 &= \delta s_A / AP_2 = c_5 \delta s_A, & \delta \psi &= \delta s_B / h = (BP_2 / h AP_2) \delta s_A = c_6 \delta s_A, \\ c_5 &= 1 / AP_2, & c_6 &= BP_2 / h AP_2. \end{aligned}$$

Падстаўляем $\delta \varphi_2$, $\delta \psi$ у (5). Паўтараем папярэднія разважанні і дзеянні. У выніку атрымліваем:

$$Y_A = c_5 [M_{P_2}(\vec{F}_2) + M_2] - c_6 M_3. \quad (6)$$

Па кампанентам (4), (6) знаходзім раўнадзейную сілу ўзаемадзеяння звенняў 1, 2 у кінематычнай пары A :

$$F_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}.$$

Пераходзім да шарніра B . Прадстаўляем яго як двухвалентную сувязь двума кароткімі стрыжнямі BB' , BB'' (гл. рысунак 7).

Разглядаем умоўную раўнавагу часткі O_1AB механізма. Для вызначэння складовай сілы ўзаемадзеяння X_B уяўна адкідваем сувязь BB' . Надаем шарніру B незалежнае магчымае перамяшчэнне δs_B . Адпаведныя яму магчымыя перамяшчэнні звенняў $1, 2$ і шарніра A абазначаем праз $\delta\varphi_1, \delta\varphi_2$ і δs_A . Улічваем, што імгненны цэнтр павароту звяна 2 знаходзіцца ў пункце P_2 . Запісваем ураўненне работ (1):

$$X_B \delta s_B - M_{P_2}(\vec{F}_{2x}) \delta\varphi_2 - M_{P_2}(\vec{F}_{2y}) \delta\varphi_2 - M_2 \delta\varphi_2 - M_y \delta\varphi_1 = 0, \quad (7)$$

дзе $F_{2x} = F_2 \cos(\alpha + \gamma), F_{2y} = F_2 \sin(\alpha + \gamma)$.

Выражаем $\delta\varphi_1, \delta\varphi_2$ праз δs_B :

$$\begin{aligned} \delta\varphi_1 &= \delta s_A / r = (AP_2 / rBP_2) \delta s_B = c_7 \delta s_B; & \delta\varphi_2 &= \delta s_B / BP_2 = c_8 \delta s_B; \\ c_7 &= AP_2 / (rBP_2); & c_8 &= 1 / BP_2. \end{aligned}$$

Падстаўляем атрыманыя $\delta\varphi_1, \delta\varphi_2$ у (7). Паўтараем папярэднія разважанні. Атрымліваем ураўненне ўмоўнай раўнавагі разглядаемай часткі механізма, з якога знаходзім:

$$X_B = c_8 [M_{P_2}(\vec{F}_{2y}) + M_{P_2}(\vec{F}_{2x}) + M_2] + c_7 M_y. \quad (8)$$

Аналагічна, карыстаючыся rysункам 8, запісваем ураўненне работ (1) для вызначэння кампаненты Y_B :

$$Y_B \delta s_B - M_{P_2}(\vec{F}_{2x}) \delta\varphi_2 - M_{P_2}(\vec{F}_{2y}) \delta\varphi_2 + M_2 \delta\varphi_2 - M_y \delta\varphi_1 = 0. \quad (9)$$

Тут $\delta\varphi_1 = \delta s_A / r = c_9 \delta s_B, \delta\varphi_2 = \delta s_A / AP_2 = c_{10} \delta s_B, c_9 = AP_2 / (rBP_2), c_{10} = 1 / BP_2$. Падстаўішы $\delta\varphi_1, \delta\varphi_2$ ва ўраўненне (9), прыходзім да ўраўнення ўмоўнай раўнавагі той жа часткі механізма. Вызначаем Y_B :

$$Y_B = c_{10} [M_{P_2}(\vec{F}_{2y}) + M_{P_2}(\vec{F}_{2x}) - M_2] + c_9 M_y. \quad (10)$$

Знаходзім раўнадзейную складовых (8), (10):

$$F_B = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2}.$$

Вызначэнне сіл узаемадзеяння ў знешніх кінематычных парах O_1, O_2 . Сілы ўзаемадзеяння крывашыпа 1 і каромысла 3 са стойкай O_1O_2 будзем знаходзіць метадам кінестатыкі. На рысунку 9 дзеянне стойкі на звенні $1, 3$ прадстаўлена сіламі $X_{O_1}, Y_{O_1}, X_{O_2}, Y_{O_2}$.

Разглядаем асобна ўмоўную раўнавагу крывашыпа і каромысла. Да дзеючых на іх знешніх сіл, знойдзеных раней, далучаем і ўжо вызначаныя сілы: $X'_A = -X_A, Y'_A = -Y_A, X'_B = -X_B, Y'_B = -Y_B$, прыкладзеныя да шарніраў A, B . Напрамак сіл X'_A, Y'_A, X'_B, Y'_B на рысунку 9 адваротны да сапраўднага (а не да паказанага на рысунках 5—8) напрамку сіл X_A, Y_A, X_B, Y_B .

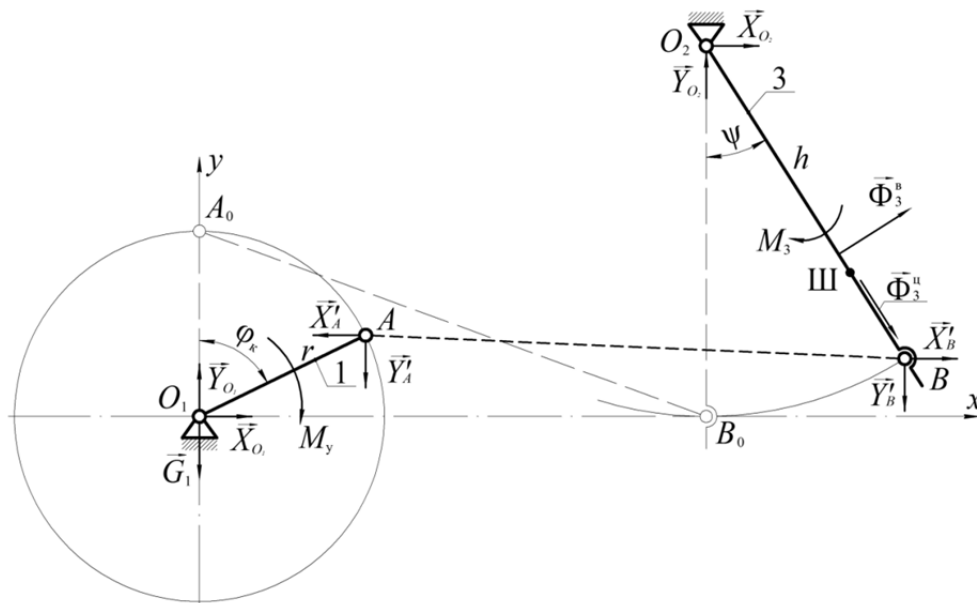


Рисунок 9. — Разліковая схема для вызначэння сіл узаемадзеяння ў знешніх кінематычных парах

На рисунку 9 сіла

$$\vec{\Phi}_3^u = \vec{\Phi}_k^u + \vec{\Phi}_{ш}^u, \quad \vec{\Phi}_3^B = \vec{\Phi}_k^B + \vec{\Phi}_{ш}^B,$$

дзе $\Phi_k^u = \frac{1}{2} m_3 h \omega_3^2$, $\Phi_{ш}^u = m_{ш} h_{ш} \omega_3^2$ — адцэнтрабежныя сілы каромысла і штангі; $h = O_2B$; $h_{ш} = O_2Ш$;

$\Phi_k^B = \frac{1}{2} m_3 h \varepsilon_3$, $\Phi_{ш}^B = m_{ш} h_{ш} \varepsilon_3$ — іх вярчальныя сілы інерцыі; $h = O_2B$; $h_{ш} = O_2Ш$.

$m_3, m_{ш}$ — масы каромысла і штангі;

ω_3, ε_3 — іх вуглавая скорасць і паскарэнне.

Карыстаючыся рысункамі 3 і 9, запісваем умовы раўнавагі крывашыпа і каромысла:

$$\left. \begin{aligned} \sum X_i &= X_{O_1} - X'_A = 0; \\ \sum Y_i &= Y_{O_1} - G_1 - Y'_A = 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum X_i &= X_{O_2} + X'_B - F'_{лх} - F''_{лх} + \Phi_3^u \sin \psi + \Phi_3^B \cos \psi = 0; \\ \sum Y_i &= Y_{O_2} - Y'_B - G_3 - G_{ш} - F'_{лу} - F''_{лу} - \Phi_3^u \cos \psi + \Phi_3^B \sin \psi = 0, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

дзе $F'_{лх}, F''_{лх}, F'_{лу}, F''_{лу}$ — праекцыі сіл $F'_л, F''_л$ на восі каардынат.

Як бачым, кожнае ўраўненне (11), (12) утрымлівае толькі адну невядомую сілу. Знаходзім іх:

$$X_{O_1} = X'_A; \quad Y_{O_1} = Y'_A + G_1; \quad X_{O_2} = F'_{лх} + F''_{лх} - X'_B - \Phi_3^u \sin \psi - \Phi_3^B \cos \psi;$$

$$Y_{O_2} = Y'_B + G_3 + G_{ш} + F'_{лу} + F''_{лу} + \Phi_3^u \cos \psi - \Phi_3^B \sin \psi.$$

Адсюль

$$F_{O_1} = \sqrt{X_{O_1}^2 + Y_{O_1}^2}; \quad F_{O_2} = \sqrt{X_{O_2}^2 + Y_{O_2}^2}.$$

Заклучэнне. У даследаванні выкананы сілавы аналіз прываднага механізма ланцужнага аграгата. Выкарыстаны новы камбінаваны метада, які спалучае прынцып Даламбера—Лагранжа з метадам кінетастантыкі. Знойдзены ўраўнаважвальны момант на крывашыпе і сілы ўзаемадзеяння ва ўнутраных і знешніх кінематычных парах.

Спіс цытаваных крыніц

1. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. моногр. / Л. А. Сиваченко [и др.] ; под науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. — Барановичи : БарГУ, 2020. — 359 с.
2. Агрегат для переработки неоднородных и сложных по составу и свойствам материалов : пат. ЕАПО 038851 / Л. А. Сиваченко, В. А. Потапов, Т. Л. Сиваченко ; дата опубл.: 28.10.2021.
3. Заяц, В. Р. Альтэрнатыўны метада сілавога аналізу плоскіх рычажных механізмаў / В. Р. Заяц, С. І. Русан, І. М. Талачынец // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 4. — С. 2—4.
4. Распрацоўка алгарытму аналітычнага метада кінематычнага аналізу чатырохзвеннага механізма ланцужнага аграгата / У. А. Патапаў [і інш.] // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. — 2022. — № 2. — С. 105—112.
5. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин : учеб. для втузов / И. И. Артоболевский. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Наука, 1988. — 640 с.
6. Теория механизмов и механика машин : учеб. для втузов / К. Ф. Фролов [и др.] ; под. ред. К. В. Фролова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 1998. — 496 с.
7. Хвясько, Г. М. Курс тэарэтычнай механікі : вучэб. дапаможнік для студэнтаў выш. тэхн. навуч. устаноў. — Мінск : БДТУ, 2000. — 354 с.
8. Хвясько, Г. М. Тэарэтычная механіка. Практыкум : вучэб. дапаможнік для студэнтаў тэхн. спецыяльнасцей устаноў, якія забяспечваюць атрыманне выш. адукацыі : у 2 ч. / Г. М. Хвясько. — Мінск : БДТУ, 2005. — Ч. 2. — 198 с.

Паступіў у рэдакцыю 09.09.2022.

УДК 621.89.097.2

А. А. Пивоварчик¹, кандидат технических наук, доцент,
А. К. Гавриленя², кандидат технических наук, доцент,
А. С. Корольков¹

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

²Государственное научное учреждение «Институт экономики Национальной академии наук Беларуси», ул. Руссиянова, 50, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 22 259 33, AndrejGavrilena@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПРОБЕГА ЛЕГКОВОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ПЛОТНОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРУ ВСПЫШКИ В ОТКРЫТОМ ТИГЛЕ МОТОРНЫХ МАСЕЛ «ЛУКОЙЛ ЛЮКС 5W-40» И «НАФТАН ПРЕМЬЕР 5W-40»

Целью настоящей работы является уточнение фактических сроков замены синтетических моторных масел путем исследования влияния величины пробега легкового транспортного средства на плотность при 15 °С и температуру вспышки моторных масел в открытом тигле.

Научная новизна работы состоит в получении новых экспериментальных данных по изменению плотности при 15 °С и температуры вспышки в открытом тигле синтетических моторных масел марок «Лукойл Люкс 5W-40» и «Нафтан Премьер 5W-40» при изменении величины пробега транспортного средства.

Введение содержит краткую информацию о плотности при 15 °С, температуре вспышки в открытом тигле и рекомендуемых сроках замены моторных масел.

В основной части работы представлены результаты исследования эксплуатационных свойств моторных масел марок «Лукойл Люкс 5W-40» и «Нафтан Премьер 5W-40». В результате экспериментальных исследований установлено, что при пробеге легковым транспортным средством 15 тыс. км плотность синтетического моторного масла «Нафтан Премьер 5W-40» при 15 °С увеличилась на 0,64 п. п. меньше, чем моторного масла марки «Лукойл Люкс 5W-40». Показано, что при пробеге легковым транспортным средством 15 тыс. км плотность, измеренная при 15 °С, и температура вспышки исследуемых синтетических моторных масел в открытом тигле находятся в допустимых пределах.

Результаты исследований будут полезны инженерам-механикам при определении сроков замены синтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях внутреннего сгорания легковых транспортных средств.

Ключевые слова: бензиновый двигатель внутреннего сгорания; моторное масло; пробег; плотность; температура вспышки в открытом тигле.

Рис. 2. Библиогр.: 15 назв.

A. A. Pivovarchyk¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. K. Haurilenia², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. S. Korolkov¹

¹Yanka Kupala State University of Grodno, 22 Ozheshko Str., 230021 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (29) 876 68 24, Pivovarchik_AA@grsu.by

²State Scientific Institution "The Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus", 50 Russiyanova Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 22 259 33, AndrejGavrilena@mail.ru

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE MILEAGE OF A PASSENGER VEHICLE ON THE DENSITY AND FLASH POINT IN AN OPEN CRUCIBLE OF LUKOIL LUX 5W-40 AND NAPHTHAN PREMIER 5W-40 MOTOR OILS

The purpose of this work is to clarify the actual terms of synthetic motor oils replacement by studying the effect of the passenger vehicle mileage on the density at 15 °С and the flash point of motor oils in an open crucible.

The scientific novelty of the work consists in obtaining new experimental data on changes in density at 15 °С and flash point in an open crucible of synthetic motor oils of the Lukoil Lux 5W-40 and Naphthan Premier 5W-40 brands when the vehicle mileage changes.

The introduction contains brief information about the density at 15 °C, the flash point in an open crucible and the recommended timing of engine oil replacement.

The main part of the paper presents the results of the study of Lukoil Lux 5W-40 and Naphthan Premier 5W-40 motor oils operational properties. As a result of experimental studies, it was found that when a passenger vehicle ran 15 thousand km, the density of synthetic Naphthan Premier 5W-40 engine oil at 15 °C increased by 0,64 percentage points less than Lukoil Lux 5W-40 engine oil. It is shown that when a passenger vehicle runs 15 thousand km, the density measured at 15 °C and the flash point of the studied synthetic motor oils in an open crucible are within acceptable limits.

The results of the research will be useful to mechanical engineers in determining the timing of synthetic motor oils replacement used in gasoline internal combustion engines of passenger vehicles.

Key words: gasoline internal combustion engine; engine oil; mileage; density; flash point in an open crucible.

Fig. 2. Ref.: 15 titles.

Введение. В настоящее время требования по увеличению работоспособности, надежности и эффективности работы транспортных средств привели к существенному ужесточению эксплуатационных показателей смазочных моторных масел [1; 2].

Из работ [1—10] известно, что одними из важнейших эксплуатационных показателей моторных масел являются плотность, измеренная при 15 °C, и температура вспышки в открытом тигле. Авторы научных работ [1—15] отмечают, что конкретные конструкционные особенности и условия эксплуатации механических транспортных средств должны соответствовать определенным по составу и свойствам топливу и смазочным материалам. Необоснованный и некорректный выбор марки моторного масла, а также несвоевременная замена моторного масла приводят к существенному уменьшению срока службы и надежности работы транспортного средства (до 40 %), повышенному расходу топлива (от 3 до 15 %).

Имеющаяся информация в научной и технической литературе о сроках замены моторных масел в большинстве случаев носит рекомендательный характер. Результаты исследований, опубликованные в работах [1; 2; 4; 6], показывают, что сроки замены синтетических моторных масел в бензиновых двигателях внутреннего сгорания (далее — ДВС) различны и варьируются в пределах от 15 до 20 тыс. км пробега, а также в значительной степени зависят от типа двигателя и его технического состояния, условий эксплуатации транспортного средства, количества присадок в моторном масле. В работах [10—15] указывается, что систематический контроль состояния моторных масел позволяет существенно уменьшить финансовые затраты при эксплуатации автотранспортных механических средств.

Для организации пассажирских перевозок в Республике Беларусь транспортными предприятиями довольно часто используются легковые автомобили Skoda Rapid. В руководстве по эксплуатации и обслуживанию данного транспортного средства указывается, что при нормальных условиях эксплуатации замену моторного масла следует проводить через 1 год эксплуатации транспортного средства или 15 тыс. км пробега, при тяжелых условиях эксплуатации — через 7,5 тыс. км пробега. В работах [1; 5; 9—12] отмечается, что замена минерального масла проводится после 10...15 тыс. км пробега, а синтетического моторного масла — после 20...35 тыс. км пробега. Согласно нормативно-технической документации (ТКП 248-2010) замена моторного масла для легковых транспортных средств проводится при выполнении технического обслуживания (ТО) и технического ремонта, при этом сроки замены определяются с учетом поправочных коэффициентов, характеризующих условия работы подвижного состава и климатические условия. Следует отметить, что при определении сроков замены не учитывается марка моторного масла.

В работах [1—9] указано, что плотность моторных масел, измеренная при 15 °C, в процессе эксплуатации транспортных средств должна находиться в интервале от 830 до 880 кг / м³. Увеличение плотности моторного масла свидетельствует об увеличении содержащихся в масле механических примесей и (или) воды, что негативно сказывается на сроке службы двигателя.

Температура вспышки в открытом тигле современных моторных масел превышает 175 °C и, как правило, находится в пределах от 190 до 230 °C и выше [1—5; 10—13].

Целью настоящей работы является уточнение фактических сроков замены синтетических моторных масел путем исследования изменения их плотности при 15 °С и температуры вспышки в открытом тигле в процессе эксплуатации транспортных средств.

Материалы и методы исследования. Исследование прошли синтетические моторные масла марок «Лукойл Люкс 5W-40» и «Нафтан Премьер 5W-40», которые используются в бензиновых двигателях легковых транспортных средств. Определение плотности моторных масел проводилось по ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности», температуры вспышки в открытом тигле — по ГОСТ 4333-87 «Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле». Выбор указанных марок моторных масел обусловлен тем, что данные моторные масла централизованно закупаются и используются в легковых автомобилях Skoda Rapid при осуществлении пассажирских перевозок. Данные легковые автомобили оборудованы четырехцилиндровым бензиновым двигателем с распределенным впрыском топлива объемом 1 598 см³. Изготовителем легковых автомобилей Skoda Rapid рекомендуется замена моторных масел после 15 тыс. км пробега. В целях получения достоверных результатов эксперимента исследуемые моторные масла заливались в каждые три автомобиля. За результат исследования принимали среднее арифметическое значение показателя, полученное после отбора пробы с каждого из трех автомобилей.

Перед исследованием изменения плотности при 15 °С и температуры вспышки моторных масел в открытом тигле были проведены ТО-2 и диагностика легковых автомобилей. Проверено натяжение цепи газораспределительного механизма, напряжение бортовой сети, отрегулированы тепловые зазоры, стартер, генератор, приборы системы зажигания и питания. Величина пробега легковых транспортных средств находилась в диапазоне от 25 до 30 тыс. км. Объем залитого масла в двигатель автомобиля составил 3,6 л. Для проведения исследования пробы моторного масла отбирались через каждые 5 тыс. км. После исследования эксплуатационных показателей образец моторного масла заливался обратно в двигатель легкового транспортного средства. Доливание моторного масла не проводилось вследствие того, что перед проведением исследований масло заливалось в ДВС до максимального уровня по щупу. Перед отбором проб проводился контроль уровня моторного масла в двигателе. Плотность при 15 °С и температура вспышки моторного масла в открытом тигле определялись по стандартным методикам с использованием специализированного и сертифицированного оборудования.

Результаты исследования и их обсуждение. На рисунке 1 показано изменение плотности исследуемых моторных масел при 15 °С в зависимости от величины пробега транспортного средства.

Результаты экспериментов показали, что при увеличении величины пробега плотность всех исследуемых моторных масел возрастает. При пробеге транспортным средством 15 тыс. км плотность моторного масла марки «Лукойл Люкс 5W-40» увеличивается с 847,0 до 874,6 кг / м³, моторного масла марки «Нафтан Премьер 5W-40» — с 910,6 до 934,5 кг / м³. Установлено, что при пробеге транспортным средством 15 тыс. км плотность при 15 °С моторных масел марок «Лукойл Люкс 5W-40» и «Нафтан Премьер 5W-40» увеличивается на 3,26 и 2,62 % соответственно. Менее интенсивное увеличение плотности синтетического моторного масла марки «Нафтан Премьер 5W-40» обусловлено тем, что данное моторное масло содержит большее количество синтетических добавок (до 40 % от основы). Следует отметить, что к увеличению плотности моторного масла могут привести отложения, нагары и осадки, образующиеся в ДВС в процессе эксплуатации транспортного средства. Отложения в ДВС образуются в результате превращения углеводородов, которые являются основой моторных масел. Нагары представляют собой твердые углеродистые вещества, откладывающиеся на стенках камеры сгорания, клапанах, свечах, днище поршня и на верхнем пояске боковой поверхности поршня. Химический состав нагара зависит как от качества масла и топлива, так и от режима работы двигателя, запыленности воздуха, наличия присадок и др. [1; 6; 10—12].

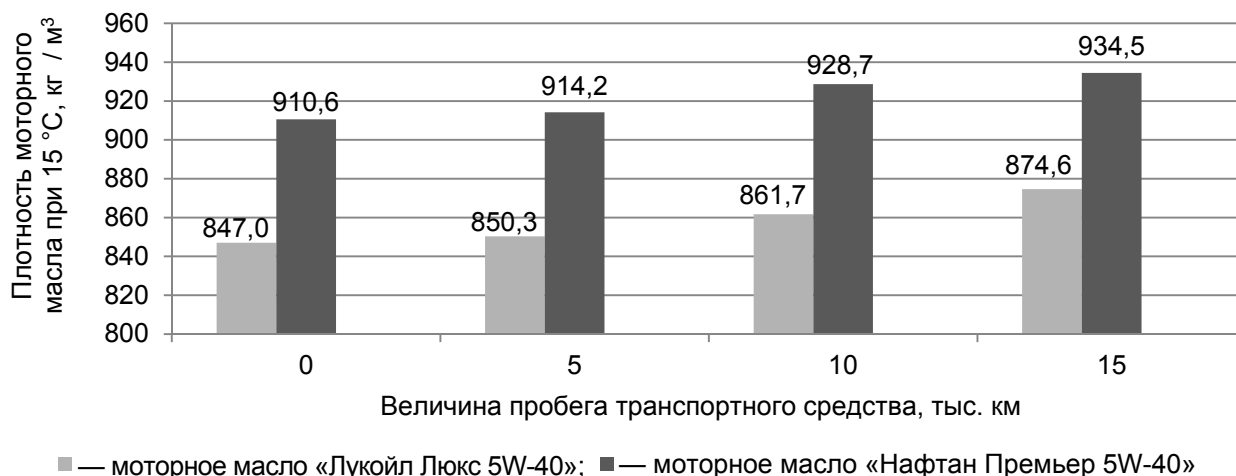


Рисунок 1. — Изменение плотности синтетических моторных масел при увеличении величины пробега транспортного средства

Основную часть нагара составляют карбены и карбоиды (50,0...70,0 %), смолы и масла (15,0...40,0 %), асфальтены и оксикислоты (3,0...6,0 %), зола (1,0...10,0 %). Количество образующегося нагара зависит от качества масла и его расхода, а также от качества применяемого топлива. Толщина слоя нагара зависит от теплового режима работы двигателя: чем ниже температура стенок камеры сгорания, тем больший слой нагара на них образуется. Из работ [1; 7—13] известно, что в летний период эксплуатации транспортного средства нагара образуется меньше, чем в зимний. Осадки откладываются на стенках поддона картера, крышке головки блока цилиндров, шейках коленчатого вала и других деталях двигателя, а также в фильтрах и маслопроводах. Осадки состоят из масла (50,0...85,0 %), воды (5,0...35,0 %) и продуктов их окисления: оксикислот (2,0...15,0 %), карбенов и карбоидов (2,0...10,0 %), асфальтенов (0,1...15,0 %) [4; 6—8; 12].

Результаты исследований показали, что наиболее интенсивное изменение плотности моторных масел при 15 °C происходит при пробеге транспортным средством более 10 тыс. км, что является следствием так называемого «естественного старения», вызванного воздействием высокой температуры и давления в рабочей зоне ДВС.

На рисунке 2 показаны результаты исследований изменения температуры вспышки в открытом тигле синтетических моторных масел в зависимости от величины пробега транспортного средства.

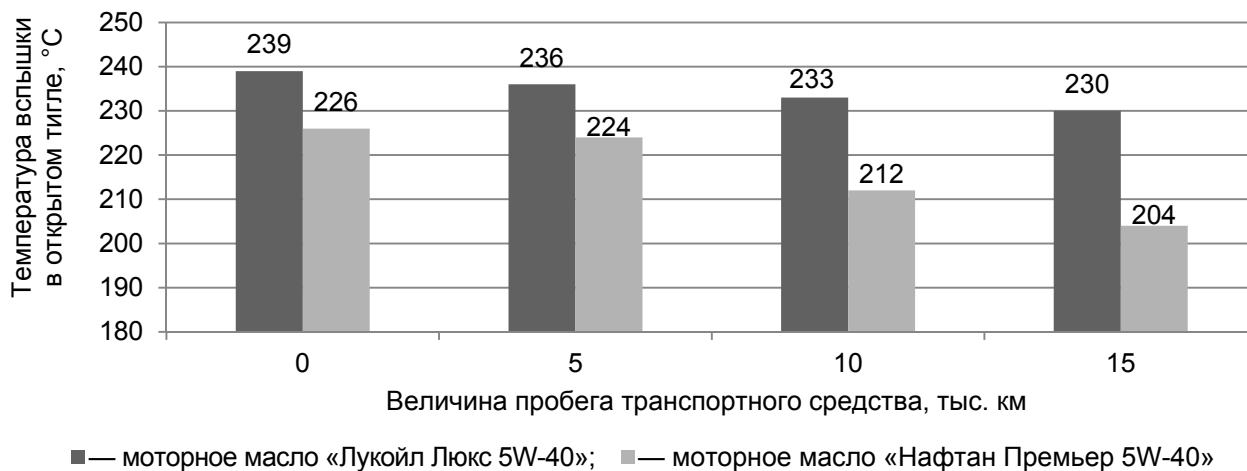


Рисунок 2. — Изменение температуры вспышки в открытом тигле синтетических моторных масел при увеличении величины пробега транспортного средства

Результаты экспериментов показали, что с увеличением величины пробега транспортного средства температура вспышки в открытом тигле исследуемых моторных масел снижается. Установлено, что исходное значение температуры вспышки в открытом тигле моторного масла «Нафтан Премьер 5W-40» составляет 226 °С, моторного масла «Лукойл Люкс 5W-40» — 239 °С. Минимальное значение температуры вспышки в открытом тигле при пробеге легковым транспортным средством 15 тыс. км моторного масла «Нафтан Премьер 5W-40» составило 204 °С, моторного масла «Лукойл Люкс 5W-40» — 230 °С. Снижение температура вспышки в открытом тигле моторного масла марки «Нафтан Премьер 5W-40» при пробеге до 10 тыс. км равно 14 °С и носит практически линейный характер. При аналогичном пробеге легкового транспортного средства снижение температуры вспышки моторного масла марки «Лукойл Люкс 5W-40» в открытом тигле составляет 6 °С. При дальнейшем увеличении пробега транспортного средства с 10 до 15 тыс. км наблюдается менее интенсивное снижение температуры вспышки в открытом тигле и составляет 8 и 3 °С для моторных масел марок «Нафтан Премьер 5W-40» и «Лукойл Люкс 5W-40» соответственно.

Установлено, что через каждые последующие 5 тыс. км пробега температура вспышки моторного масла марки «Нафтан Премьер 5W-40» в открытом тигле снижается в среднем на 7,3 °С, моторного масла «Лукойл Люкс 5W-40» — на 2,2 °С.

Результаты исследований показали, что при пробеге транспортным средством 15 тыс. км температура вспышки моторного масла марки «Нафтан Премьер 5W-40» в открытом тигле по сравнению с исходным значением снизилась на 9,8 %, моторного масла марки «Лукойл Люкс 5W-40» — на 3,8 %. Полученный результат свидетельствует о более высоком качестве сырья, используемого при получении моторного масла марки «Лукойл Люкс 5W-40».

Заключение. В результате проведенных экспериментов установлено, что при пробеге легкового транспортного средства до 15 тыс. км плотность, измеренная при 15 °С, и температура вспышки в открытом тигле исследуемых марок масел находятся в допустимых пределах, что подтверждает целесообразность замены масла после 15 тыс. км пробега.

Исследования также показали, что при пробеге легковым транспортным средством 15 тыс. км плотность при 15 °С синтетического моторного масла «Нафтан Премьер 5W-40» увеличивается на 0,64 п. п. меньше, чем моторного масла марки «Лукойл Люкс 5W-40», а температура вспышки моторного масла марки «Лукойл Люкс 5W-40» снижается на 6 п. п. меньше, чем моторного масла марки «Нафтан Премьер 5W-40». Данные результаты свидетельствуют о более высоких эксплуатационных свойствах по исследуемым показателям моторного масла марки «Лукойл Люкс 5W-40».

Список цитированных источников

1. Пивоварчик, А. А. Исследование эксплуатационных показателей синтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях легковых механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. С. Корольков, Н. Н. Алифировец // Вестн. ГрДУ імя Я. Купалы. Сер. 6 : Тэхніка. — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 21—27.
2. Пивоварчик, А. А. Исследование эксплуатационных свойств полусинтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях внутреннего сгорания легковых автомобилей модели Volkswagen Polo Sedan / А. А. Пивоварчик, О. Д. Заболотный // Вестн. ГрДУ імя Я. Купалы. Сер. 6 : Тэхніка. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 25—33.
3. Пивоварчик, А. А. Исследование вязкостно-температурных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. К. Гавриленя, О. Д. Заболотный // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2021. — № 1 (9). — С. 70—76.
4. Пивоварчик, А. А. Исследование эксплуатационных показателей полусинтетических моторных масел марки SAE 10W40, используемых в бензиновых двигателях / А. А. Пивоварчик, А. К. Гавриленя, О. Д. Заболотный // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2021. — № 1 (9). — С. 77—84.
5. Liehpao, O. F. Ashless Antiwear and Extreme-Pressure Additives / O. F. Liehpao // Lubricant additives: chemistry and applications / ed. L. R. Rudnick. — New York, 2009. — P. 3, ch. 8. — P. 214—257.

6. Исследования характеристик моторных масел 5w40 и 10w40 / Е. Б. Ахметбай [и др.] // Эпоха науки. Техн. науки. — 2018. — № 16. — С. 159—163.
7. Варакин, А. Г. Сравнительный тест полусинтетических моторных масел / А. Г. Варакин, А. М. Лопоткин, А. Е. Хохлов // Вестн. Нижегород. гос. инженер.-экон. ун-та. — 2014. — № 10 (41). — С. 17—22.
8. Пивоварчик, А. А. Исследование эксплуатационных свойств полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях внутреннего сгорания / А. А. Пивоварчик, А. К. Гавриленя, А. И. Сергей // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2020. — № 8. — С. 111—118.
9. Долгова, Л. А. Обеспечение рационального ресурса моторного масла в двигателях / Л. А. Долгова, В. В. Салмин // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И. Я. Яковлева. — 2012. — № 2 (74). — С. 146—156.
10. Корнеев, С. В. Изменение характеристик моторных масел в газопоршневых двигателях большой мощности / С. В. Корнеев // Вестн. Сиб. гос. автомобил.-дорож. акад. — 2017. — Вып. 4—5 (56—57). — С. 37—41.
11. Корнеев, С. В. Оценка достоверности прогнозирования периодичности смены моторного масла в двигателях / С. В. Корнеев, А. П. Серков // Ом. науч. вестн. — 2014. — № 1. — С. 62—65.
12. Пивоварчик, А. А. Исследование температурно-вязкостных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. И. Сергей // Весн. Гродз. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 6 : Тэхніка. — 2019. — Т. 9, № 1. — С. 78—87.
13. Влияние условий эксплуатации автомобилей на ресурс работы моторного масла / И. И. Ширлин [и др.] // Вестн. Сиб. гос. автомобил.-дорож. акад. — 2013. — Вып. 4 (32). — С. 42—45.
14. Доблер, В. И. Повышение эксплуатационной надежности двигателей дорожных и строительных машин трибологическим контролем состояния и активацией моторных масел : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. И. Доблер ; Том. политех. ун-т. — Томск, 2005. — 23 с.
15. Чудиновских, А. Л. Разработка научных основ химмотологической оценки автомобильных моторных масел : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / А. Л. Чудиновских ; Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И. М. Губкина. — М., 2016. — 50 с.

Поступила в редакцию 14.03.2022.

УДК 621.78.001, 621.81

А. А. Шматов, доктор технических наук, профессорБелорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013 Минск,
Республика Беларусь, +375 (29) 377 73 57, shmatovalexander@gmail.com

МНОГОМЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМОГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДОГО СПЛАВА В ГИДРОЗОЛЕ ОКСИДОВ ЦИНКА И МОЛИБДЕНА

Приведены результаты исследования триботехнических свойств твердосмазочных покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 (94 % WC + 6 % Co) в результате термогидрохимической обработки. Изучаемый процесс включает: гидрохимическую обработку сплава в вододисперсионной среде на базе оксидов ZnO + MoO₃; термообработку. Выполнена многомерная технологическая оптимизация состава среды и температурно-временных параметров термогидрохимической обработки по коэффициенту трения полученных твердосмазочных покрытий. Используя математические модели, построены диаграммы «параметры процесса — свойство». Обработка по оптимальному режиму позволяет в условиях отсутствия смазки снизить коэффициент трения твердосплавной поверхности в 4,1 раза по сравнению с необработанной. Разработанная технология повышает в 1,3...4,0 раза стойкость твердосплавных инструментов по сравнению с неупрочненными.

Ключевые слова: термогидрохимическая обработка; твердый сплав; твердосмазочное покрытие; инструменты.

Рис. 4. Табл. 4. Библиогр.: 23 назв.

A. A. Shmatov, DSc in Technical Sciences, ProfessorBelarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk,
the Republic of Belarus, +375 (29) 377 73 57, shmatovalexander@gmail.com

MULTIDIMENSIONAL OPTIMIZATION OF HARD ALLOY THERMOHYDROCHEMICAL TREATMENT IN ZINC AND MOLYBDENUM OXIDES HYDROSOL

The results of a study of the tribotechnical properties of solid lubricant coatings obtained on the hard alloy VK6 (94 % WC + 6 % Co) as a result of thermohydrochemical treatment are presented. The studied process involves: hydrochemical treatment of the alloy in a water-dispersive ZnO + MoO₃ medium; heat treatment. A multidimensional technological optimization of the medium composition and the thermohydrochemical treatment temperature-time parameters was carried out according to the friction coefficient of the obtained solid lubricating coatings. Using mathematical models, diagrams “process parameters — property” are constructed. Processing according to the optimal mode allows, in the absence of lubrication, to reduce the coefficient of the hard-alloy surface friction by 3.5 times compared with the untreated one. The developed technology permits increasing the durability of carbide tools by the factor of 1.3...4.0 in comparison with non-hardened ones.

Key words: thermohydrochemical treatment; hard alloy; solid lubricating coating; tools.

Fig. 4. Table 4. Ref.: 23 titles.

Введение. Благодаря высокой твердости, износостойкости и теплостойкости твердых сплавов, твердосплавные инструменты преимущественно используют для высокопроизводительной механической обработки высокотвердых и труднообрабатываемых сталей и сплавов. В современных условиях потребность в режущих и формообразующих твердосплавных инструментах постоянно растет, поскольку на практике все больше применяют сложнолегированные высокопрочные и другие специальные сплавы, ужесточаются режимы их обработки, однако твердосплавные инструменты пока еще имеют недостаточную эксплуатационную стойкость. Для повышения работоспособности твердосплавных инструментов в Беларуси

и за рубежом в основном развиваются технологии получения износостойких покрытий методами PVD (физического осаждения из паровой фазы), CVD (химического осаждения из парогазовой фазы), напылением, ХТО (химико-термической обработкой) и др., которые активированы нетрадиционными источниками нагрева (плазмой, лазером, электронным лучом и др.) с применением вакуумной техники. Но эти технологии не удовлетворяют требованиям их быстрого освоения в производстве из-за малой производительности, высокой энергоемкости и большой стоимости процессов, а применяемое высокоэнергетическое оборудование оказывает вредное воздействие на здоровье человека [1—4]. Поэтому большой научный и практический интерес представляет новый процесс термогидрохимической обработки (далее — ТГХО), поскольку он отличается простотой, высокой эффективностью и производительностью и применим для готовых к эксплуатации режущих и штамповых инструментов, незначительно меняя их первоначальные размеры, форму и структуру матрицы [5—7]. Процесс ТГХО включает гидрохимическую обработку (далее — ГХО) и последующую термообработку (далее — ТО).

Термогидрохимическая обработка предназначена химически осаждать на поверхности различных материалов и сплавов антифрикционные твердосмазочные покрытия, которые обладают резервными возможностями в жестких и катастрофических условиях эксплуатации инструментов и машин [5—7]. Как известно [8—11], покрытия могут приобретать твердосмазочные свойства в случаях:

- а) когда созданы из материалов со слоистой микрокристаллической структурой (графит, сульфиды и др.);
- б) сформированы на основе нанокристаллических материалов;
- в) реализуется теория Бернала, согласно которой любое твердое тело приобретает свойства жидкости, если в кристаллической решетке содержится более 10 % вакансий;
- г) реализуется эффект Ребиндера, который ведет к пластифицированию поверхностного слоя и созданию положительного градиента механических свойств в зоне трения;
- д) реализуется эффект Киркендалла, который приводит к селективному растворению из сплава легирующих элементов вследствие различия их электрохимических потенциалов, в результате чего формируется квазижидкая пленка, снижающая коэффициент трения и фрикционный разогрев.

Так, ТГХО является наиболее простым и универсальным методом получения твердосмазочных покрытий. С помощью этого метода можно создавать наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, алмаза, углеродных и других антифрикционных керамических материалов [5—7]. Полученные наноструктурированные покрытия обладают сверхпластичностью, они облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения; в то же время твердость и другие рабочие свойства нанокристаллических металлов и тугоплавких соединений возрастают в 2...3 раза [2—4]. Согласно молекулярно-механическому, адгезионно-деформационному, дислокационно-вакансионному и другим механизмам трения повышение износостойкости твердого тела можно достичь при выполнении двух условий: при высокой поверхностной твердости эксплуатируемого материала и низкой прочности его адгезионной связи в зоне трения [8; 9; 11].

В процессах ТГХО в наибольшей мере реализуются термохимические источники воздействия на инструментальные материалы, чтобы сформировать в них метастабильные структуры, когда, согласно теории Дж. Мартина, Р. Доэрти, С. Т. Конобеевского [12], достигаются наиболее высокие свойства инструментов. Это создается:

- а) значительным градиентом химической концентрации дисперсной фазы в насыщающей среде и на обрабатываемой поверхности;
- б) формированием сильно измельченной структуры твердого осадка, образуемого в насыщающей среде и на обрабатываемой поверхности;
- в) многократным повторением парожидкостной трансформации водной дисперсионной среды при циклической смене ее агрегатного состояния;

г) интенсивным «псевдокавитационным» термогидродинамическим воздействием кипящей водной дисперсионной среды на поверхности инструмента и твердых керамических дисперсных частиц, входящих в состав насыщающей дисперсной системы.

Для создания более высокого химического градиента процесс ТГХО проводят в жидкой дисперсионной среде. Обязательным условием образования дисперсной системы являются взаимная нерастворимость дисперсной фазы и жидкой среды, а также высокая раздробленность частиц дисперсной фазы. В данном процессе происходит гидрохимическое диспергирование водных грубодисперсных составов (суспензий), которое достигается за счет расклинивающего действия добавленного в состав поверхностно-активного вещества (далее — ПАВ) и «псевдокавитационного» термогидродинамического воздействия кипящей водной дисперсионной среды [7; 10; 13—15]. В результате происходит постепенный переход суспензии в коллоидный раствор (гидрозолю). А при обработке самих инструментов в этих гидрозолях на поверхности инструментальных материалов формируются твердомазочные покрытия, которые, согласно адсорбционному эффекту Ребиндера [13], хорошо пластифицируются в результате адсорбции ПАВ на внешней поверхности инструментов.

Проведение процессов ГХО инструментальных материалов в условиях воздействия кипящей водной дисперсионной среды ускоряет протекание всех физических и электрохимических процессов. В таких средах со свойствами электролита при адсорбционном действии ПАВ и импульсном давлении схлопывающихся пузырьков пара происходит локальное травление с образованием ювенильной поверхности, имеющей высокую реакционную способность формировать наноструктурированные пленки, препятствующие адгезионному схватыванию [3; 7—9; 13; 15—17].

Поскольку после ТГХО исходная структура материала сохраняется (не разупрочняется), а конечные размеры и форма изделий практически не меняются, данную технологию можно применять для готовых к эксплуатации инструментов. С другой стороны, в условиях интенсивной эксплуатации инструментов, когда в зоне трения отсутствует смазка или ее подача ограничена, наилучшим способом снижения трения режущей кромки является нанесение различных твердосмазочных покрытий [5; 7; 18].

На основании предварительных исследований [5; 7; 18] лучшие триботехнические свойства имеют покрытия, полученные методом ТГХО с применением многокомпонентных водных сред на основе смеси оксидов, благодаря образованию многофазной наноструктуры полиоксидных покрытий. Изначально предполагалось, что наличие в составе водной дисперсионной среды оксида цинка может повысить твердость покрытия, а оксида молибдена — его коррозионную стойкость [19; 20].

На основании приведенного анализа следует, что процесс ТГХО имеет большие перспективы для своего развития, прежде всего для высокопроизводительных инструментов, испытывающих значительные механические и температурные нагрузки. Особое внимание уделяется инструментам из твердых сплавов (марки ВК, ТК, ТТК и др.), которые широко используются для изготовления различных видов режущих и штамповых инструментов. Однако вопросы, связанные с термогидрохимическим способом получения на твердых сплавах твердосмазочных покрытий на базе оксидов цинка и молибдена, остаются не изученными.

Огромную помощь исследователю при трудоемком выборе оптимального варианта проведения процесса ТГХО сплавов могут оказать математические методы планирования экспериментов, которые позволяют получать максимум информации при минимуме затрат. В материаловедении традиционно решают прямые задачи, когда на основании минимального количества экспериментов, проведенных по заранее заданным температурно-временным режимам (согласно плану экспериментов), определяют свойства материала, затем создают математические модели, описывающие влияние факторов, и с помощью графической интерпретации выбирают оптимальные параметры процесса [21]. Но такой подход не может решить всего комплекса вопросов, возникающих при проектировании технологии, поскольку

функционирование любой технологической системы (в данном случае таковой является технология ТГХО твердого сплава в гидрозоле на базе оксидов цинка и молибдена) происходит в условиях постоянного случайного изменения значений параметров системы под влиянием различных внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Сами технологические системы, как объекты проектирования, обладают рядом специфических особенностей: многокритериальностью, многопараметричностью, стохастичностью (рассеиванием параметров), наличием нелинейных внутрисистемных связей и т. д. При исследовании, проектировании и освоении таких объектов требуется решение не только прямых, но и обратных задач, когда исследователь заранее задает комплекс необходимых свойств материала и с помощью компьютерного моделирования находит технологически оптимальные температурно-временные параметры процесса. Данный методологический подход, получивший название многомерного проектного синтеза технологической системы, успешно применяется при разработке новых технологий и материалов [5; 7; 22].

В связи с вышеназванным целью данной работы явилась многомерная технологическая оптимизация процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсионной среде на основе оксидов цинка и молибдена с помощью компьютерного метода многомерного проектного синтеза технических объектов, технологий и материалов.

Материалы и методы исследования. Термогидрохимической обработке подвергали твердый сплав ВК6 (94 % WC + 6 % Co), который широко используют для изготовления высокопроизводительных инструментов, чтобы резать труднообрабатываемые сплавы. Сам процесс ТГХО осуществляли путем проведения двух операций: ГХО твердого сплава при температуре 96...100 °С в течение 10...60 мин в специально приготовленном вододисперсном составе на базе оксидов цинка и молибдена; ТО при нагреве до температуры 150...1 000 °С и выдержке в течение 20 мин. Водную суспензию предварительно готовили по специальной технологии при смешивании в воде порошковой смеси, состоящей из оксидов цинка и молибдена с добавкой 2...8 % сульфанола (ПАВ). Готовым считался рабочий состав с кислотностью pH 7...9, которую поддерживали путем дозированного введения NH₄OH. При проведении ГХО образцы помещали и выдерживали в ванне с готовым рабочим составом, нагретым до температуры процесса. Поверхность образцов предварительно обезжиривали и декапировали в 5...10 %-ном растворе серной кислоты в течение 1...2 мин. После ГХО проводили нагрев твердого сплава: в воздушной среде — до 200 °С, а в защитной среде — выше 200 °С.

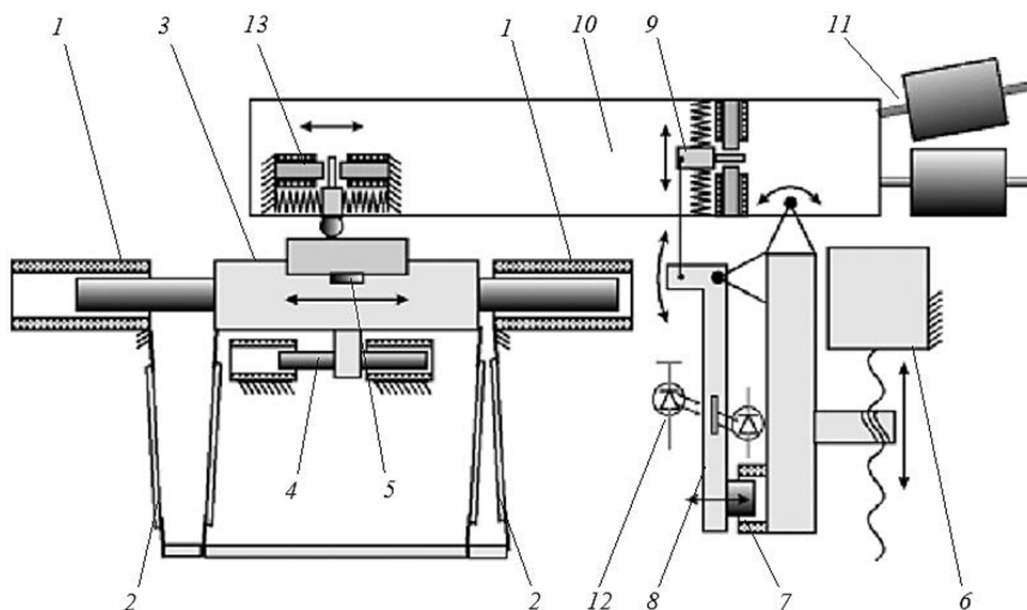
Определение триботехнических свойств поверхности осуществляли на микротрибометре возвратно-поступательного типа (рисунок 1) по схеме «подвижный шарик — неподвижная плоскость» при условиях испытаний: нагрузка — 1 Н; длина хода (трека) — 3 мм, скорость — 4 мм / с; пара трения: упрочненный твердый сплав (плоскость) — сталь 95Х18 (сфера диаметром 3 мм) [5; 7]. Показатель относительной износостойкости упрочненного твердосплавного инструмента определяли по формуле

$$K_w = t_2 / t_1,$$

где t_2 — время работы упрочненного инструмента;

t_1 — время работы (длина рабочего хода) исходного инструмента.

При технологической оптимизации параметров процесса ТГХО твердого сплава ВК6 применяли синтез-технологии метода многомерного проектного синтеза технологических объектов, технологий и материалов в виде базовой компьютерной программы «СИНТЕЗ МК» [22]. Алгоритм многомерного компьютерного проектирования данного процесса складывается из решения двух главных задач: прямой задачи оптимизации и обратной задачи 100 %-ной воспроизводимости оптимальных параметров процесса в заданных полях производственных допусков применяемого технологического оборудования.



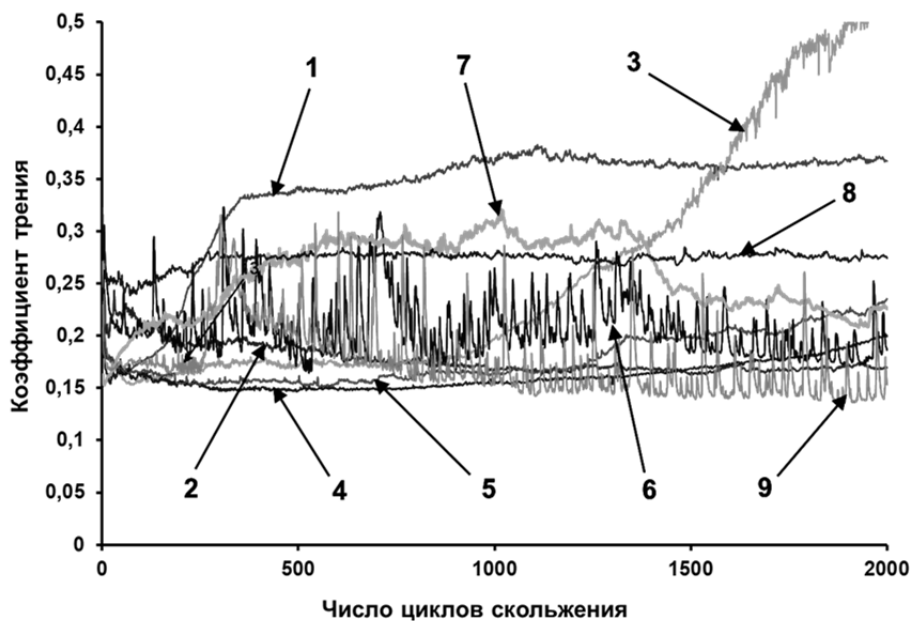
1 — электромагниты привода; 2 — направляющие изгиба; 3 — столик-держатель образца; 4 — датчик положения; 5 — датчик трибоакустической эмиссии; 6 — шаговый привод; 7 — электромагнит системы нагружения; 8 — рычаг; 9 — датчик нагрузки; 10 — головка; 11 — балансировочные грузы; 12 — оптопара; 13 — датчик силы трения

Рисунок 1. — Микротрибометр возвратно-поступательного типа с максимальной прилагаемой нагрузкой 1 Н (производства ИММС, Гомель, Беларусь)

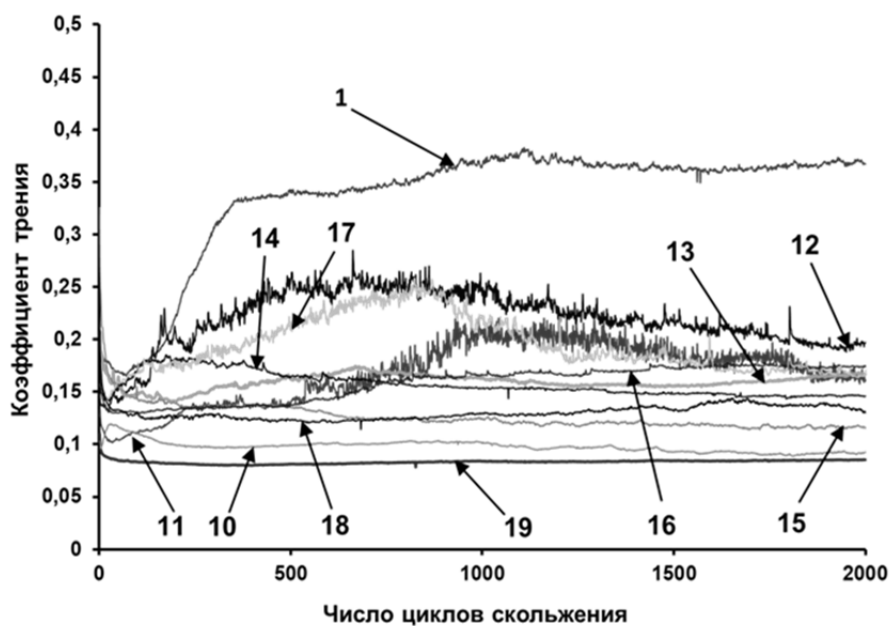
Для реализации многомерного проектного синтеза технологической системы использован комплекс методов: решения обратных многокритериальных задач, компьютерного выбора технически оптимального варианта, выделения областей устойчивости исследуемой технологической системы в многомерном пространстве технологических параметров и метод построения графического изображения состояний технологической системы. Метод многомерной технологической оптимизации [22] в отличие от метода, описанного в источнике [21], позволяет:

- выбирать технически оптимальный вариант, обладающий наибольшей устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов производства;
- одновременно решать обратные многокритериальные задачи: выделять в пространстве системы области устойчивости и выбирать технически оптимальный вариант технологической системы при обеспечении требуемого уровня свойств материала;
- выбирать в пространстве технологических параметров область устойчивого состояния системы, в которой стабильно воспроизводятся заданные свойства материала.

Результаты исследования и их обсуждение. Для проведения многомерной оптимизации технологии ТГХО твердый сплав ВК6 сначала подвергали ГХО в течение 11...15 мин в кипящей вододисперсионной среде, содержащей равное соотношении оксидов ZnO и MoO₃ с добавкой 4...8 % ПАВ, затем осуществляли отпуск при температуре 130...170 °С, поскольку в таких условиях формируются покрытия с наилучшими антифрикционными свойствами (рисунок 2). При оптимизации варьировали температуру и время ГХО, долевое содержание ПАВ и температуру ТО. В таблице 1 представлены результаты триботехнических испытаний твердого сплава, полученные при реализации 11 опытов плана экспериментов [21].



а)



б)

1 — твердый сплав ВК6 (до обработки); режим ГХО: 2 — 5 мин; 3 — 10 мин; 4 — 13 мин; 5 — 15 мин; 6 — 17 мин; 7 — 20 мин; 8 — 30 мин; 9 — 80 мин; режим ТО: 10 — 150 °C; 11 — 200 °C; 12 — 300 °C; 13 — 400 °C; 14 — 500 °C; 15 — 600 °C; 16 — 700 °C; 17 — 800 °C; 18 — 900 °C; 19 — 1 000 °C

Рисунок 2. — Влияние параметров процесса ТГХО на коэффициент трения поверхностного слоя твердого сплава ВК6

Примечание. Режим ТГХО: состав вододисперсионной среды для ГХО на основе $\text{ZnO} + \text{MoO}_3$: а — ГХО при $T = 100$ °C без ТО; б — ТО при $\tau = 20$ мин после ГХО при $T = 100$ °C, $\tau = 13$ мин; условия испытаний: сухое трение скольжения (без смазки); пара трения: упрочненный твердый сплав ВК6 (плоскость) — сталь 95Х18 (сфера диаметром 3 мм); нагрузка — 1 Н; длина хода (трека) — 3 мм, скорость — 4 мм / с.

Т а б л и ц а 1. — Результаты исследования коэффициента трения покрытий, полученных при ТГХО сплава ВК6 с применением среды на основе $ZnO + MoO_3$

Номер опыта	Факторы				Коэффициент трения за 2 000 циклов, f
	Гидрохимическая обработка ГХО			Температура T , °C	
	Температура T , °C	Время τ , мин	Доля ПАВ в составе, %		
Условное обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1
Основной уровень (0)	98	13	6	150	
Интервал варьирования	2	2	2	20	
Верхний уровень (+1)	100	15	8	170	
Нижний уровень (−1)	96	11	4	130	
1	+	+	+	+	0,098
2	−	+	+	−	0,104
3	+	−	+	−	0,110
4	−	−	+	+	0,109
5	+	+	−	+	0,100
6	−	+	−	−	0,102
7	+	−	−	−	0,113
8	−	−	−	+	0,107
9	0	0	0	0	0,095
10	0	0	0	0	0,092
11	0	0	0	0	0,090

На основании данных таблицы 1 рассчитаны линейные и нелинейные математические модели, описывающие влияние температурно-временных параметров ТГХО и состава активной среды на коэффициент трения полученных твердосмазочных покрытий на основе оксидов цинка и молибдена. Однако адекватной признана только нелинейная многокритериальная математическая модель следующего вида:

$$Y_1 = -1,66 + 4,43 \cdot 10^{-2} X_1 + 2,21 \cdot 10^{-2} X_2 - 4,56 \cdot 10^{-2} X_3 - 1,57 \cdot 10^{-3} X_4 - 2,65 \cdot 10^{-4} X_1^2 - 1,47 \cdot 10^{-3} X_2^2 + 3,92 \cdot 10^{-3} X_3^2 + 5,36 \cdot 10^{-6} X_4^2 + 1,42 \cdot 10^{-4} X_1 X_2 - 9,37 \cdot 10^{-6} X_3 X_4,$$

где Y_1 — коэффициент трения;

X_1 — температура ГХО;

X_2 — время ГХО;

X_3 — доля ПАВ в порошковом составе насыщающей вододисперсионной среды;

X_4 — температура изотермической выдержки.

Из-за многокритериальности, стохастичности и нелинейности технологической системы «процесс ТГХО твердого сплава ВК6» прогнозирование ее поведения усложняется. У каждого реального объекта значения параметров отличаются от расчетных и случайным образом распределены в поле рассеивания. Вследствие этого нет гарантии полного попадания точек оптимизации реальной системы в область устойчивости, т. е. не всегда можно улуч-

шить свойства материала до заданного уровня свойств. Чтобы такого не произошло, при многомерной технологической оптимизации процесса предусмотрен определенный запас устойчивости системы, который позволяет избежать ухудшения качества функционирования системы по критерию воспроизводимости свойств материала.

При традиционной методологии оптимизации параметров системы решения задач технологического проектирования системы не совсем корректны, поскольку процессы рассматриваются как детерминированные, т. е. проходящие при соблюдении точных значений параметров технологической системы. В действительности детерминированных систем не существует, так как значения параметров реальных технологических систем всегда являются случайными, а сами системы стохастическими. Выбор технически оптимального варианта ТГХО твердого сплава ВК6 в гидрозоле оксидов цинка и молибдена осуществляли путем компьютерного проектирования технологических систем методом многомерного проектного синтеза технических объектов, технологий и материалов [22] с применением специально разработанной программы «СИНТЕЗ МК», которая предназначена решать нелинейные и стохастические задачи для обеспечения полной работоспособности технологических систем.

Многомерную технологическую оптимизацию нового процесса ТГХО твердого сплава ВК6 с помощью компьютерной программы «СИНТЕЗ МК» осуществляли в несколько этапов [22].

Результаты выбора оптимального варианта изучаемой технологической системы сведены в таблицу 2. Оптимальные показатели трибосвойства покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО с применением гидрозоля на основе $ZnO + MoO_3$ и поля их рассеивания: наименование оптимального показателя свойств — коэффициент трения f ; номинальное значение — 0,090; поле рассеивания — 0,027.

При решении обратной многокритериальной задачи были заданы желаемые уровни показателей свойств твердосмазочных покрытий, полученных при ТГХО твердого сплава ВК6. Заданные границы трибосвойства покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО с применением гидрозоля на основе $ZnO + MoO_3$: наименование желаемого показателя свойств — коэффициент трения f ; минимальное значение — 0,079; максимальное значение — 0,106.

Результаты виртуальных испытаний работоспособности системы в условиях влияния дестабилизирующих факторов производства приведены в таблице 3.

Для графической интерпретации результатов, полученных при решении задач исследования и проектирования технологии ТГХО твердого сплава ВК6 с применением гидрозоля на основе оксидов цинка и молибдена, построены дискретные портреты (рисунок 3). Выделение областей устойчивости в многомерном пространстве состояний является важным этапом выбора технически оптимального варианта системы.

Т а б л и ц а 2. — Оптимальные параметры ТГХО твердого сплава ВК6 с применением гидрозоля на основе $ZnO + MoO_3$ и поля их рассеивания

Наименование параметра процесса	Номинальное значение	Разрешенные поля рассеивания
Температура гидрохимической обработки, °C	99	2
Время гидрохимической обработки, мин	13	1,8
Доля ПАВ в составе, %	5,7	2,6
Температура термообработки, °C	147	26

Т а б л и ц а 3. — Запас работоспособности технологической системы по входным параметрам

Наименование параметра процесса	Значение параметра	Значение производственного допуска	Поле производственного допуска	Коэффициент работоспособности
Температура ГХО, °C	99	± 1	2	1,0
Время ГХО, мин	13	$\pm 0,1$	0,2	9,0
Доля ПАВ в составе, %	5,7	$\pm 0,1$	0,2	13,0
Температура термообработки, °C	147	± 5	10	2,6

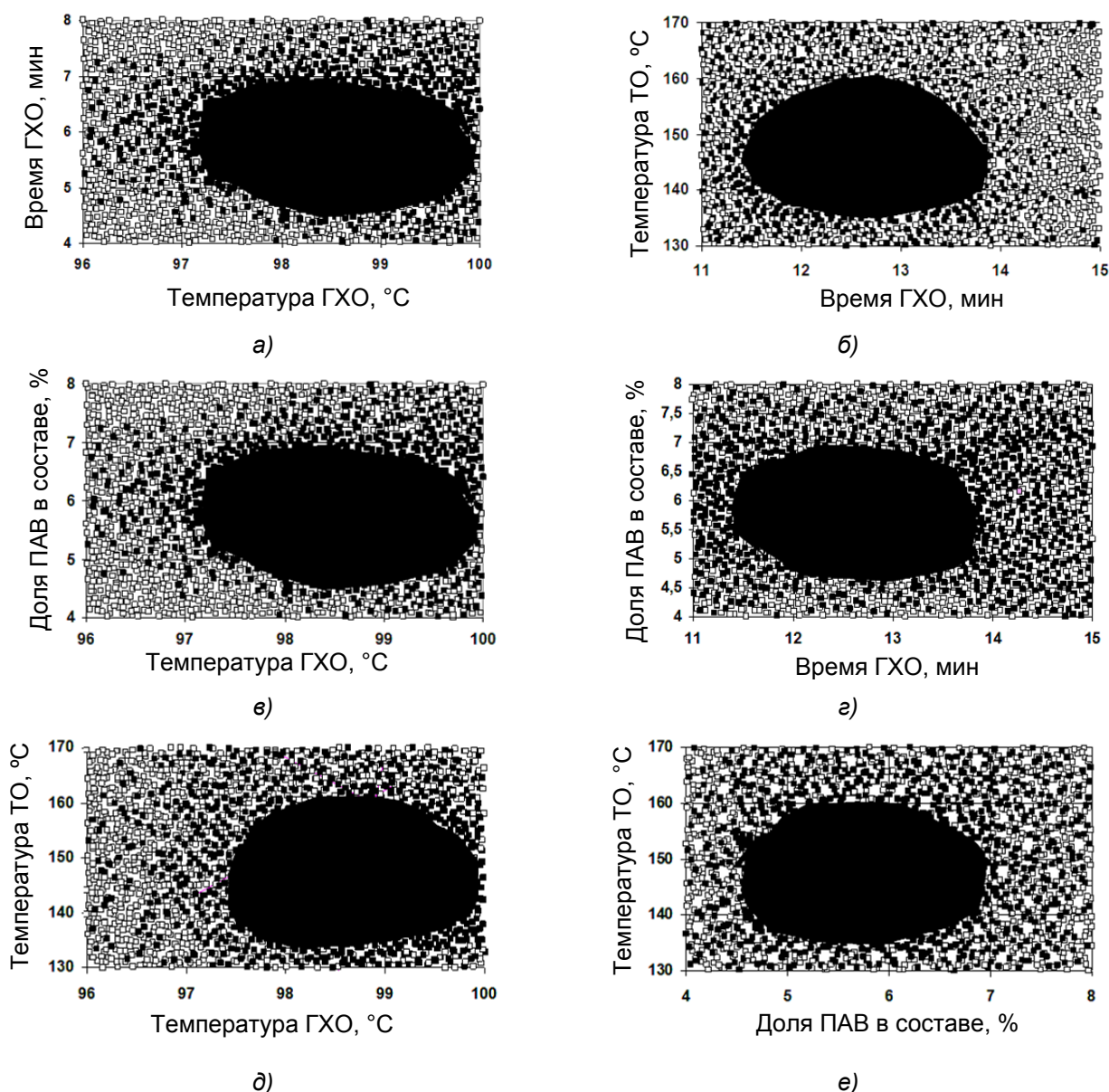


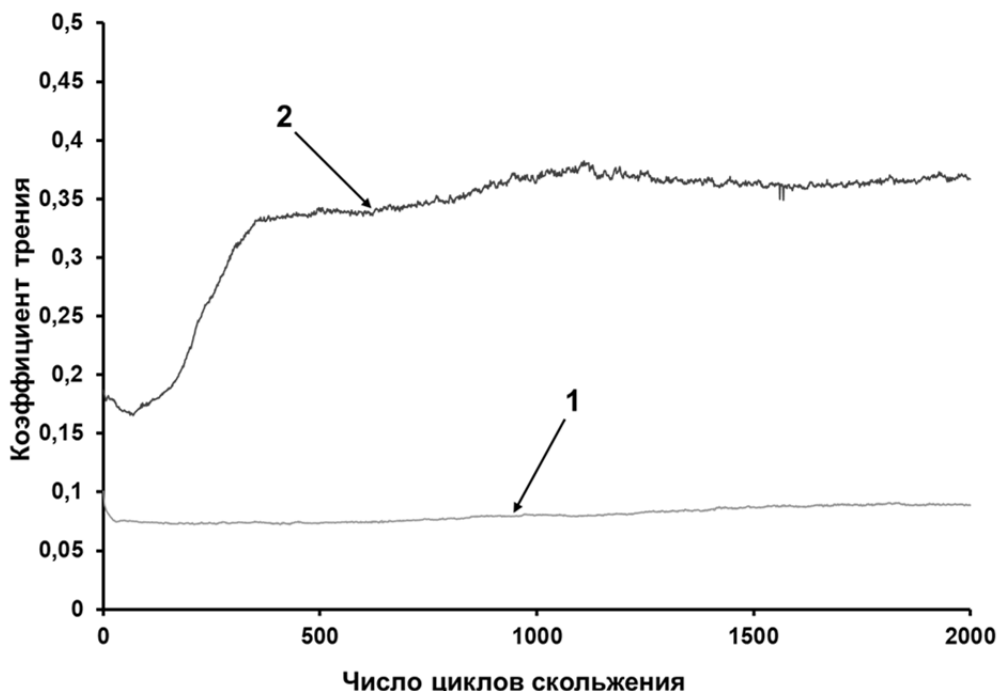
Рисунок 3. — Дискретные портреты виртуального пространства технологической системы процесса ТГХО твердого сплава ВК6 с использованием гидрозоля оксидов цинка и молибдена: а — зависимость времени ГХО от ее температуры; б — зависимость температуры термообработки от времени ГХО; в — зависимость доли ПАВ в составе от температуры ГХО; г — зависимость доли ПАВ в составе от времени ГХО; д — зависимость температуры термообработки от температуры ГХО; е — зависимость температуры термообработки от доли ПАВ в составе

Примечание. ♦ — вариант системы, обеспечивающий заданные свойства твердого сплава ВК6;
 ◇ — вариант системы, не обеспечивающий заданные свойства твердого сплава ВК6.

В качестве критерия оптимизации выступает коэффициент трения с желаемым уровнем 0,079...0,106. Из рисунка 3 видно, что технология ТГХО твердого сплава ВК6 с применением гидрозоля на основе оксидов цинка и молибдена реализуется с высокими показателями триботехнического свойства (коэффициента трения) только тогда, когда система попадает в области устойчивости, отмеченные темными точками. Выход одного или нескольких параметров процесса за пределы областей устойчивости в области, отмеченные светлыми точками, свидетельствует о том, что материал покрытия с заданными значениями триботехнического свойства в этом случае не будет получен.

В результате решения задачи многомерной технологической оптимизации процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в гидрозоле оксидов цинка и молибдена установлены фактические показатели основного триботехнического свойства — коэффициента трения f (номинальное значение — 0,090; границы рассеивания показателей свойств: нижняя — 0,079; верхняя — 0,106), 100 %-ная воспроизводимость которого достигается при точном соблюдении параметров процесса в пределах производственных допусков (см. таблицу 3). Это подтвердили и результаты испытаний (рисунок 4). Для любого инструмента, у которого место контакта с обрабатываемой деталью меняется со временем [23], важно иметь на протяжении всего периода эксплуатации не только минимальные, но и неизменные значения коэффициента трения. Таким требованиям отвечают полученные методом ТГХО покрытия; в этом случае они имеют преимущества перед другими известными твердосмазочными покрытиями [18].

В результате многомерной компьютерной оптимизации изучаемой технологии ТГХО достигнуто значительное (в 4,1 раза) снижение коэффициента трения твердого сплава ВК6 без смазки по сравнению с исходным состоянием: с 0,37 до 0,09 (см. рисунок 4).



1 — твердый сплав ВК6 после ТГХО в оптимальном режиме и составе на базе $ZnO + MoO_3$; 2 — исходный твердый сплав ВК6 (без обработки)

Рисунок 4. — Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания (без смазки) поверхности твердого сплава ВК6 до и после ТГХО

Т а б л и ц а 4. — Результаты испытаний твердосплавных инструментов, подвергнутых ТГХО

Вид инструмента	Вид твердого сплава	Место испытаний	Повышение стойкости инструмента K_w
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	T15K6	«БЕЛАЗ», «КЗТШ», «АГУ» (Беларусь)	1,8...3
	MP4	«БМЗ» (Беларусь)	1,3
	Sandvik CT35, Orion HC6620	«Веза» (Россия)	1,6...1,7
	Karloy PC9030	«Искра» (Россия)	2,2
Режущие пластины для черновой токарной обработки	T15K6	«Мотовело» (Беларусь)	3...4
	PT40	«БМЗ» (Беларусь)	2,6...3,3
	Kennametal KCU10 Walter WSM20	«НОВОМЕТ-ПЕРМЬ» (Россия)	1,8...3,6
Резцы гальтельные	T15K6	«МПЗ» (Беларусь)	2
Торцевые фрезы сборные	МК8	«БМЗ» (Беларусь)	1,6...2
	T15K6	«МПЗ» (Беларусь)	2,1
Волоки для металлокорда	Разные марки твердых сплавов	«БМЗ» (Беларусь)	1,4...1,8

Результаты производственных испытаний показали, что ТГХО с использованием оксидосодержащих вододисперсных составов позволяет увеличить стойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3...4,0 раза по сравнению с необработанными (таблица 4) [6; 7]. Анализируя результаты испытаний, следует отметить, что наивысшие показатели стойкости твердосплавных режущих инструментов достигнуты при черновой токарной и фрезерной обработке, особенно труднообрабатываемых высоколегированных сталей и сплавов. Технология ТГХО разных твердых сплавов с использованием нанодисперсионных сред внедрена в Беларуси на машиностроительных предприятиях «БЕЛАЗ», «Мотовело» и «АГУ».

Заключение. Выполнено математическое моделирование и технологическая оптимизация процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в среде гидрозоля оксидов цинка и молибдена с помощью компьютерных технологий метода многомерного проектного синтеза технических объектов, технологий и материалов. Определены технически оптимальные режимы для реализации процесса в производстве с гарантированным достижением заданных свойств термогидрохимически упрочненных твердосплавных инструментов.

Термогидрохимическая обработка твердого сплава ВК6 по оптимальному режиму в гидрозоле оксидов цинка и молибдена позволяет существенно (в 4,1 раза) снизить коэффициент трения твердосплавной поверхности в условиях сухого трения скольжения.

Разработана простая безэлектролизная и высокопроизводительная технология ТГХО, которая позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3...4,0 раза по сравнению со стандартными.

Список цитированных источников

1. Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия : пер. с англ. / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки. — М. : Мир, 2000. — 518 с.
2. Материаловедение : учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 648 с.

3. Наноструктурные покрытия : пер. с англ. / под. ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. — М. : Техносфера, 2011. — 752 с.
4. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под ред. В. С. Чередниченко. — М. : Омега-Л, 2008. — 752 с.
5. *Shmatov, A.* Thermo-hydrochemical treatment for tool materials / A. Shmatov, L. Soos, Z. Krajny. — Bratislava : Slovak Technical University, 2014. — 115 p.
6. *Шматов, А. А.* Характер упрочнения твердых сплавов при термогидрохимической обработке / А. А. Шматов // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2022. — № 1. — С. 48—55.
7. *Шматов, А. А.* Научные и технологические основы термохимических и термоциклических методов упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.01, 05.02.07 / А. А. Шматов. — Минск, 2020. — 344 л.
8. *Польцер, Г.* Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф. Майсснер. — М. : Машиностроение, 1984. — 264 с.
9. *Мышкин, Н. К.* Трение, смазка, износ / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 368 с.
10. *Фридман, Я. Б.* Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. — М. : Машиностроение, 1974. — Т. 2. — 135 с.
11. *Гаркунов, Д. Н.* Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д. Н. Гаркунов, П. И. Корник. — М. : Изд-во МСХА, 2003. — 344 с.
12. *Мартин, Дж.* Стабильность микроструктуры металлических систем : пер. с англ. / Дж. Мартин, Р. Доэрти. — М. : Атомиздат, 1978. — 280 с.
13. *Воронков, Г. Я.* Феномен поверхности — мир межфазной границы / Г. Я. Воронков. — М. : Поколение, 2009. — 208 с.
14. *Дорофеев, Б. М.* Звуковые явления при кипении : автореф. ... дис. д-ра физ.-мат. наук : 01.04.14 / Б. М. Дорофеев. — Нальчик, 1994. — 53 с.
15. *Акуличев, В. А.* Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях / В. А. Акуличев. — М. : Наука, 1978. — 220 с.
16. *Поляченко, О. Г.* Физическая и коллоидная химия / О. Г. Поляченко, Л. Д. Поляченко. — Могилев : МГУП, 2008. — 196 с.
17. *Сумм, Б. Д.* Основы коллоидной химии / Б. Д. Сумм. — М. : Академия, 2009. — 240 с.
18. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П. А. Витязь [и др.]. — Минск : Беларус. навука, 2007. — 170 с.
19. *Самсонов, Г. В.* Тугоплавкие соединения : справ. по свойствам и применению / Г. В. Самсонов. — М. : Металлургиздат, 1963. — 399 с.
20. Физико-химические свойства окислов : справочник / под ред. Г. В. Самсонова — М. : Metallurgia, 1978. — 472 с.
21. *Новик, Ф. С.* Математические методы планирования экспериментов в металловедении / Ф. С. Новик. — М. : МиСИС, 1971. — Разд. IV. — 148 с.
22. *Витязь, П. А.* Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования / П. А. Витязь, О. В. Жилинский, Т. В. Лактюшина // Физ. мезомеханика. — 2004. — Т. 7. — С. 3—11.
23. *Бельский, С. Е.* Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента / С. Е. Бельский, Р. Л. Тофпенец. — Минск : Наука и техника, 1984. — 128 с.

Поступила в редакцию 09.09.2022.

УДК 621.791.927.5

В. С. Голубев¹, кандидат технических наук,
И. И. Вегера¹, кандидат технических наук,
В. Е. Ходюш¹, П. С. Дробышевский²

¹Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 638 19 50, gvs_fti@mail.ru

²Открытое акционерное общество «Гомсельмаш», ул. Шоссейная, 41, 246004 Гомель, Республика Беларусь

НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКИХ СЛОЕВ НА РАБОЧИЕ КРОМКИ ПРОТИВОРЕЖУЩИХ БРУСЬЕВ КОРМОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

В данной работе приведены результаты исследований микроструктуры, качества и ряда физико-механических характеристик износостойких слоев, создаваемых на рабочих кромках образцов противорежущих брусьев из стали 45 методами электродуговой и индукционной наплавки. Электродуговой наплавкой формировались упрочненные слои из износостойких сплавов трех различных составов на стальной и чугуновой основах. Для индукционной наплавки использовались порошки износостойких сплавов на никелевой и кобальтовой основах. Проведенные полевые испытания показали, что разработанная технология электродуговой наплавки дает положительный эффект, ресурс работы упрочненных деталей повышается. Выполненные эксперименты по индукционной наплавке на рабочие кромки противорежущих брусьев с использованием самофлюсующихся порошков показали, что наплавленные слои являются достаточно однородными и имеют характерную мелкоячеистую и дендритную структуру. При этом наблюдается полное заполнение нужного профиля, отсутствуют поры, трещины, несплошности и другие дефекты.

Ключевые слова: электродуговая наплавка; индукционная наплавка; наплавленный слой; микроструктура; твердость.

Рис. 4. Библиогр.: 8 назв.

V. S. Golubev¹, PhD in Technical Sciences,
I. I. Vegera¹, PhD in Technical Sciences,
U. E. Khodziush¹, P. S. Drobyshevsky²

¹State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 10 Akademician Kuprevich Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 31 24, gvs_fti@mail.ru

²Open Joint-Stock Company “Gomselmash”, 41 Shosseynaya Str., 246004 Gomel, the Republic of Belarus

SURFACING OF WEAR-RESISTANT LAYERS ON THE WORKING EDGES OF ANTI-CUTTING BARS OF FORAGE HARVESTERS

This paper presents the results of the microstructure studies, quality, and a number of physical and mechanical characteristics of wear-resistant layers created on the working edges of anti-cutting bars samples made of steel 45 by electric arc and induction surfacing methods. Hardened layers of wear-resistant alloys of three different compositions were formed by electric arc surfacing on steel and cast iron bases. Powders of wear-resistant alloys on nickel and cobalt bases were used for induction surfacing. Conducted field tests have shown that the developed technology of electric arc

surfacing has a positive effect, the service life of hardened parts increases. The performed experiments on induction surfacing on the working edges of anti-cutting bars using self-fluxing powders showed that the deposited layers are quite homogeneous and have a characteristic fine-meshed and dendritic structure. In this case, complete filling of the desired profile is observed, there are no pores, cracks, discontinuities and other defects.

Key words: arc welding; induction welding; deposited layer; microstructure; hardness.

Fig. 4. Ref.: 8 titles.

Введение. Основными причинами выхода из строя сменных деталей измельчающих узлов кормоуборочных комбайнов (ножей, противорежущих брусьев) являются износ, растрескивание рабочих кромок и поверхностей, выкрашивание, деформация и поломка. Все эти проявления требуют от используемого материала наличия определенных физико-механических свойств. Так, для повышения стойкости к абразивному износу необходимо наличие гетерофазной структуры с включениями повышенной твердости. Возрастание твердости в целом может вызывать повышение хрупкости, следовательно, повысится вероятность выкрашивания рабочих кромок и поверхностей, которое будет способствовать еще более интенсивному износу.

Уменьшить склонность к выкрашиванию и трещинообразованию возможно только увеличением его вязкости, повышая работу ударного разрушения. Потеря твердости чаще всего связана с изменением структурно-фазового состояния материала. Одним словом, решить проблему можно с использованием технологий создания слоистых материалов, формируя на поверхности рабочие слои с необходимыми эксплуатационными свойствами. Поскольку работоспособность некоторых деталей часто определяется свойствами работающих поверхностных слоев, технически и экономически целесообразно при изготовлении металлоемких изделий использовать материалы с резко различающимися свойствами для сердцевины, кромок или поверхности, применяя различные технологии и варианты при их изготовлении, а также составы износостойких материалов [1—7].

Так, например, увеличивая вязкость и трещиностойкость нанесенных на поверхность слоев, можно повысить стойкость всего изделия при воздействии на него динамических, циклических, механических и других нагрузок. Повышение износостойкости может быть достигнуто нанесением слоев, содержащих в структуре твердые растворы с легирующими элементами, которые образуют карбиды с высокой твердостью и термической стабильностью твердых растворов и карбидов.

В настоящее время существует большое количество технологий и методов для получения слоев необходимой глубины с заданными свойствами. В частности, наплавка — нанесение слоя расплавленного металла на оплавленную металлическую поверхность (основу) посредством плавления присадочного материала теплотой газового пламени (кислородно-ацетиленового или пропанового), лазерным излучением, электрической или плазменной дугой, индукционным нагревом и др. Каждый из методов имеет в определенной степени общие недостатки и достоинства, связанные с выбором соответствующих материалов и оборудования и технологическими особенностями процесса наплавки [1—7].

Материалы и методы исследования. В данной работе проведены исследования микроструктуры, качества и ряда физико-механических характеристик износостойких слоев, создаваемых на рабочих кромках образцов из стали 45 методами электродуговой и индукционной наплавки. Для отработки технологии наплавки, пригодности выбранного метода и выбора оптимальных составов наплавочных материалов были изготовлены образцы длиной 250 мм, сечением 60 × 30 мм, на ребрах которых выфрезировывались соответствующие открытые или закрытые пазы с размерами ~10 × 10 мм. Размеры наплавленных нами опытных образцов противорежущих брусьев и аналогичных готовых изделий для конкретных сельскохозяйственных машин были одинаковы. Это позволяло получать данные об изменении возникающих изгибающих моментов и короблений по длине образцов в целях учёта этих факторов

в дальнейшем при разработке технологии изготовления, а также для дальнейшей оптимизации выбранных методов наплавки, составов наплавочных материалов и режимов термической обработки в технологическом цикле изготовления такого рода длинно-размерных изделий.

Далее методом электродуговой наплавки формировали упрочненные валики (рисунок 1, а) наплавленного металла из трех различных составов износостойких сплавов. Для этих целей использовали электроды со специальным защитным покрытием: состав 1 — высоколегированный хромосодержащий сплав (С-4,75 %, Si-1,37 %, Cr-23,7 %...), состав 2 — легированная сталь (С-0,65 %, Si-0,7 %, Cr-4 %...), состав 3 — легированный чугун (С-3 %, Si-2 %, Cr-8 %...). Слои формировались при наплавке электродов за несколько проходов. При этом ток дуги экспериментально выбирался в диапазоне 120...200 А. Наплавку на рабочие грани образцов проводили при комнатной температуре (холодная подложка) и при предварительном нагреве их в печи до различных температур. Исходная структура образцов была феррито-перлитной. Микротвердость феррита при этом составляла 2 250...2 400 МПа (20...23 HRC), твердость перлита — 2 560...2 690 МПа (25...27 HRC).

Индукционный нагрев (см. рисунок 1, б) в целях наплавки осуществляли непрерывно-последовательным методом, используя для этого установки нагрева токами высокой частоты ФТИ 3.148.1, ФТИ 3.148.2. Оборудование комплектовалось высокочастотными преобразователями в различных диапазонах частот и специальными индукторами, спроектированными и изготовленными в лаборатории скоростных методов термообработки ФТИ НАН Беларуси. Основными параметрами при нагреве с использованием воздействия токами высокой частоты является частота используемого источника и его мощность. При этом для наплавки применялись индуктора с воздействием как внутреннего, так и внешнего поля. В первом случае при использовании для нагрева внутреннего поля индуктор имел исполнение в виде замкнутой водоохлаждаемой плоской и широкой трубки, между витками которой располагалась нагреваемая деталь. При наплавке внешним полем в качестве дополнительных элементов применялись ферритные вставки, цель которых — «выдавливает» электромагнитное поле наружу витка.

Для наплавки использовались порошки износостойких сплавов на никелевой (Т-Термо 55, ПГ-10Н-01 и Т-Термо 650 (ПГ-10Н-01 + 50 % WC)) и кобальтовой (ПГ-10К-01) основах. Изучение структурных и фазовых превращений проводилось с применением металлографического, электронно-микроскопического и рентгеноструктурного анализов. Исследования физико-механических свойств проводились по стандартным методикам.



а)



б)

**Рисунок 1. — Образец противорежущего бруса с наплавленной кромкой:
а — электродуговая наплавка; б — индукционная наплавка**

Результаты исследования и их обсуждение. Выполненный нами анализ структуры образцов, вырезанных из противорежущих брусьев, производства ведущих зарубежных фирм, поставляемых в нашу республику, показал, что этими фирмами используются конструкционные недорогие стали типа Ст45 или 65Г с наплавкой на рабочие грани слоя легированного белого износостойкого чугуна толщиной ~4...5 мм. В частности, противорежущие брусья кормоуборочных комбайнов немецких фирм Claas, John Deere изготавливаются из сталей, не подвергнутых термической обработке с наплавкой рабочих кромок износостойким чугуном, легированным хромом, ванадием, вольфрамом и др. Как известно [1—2], износостойкие сплавы на основе высокохромистых белых чугунов широко применяются для поверхностного упрочнения электродуговой наплавкой деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания в сочетании с ударными нагрузками умеренной интенсивности. Для таких материалов оптимальное сочетание эксплуатационных характеристик по износостойкости и ударной вязкости достигается при полностью эвтектической структуре. Присутствие в их структуре дендритов твердого раствора приводит к снижению твердости и, соответственно, сопротивляемости абразивному изнашиванию.

Выполненные далее исследования показали следующее. Микроструктура наплавленного нами слоя, полученного с использованием хромосодержащего сплава (состав 1), состояла из первичных частиц карбидов с геометрической формой огранки (шестигранной, ромбической, треугольной и др.), характерной для карбидов хрома, образующихся в системе Fe—C—Cr с микротвердостью порядка 10 700...12 000 МПа, дендритов твердого раствора и эвтектики из карбидной фазы и твердого раствора. При этом размеры ячеек твердого раствора в дендритных ветвях наплавки изменялись, укрупняясь к границе сплавления с материалом подложки, их твердость составляла 5 300...5 400 МПа (49...50 HRC), твердость эвтектики была на уровне 6 000...6 300 МПа (54...55 HRC).

Металл подложки, граничащий с наплавленным слоем, претерпевает закалку. Непосредственно на границе располагается мартенситный слой в смеси с остаточным аустенитом глубиной приблизительно 0,3...0,35 мм. Твердость этого слоя составляла 6 200...6 500 МПа (55...56 HRC). В слоях ниже мартенсит испытывает отпуск, в структуре присутствует отпущенный мартенсит в смеси с трооститом и остаточным аустенитом, причем мартенсит, располагающийся ближе к наплавленному слою, претерпевает отпуск в большей степени, чем мартенсит, расположенный глубже. Таким образом, степень протекания релаксационных процессов в мартенсите уменьшается по мере удаления от наплавленного слоя [6]. В этой связи твердость непосредственно под наплавленным слоем меньше, чем на некотором удалении от границы сплавления. В итоге вначале твердость ниже, а затем по мере удаления повышается. Следует отметить, что при наплавке на холодный образец в наплавленном слое могло наблюдаться возникновение трещин.

Характер изменения микроструктуры в образцах с наплавкой на предварительно подогретые подложки аналогичен. В наплавленных слоях и подложке структурные составляющие те же, но в структуре материала образцов при наплавке на подогретые образцы изменялась протяженность областей существования фаз. Происходило сужение размеров зон, наблюдался более быстрый переход к области, где фиксируется обособление зерен перлита с приграничными разреженными участками с дальнейшим переходом их в феррит с мелкими карбидами. Таким образом, под слоем наплавки вначале наблюдается образование структур неполной закалки.

Было опробовано также наплавление кромок брусьев стальными (состав 2) и чугунными электродами другого состава по такой же технологии наплавки (состав 3). Микроструктура слоя, наплавленного электродуговым методом с использованием стального электрода, состояла из дендритов твердого первичного раствора, закаленного на мартенсит в смеси с остаточным аустенитом. При этом твердость слоя, наплавленного на холодную подложку, составляла 6 670...7 450 МПа (57...60 HRC). На границе сплавления твердость была ~4 750 МПа (46 HRC). Непосредственно под наплавленным слоем в подложке наблюдалась

смесь из перлита, небольшого количества феррита и отпускаемого мартенсита. Твердость здесь составляла $\sim 3\,200$ МПа (33 HRC), т. е. основу приграничного слоя образца составляют структуры неполной закалки в виде претерпевшего отпуск мартенсита в смеси с трооститом и остаточный аустенит. Под этим слоем располагается такая же структура, но твердость этой смеси несколько выше — $\sim 4\,200\ldots 4\,350$ МПа (42...43 HRC) — вследствие количественного изменения состава фаз и величины отпуска мартенситной фазы [6].

При применении этого состава стали на подогретые образцы в структуре дендритов наплавленного слоя наблюдается так же, как и при наплавке на холодную основу, распад пересыщенных легирующими элементами приграничных зон первичного твердого раствора, при этом происходит выделение смеси карбидной фазы и, по-видимому, аустенита на стыках ветвей и по границам зёрен (рисунок 2).

Следует отметить, что непосредственно на самой поверхности слоя этот распад был не столь значительным и происходил с образованием небольшого количества продуктов распада. В то же время по мере приближения к границе сплавления с материалом подложки количество распавшегося твердого раствора увеличивалось (см. рисунок 2, а). При этом в центральных объемах ветвей дендритов твердого раствора происходило превращение в мартенсит игольчатой морфологии. В этих случаях степень перенасыщенности твердого раствора падает, что сопровождается уменьшением искаженности кристаллической решетки как в твердом растворе, так и в образованном из него мартенсите. По этой причине твердость по сечению наплавленного слоя в твердом растворе снижается от $\sim 7\,750\ldots 7\,450$ МПа (60...61 HRC) на поверхности до $\sim 3\,450$ МПа (38 HRC) вблизи слоя наплавки. С ростом температуры образцов снижение твердости вблизи границы с подложкой интенсифицируется.

На всех образцах границы сплавления с подложкой были сплошными, а слои без наличия трещин. Однако необходимо отметить, что у этого состава сплава относительно низкая жидкотекучесть расплава, вследствие чего возможно образование такого дефекта, как неполное заполнение расплавом угла в выборке по ребру образца. Данный состав материала наплавки уступал предыдущему по твердости, но при его применении в наплавленном слое не возникало трещин.

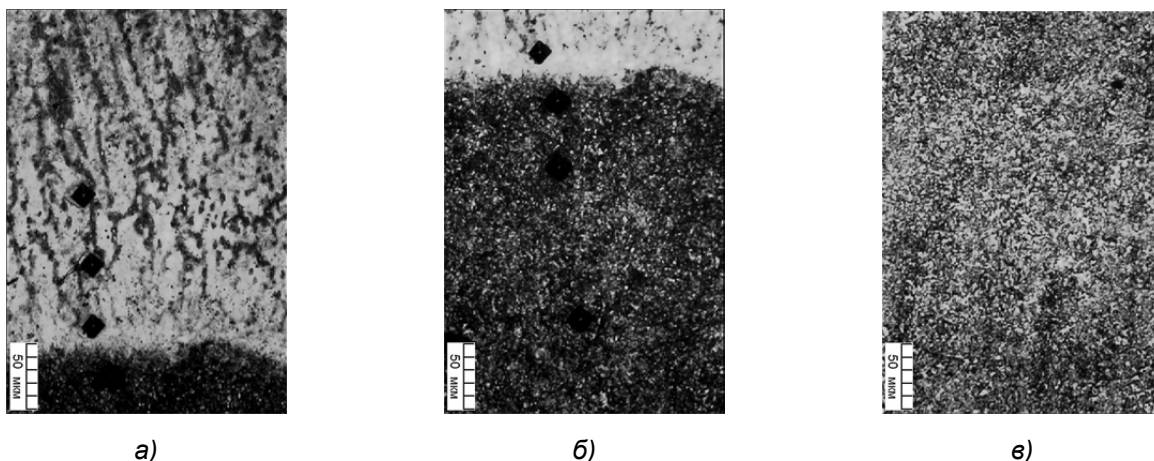


Рисунок 2. — Изменение микроструктуры после наплавки стальным электродом на подогретую до $300\,^{\circ}\text{C}$ основу подложки, $\times 400$: а — структура наплавленного слоя (дендриты первичного твердого раствора, закаленного на мартенсит в смеси с остаточным аустенитом и частичным распадом твердого раствора по границам дендритных ветвей с выделением карбидной фазы и троостита); б — микроструктура границы сплавления и подложки, прилегающей к границе (смесь из мартенсита игольчатой морфологии, остаточного аустенита и троостита); в — микроструктура подложки по мере углубления от сплавления (смесь из мартенсита, остаточного аустенита, троостита и цепочек цементита по границам бывших аустенитных зёрен)

В экспериментах по наплавке электродом из чугуна (состав 3) с содержанием более 3 % углерода и других элементов в структуре наплавленного слоя наблюдались первичные выделения карбидных фаз, небольшое количество мелких участков эвтектики из твердого раствора аустенита и карбидов и областей твердого раствора аустенита. При этом центральные зоны твердого раствора также претерпевали распад на аустенит и карбиды. В результате закалки твердый раствор трансформируется в мартенсит игольчатой морфологии и содержит остаточный аустенит, а наружные области, по всей вероятности, содержат меньшее количество легирующих элементов, обладают меньшей травимостью и имеют вид светлых гребней, которые окантовывают зерна бывших дендритных ветвей. Твердость таких светлых гребней: ободков — ~6 670 МПа (57 HRC), внутренних, претерпевших распад и более темных — ~7 250 МПа (59 HRC). В слое находится незначительное количество эвтектики, и она вырожденная. Твердость наплавленного слоя ближе к границе сплавления составляет ~7 750 МПа (61 HRC). На границе сплавления в структуре наблюдается мартенсит с остаточным аустенитом при твердости ~6 000...5 800 МПа (57...58 HRC). Под слоем непосредственно в структуре основы располагается смесь мартенсита с некоторым количеством троостита и остаточного аустенита.

При наплавке этого состава на подогретые образцы твердость в слое остается на достаточно высоком уровне вплоть до температуры предварительного нагрева 600 °С: ~10 080...7 740 МПа (68...61 HRC) с включениями карбидов и зонами вырожденной карбидной эвтектики, где микротвердость составляет, соответственно, ~28 000 и 11 000 МПа. На рисунке 3 приведены характерные микроструктуры при наплавке подогретого до 400 °С образца чугуном электродом. Наблюдается такой же характер изменения структуры, как и при наплавке на холодную основу. Изменения были следующими: наблюдается более полный распад твердого раствора, растет количество и размеры карбидной фазы в наплавленном слое, на границе сплавления имеет место смесь мартенсита, остаточного аустенита и троостита, а сразу в приграничной области образца (см. рисунок 3) проявляются троостит с остаточным аустенитом. По сравнению с наплавкой на холодную подложку протяженность всех лежащих ниже аналогичных областей структур меньше, такая закономерность сохраняется с ростом температуры образцов [6].

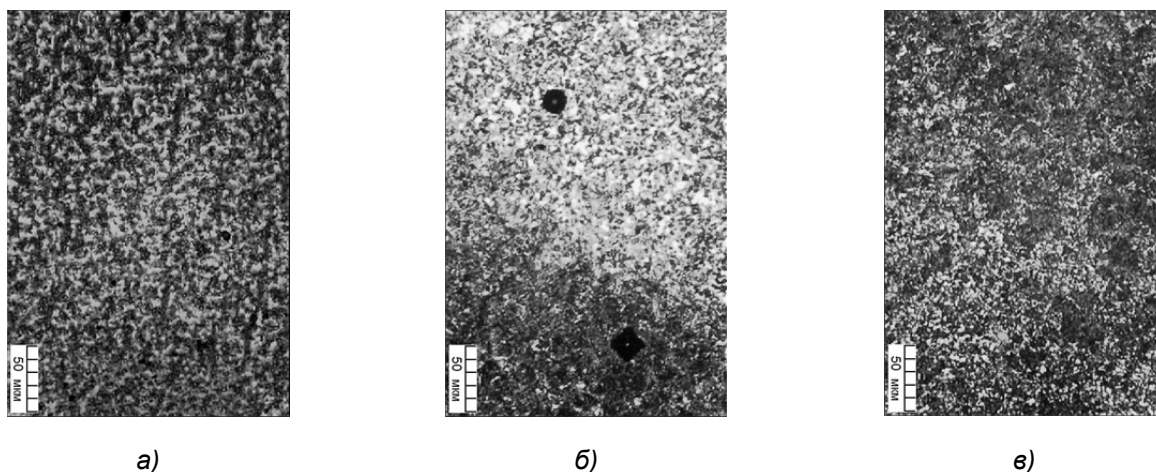


Рисунок 3. — Изменение микроструктуры при наплавке электродом из чугуна на подогретую до 400 °С основу по мере углубления от поверхности, ×400: а — наплавленный слой (первичные карбиды, дендриты твердого раствора и эвтектика из карбидов и твердого раствора аустенита); б — наплавленный слой и переходная зона (в переходной зоне — мартенсит, остаточный аустенит, троостит); в — микроструктура подложки вблизи переходной зоны (троостит, перлит, аустенит)

Следует отметить, что переходная зона на границе наплавленного слоя и подложки является плавной, со взаимным проникновением твердых растворов друг в друга, без расслоений, трещин и других дефектов, что способствует постепенному распределению физико-механических свойств по сечению. Как правило, жидкотекучесть расплава износостойкого чугуна более высокая, чем при наплавлении с использованием стальных электродов. Этот фактор будет гарантировать лучшее заполнение пазов, предварительно подготовленных в целях формирования кромок противорежущего бруса при предложенной технологии его изготовления с использованием электродуговой наплавки ребер легированными сплавами с высокой износостойкостью.

На основании проведенных исследований при оптимальном выборе состава наплавляемого материала, режимов и схемы электродуговой наплавки, с учетом условий проведения процесса в целях получения максимального качества наплавленного слоя и минимизации проблем при шлифовке были изготовлены несколько образцов реальных противорежущих брусьев для полевых испытаний. Анализ результатов испытаний показал, что разработанная технология дает положительный эффект, ресурс работы упрочненных деталей повышается. Так, интенсивность износа по ширине рабочих зон противорежущих брусьев в смешанном цикле работы (сенаж—кукуруза) составил не выше 0,11 мм / 1 000 т. Это дает основание предполагать, что прогнозные ресурсы работы упрочненных деталей будут составлять значения не менее указанных в СТБ 1616-2011.

Далее, проанализировав предыдущий опыт и учитывая желание со стороны ведущих отечественных специалистов в области сельхозмашиностроения, например ОАО «Гомсельмаш», максимально использовать возможности автоматизации разрабатываемых процессов, было принято решение апробировать метод наплавки на основе индукционного нагрева с использованием порошков самофлюсующихся сплавов износостойких составов.

Проведенный подбор режимов показал, что выбранная технология наплавки может быть весьма перспективной для такого рода деталей. На рисунке 1, б, показан противорежущий брус с наплавленным участком рабочей кромки. На рисунке 4 приведена фотография заполнения паза расплавом на противорежущем брусе при однократном проходе в процесса наплавки.

Следует отметить, что такое формирование наплавленного слоя в пазу связано с усадкой материала при расплавлении порошка, которое может достигать 50 % и более. Но при определенных условиях уже одного прохода оказывается в принципе достаточным, чтобы после окончательной шлифовки получить необходимые толщины наплавленного слоя ~4...5 мм. Наплавленный слой (см. рисунок 4) является достаточно гомогенным и имеет характерную мелкоячеистую и дендритную структуру. При этом наблюдается полное заполнение нужного профиля паза, отсутствуют поры, трещины, несплошности и другие дефекты. Твердость наплавки, например, порошка Т-Термо 55 варьировалась от 35 HRC до заявленной его производителем твердости. При выборе порошков с большей твердостью из линейки указанной марки порошков есть возможность получения и более твердых наплавленных слоев на рабочих кромках такого рода деталей.

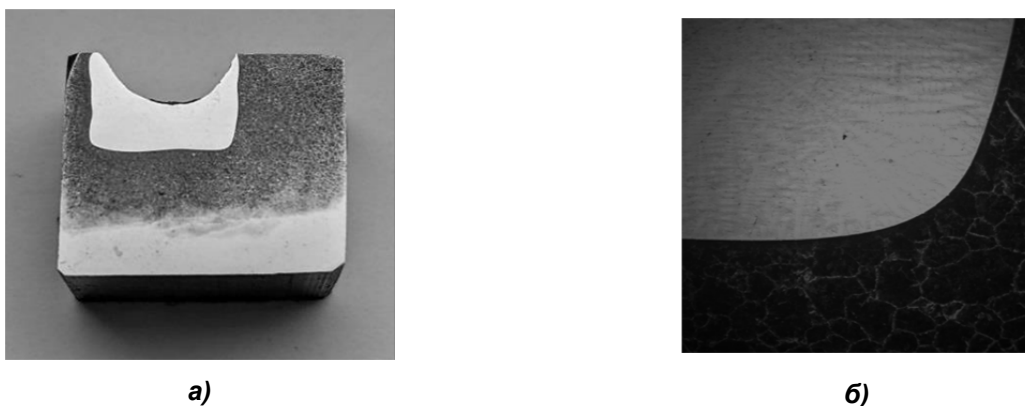


Рисунок 4. — Наплавка в паз при использовании технологии индукционного нагрева: а — общий вид наплавки при однократном проходе; б — микроструктура наплавленного слоя

Анализ структур поверхностных слоев из, например, Ni—Cr—B—Si-сплавов, полученных с использованием различных источников, в том числе токов высокой частоты, показал, что при умеренных скоростях нагрева и охлаждения, свойственных индукционной наплавке, наплавляемые Ni—Cr—B—Si-сплавы имеют сложную многофазную структуру: первичные кристаллы γ — твердого раствора на основе никеля с микротвердостью 3 780...5 250 МПа, мелкодисперсная эвтектика $[\gamma + \text{Ni}_3\text{B}]$ с микротвердостью 6 350...8 950 МПа, карбиды стерженьковой формы длиной до 110...120 мкм и карбиды сложной разветвленной формы. Исследования на микрорентгеновском анализаторе показали, что карбиды сложной ветвистой формы по стехиометрическому составу близки к Cr_7C_3 , а стерженьковой формы — к Cr_3C_2 . При этом отмечается, что при сравнении, например, лазерной наплавки с наплавкой токами высокой частоты твердый раствор более пересыщен легирующими элементами, в структуре наплавленных покрытий значительно меньше карбидов стерженьковой формы и больше крупных низших карбидов Cr_{26}C_6 . Все это дает основание считать, что предложенная технология создания наплавленных слоев на рабочих кромках противорежущих брусьев вполне может обеспечить нужные эксплуатационные свойства этим изделиям, т. е. обеспечить им необходимые абразивную износостойкость и прочность при ударных нагрузках [8].

Основной задачей в этом случае является недопущение как недогрева, так и перегрева порошков при наплавке выше 1 050...1 100 °С, при этом важным фактором является также скорость осуществляемого нагрева. С этой целью было апробировано несколько типов индукторов с поперечным и продольным их расположением. Установлено, что при продольных схемах оплавления возрастала вероятность проявления негативных тенденций по стабилизации температуры нагрева в оптимальном диапазоне, величине остаточных напряжений, приводящих к деформации детали и др.

Заключение. В соответствии с типом деталей «противорежущие брусья» и условиями их работы выбран путь повышения их работоспособности, определен выбор легирующих элементов и состав покрытия. Определены технологические параметры процесса и температурные интервалы нагрева подложки для наплавки и формирования режущих износостойких кромок изделий и температуры термической обработки для устранения поволоки и коробления. Проведенные полевые испытания показали, что разработанная технология электродуговой наплавки дает положительный эффект, ресурс работы упрочненных деталей повышается. Так, интенсивность износа по ширине рабочих зон противорежущих брусьев в смешанном цикле работы (сенаж—кукуруза) составил не выше 0,11 мм / 1 000 т.

Проведенные эксперименты по индукционной наплавке износостойких слоев на рабочие грани противорежущих брусьев с использованием самофлюсующихся порошков показали, что наплавленный слой является достаточно гомогенным и имеет характерную мелкоячеистую и дендритную структуру. При этом наблюдается полное заполнение нужного профиля, отсутствуют поры, трещины, несплошности и другие дефекты. Это все дает основание полагать, что предложенная технология создания наплавленных слоев вполне может обеспечить нужные эксплуатационные свойства такого рода изделиям, т. е. обеспечить им необходимые износостойкость и прочность при ударных нагрузках. Кроме того, процесс наплавки, основанный на индукционном нагреве, может быть в достаточной степени автоматизирован.

Список цитированных источников

1. Лившиц, Л. С. Основы легирования наплавленного металла / Л. С. Лившиц, Н. А. Гринберг, Э. Г. Куркумелли. — М. : Машиностроение, 1969. — 106 с.
2. Фрумкин, И. И. Современные типы наплавленного металла и их классификация // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный металл : сборник. — Киев : Наук. думка, 1977. — С. 3—179.
3. Бабей, Ю. И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю. И. Бабей, Б. И. Бутаков, В. Г. Сысоев. — Киев : Наук. думка, 1995. — 256 с.

4. *Рябцев, И. А.* Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев — Киев : Экотехнология, 2004. — 160 с.
5. *Шило, И. Н.* Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило, Г. Ф. Бетенья, В. С. Голубев. — Минск : БГАТУ, 2010. — 320 с.
6. Структурообразование в поверхностных слоях при электродуговой наплавке на детали сельхозтехники / В. И. Гуринович [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2015. — Кн. 2. — С. 117—122.
7. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / А. И. Гордиенко [и др.]. — Минск : Беларус. наука, 2009. — 287 с.
8. *Тарасова, Т. В.* Особенности формирования структуры наплавленных слоев при лазерной обработке / Т. В. Тарасова, С. Д. Кузьмин, В. С. Голубев // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2014. — № 9. — С. 26—30.

Поступила в редакцию 18.10.2022.

УДК 621.43.065.001.57

В. Я. Груданов¹, доктор технических наук, профессор,
Л. Т. Ткачёва¹, кандидат технических наук, доцент,
Г. И. Белохвостов¹, кандидат технических наук, доцент,
М. В. Кунаш²

¹Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 267 47 71

²Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (0163) 66 53 74, marinavainilovich@mail.ru

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В КОНСТРУИРОВАНИИ ГЛУШИТЕЛЕЙ ШУМА ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Представлены научные основы проектирования новых конструкций глушителей шума двигателей внутреннего сгорания, обеспечивающих выпуск газовых потоков с улучшенными газодинамическими и акустическими характеристиками. Предложены инновационные модели глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания с улучшенными гидравлическими и акустическими характеристиками на основе теории чисел и конфузорно-диффузорных вставок, имеющих вид трубы Вентури, с помощью которых осуществляется контроль и управление газовым потоком по всей длине корпуса глушителя шума от впускного патрубка до выпускного, в результате чего происходит эффективное шумоглушение при минимально возможном гидравлическом (аэродинамическом) сопротивлении.

Ключевые слова: глушители шума; двигатель внутреннего сгорания; отработавшие газы; предпочтительные числа; ряды предпочтительных чисел; золотая пропорция; перфорированная перегородка; труба Вентури; инновационные модели глушителей шума.

Рис. 6. Табл. 2. Библиогр.: 21 назв.

V. Ya. Grudanov¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
L. T. Tkacheva¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
G. I. Belokhvostov¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
M. V. Kunash²

¹Educational institution "Belarusian State Agrarian Technical University",

99 Nezavisimosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 47 71

²Educational institution "Baranovichi State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi,
the Republic of Belarus, +375 (0163) 66 53 74, marinavainilovich@mail.ru

NEW DIRECTIONS IN THE NOISE MUFFLERS DESIGN OF RECIPROCATING INTERNAL COMBUSTION ENGINES

The scientific bases of new noise mufflers designs of internal combustion engines, providing the gas flows release with improved gas dynamic and acoustic characteristics are presented. Innovative models of noise silencers of reciprocating internal combustion engines with improved hydraulic and acoustic characteristics based on the theory of numbers, and confusor-diffuser inserts having the form of a Venturi pipe are proposed. The gas flow along the entire length of the noise silencer body from the inlet pipe to the exhaust is monitored and controlled with their help. As a result, effective noise reduction occurs at the lowest possible hydraulic (aerodynamic) resistance.

Key words: noise mufflers; internal combustion engine; exhaust gases; preferred numbers; rows of preferred numbers; golden ratio; perforated partition; Venturi pipe; innovative models of noise silencers.

Fig. 6. Table 2. Ref.: 21 titles.

Введение. Среди глобальных проблем развития современной цивилизации шум относится к числу наиболее важных. Он является общебиологическим раздражителем, способным влиять на все органы и системы организма, вызывая разнообразные физиологические

изменения. Неблагоприятное воздействие шума в той или иной степени ощущает на себе каждый второй человек на планете. Энергетические установки, такие как двигатель внутреннего сгорания (далее — ДВС), являются основными источниками шума в окружающей среде. Уже сейчас, например, передовые страны расходуют на борьбу с шумом транспортных средств около 1 % своего бюджета [1; 2].

Шум определяют как всякий нежелательный для человека звук. С физической точки зрения шум — это беспорядочное сочетание звуков различной частоты и интенсивности (силы), возникающих при механических колебаниях в твердых, жидких и газообразных средах, частоты которых лежат в диапазоне от 16 до 20 000 Гц (звуковые, или акустические, колебания). Колебания с частотой ниже 16 Гц (инфразвук) и выше 20 кГц (ультразвук), хотя и не воспринимаются органами слуха, также могут оказывать неблагоприятное воздействие на организм человека [3].

По данным Всемирной организации здравоохранения (2002), в глобальном грузе болезней по вкладу профессиональных факторов потери слуха от шума занимают 2-е место (16 %) после болей в спине (37 %). Более 12 % несчастных случаев на производстве были вызваны сочетанием высокого уровня шума (90 дБА и более) и наличием потери слуха у работника [3].

Более 30 % работников, занятых в сельскохозяйственном производстве, подвергаются неблагоприятному воздействию шума, превышающего допустимые нормы. Организм человека, не приспособленный к перманентному воздействию шума, реагирует на звуковые раздражители достаточно негативно. Отрицательное влияние шума на работоспособность проявляется даже при его небольшой интенсивности.

В нозологической структуре профзаболеваемости основное место занимает нейросенсорная тугоухость (порядка 41,5 %), а анализ профессиональных заболеваний по этиологическим факторам показывает, что порядка 44 % заболеваний возникает по причине воздействия физических факторов (в основном шума).

По международным данным, длительное воздействие интенсивного шума на человека приводит к развитию шумовой болезни, являющейся самостоятельной формой профессиональной патологии. Шумовая болезнь — это общее заболевание организма с преимущественным поражением органа слуха, центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, развивающееся в результате длительного воздействия интенсивного шума. Формирование патологического процесса при шумовом воздействии происходит постепенно и начинается с неспецифических проявлений вегетативно-сосудистой дисфункции. Далее развиваются сдвиги со стороны центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, затем специфические изменения в слуховом анализаторе [3].

Несмотря на исключительную научную направленность и экономические усилия, переход от ДВС к полностью электрическим двигателям будет долгим и сложным. Двигатели внутреннего сгорания в ближайшие годы будут по-прежнему играть фундаментальную роль как в качестве традиционных двигателей, так и в составе гибридных силовых агрегатов. Исходя из изложенного, снижение уровня шума тракторов, самоходных сельскохозяйственных и транспортных машин совершенствованием системы выпуска отработанных газов является важной народно-хозяйственной задачей [4].

Материалы и методы исследования. Шум ДВС с учетом механизмов образования его отдельных составляющих подразделяют на аэродинамический и структурный. Изначально аэродинамический шум по своему уровню значительно превышает структурный [5]. Проблема снижения этого шума решается с помощью применения эффективных глушителей. Глушители шума должны уменьшать уровень шума и не препятствовать функционированию устройства, генерирующего шум. Кроме того, к глушителям в зависимости от эксплуатаци-

онных особенностей предъявляются требования по габаритам, форме, массе, стоимости, использованию конструкционных и поглощающих звук материалов и т. п. [2].

Задача глушителя состоит в том, чтобы сгладить пульсации струи отработавших газов в такой мере, чтобы на выходе из выпускного органа двигателя в свободную среду газовая струя не содержала составляющих, оказывающих заметное с точки зрения громкости влияние на ухо.

Аналогичная задача в области электротехники состоит в сглаживании пульсирующего тока от однофазного выпрямителя, пропущенного через фильтр, в такой степени, чтобы после фильтрующего устройства получался только постоянный ток с допустимой мерой пульсации. Для этой цели обычно применяют электрический фильтр.

Для целей глушения выхлопа необходимо подобрать такой акустический фильтр, который по возможности уничтожал бы все пульсации газового потока, а постоянный поток газовой струи пропускал неослабленным.

Пульсации газовой струи можно свести к минимуму двумя путями:

1) превращением энергии пульсации газового потока в тепловую энергию. Для этого ДВС следует нагрузить активным акустическим сопротивлением, в котором осуществляется поглощение энергии пульсирующего газового потока, а постоянный поток газа пропускается в окружающую среду неослабленным;

2) не пропускать энергию пульсации из источника в среду. Для этой цели ДВС следует нагружать реактивным акустическим сопротивлением, представляющим собой глушитель, работающий по принципу акустического фильтра. В подобном глушителе энергия пульсации газового потока возвращается источнику, а постоянная составляющая потока беспрепятственно выпускается в среду.

Заметим, что во всех случаях глушения выхлопа двигателя постоянный поток газа должен выпускаться в среду с возможно меньшим сопротивлением.

Очевидно, что чем меньше сопротивление глушителя постоянному потоку, тем меньше глушитель снижает мощность двигателя [6].

Разработка глушителей шума выпуска — важное направление шумозащиты транспортных машин. Над проектированием и производством глушителей работает множество фирм и специалистов. В этой области отсутствует сколько-нибудь серьезная унификация, почти к каждой новой транспортной машине создается свой глушитель. Несмотря на многообразие технических решений [7—10], до настоящего времени не создана единая научно обоснованная методика расчета геометрических параметров перфорации внутренних элементов глушителя, что существенно усложняет их разработку [1].

При распространении плоской звуковой волны в канале и отсутствии отражения звуковых волн за глушителем величина снижения шума глушителем определяется зависимостью

$$\Delta Z = 10 \lg(1 + \rho_c / 2SZ_a)^2,$$

где ρ_c — удельное акустическое сопротивление среды в канале;

S — площадь поперечного сечения канала;

Z_a — акустическое сопротивление глушителя, представляющее собой сумму активного R_a и реактивного φ_a сопротивлений, $Z_a = R_a + i\varphi_a$ [11].

Эффективность глушителя характеризуют эффектом установки глушителя: по звуковому давлению в точке контроля шума $\Delta L = L_1 - L_2$ и по звуковой мощности $\Delta L_p = L_{p1} - L_{p2}$, где L_{p1} и L_{p2} — уровни звуковой мощности в системе за глушителем до и после его установки.

Эффект глушителя по мощности, измеренной при установке не отражающих звук воздухопроводов на входе и выходе глушителя, вычисляют по формуле $\Delta L_T = 10 \lg(P_{\text{пад}} / P_{\text{прош}})$, называют трансмиссионными потерями и чаще всего используют для оценки эффективности конструкции глушителя.

Уровень баланса звуковой энергии (мощности) в глушителе (рисунок 1) имеет вид:

$$P_{\text{прош}} = P_{\text{пад}} - (P_{\text{отр}} + P_{\text{погл}} + P_{\text{изл}}) + P_{\text{ген}},$$

где $P_{\text{прош}}$, $P_{\text{пад}}$, $P_{\text{отр}}$, $P_{\text{погл}}$, $P_{\text{изл}}$, $P_{\text{ген}}$ — звуковая энергия прошедших, падающих, отраженных волн, энергия, поглощенная в глушителе, излучаемая в пространство и генерируемая в нем в единицу времени соответственно.

В правильно спроектированном глушителе энергией $P_{\text{ген}}$ в приведенном уравнении баланса можно пренебречь. Эффективными средствами уменьшения генерации энергии являются уменьшение скорости потока в глушителе и придание внутренним элементам глушителя обтекаемой формы.

Передача звука через глушитель происходит по газу, находящемуся в полости глушителя, и по элементам конструкции глушителя. Энергия, передаваемая по конструкции, обычно невелика вследствие большой разницы акустических сопротивлений воздуха и металла (материала корпуса глушителя) [2].

Вопросам проблемы шума и разработке современных методов расчета и проектирования автомобильных и тракторных глушителей шума посвятили свои работы белорусские и российские учёные: В. Я. Груданов, М. Г. Шатров, Н. И. Иванов, М. А. Разумовский, А. Ф. Безручко, М. В. Дробаха, А. И. Комкин, А. А. Лубянченко, А. Н. Кузнецов и др.

В настоящее время существует несколько классификаций глушителей. Согласно ГОСТ 31328-2006 (ИСО 14163:1998) «Руководство по снижению шума глушителями» [12], в соответствии с преобладающим механизмом ослабления глушители (рисунок 2) могут быть классифицированы следующим образом: диссипативные; реактивные, включая резонаторные и отражательные; глушители сброса; активные.

Так, исследователем А. Н. Кузнецовым [13] приведён результат обобщения классификаций глушителей (рисунок 3), представленных в различных литературных источниках.

Камерные глушители действуют как акустические фильтры, снижая звук на некоторых частотах за счет его отражения в местах сужения и расширения воздухопровода. Данный вид глушителей наиболее эффективен на низких частотах, а их акустическая характеристика может иметь широкие полосы заглушения и узкие полосы полного прохождения звука [13].

Резонансные глушители представляют собой газовые полости, сообщающиеся с трубопроводом с помощью отверстия. Эти глушители обычно оформляются в виде группы резонаторов, они применяются для подавления дискретных составляющих шума.

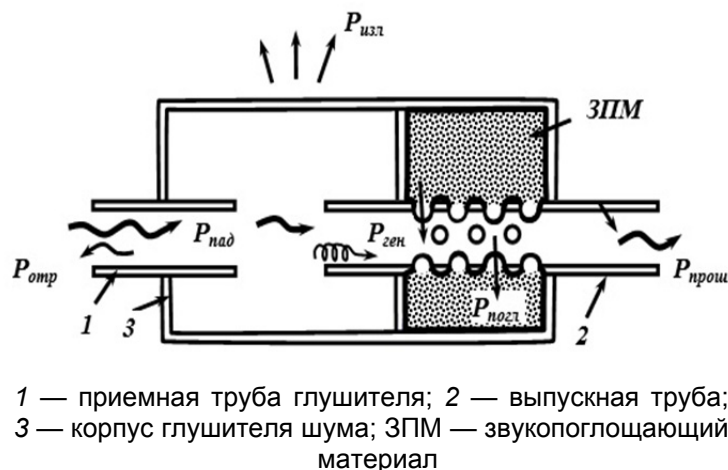


Рисунок 1. — Распределение потоков звуковой энергии в глушителе



Рисунок 2. — Классификация глушителей по ГОСТ 31328-2006 [12]

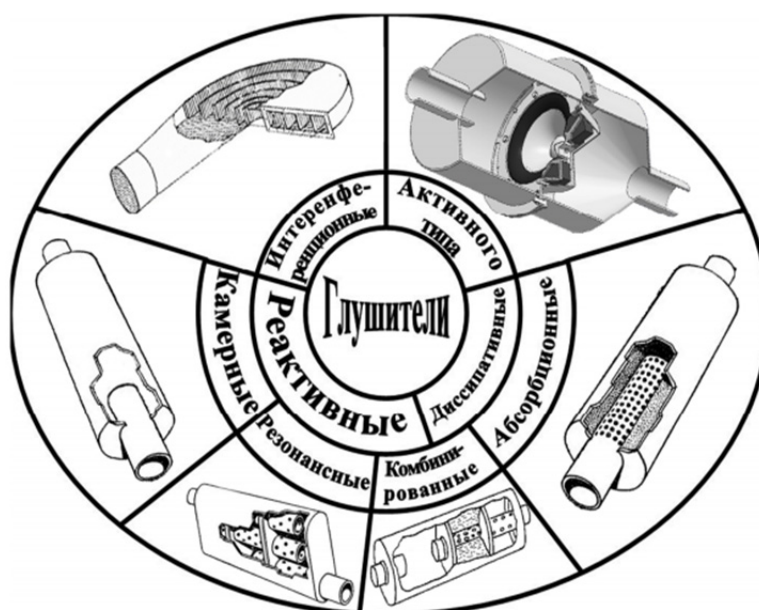


Рисунок 3. — Классификация глушителей шума процесса выпуска [4; 13]

В абсорбционных глушителях снижение шума достигается за счёт перехода звуковой энергии в тепловую в звукопоглощающем элементе. Интерференционные глушители для снижения шума используют взаимное ослабление звуковых волн, прошедших через каналы разной длины и находящихся вследствие этого в противофазе. Применение глушителей данного типа, как и резонансных, наиболее эффективно, когда требуется заглушить одну или несколько тональных составляющих в стабильном спектре шума.

Комбинированные глушители объединяют в себе несколько принципов снижения шума и могут иметь признаки всех вышеперечисленных типов глушителей. Все вышеназванные

типы глушителей являются пассивными, так как не используют для снижения шума внешние источники энергии [13].

Практический интерес представляет трехкамерный реактивный глушитель [14]. Основными рабочими органами глушителя шума являются вертикальные перфорированные перегородки и горизонтальные перфорированные трубы, образующие систему резонансных камер.

По ходу движения потока отработавших газов ДВС диаметр отверстий в трубах и перегородках уменьшается, а их количество увеличивается, что приводит совместно с резонансными камерами к снижению скорости и, соответственно, уменьшению уровня шума (звукового давления). На рисунке 4 представлена принципиально-конструктивная схема глушителя шума.

В целях оптимизации конструкции и достижения технического совершенства данного устройства конструктивные и геометрические параметры всех внутренних элементов глушителя целесообразно взаимоувязать между собой на основе теории чисел и с использованием математической модели перфорированной перегородки. Согласно этой новой модели расчет глушителя шума осуществляется в следующей последовательности.

1. В качестве определяющего параметра глушителя принят диаметр впускного патрубка, и площадь проходного сечения перфорации входной центральной трубы определяется в зависимости от площади поперечного сечения впускного патрубка $d_{вп}$:

$$F_2 = \sqrt{\Phi} F_1,$$

где F_2 — площадь проходного сечения перфорации входной центральной трубы, м^2 ;

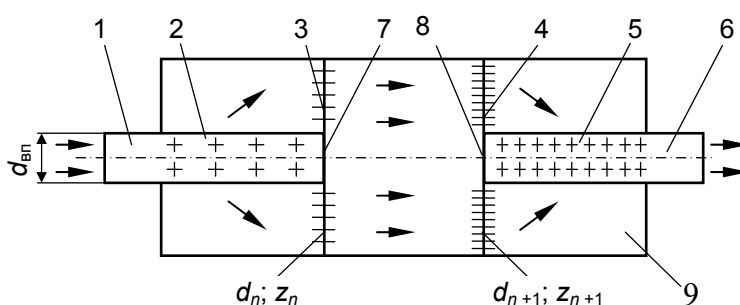
F_1 — площадь поперечного сечения впускного патрубка, м^2 .

2. Диаметры отверстий перфорации во внутренних элементах глушителя связаны между собой соотношением

$$d_n = \Phi d_{n+1},$$

где d_n — диаметр отверстий перфорации n -го внутреннего элемента глушителя, считая от впускного патрубка, м;

n — порядковый номер внутреннего элемента, считая от впускного патрубка.



1 — впускной патрубок; 2 — входная центральная труба;
3 — входная поперечная перегородка; 4 — выходная поперечная перегородка; 5 — выходная центральная труба;
6 — выпускной патрубок; 7, 8 — заглушки; 9 — корпус глушителя; $d_{вп}$ — диаметр впускного патрубка; d_n — диаметр отверстий перфорации n -го внутреннего элемента; z_n — количество отверстий перфорации в n -м элементе

Рисунок 4. — Принципиально-конструктивная схема глушителя шума [14]

3. Количество отверстий перфорации во внутренних элементах глушителя связано между собой соотношением

$$z_n = \frac{z_{n+1}}{\Phi^2},$$

где z_n — количество отверстий перфорации в n -м внутреннем элементе глушителя, считая от впускного патрубка.

4. Расположение отверстий перфорации на входной 3 и выходной 4 перегородках принимаем концентрическое (см. рисунок 4). Радиусы окружностей, на которых расположены отверстия, определяются по формуле

$$R_n = (1,272)^n R_0 \quad \text{или} \quad R_n = (\sqrt{\Phi})^n R_0,$$

где R_n — радиус n -й окружности, на которой расположены отверстия, м;

n — порядковый номер окружности, считая от оси глушителя;

R_0 — радиус впускного патрубка, м.

5. Расположение отверстий перфорации на входной 2 и выходной 5 трубах шахматное с равномерным шагом как в поперечном, так и в продольном направлении, при этом принимаем:

$$\frac{a}{b} = 1,618 \quad \text{или} \quad \frac{a}{b} = \Phi,$$

где a — шаг перфорации в поперечном направлении;

b — шаг перфорации по длине трубы.

Расчет геометрических параметров глушителя шума по вышеприведенным формулам позволяет получить одинаковые площади проходных сечений всех внутренних элементов по ходу движения газов, значение которых в 1,272 раза больше площади впускного патрубка. При этом существенно упрощается методика расчета, а в конструкции глушителя появляется системная, гармоничная и пропорциональная взаимосвязь внутренних элементов между собой.

Данная методика была частично реализована в опытном образце глушителя шума, изготовленном и испытанном на Могилевском автомобильном заводе им. С. М. Кирова. Опытный образец был изготовлен на базе серийного глушителя при неизменных габаритных и присоединительных размерах. Испытания проводились в загородной зоне на серийном скрепере МоАЗ-6014 с двигателем ЯМЗ-238 АМ2 при температуре окружающей среды 278 К (5 °С), средней скорости ветра 3,5 м / с и фоновом уровне шума 60 дБ (А).

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты измерений (средние величины по трем измерениям) представлены в таблице 1.

Обработка результатов испытаний проводилась по методике, изложенной в [15], при этом для оценки технического уровня и оптимизации конструкции глушителей шума использован следующий комплекс относительных и удельных оценочных параметров:

– относительный объем глушителя, вычисляемый по формуле

$$V_{\text{отн}} = V_{\text{гл}} / iV_h,$$

где $V_{\text{гл}}$ и V_h — объем глушителя и рабочий объем цилиндра двигателя соответственно;

i — число цилиндров.

Т а б л и ц а 1. — Результаты измерений

Режим испытаний	Число оборотов двигателя, об / мин	Температура отработавших газов на выходе, К (°С)	Гидравлическое сопротивление глушителя, Па	Уровень звукового давления, дБ(А)
Без глушителя (труба)	600	608 (335)	96	87,0
	2 000	706 (433)	640	107,0
Серийный глушитель	600	602 (329)	480	80,0
	2 000	706 (433)	1 520	95,5
Новый глушитель	600	596 (323)	320	80,0
	2 000	706 (433)	1 120	94,5

Примечание. Уровень звукового давления измерялся согласно ОСТ-23.3.23-88 на расстоянии 0,5 м от выпускного патрубка глушителя шума.

– удельное заглушение на единицу относительного объема [дБ(А) / ед. $V_{\text{отн}}$]:

$$\Delta L_{A(V)} = \Delta L_A / V_{\text{отн}};$$

– относительное гидравлическое сопротивление:

$$H_{\text{отн}} = H_1 / H_2,$$

где H_1 и H_2 — гидравлическое сопротивление систем с глушителем и без него соответственно;

– удельное заглушение на единицу относительного сопротивления [дБ(А) / ед. $H_{\text{отн}}$]:

$$\Delta L_{A(H)} = \Delta L_A / H_{\text{отн}};$$

– относительный теплообмен:

$$T_{\text{отн}} = T_2 / T_1,$$

где T_2 и T_1 — температуры отработавших газов на выходе, К.

Относительный объем глушителей часто ограничен условиями компоновки и обеспечения обзорности (тракторы, дорожно-строительные машины и др.), что во многом определяет принципы заглушения, реализуемые в конструкции. С учетом этого глушители четырехтактных поршневых двигателей могут быть малого ($V_{\text{отн}} \leq 2,5$), среднего ($V_{\text{отн}} = 2,5 \dots 3,5$) и большого ($V_{\text{отн}} \geq 3,5$) относительных объемов.

Удельное заглушение на единицу объема характеризует степень использования объема глушителя для обеспечения необходимого заглушения. Наибольший интерес при этом представляет оценка по удельному заглушению в рамках отмеченных ранее пределов относительных объемов, поскольку для многих конструкций глушителей, принадлежавших к одной группе по относительному объему, характерно использование преимущественно одинаковых принципов заглушения. Однако возможна также оценка по этому параметру глушителей, реализующих различные принципы заглушения и принадлежащих к различным группам по относительному объему.

Относительное гидравлическое сопротивление и соответствующее удельное заглушение позволяют в первом случае косвенно оценить влияние глушителя на потери мощности и ухудшение топливной экономичности двигателя, во втором — степень использования сопротивления для уменьшения процесса выпуска. Аналогичный смысл имеет оценка конструкции глушителя по относительному теплообмену.

В таблице 2 приведены основные комплексные оценочные параметры испытываемых глушителей шума.

Т а б л и ц а 2. — Основные комплексные оценочные параметры испытываемых глушителей шума

Оценочный параметр	Единица измерения	Глушитель			
		серийный, об / мин		новый, об / мин	
		600	2 000	600	2 000
$V_{\text{отн}}$	—	2,698		2,698	
$\Delta L_{A(V)}$	дБ(А) / ед. $V_{\text{отн}}$	2,595	4,262	2,595	4,633
$H_{\text{отн}}$	—	5,0	2,375	3,333	1,75
$\Delta L_{A(H)}$	дБ(А) / ед. $H_{\text{отн}}$	1,4	4,842	2,1	7,143
$T_{\text{отн}}$	—	1,018	1,0	1,037	1,0
ΔL_A	дБ(А)	7,0	11,5	7,0	12,5
$\Delta L_A(H, V_{\text{гл}})$	дБ(А) / (ед. $H_{\text{отн}}$ · ед. $V_{\text{отн}}$)	0,519	1,795	0,778	2,647
$\Delta L_A(H, V_{\text{гл}})$	дБ(А) / (Па · м ³)	0,365	0,189	0,547	0,279
Масса	кг	19		17	

Как видно из таблицы 2, новый глушитель шума по всем основным оценочным параметрам имеет более совершенные тепловые, газодинамические и акустические характеристики, что свидетельствует о его более высоком техническом уровне по сравнению с серийным.

В конструктивном отношении новый (модернизированный) глушитель шума имеет следующие преимущества:

- уменьшение количества внутренних деталей с восьми в серийном до четырех в новом, снижение массы с 19,0 до 17,0 кг и упрощении при этом конструкции;
- производственная технологичность конструкции по размерам и формам поверхности внутренних деталей, сокращение числа технологических операций и их унификации основных деталей глушителей всего семейства машин типа МоАЗ, создание параметрического ряда глушителей.

Вместе с тем необходимо отметить, что в новой конструкции глушителя шума из-за требования по неизменности размеров корпуса серийного глушителя не удалось в полной мере (65 %) практически реализовать принцип «золотой» пропорции.

В целом испытания показали, что расчет параметров перфорации по новой методике, основанной на применении принципа «золотой» пропорции и свойств чисел Фибоначчи, позволяет существенно повысить технический уровень конструкции глушителя в части снижения газодинамического сопротивления при стабильности шумоглушения.

На рисунке 5 представлен макет инновационной конструкции глушителя шума поршневых ДВС на основе теории чисел [16].

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» совместно с ЗАО «Амкодор-Пинск» разрабатывает проект заявки по теме «Обоснование технологических и режимно-конструктивных параметров глушителя шума поршневого двигателя внутреннего сгорания» в качестве задания по Государственной программе научных исследований на 2021—2025 гг.

В ОАО «Минский тракторный завод» проходит испытания новая конструкция глушителя шума [17] со вставкой конфузочно-диффузорного типа, имеющей вид трубы Вентури [18], с помощью которой осуществляется контроль газового потока и управление им по всей длине корпуса глушителя шума от впускного патрубка до выпускного, в результате чего происходит эффективное шумоглушение при минимально возможном гидравлическом (аэродинамическом) сопротивлении (рисунок 6).

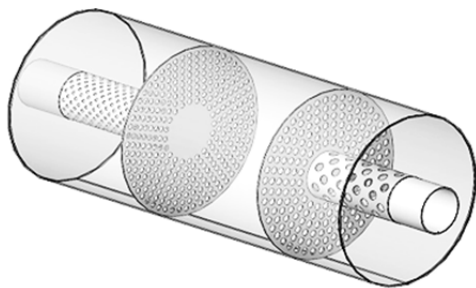


Рисунок 5. — Макет инновационной конструкции глушителя шума поршневых ДВС на основе теории чисел [16]

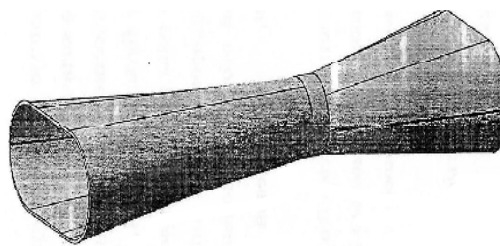


Рисунок 6. — Макет вставки конфузорно-диффузорного типа, имеющий вид трубы Вентури, глушителя шума поршневого ДВС [17]

Заключение. Для совершенствования важнейших параметров рабочих органов глушителей шума предложен методологический метод, основанный на применении теории предпочтительных чисел. Разработаны конструкции перфорированных перегородок, в которых использованы закономерности новых основных рядов предпочтительных чисел. Дано расчетное обоснование основных геометрических и конструктивных размеров глушителей шума с использованием математической модели перфорированной перегородки на основе «золотой» пропорции и новых основных рядов предпочтительных чисел, которое позволяет получить конструкцию глушителей шума, обладающую минимально возможным аэродинамическим сопротивлением при максимально возможном снижении уровня шума выпуска отработавших газов ДВС [1; 2]. Предложены инновационные модели глушителей шума поршневых ДВС с улучшенными гидравлическими и акустическими характеристиками на основе теории чисел [16], а также конфузорно-диффузорных вставок, имеющих вид трубы Вентури. С их помощью осуществляется контроль газового потока и управление им по всей длине корпуса глушителя шума от впускного патрубка до выпускного, в результате чего происходит эффективное шумоглушение при минимально возможном гидравлическом (аэродинамическом) сопротивлении [17]. Теория предпочтительных чисел применима к любым техническим устройствам [19—21].

Список цитированных источников

1. Груданов, В. Я. Научно-практические подходы к совершенствованию конструкций глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания на основе теории чисел / В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов, Л. Т. Ткачева // Наука и техника. — 2021. — Т. 20, № 4. — С. 434—444.
2. Груданов, В. Я. Моделирование и оптимизация гидравлических и акустических характеристик глушителей шума поршневых двигателей на основе теории чисел / В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов, Л. Т. Ткачева // Гор. механика и машиностроение. — 2020. — № 4. — С. 28—42.
3. Рыбина, А. Л. Шум как физический фактор. Влияние на организм и профилактика на производстве / А. Л. Рыбина, И. П. Семенов // Охрана труда. Технологии безопасности. — 2021. — № 7. — С. 74—79.
4. Классификация и особенности эксплуатации глушителей шума выпуска отработанных газов самоходной сельскохозяйственной техники / А. А. Пинчук [и др.] // Современные направления повышения эффективности использования транспортных систем и инженерных сооружений в АПК : материалы Междунар. студенч. науч.-практ. конф., 16 февр. 2022 г. — Рязань : Ряз. гос. агротехнол. ун-т им. П. А. Костычева, 2022. — С. 348—352.
5. Шатров, М. Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания / М. Г. Шатров, А. Л. Яковенко, Т. Ю. Кричевская. — М. : МАДИ, 2014. — 68 с.
6. Инзель, Л. И. Основы глушения шума выхлопа двигателей внутреннего сгорания / Л. И. Инзель. — М. : Изд-во и 1-я тип. Машгиза в Лгд, 1949. — 196 с.
7. Комкин, А. И. Разработка современных методов расчета и проектирования автомобильных глушителей с требуемыми характеристиками / А. И. Комкин. — СПб. : Балт. гос. техн. ун-т «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2012. — 48 с.

8. Белоцерковский, С. В. Автомобильные глушители: современные требования, тенденции развития, методы расчета и испытаний [Электронный ресурс] / С. В. Белоцерковский, В. Е. Тольский // Техн. акустика. — 2001. — № 1. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomobilnye-glushiteli-sovremennye-trebovaniya-tendentsii-razvitiya-metody-rascheta-i-ispytaniy>. — Дата доступа: 15.07.2022.

9. Реактивный глушитель шума : полезная модель к пат. RU 171331 U1 : МПК F01N13/02, F01N1/06 / С. Г. Смирнов, В. А. Николаева, А. И. Комкин, А. И. Быков ; заявитель С. Г. Смирнов. № 2016149537 ; заявл.: 16.12.2016 ; дата публ.: 29.05.2017 // Открытия. Изобретения. — 2017. — Бюл. № 16. — 8 с.

10. Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания : пат. RU 2243388 C2 : МПК F01N1/24 / В. Л. Жданов, Э. Б. Куновский, А. П. Ракомсин, В. В. Корсаков, М. И. Горбачев ; заявитель ПРУП «Минский автомобильный завод». № 2002132548/06 ; заявл.: 03.12.2002 ; дата публ.: 10.08.2004 // Открытия. Изобретения. — 2004. — 8 с.

11. Терехин, А. С. Снижение аэродинамического шума при помощи комбинированных глушителей / А. С. Терехин, В. И. Яхонтов // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. «Машиностроение». — 1984. — № 4. — С. 37—40.

12. Шум. Руководство по снижению шума глушителями : ГОСТ 31328-2006 (ИСО 14163:1998). — Введ. 01.04.2007. — М. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2007. — 66 с.

13. Кузнецов, А. Н. Разработка системы активного шумоподавления в глушителях тракторов сельскохозяйственного назначения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / А. Н. Кузнецов ; Воронеж. гос. аграр. ун-т им. Императора Петра I. — Воронеж, 2015. — 18 с.

14. Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания : пат. РФ 2056508 C1 : МПК F01N1/08 / В. Я. Груданов, С. В. Акуленко ; заявитель Могилев. технол. ин-т. № 93002786/06 ; заявл.: 12.01.1993 ; дата публ.: 20.03.1996 // Открытия. Изобретения. — 1996. — 9 с.

15. Разумовский, М. А. Методика оценки технического уровня глушителей шума выпуска поршневых двигателей / М. А. Разумовский, А. Ф. Безручко, И. М. Мотыль // Двигателестроение. — 1990. — № 3. — С. 37—38.

16. Инновационная конструкция глушителя шума поршневых двигателей с улучшенными гидравлическими и акустическими характеристиками на основе теории чисел // Каталог ярмарки «Инновации в машиностроении» ; рук. разработки В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов. — Бобруйск : БелИСА, 2019. — С. 18—19.

17. Глушитель шума двигателя внутреннего сгорания: положительный результат предварительной экспертизы по заявке на выдачу патента на изобретение : МПК F01N1/08 / В. Я. Груданов, Г. И. Белохвостов, Н. И. Зезетко, А. А. Пинчук. — № a20220052 ; заявл.: 09.03.2022.

18. Трубы Вентури. Технические условия : ГОСТ 23720-79. Изд. офиц. — М. : Гос. ком. СССР по стандартам, 1988. — 19 с.

19. Груданов, В. Я. Основы инженерного творчества / В. Я. Груданов. — Минск : БГУ, 2005. — 299 с.

20. Груданов, В. Я. Золотая пропорция в инженерных задачах / В. Я. Груданов. — Могилев : Могилев. гос. ун-т им. А. А. Кулешова, 2006. — 288 с.

21. Груданов, В. Я. Теория чисел в развитии машиностроительного комплекса Республики Беларусь / В. Я. Груданов, Е. Н. Филидович, Г. И. Белохвостов // Инженер-механик. — 2020. — Т. 86, № 1. — С. 7—9.

Поступила в редакцию 30.09.2022.

УДК 621.929:636(476)

А. В. Китун, доктор технических наук, профессор,**И. М. Швед, С. Н. Бондарев, И. И. Скорб**Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ НАВОЗА МЕХАНИЧЕСКИМИ СТАЦИОНАРНЫМИ СРЕДСТВАМИ НА ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМАХ И КОМПЛЕКСАХ

Технологический процесс уборки, утилизации и переработки навоза на фермах и комплексах требует применения дорогостоящего и сложного технологического оборудования и специальных помещений. Внедрение современных технологий и нового, более совершенного оборудования в производство направлено на комплекс мероприятий по приобретению, освоению и организации эксплуатации сложных машин и оборудования.

Выбор машин и оборудования в основном предопределяется при оптимизации технологий производственных процессов, проводимых на животноводческих фермах и комплексах. Для решения оптимизационной задачи по выбору оборудования для удаления навоза механическими средствами необходимо проанализировать разные варианты используемого оборудования, обеспечивающего выполнение принятой технологической задачи. Оптимизация при этом сводится к выбору лучшего варианта из возможных, рекомендованных на основе анализа сравнительной оценки технических характеристик предварительно выбранных машин и оборудования. Наилучшим будет тот вариант, который экономически более целесообразен при обязательном удовлетворении условий по качеству и полезному эффекту, достигаемому в процессе эксплуатации оборудования.

В статье приведены технические характеристики навозоуборочного оборудования, а также рассматривается метод оптимизации, позволяющий предусматривать бесперебойную линию уборки и утилизации навоза на фермах и обеспечивающий оптимальную загрузку эксплуатируемого оборудования.

Ключевые слова: ферма; комплекс; навоз; транспортер; поперечный канал; технологическая линия.

Рис. 4. Табл. 4 Библиогр.: 9 назв.

A. V. Kitun, DSc in Technical Sciences, Professor,**I. M. Shved, S. N. Bondarev, I. I. Skorb**Educational institution "Belarusian State Agrarian Technical University", 99 Nezavisimosti Ave.,
220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

OPTIMIZATION OF THE EQUIPMENT SELECTION FOR MANURE REMOVAL BY MECHANICAL STATIONARY MEANS ON LIVESTOCK FARMS AND COMPLEXES

The technological process of cleaning, utilizing and processing manure on farms and complexes requires the use of expensive, sophisticated technological equipment and special premises. The introduction of modern technologies and new, more advanced equipment into production is aimed at a set of measures for the acquisition, development and organization of complex machines and equipment operation.

The choice of machinery and equipment is mainly predetermined when optimizing the technologies of production processes carried out on livestock farms and complexes. To solve the optimization problem on the choice of equipment for removing manure by mechanical means, it is necessary to analyze different options for the equipment used to ensure the implementation of the accepted technological task. Optimization in this case comes down to choosing the best option out of the possible, recommended on the basis of an analysis of a comparative assessment of the technical characteristics of pre-selected machines and equipment. The best option will be the one that is more economically feasible with the obligatory conditions satisfaction for quality and the beneficial effect achieved during the of the equipment operation.

The article presents the technical characteristics of manure removal equipment, and considers an optimization method that allows for an uninterrupted line of cleaning and disposal of manure on farms and ensures optimal loading of the equipment being operated.

Key words: farm; complex; manure; conveyor; cross channel; technological line.

Fig. 4. Table 4. Ref.: 9 titles.

Введение. Целью работы является оптимизация выбора оборудования для удаления навоза механическими стационарными средствами на животноводческих фермах и комплексах.

На животноводческих фермах и комплексах образовывается навоз, который необходимо удалить, а затем обеспечить соответствующее его хранение. Эффективное удаление навоза способствует лучшему поддержанию гигиены доения и здоровья коров. Кроме того, оно улучшает микроклимат в помещении, поскольку при этом снижается уровень содержания аммиака и азотистых газов в воздухе. Правильно спроектированная и управляемая система удаления навоза позволяет сохранять биохимическую ценность навоза как удобрения. Разработка общей схемы технологического процесса составляет важную часть в общем процессе оптимизации работы поточной линии уборки, утилизации, переработки и хранения навоза. В схеме должны быть учтены все новейшие достижения науки, техники и передового опыта на современном этапе. Правильно заложенная технология может обеспечить успех производства, а поэтому все новое и прогрессивное должно быть заложено в проекте.

При разработке схемы технологического процесса необходимо:

- выбрать и обосновать рациональный перечень последовательных операций по уборке, транспортировке, хранению и утилизации навоза;
- установить количественные и качественные показатели по каждой операции;
- предварительно решить вопрос системы машин.

Метод технологического расчета зависит от принципа осуществления производственного процесса, который может быть периодическим и непрерывным. Иногда бывает целесообразно часть операций производственного процесса осуществлять по непрерывному процессу, а часть — по периодическому, такой процесс называется смешанным. Для выбора перечня последовательных операций по существующим производственным линиям необходимо критически оценить технические характеристики эксплуатируемых на фермах и комплексах машин и оборудования, а также внести изменения, вытекающие из последних достижений науки и техники.

Материалы и методы исследования. Навоз — смесь твердых и жидких экскрементов сельскохозяйственных животных.

Механический способ уборки навоза из помещений основан на применении мобильных или стационарных средств механизации. Для уборки навоза из помещений используют скребковые, штанговые, скреперные и шнековые транспортеры.

Результаты исследования и их обсуждение. Предварительный подбор технологического оборудования поточной линии по уборке навоза и его транспортировке в навозохранилище осуществляется на стадии проработки технологической схемы линии. Первоначально намечают оборудование для процессов, с которых начинается поступление навоза в поточную линию, т. е. транспортеры для уборки навоза из животноводческих помещений. Далее комплектуют машины и аппараты в соответствии с принятой технологической схемой.

Механическое удаление навоза следует проектировать на:

- фермах крупного рогатого скота при стойлово-пастбищном и выгульном содержании с применением подстилки, в родильных отделениях, профилакториях, при хранении навоза под полом помещения, на открытых откормочных площадках;
- небольших свиноводческих фермах, использующих корма собственного производства и пищевые отходы, в свинарниках-маточниках и при батарейном содержании свиней.

Расчет стационарного механизированного средства удаления навоза сводится к определению подачи, тягового сопротивления и потребляемой мощности [1].

Для выполнения расчета определяется суточный выход навоза из определенного животноводческого помещения:

$$Q_{\text{сут}} = \sum_{i=1}^n g_i m_i, \text{ кг},$$

где g_i — норма выхода навоза от одной головы, кг;
 m_i — количество животных в данном помещении, гол.

Длительность цикла удаления навоза стационарным транспортером рассчитывается по формуле

$$t_{\text{ц}} = \frac{n_{\text{тр}} L}{3600 v_{\text{ср}}}, \text{ ч},$$

где $n_{\text{тр}}$ — число ветвей навозоуборочного транспортера, шт.;
 L — длина навозного канала, м;
 $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость движения транспортера, м / с.

Необходимая производительность транспортирующего устройства определяется по формуле

$$Q_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{сут}}}{t_{\text{ц}} n_{\text{вк}}}, \text{ т / час},$$

где $n_{\text{вк}}$ — число циклов включения транспортного средства в сутки ($n_{\text{вк}} = 3 \dots 6$):

$$n_{\text{вк}} = \frac{Q_{\text{сут}}}{b_{\text{к}} h_{\text{к}} l \rho_{\text{н}} \varphi_{\text{н}}},$$

где $b_{\text{к}} h_{\text{к}}$ — ширина и высота навозного канала соответственно, м;
 l — длина навозного канала, м;
 $\rho_{\text{н}}$ — плотность навоза, т / м³;
 $\varphi_{\text{н}}$ — коэффициент заполнения ($\varphi_{\text{н}} = 0,9 \dots 1,2$).

Производительность также может быть определена по формуле

$$Q_{\text{тр}} = \frac{V_{\text{с}} \rho_{\text{н}} \varphi}{t_{\text{ц}}}, \text{ т / час},$$

где $V_{\text{с}}$ — вместимость транспортера, м³;
 $t_{\text{ц}}$ — длительность одного цикла, ч.

Вместимость транспортера

$$V_{\text{с}} = h b L,$$

где h, b, L — высота, ширина и длина навозного канала соответственно, м.

Соппротивление, возникающее при перемещении навоза в желобе, определяют по формуле

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4,$$

где P_1 — сопротивление от трения навоза о дно канавки, Н;
 P_2 — боковое сопротивление от трения навоза о боковые стенки канавки, Н;
 P_3 — сопротивление перемещению транспортера на холостом ходу, Н;
 P_4 — сопротивление движению от заклинивания навоза между скребками и канавкой, Н.
 Сопротивление от трения навоза о дно канавки определяется по формуле

$$P_1 = Q_{\text{тр}} f g,$$

где $Q_{\text{тр}}$ — масса навоза в желобе транспортера перед каждым его включением, кг;
 f — коэффициент трения покоя навоза о поверхность канавки, $f = 0,99$;
 g — ускорение свободного падения, м / с².

Боковое сопротивление от трения навоза о боковые стенки канавки

$$P_2 = N_6 f,$$

где N_6 — нормальное давление на боковую стенку канавки, Н: $N_6 = (0,3 \dots 0,4) Q_{\text{тр}g}$.

Сопротивление перемещению транспортера на холостом ходу

$$P_3 = q_{\text{т}} L f g,$$

где $q_{\text{т}}$ — масса одного погонного метра транспортера, кг;

L — длина цепи транспортера, м;

f — коэффициент трения, $f = 0,4 \dots 0,5$.

Сопротивление движению от заклинивания навоза между скребками и канавкой

$$P_4 = W a_{\text{с}},$$

где W — сопротивление одного скребка, Н (для соломистого навоза $W = 15$ Н, а для экс-крементов и торфяного навоза $W = 30$ Н).

$a_{\text{с}}$ — шаг скребков, м;

Мощность электродвигателя привода скребкового конвейера (кВт) определяется по формуле

$$N = \frac{P v k_3}{\eta_{\text{пм}}},$$

где P — сопротивление, возникающее при перемещении навоза в желобе, Н;

v — средняя скорость транспортера, м / с;

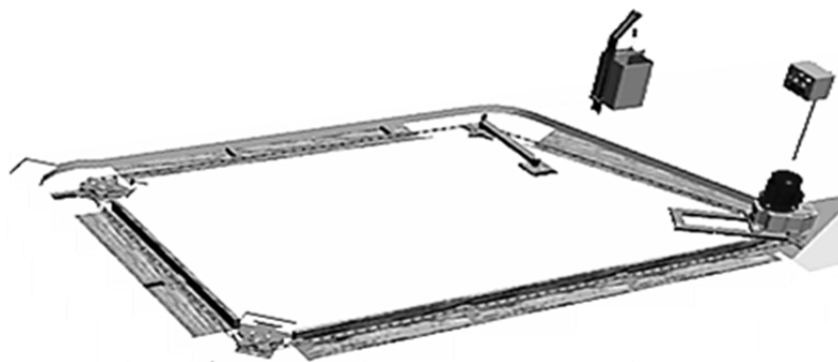
k_3 — коэффициент запаса;

$\eta_{\text{пм}}$ — КПД привода.

В приводных станциях скребковых конвейеров используются трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Двигатель выбирается из справочной литературы.

К стационарным механизированным средствам удаления навоза относят скребковый и скреперный транспортеры для удаления навоза. Скребковые навозоуборочные транспортеры серии ТСН применяются только при привязном содержании животных [2]. Транспортер скребковый навозоуборочный серии ТСН (рисунок 1) состоит из горизонтального и наклонного транспортеров, каждый из которых имеет свою приводную станцию, и шкафа управления. Горизонтальный транспортер, состоящий из ковальной цепи со скребками, поворотных устройств и приводной станции, размещается в открытом бетонированном лотке, внутренняя стенка и дно которого облицованы досками. Техническая характеристика транспортеров для удаления навоза серии ТСН представлена в таблице 1.

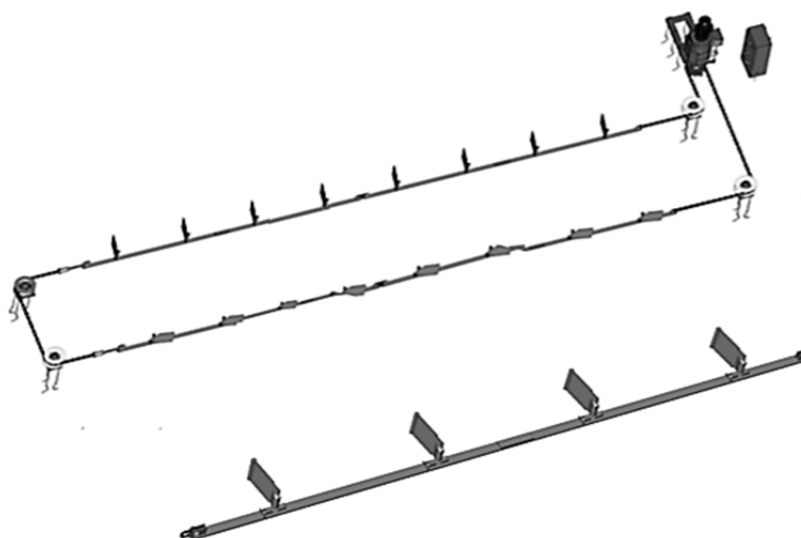
Штанговый навозоуборочный транспортер серии ТШ (рисунок 2) относится к возвратно-поступательным механизмам и используется для сбора и дальнейшего удаления навоза из коровников и свиноферм [3]. Удаление навозной массы производится за счет реверсивного возвратно-поступательного передвижения скребков, закрепленных на подвижные крепежи к опорной штанге. Техническая характеристика транспортеров для удаления навоза представлена в таблице 2.



**Рисунок 1. — Скребковый
навозоуборочный транспортер серии ТСН**

Т а б л и ц а 1. — Техническая характеристика транспортеров для удаления навоза [4]

Показатель	ТСН-160	ТСН-3,0Б	ТСН-2,0
Производительность, т / ч	4,0...5,5	4...4,5	4,5
Максимально допустимая длина цепи, м	170		
Скорость движения цепи (штанги), м / с	0,25	0,19	0,19
Размеры скребков, мм:			
горизонтального	240 × 60 × 36		290 × 70 × 36
наклонного	240 × 60 × 36		
Расстояние между скребками, мм	960	1 000	460
Размер навозного канала, мм	320 × 120		320 × 125
Количество электродвигателей, шт.	2	2	1
Потребляемая мощность, кВт	5,5	5,5	4,5
Масса, кг	1 825 ± 30	2 130	2 730



**Рисунок 2. — Штанговый
навозоуборочный транспортер серии ТШ**

Т а б л и ц а 2. — Техническая характеристика штангового транспортера ТШ-320

Показатель	Значение
Установленная мощность, кВт	1,5
Длина хода рабочего органа, м	1,8
Вид движения скребков	Возвратно-поступательный
Размер навозного канала (глубина), мм	200
Размер навозного канала (ширина), мм	320
Длина контура, м	170
Скорость движения скрепера, м / мин	Не более 5,0
Обслуживающий персонал, чел.	1

Установка скреперная (рисунок 3) серии УСГ возвратно-поступательного движения предназначена для уборки навоза крупного рогатого скота из открытых навозных проходов при боксовом и комбибоксовом способах содержания с использованием подстилки или без нее. Скреперная установка транспортирует навоз по продольным каналам коровника в поперечный канал, комплектуется четырьмя рабочими органами, что позволяет осуществить выгрузку навоза как из торца, так и из середины помещения там, где размещен поперечный канал. Установка убирает навоз одновременно из двух навозных проходов [5].

Скрепер состоит из ползуна, шарнирно закрепленных на нем скребков и смонтированного внутри ползуна натяжного устройства. Техническая характеристика скреперной установки представлена в таблице 3.

Шнековый транспортер применяется для очистки коровника от навоза с максимальной влажностью более 75 % [6]. Транспортер предназначен для удаления навоза по поперечным каналам животноводческих помещений с одновременной погрузкой в транспортное средство. Комплект состоит из поперечного транспортера, наклонного транспортера, пульта управления. Поперечный транспортер представляет горизонтальный шнек, помещенный в металлический лоток, расположенный в бетонном канале. Навоз, проталкиваясь через решетки, подается в желоб и при вращении шнека постепенно перемещается вдоль него. Принцип действия шнековых транспортеров основан на использовании осевой движущей силы. Когда шнек начинает вращаться, собранный в желобах навоз движется по желобу и в конечной точке загружается в транспортер, который подает навоз в накопительный бункер.



Рисунок 3. — Установка скреперная

Т а б л и ц а 3. — Технические характеристики скреперных установок

Наименование параметра	ТСГ-170	ТСГ-250
Тип установки	Стационарный, возвратно-поступательного действия	
Установленная мощность, кВт	1,1	1,5
Длина контура, м	170	250
Ширина захвата, м	от 1,8 до 3,0	
Глубина навозного канала, мм	200	
Скорость рабочего органа, м / мин	5,1	
Срок службы, лет	7	
Количество обслуживаемого поголовья скота, шт.	80...120	140...180
Обслуживающий персонал, чел.	1	
Передаточное число редуктора	229	
Масса, кг	1 150	1 400

Шнековый транспортер может быть укомплектован электронной системой управления, датчики которой следят за уровнем навоза в накопителе и управляют скоростью вращения шнека. При эксплуатации шнековых транспортеров в качестве подстилочного материала используются опилки или измельченная солома.

Для расчета шнекового транспортера необходимо учитывать такие основные параметры, как шаг навивки, плотность навоза (с ростом плотности навоза шаг навивки необходимо уменьшить) и скорость вращения вала шнека [7].

Для выполнения расчета определяется объем шнековой камеры:

$$V_k = 0,25\pi(D-d)^2 L_{ш} k_1,$$

где D и d — наружный и внутренний диаметры шнека, м;

$L_{ш}$ — длина шнека, м;

k_1 — коэффициент заполнения шнековой камеры.

Шаг шнека определяется из уравнения $S_{ш} = (0,8...1,0)D$.

Объемная производительность шнека определяется по формуле

$$Q_{ш} = V_k \omega_{\max},$$

где $\omega_{\max}$ — максимальная угловая скорость вала шнека при максимальной загрузке шнековой камеры, c^{-1} .

Мощность на привод шнека определяется по формуле

$$N_{ш} = \frac{0,278 \cdot 10^{-5} Q_{ш} g \rho (H + k_c L_{ш}) \eta_a}{\eta},$$

где g — ускорение свободного падения, м / c^2 ;

ρ — плотность навоза, кг / m^3 ;

H — высота подъема навоза наклонным транспортером, м;

k_c — коэффициент сопротивления перемещению навоза по желобу ($k_c = 4 \dots 8$);

η_a — коэффициент запаса мощности;

η — КПД привода шнека ($\eta = 0,7 \dots 0,9$).

Транспортер шнековый серии ТШН (рисунок 4) монтируется из универсальных секций, скрепленных сваркой или болтами. Количество этих секций ограничено длиной бетонных каналов. Соединение шнека к подшипниковому валу производится посредством карданного вала. Техническая характеристика шнековых навозоуборочных транспортеров представлена в таблице 4.

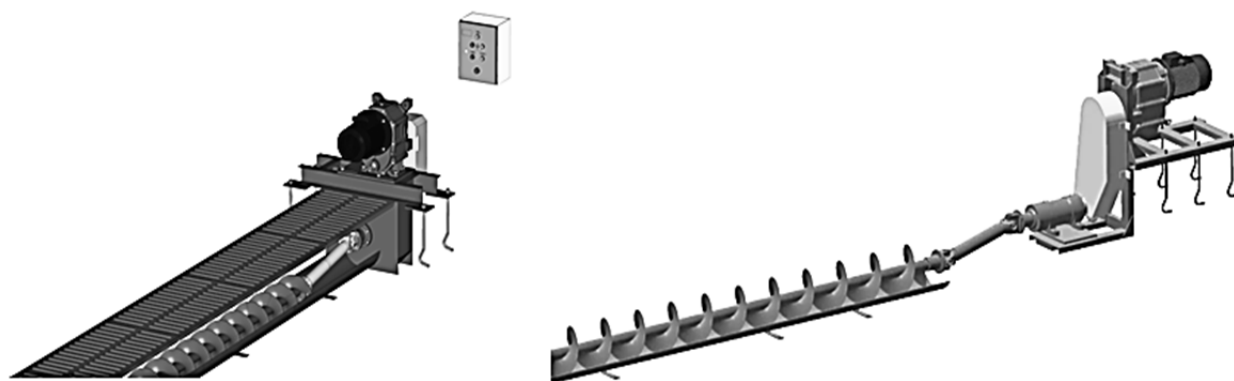


Рисунок 4. — Транспортер шнековый навозоуборочный серии ТШН

Т а б л и ц а 4. — Технические характеристики шнековых транспортеров серии ТШН

Показатель	ШТК-Ф-200	ТШН-10	ТШН-200
Производительность, т / ч	6	6	5,8
Установленная мощность транспортеров, кВт:			
продольного	16	16	16
поперечного	4	4	4
наклонного	—	—	4
Длина транспортеров, м:			
продольного	66,1	65,6	70
поперечного	19,6	20,6	20
наклонного	—	—	9
Частота вращения транспортеров, мин ⁻¹ :			
продольного	24	15...60	15
поперечного	24	15...60	56
наклонного	—	—	56
Угол установки наклонного транспортера, град.	—	—	до 30
Диаметр витков, м	0,207	0,207	0,300
Шаг спирали шнека, м	0,15	0,15	0,2

Заключение. Для удаления навоза механическими стационарными средствами на животноводческих фермах и комплексах применяются транспортеры кругового движения, возвратно-поступательного и винтовые.

При подборе оборудования необходимо предусматривать бесперебойную работу поточной линии и осуществление всех технологических процессов по принятой схеме, а также обеспечивать необходимую производительность и оптимальную загрузку оборудования, лучшие условия труда и низкую себестоимость выпускаемой продукции.

Список цитированных источников

1. Китун, А. В. Машины и оборудование в животноводстве : учебник / А. В. Китун, В. И. Передня, Н. Н. Романюк. — Минск : БГАТУ, 2019. — 504 с.
2. Гриб, В. К. Механизация животноводства / В. К. Гриб. — Минск : Ураджай, 1997. — 640 с. : ил.
3. Рекомендации по системам удаления, транспортирования, хранения и подготовки к использованию навоза для различных производственных и природно климатических условий. — М. : Росинформагротех, 2005. — 180 с.
4. Организация и технология производства продукции животноводства / Н. В. Казаровец [и др.]. — Минск : Беларусь, 2008. — 232 с.
5. Техническое обеспечение процессов в животноводстве : учебник / В. К. Гриб [и др.] ; под общ. ред. В. К. Гриба. — Минск : Беларус. навука, 2004. — 831 с.
6. Машины и оборудование в животноводстве : учеб. пособие / Д. Ф. Кольга [и др.] ; под ред. Н. В. Казаровца, Д. Ф. Кольги. — Минск : Беларусь, 2010. — 310 с.
7. Марон, Ф. П. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин / Ф. П. Марон, А. В. Кузьмин. — Минск, 1977. — 271 с.

Поступила в редакцию 27.01.2022.

УДК 637.116.4

П. Ю. Крупенин, кандидат технических наук, доцент,**Ю. А. Крупенин**

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

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДОИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Доеение коров — не только наиболее трудоемкая технологическая операция на молочно-товарных предприятиях, но и единственная, которая в полной мере соответствует определению системы «человек—машина—животное», причем оператор машинного доения по-прежнему остается ключевым элементом этой системы, действия которого оказывают непосредственное влияние на безопасность и уровень стресса животных.

Из перечня действий, выполняемых оператором машинного доения, отдельного внимания заслуживает операция по постановке доильного аппарата на вымя, в ходе которой происходит подсос воздуха в систему транспортирования молока, что приводит к колебаниям вакуумметрического давления, ощущаемых на каждом доильном месте.

Стабильность вакуумметрического давления в переходных режимах работы доильной установки характеризуется такими параметрами, как падение давления при постановке доильного аппарата, перебор регулировки при постановке доильного аппарата и недобор регулировки при его снятии.

Измерение величины колебаний вакуумметрического давления в переходных режимах работы доильного оборудования представляет собой комплексный диагностический прием, позволяющий оценить согласованность работы узлов и систем доильной установки.

Ключевые слова: доение коров; доильная установка; диагностирование; вакуумметрическое давление; прибор ППДУ-01; вакуум-регулятор.

Рис. 4. Библиогр.: 7 назв.

P. Y. Krupenin, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**Y. A. Krupenin**

Educational Institution “Belarusian State of the Orders of October Revolution and Labor Red Banner
Agricultural Academy”, 5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus, pavel@krupenin.com

DIAGNOSIS OF THE MILKING MACHINE IN TRANSIENT OPERATION MODES

Milking cows is not only the most labour-intensive technological operation in dairy enterprises, but also the only one that fully corresponds to the definition of the “man-machine-animal” system, and a man is still the key element of it.

From the list of actions performed by the machine-milking operator, the operation of placing the milking cups on the udder deserves special attention, during which air is sucked into the milk transportation system. It leads to vacuum pressure fluctuations felt at each milking place.

The stability of the vacuum pressure in the transient of operation modes of the milking machine is characterized by such parameters as the pressure drop and, the overshoot of the adjustment when the milking cups are installed and the lack of adjustment when they are removing it.

Measuring the magnitude of fluctuations in vacuum pressure can be used like the consistency criterion of the milking parlor systems.

Key words: milking cows; milking machine; diagnostics; vacuum pressure; device PPDU-01; vacuum regulator.

Fig. 4. Ref.: 7 titles.

Введение. Доеение коров — не только наиболее трудоемкая технологическая операция на молочно-товарных предприятиях, но и единственная, которая в полной мере соответствует определению системы «человек—машина—животное». Одним из направлений повышения эффективности этой системы является улучшение условий деятельности операторов машинного доения. Однако сложность современных технологических и технических элементов процесса машинного доения увеличивает нагрузку на операторов, снижает эффективность их работы и, как следствие, повышает вероятность некачественного выполнения ими ручных операций [1].

Несмотря на то, что производители доильного оборудования активно разрабатывают и внедряют новые технические решения, облегчающие условия труда операторов машинного доения и снижающие количество человеческих ошибок [2], оператор машинного доения по-прежнему остается неотъемлемым элементом системы «человек—машина—животное», а значит, его действия оказывают непосредственное влияние на безопасность и уровень стресса животных.

Из перечня действий, выполняемых оператором машинного доения, отдельного внимания заслуживает операция по постановке доильного аппарата на вымя. Особенностью данной операции является то, что в ходе ее выполнения возможен подсос воздуха в систему транспортирования молока и, как следствие, в вакуумную систему доильной установки. Резкие изменения в расходе воздуха доильной установкой приводят к колебаниям вакуумметрического давления в ее системах, которые ощущаются на каждом доильном месте и представляют собой дополнительный стрессовый фактор для доящихся на них коров.

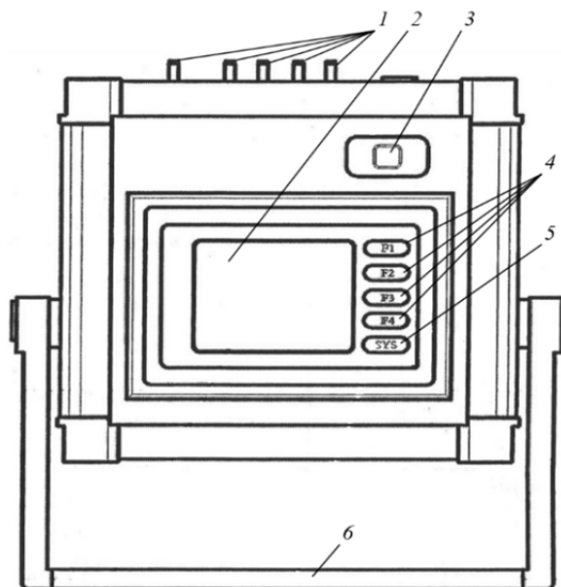
Амплитуда колебаний вакуумметрического давления во время постановки доильного аппарата на вымя зависит от двух факторов: квалификации оператора машинного доения и технического состояния систем доильной установки, методика оценки которого рассматривается в данной статье.

Материалы и методы исследования. Комплексное диагностирование технического состояния систем доильной установки невозможно без использования специализированного оборудования [3; 4]. Из его отечественных образцов следует отметить прибор проверки доильных установок ППДУ-01, позволяющий измерять уровень вакуумметрического давления в статических и динамических режимах работы доильной установки, расход воздуха и кинематические параметры вакуумного насоса. Прибор включен в Государственный реестр средств измерений (сертификат № 11282) и допущен к применению на территории Республики Беларусь [5].

Прибор проверки доильных установок ППДУ-01 состоит из блока измерительного функционального БИФ-01, датчика расхода воздуха ДРВ-01, датчика частоты вращения ДСВ-01, комплекта принадлежностей и пластикового кейса для переноски. Измерительный функциональный блок БИФ-01 является главной частью прибора. На его верхней панели расположен сенсорный дисплей 2 (рисунок 1) с четырьмя кнопками управления 4 и системной кнопкой 5.

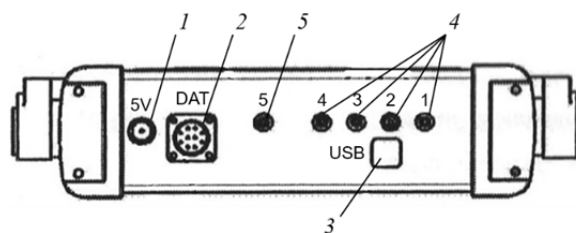
Размещение элементов измерительного блока на его задней панели показано на рисунке 2. Разъем «5V» служит для подключения блока к сетевому адаптеру (блоку питания). Подключение датчиков расхода воздуха ДРВ-01 и частоты вращения ДСВ-01 осуществляется через разъем «DAT». На задней панели измерительного также размещены входы (штуцеры) 4 и 5 датчиков давления. Для измерения вакуумметрического давления используются входы «1», «2», «3» и «4». Вход «5» служит для измерения избыточного давления.

Управление прибором, включая выбор необходимых пунктов меню, запуск измерений и сохранение их результатов во встроенной памяти осуществляются функциональными кнопками «F1»—«F4». Действия, выполняемые прибором при нажатии пользователем на определенную кнопку, условно обозначаются на экране напротив соответствующей функциональной кнопки.



1 — штуцеры датчиков давления; 2 — дисплей;
3 — кнопка «Сеть»; 4 — кнопки управления
«F1»—«F4»; 5 — системная кнопка «SYS»;
6 — ручка

**Рисунок 1. — Размещение элементов на
верхней панели измерительного блока
БИФ-01**



1 — разъем «5V»; 2 — разъем «DAT»; 3 —
разъем «USB»; 4 — входы датчиков вакуум-
метрического давления; 5 — вход датчика
избыточного давления

**Рисунок 2. — Размещение элементов
на задней панели измерительного блока
БИФ-01**

Результаты исследования и их обсуждение. Измерение величины колебаний вакуумметрического давления в системе транспортирования молока доильной установки, возникающих при постановке доильного аппарата на вымя, осуществляется в режиме «ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ», который активируется из главного меню прибора ППДУ-01. Измерение выполняется в три этапа, в ходе которых на экран прибора выводятся указания диагноста по его дальнейшим действиям.

В общем виде измерение выполняется в следующей последовательности:

- 1) вход «1» датчика давления блока БИФ-01 соединяют с молокосборником;
- 2) перекрывают клапаны коллекторов всех доильных аппаратов;
- 3) включают доильную установку и ожидают 10...15 с для стабилизации вакуумметрического давления в ее системах;

4) нажимают на кнопку «F1» измерительного блока;

5) при появлении на экране сообщения «Включите доильную единицу» открывают клапан коллектора (доильные стаканы не должны быть закрыты заглушками, а молочные трубки не должны быть пережаты), после чего нажимают на кнопку «F2»;

6) продолжают следить за экраном прибора и при появлении на нем сообщения «Выключите доильную единицу» закрывают клапан коллектора, после чего нажимают на кнопку «F3»;

7) через 10 с измерение автоматически завершается, его результаты выводятся на экран прибора (рисунок 3).

Результаты измерения в режиме «ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ» представляются на экране в виде графика вакуумметрического давления и блока числовых данных (рисунок 3). На графике отображаются изменения вакуумметрического давления в системе транспортирования молока, возникающие при постановке и снятии доильного аппарата с вымени. В нижней части экрана приводятся значения вакуумметрического давления в ключевых точках графика.

Рассмотрим алгоритм обработки получаемых в режиме «ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ» диагностических данных. До постановки доильного аппарата на вымя (клапан коллектора закрыт) в молокосборнике устанавливается начальное вакуумметрическое давление p_1 (рисунок 4). В момент времени $t_{\text{подкл}}$ произошло открытие клапана коллектора — расход воздуха доильной установкой резко увеличился, а вакуумметрическое давление «просело» до уровня p_2 . Через некоторое время произошло срабатывание вакуум-регулятора, в результате чего давление возросло и стабилизировалось на уровне p_3 .

Разность начального p_1 и установившегося в молокосборнике при открытом клапане коллектора p_3 значений называется падением давления при постановке доильного аппарата: $p_{\Delta 1-3} = p_1 - p_3$.

Разность между минимальным p_2 и установившимся p_3 значениями вакуумметрического давления при открытии клапана коллектора косвенно отражает быстроту реагирования вакуум-регулятора и называется перебором регулировки при постановке доильного аппарата: $p_{\Delta 3-2} = p_3 - p_2$.

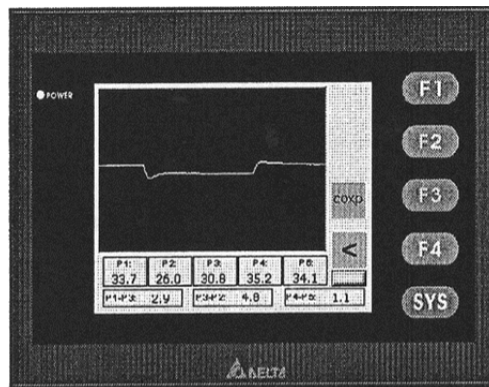


Рисунок 3. — Представление результатов измерения в режиме «ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ»

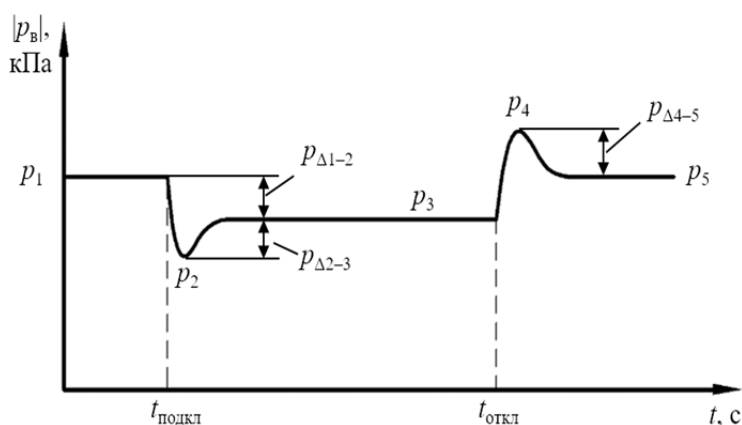


Рисунок 4. — Схема к анализу колебаний вакуумметрического давления при постановке и снятии доильного аппарата

При отключении доильного аппарата (закрытии клапана его коллектора) в момент времени $t_{\text{откл}}$ приток воздуха в систему транспортирования молока резко сократился, что вызвало обратный скачек вакуумметрического давления до максимального значения p_4 (см. рисунок 4). Спустя некоторое время вакуум-регулятор реагирует на изменение условий работы доильной установки и стабилизирует вакуумметрическое давление на уровне p_5 .

Разность между максимальным p_4 и установившимся p_5 значениями вакуумметрического давления при закрытии клапана коллектора называется недобором регулировки при снятии доильного аппарата: $p_{\Delta 4-5} = p_4 - p_5$.

В технически исправной доильной установке скачки вакуумметрического давления $p_{\Delta 1-3}$, $p_{\Delta 3-2}$ и $p_{\Delta 4-5}$ не должны превышать 2 кПа [6; 7]. С другой стороны, по итогам диагностирования действующих доильных установок с линейным молокопроводом на практике этому критерию в большинстве случаев соответствует только величина недобора регулировки при снятии доильного аппарата $p_{\Delta 4-5}$, в то время как значения падения давления $p_{\Delta 1-3}$ и перебора регулировки $p_{\Delta 3-2}$ при постановке доильного аппарата могут достигать 5...8 кПа.

Следует отметить, что вышеописанная методика измерений имитирует наихудшую, характерную для работы начинающих операторов машинного доения ситуацию, когда при постановке доильного аппарата на вымя подсос воздуха происходит одновременно через четыре доильных стакана. Опытный же работник в состоянии обеспечить постановку доильного аппарата быстро и с минимальным подсосом воздуха.

Тем не менее доильные установки проектируются исходя из наихудшего сценария и должны обеспечивать стабильный уровень вакуумметрического давления даже в переходных режимах работы. Сглаживание колебаний давления осуществляют как емкостные части доильной установки (молокосборник, ресивер, вакуум-баллон, вакуум-провод увеличенного сечения), так и регулирующие устройства (гравитационный вакуум-регулятор, сервовакуумный регулятор, система частотного регулирования VOD и др.).

Наиболее вероятными причинами, вызывающими падение давления при постановке доильного аппарата $p_{\Delta 1-3}$ более чем на 2 кПа, являются: несоответствие подачи вакуумного насоса требованиям доильной установки; недостаточная пропускная способность вакуумной системы; негерметичность вакуум-регулятора.

Факторами, приводящими к перебору $p_{\Delta 3-2}$ или недобору $p_{\Delta 4-5}$ регулировки свыше 2 кПа, могут быть: недостаточный рабочий объем узлов доильной установки, предназначенных для сглаживания пульсаций давления (ресивер, вакуум-баллон, молокосборник); несоответствие проходного сечения вакуум-провода подаче вакуумного насоса; неисправности регулирующих устройств (заклинивание клапана, повреждение мембраны, сбой настроек и др.).

Из вышеприведенных перечней возможных неисправностей следует, что измерение стабильности вакуумметрического давления в переходных режимах работы доильного оборудования, т. е. при постановке и снятии доильных аппаратов, представляет собой комплексный диагностический прием, позволяющий оценить согласованность работы узлов и систем доильной установки.

Заключение. Применение современных диагностических комплексов обеспечивает многостороннюю оценку технического состояния доильного оборудования.

Стабильность вакуумметрического давления в переходных режимах работы доильной установки характеризуется такими параметрами, как падение давления при постановке доильного аппарата, перебор регулировки при постановке доильного аппарата и недобор регулировки при его снятии.

Большая часть из обследованных доильных установок с линейным молокопроводом не соответствует критериям стабильности вакуумметрического давления в переходных режимах, что создает дополнительный стрессовый фактор для доящихся коров и повышает требования к компетентности операторов машинного доения.

Список цитированных источников

1. *Крупенин, П. Ю.* Методика расчета конструктивных параметров четырехкамерного коллектора доильного аппарата / П. Ю. Крупенин, Д. К. Гупало // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2019. — № 4. — С. 153—160.
2. *Яковенко, Т. П.* Повышение технологической надежности оператора путем совершенствования условий труда в системе «человек-машина-животное»: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Т. П. Яковенко. — Оренбург, 2003. — 24 с.
3. *Крупенин, П. Ю.* Анализ фазового портрета пульсаций доильного аппарата / П. Ю. Крупенин // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2021. — № 2 (10). — С. 102—107.
4. *Крупенин, Ю. А.* Диагностирование параметров водокольцевого вакуумного насоса доильной установки / Ю. А. Крупенин, П. Ю. Крупенин // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. работ. — Брянск : Изд-во Брян. ГАУ, 2019. — Вып. 1 (21). — С. 109—117.
5. Приборы проверки доильных установок ППДУ-01 [Электронный ресурс] // Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений. — Режим доступа: <http://oei.by/grsi/view?id=4391357>. — Дата доступа: 05.09.2022.
6. Установки доильные. Конструкция и рабочие характеристики : ISO 5707:2007. — Введ. 15.02.2007. — Женева : Междунар. организация по стандартизации, 2007. — 60 с.
7. Установки доильные. Механические испытания : ISO 6690:2007. — Введ. 15.02.2007. — Женева : Междунар. организация по стандартизации, 2007. — 48 с.

Поступила в редакцию 04.10.2022.

УДК 621.86.07:51-7

К. М. Михайлов,**М. И. Михайлов,** доктор технических наук, профессорУчреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
пр-т Октября, 48, 246746 Гомель, Республика Беларусь, +375 (232) 47 91 61, M.I. Mikhailov@gstu.by

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ НОЖЕЙ РЕЖУЩЕГО БАРАБАНА КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА НА ПАРАМЕТРЫ ЕГО ОБРАЗУЮЩЕЙ

Разработаны математические модели, устанавливающие связи параметров расположения сменных ножей измельчающего барабана кормоуборочного комбайна с параметрами режущих кромок измельчающего аппарата. Полученные зависимости позволили установить, что наибольшее влияние на изменение радиуса режущей кромки ножа оказывает угол ее наклона.

Ключевые слова: кормоуборочный комбайн; ножи измельчающего барабана; расположение; параметры режущих кромок.

Рис. 7. Библиогр.: 8 назв.

К. М. Mikhailov,**M. I. Mikhailov,** DSc in Technical Sciences, ProfessorEducational Institution "Sukhoi State Technical University of Gomel", 48 October Ave., 246746 Gomel,
the Republic of Belarus, +375 (232) 47 91 61, M.I. Mikhailov@gstu.by

INFLUENCE OF THE CUTTING DRUM KNIVES POSITION OF A FORAGE HARVESTER ON THE PARAMETERS OF ITS GENERATOR

Mathematical models that establish the relationship between the parameters of the replaceable knives location of the forage harvester-chopping drum and the cutting edges parameters of the chopping apparatus have been developed. The obtained dependences made it possible to establish that the angle of its inclination has the greatest influence on the change in the cutting edge radius of the knife.

Key words: forage harvester; chopping drum knives; location; cutting edges parameters.

Fig. 7. Ref.: 8 titles.

Введение. Работоспособность измельчающего аппарата в основном зависит от работоспособности режущих ножей барабана и противорежущего бруса [1—8]. Применение различных конструкций барабанов требовало расчетов пространственного расположения площадок под режущие ножи при условии обеспечения соответствующих углов резания. Это привело к разработке математических зависимостей, позволяющих производить пересчет углов из различных плоскостей в главную секущую плоскость [3; 7; 8]. В отличие от заточиваемых ножей барабанов, у сборных конструкций с механическим креплением сменных ножей (далее — СН) необходимая для эффективного резания геометрия получается путем определенного расположения режущей пластины относительно поверхности резания и корпуса барабана [3; 8]. Эта особенность приводит к тому, что невозможно независимо получать геометрические параметры на каком-либо участке лезвия без учета их значений на остальных. Иными словами, при повороте СН в процессе его ориентации в общем случае изменяются все углы лезвия во всех точках режущей кромки. Поэтому для описания геометрии зубьев измельчающих барабанов более приемлем подход, основанный на задании ориента-

ции СН поворотом их в корпусе на соответствующие углы относительно статической системы координат, под которой понимается многими авторами система координат, жестко связанная с точкой режущей кромки СН.

При проектировании измельчающих барабанов с СН решаются две основные задачи: прямая и обратная.

Первая (прямая) задача формулируется следующим образом: задана форма сменных ножей и углы их ориентации в корпусе барабана; необходимо определить форму образующей виртуальной инструментальной поверхности барабана и задние углы ножей в статической системе координат.

Во второй (обратной) задаче задаются форма образующей виртуальной инструментальной поверхности барабана и задние углы ножей в статической системе координат, а требуется рассчитать углы ориентации режущей пластины в корпусе барабана.

В более общем случае эти задачи объединяются: вначале по геометрии главного лезвия и форме СН рассчитываются углы ориентации, а затем для полученных значений углов анализируется геометрия режущих кромок в целях выявления участков с неблагоприятным соотношением задних углов лезвия ножа.

Используются два основных способа ориентации СН в корпусе барабана: 1) по численным значениям фронтального и профильного углов наклона ножа; 2) по положению плоскости наибольшего ската СН и его угла наибольшего наклона.

Рассмотрим общий вид измельчающего барабана кормоуборочного комбайна (рисунок 1, а). Анализ сечений и видов СН позволяет определить углы главной режущей кромки в произвольной точке (рисунок 1, б): γ — главный передний угол (угол в поперечной секущей плоскости, заключенный между основной плоскостью перпендикулярной вектору скорости резания и касательной к передней поверхности ножа); λ — угол наклона режущей кромки (угол в плоскости резания заключенный между касательной к режущей кромке и основной плоскостью); α — главный задний угол (угол в поперечной секущей плоскости, заключенный между плоскостью резания проходящей по касательной к режущей кромке и содержащей вектор скорости резания и касательной к задней поверхности); β — главный угол заострения (угол в поперечной секущей плоскости, заключенный между плоскостями касательными к передней и задней поверхностям ножа).

Рассмотрим несколько примеров моделирования виртуальных инструментальных поверхностей, образующая которых формируется из сменных пластин.

Случай 1. Передняя поверхность ножа не совпадает с основной плоскостью режущего барабана. Выбирается местная система координат XYZ , в которой расположен профиль ножа без искажения (рисунок 2).

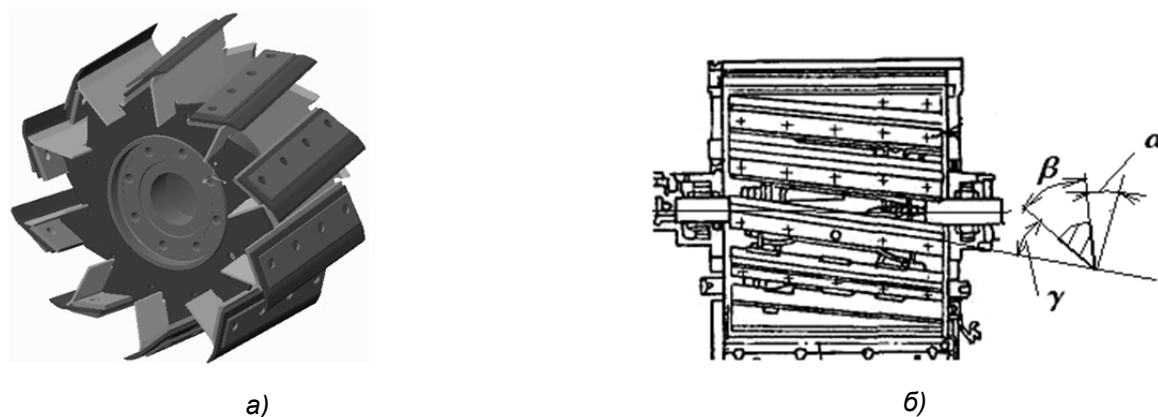


Рисунок 1. — Общий вид измельчающего барабана кормоуборочного комбайна (а), углы режущего лезвия (б)

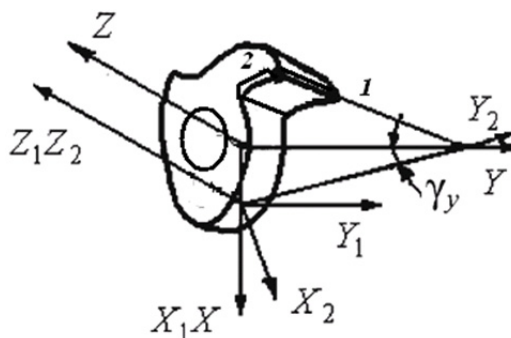


Рисунок 2. — Эскиз рабочей части барабана с призматическим режущим элементом с $\gamma_y \neq 0$, $\lambda = 0$

В системе координат XYZ уравнение режущей кромки имеет следующий вид:

$$Z = \frac{l}{\delta_y} Y - \frac{l}{\delta_y} Y(1) + Z(1), \quad (1)$$

где Z, Y — текущие координаты режущей кромки ножа;
 l — длина режущей кромки сменного ножа;
 δ_y — погрешность расположения режущей кромки ножа относительно оси инструмента;
 $Y(1), Z(1)$ — координаты расположения точки 1 ножа.

Как видно из рисунка 2, уравнения преобразования координат XYZ в $X_2Y_2Z_2$ имеют вид:

$$Y = Y_2 \cos \gamma_{yi}; \quad X = X_2 = 0; \quad Z = Z_2. \quad (2)$$

По данным рисунка 2,

$$\cos \gamma_{yi} = \sqrt{1 - Y_2^2(1) \sin^2 \gamma_y / Y_2^2}, \quad Y_2(1) \equiv R. \quad (3)$$

Подставив соотношения (2) и (3) в уравнение (1), получаем уравнение, отражающее радиусы режущего барабана в основной плоскости:

$$R_i = \sqrt{\frac{\delta_y^2}{l^2} [Z_{2i}^2 + 2Z_{2i} (\frac{l}{\delta_y} Y(1) - l_1)] + [Y(1)^2 - 2l_1 Y(1) \frac{\delta_y}{l} + l_1^2 \frac{\delta_y^2}{l^2}] + R^2 \sin^2 \gamma_y},$$

где R — максимальный радиус инструмента;

γ_y — поперечный передний угол ножа в точке кромки с радиусом R ;

l_1 — расстояние от торца режущего аппарата до точки 1 режущей кромки ножа.

Результаты расчетов по полученной зависимости представлены на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3, наибольшее влияние на изменение радиуса оказывает погрешность расположения режущей кромки ножа. Так, с увеличением погрешности расположения режущей кромки ножа от 0,2 до 1,0 мм при $\gamma_y = 10^\circ$ радиус режущей кромки ножа в крайней (конечной) его точке 2 (см. рисунок 2) увеличивается в 24,8 раза, а с увеличением переднего угла в два раза, при погрешности расположения режущей кромки ножа 1 мм численное значение радиуса режущей кромки ножа в крайней его точке уменьшилось в 5,22 раза (см. рисунок 3, б).

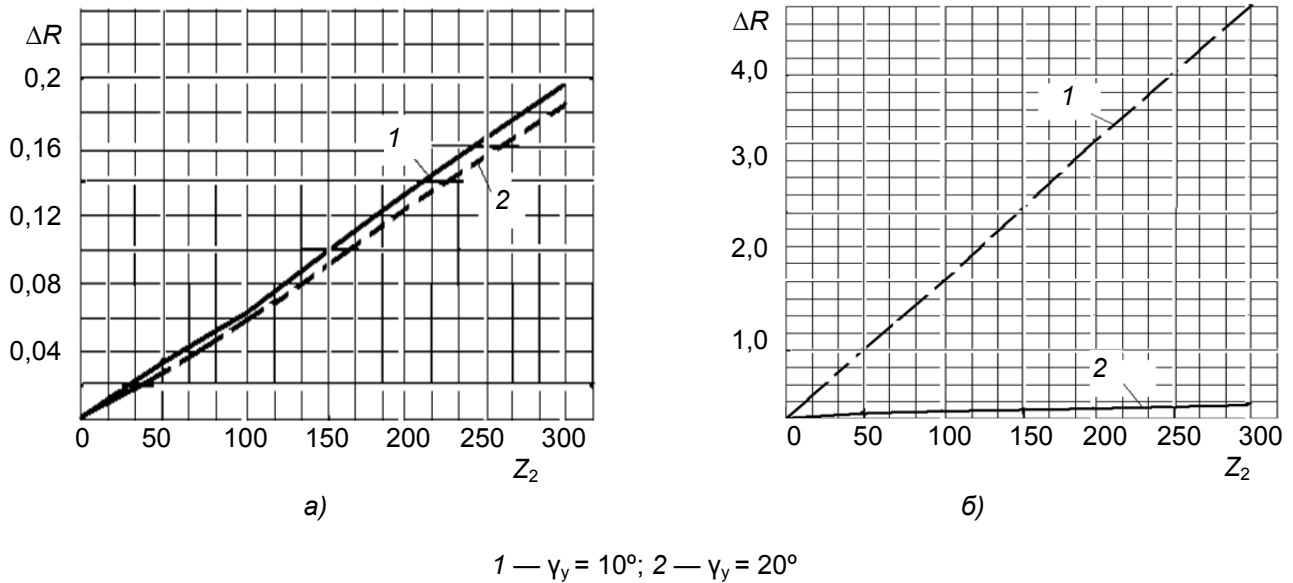


Рисунок 3. — График изменения радиуса режущей кромки ножа при $\delta_y = 0,2$ мм (а) и $\delta_y = 1$ мм (б)

Случай 2. Режущая пластина повернута относительно оси режущего барабана на угол λ (рисунок 4). Если в системе координат XYZ уравнение режущей кромки имеет вид:

$$Z = \frac{l}{\delta_y} Y - \frac{l}{\delta_y} Y(1) + Z(1), \quad (4)$$

то эта кромка в основной плоскости преобразуется в кривую второго порядка (рисунок 4).

Уравнение преобразования системы XYZ в систему $X_2 Y_2 Z_2$ имеют вид:

$$Y = Y_2 \sqrt{1 - (Z_2^2 / Y^2) \tan^2 \lambda}; \quad X = X_2 = 0; \quad Z = Z_2 / \cos \lambda. \quad (5)$$

Подставив соотношения (5) в уравнение (4), получили уравнение, отражающее радиусы режущего барабана в основной плоскости:

$$R_i = \sqrt{\frac{l^2 \sin^2 \lambda + \delta_y^2}{l^2 \cos^2 \lambda} Z_{2i}^2 + 2 Z_{2i} \frac{\delta_y}{l \cos \lambda} (Y(1) - \frac{\delta_y}{l}) + (Y(1) - Z(1) \frac{\delta_y}{l})^2}.$$

Результаты расчетов по полученной зависимости представлены на рисунке 5.

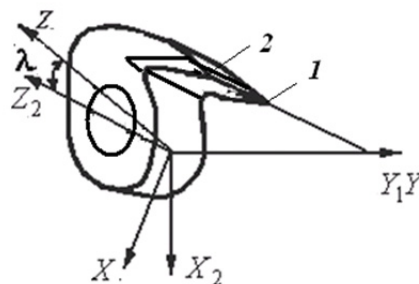


Рисунок 4. — Эскиз рабочей части барабана с призматическим режущим элементом при $\lambda \neq 0$

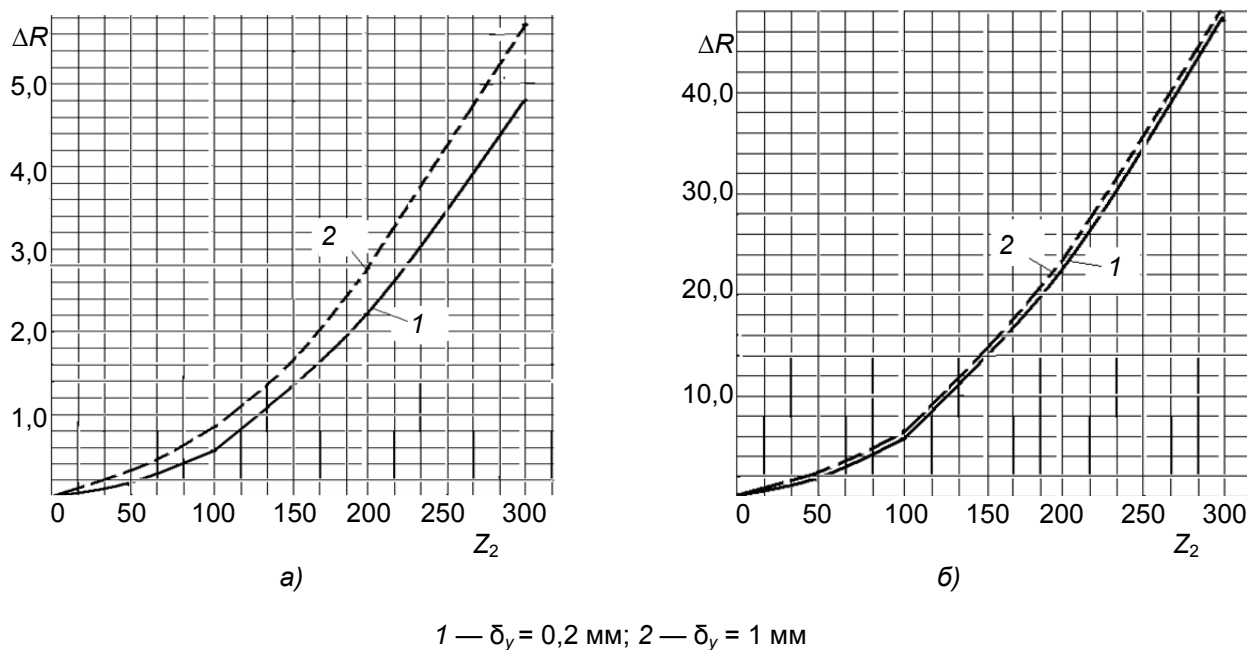


Рисунок 5. — График изменения радиуса режущей кромки ножа при $\lambda = 10^\circ$ (а) и $\lambda = 30^\circ$ (б)

Анализ результатов на рисунке 5 позволяет заключить, что наибольшее влияние на численное значение радиуса режущей кромки ножа оказывает угол наклона режущей кромки. Так, при увеличении в три раза угла наклона режущей кромки с $\lambda = 10^\circ$ до $\lambda = 30^\circ$ при погрешности расположения режущей кромки ножа $\delta_y = 0,2$ мм численное значение радиуса режущей кромки ножа в крайней его точке увеличивается в 9,7 раза, а с увеличением погрешности расположения режущей кромки ножа от 0,2 до 1,0 мм при $\lambda = 10^\circ$ численное значение радиуса режущей кромки ножа в крайней его точке увеличивается в 1,16 раза.

Случай 3. Режущая пластина составляет угол γ_y с основной плоскостью в точке кромки с максимальным радиусом барабана R и, кроме того, повернута относительно оси барабана на угол λ (рисунок 6).

В случае прямой режущей кромки, которую можно описать в системе XYZ в виде (1), она преобразуется в системе $X_2 Y_2 Z_2$ в кривую второго порядка.

Уравнения преобразования системы XYZ в систему $X_2 Y_2 Z_2$ имеют вид:

$$Y = \sqrt{Y_2^2 - (Y_2(1) \sin \gamma_y + Z_2 \operatorname{tg} \lambda)^2}; \quad X_2 = X = 0; \quad Z = Z_2 / \cos \lambda. \quad (6)$$

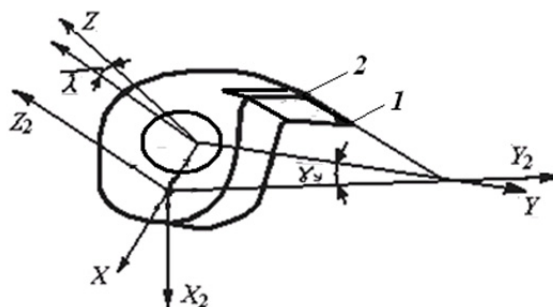
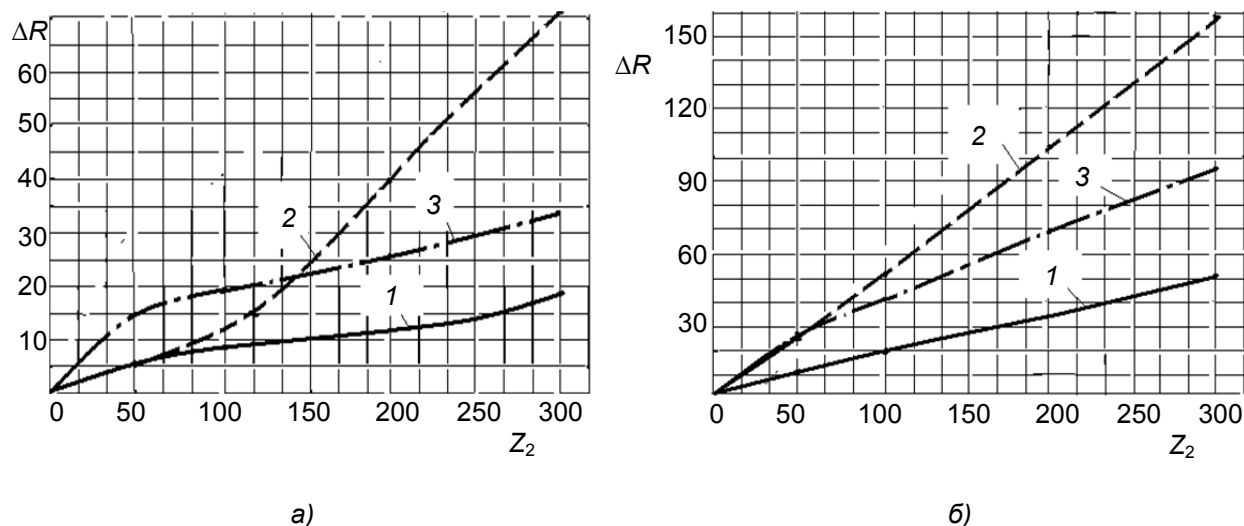


Рисунок 6. — Эскиз рабочей части барабана с призматическим режущим элементом $\gamma \neq 0$, $\lambda \neq 0$



1 — $\lambda = 10^\circ$, $\gamma_y = 10^\circ$; 2 — $\lambda = 30^\circ$, $\gamma_y = 10^\circ$; 3 — $\lambda = 10^\circ$, $\gamma_y = 20^\circ$

Рисунок 7. — График изменения радиуса режущей кромки ножа при $\delta_y = 0,2$ мм (а) и $\delta_y = 1$ мм (б)

Подставив соотношения (6) в уравнение (1), получили уравнение, отражающее радиусы режущего барабана в основной плоскости:

$$R_i = \left(\frac{l^2 \sin^2 \lambda + \delta_y^2}{l^2 \cos^2 \lambda} Z_{2i}^2 + 2Z_{2i} \frac{\delta_y}{l \cos \lambda} (Y(1) - \frac{\delta_y}{l} Z(1) + R \frac{l}{\delta_y} \sin \lambda \sin \gamma_y) + R^2 \sin^2 \gamma_y + Y(1)^2 - 2Z(1)Y(1) \frac{\delta_y}{l} + \frac{\delta_y^2}{l^2} Z(1)^2 \right)^{0.5}.$$

Так, для ножей с режущей кромкой, длина которой равна 300 мм, а угол установки под $\lambda = 10^\circ$, изменение радиуса кромки барабана приведено на рисунке 7.

Анализ графиков на рисунке 7 позволяет заключить, что наибольшее влияние на численное значение радиуса режущей кромки ножа оказывает угол наклона режущей кромки. Так, при увеличении в 3 раза угла наклона режущей кромки с $\lambda = 10^\circ$ до $\lambda = 30^\circ$ при погрешности расположения режущей кромки ножа $\delta_y = 0,2$ мм численное значение радиуса режущей кромки ножа в крайней его точке увеличивается в 4 раза.

Заключение. Получены выражения, которые позволяют определить параметры виртуальной образующей барабана с учетом погрешностей установки ножей, их размеров и расположения в корпусе барабана. Установлено, что наибольшее влияние на численное значение изменения радиуса режущей кромки ножа оказывает угол наклона режущей кромки.

Список цитированных источников

1. Тюрин, С. А. Эксплуатационные испытания ножей кормоуборочных комбайнов и их результаты / С. А. Тюрин // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. — Минск : ОИМ, 2021. — Вып. 10. — С. 13—16.
2. Власов, П. А. Надежность сельскохозяйственной техники / П. А. Власов. — Пенза : РИО ПГСХА, 2001. — 124 с.
3. Резник, Н. Е. Кормоуборочные комбайны / Н. Е. Резник. — М. : Машиностроение, 1980. — 375 с.

4. Щербаков, С. С. Напряженно-деформированное состояние и повреждаемость трибофатической системы «прижим — нож — опора» режущего инструмента комбайна / С. С. Щербаков // Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 2 (19). — С. 75—80.
5. Оценка стойкости ножей питающе-измельчающих аппаратов сельскохозяйственных комбайнов: теория, стендовые и полевые испытания / А. А. Новиков [и др.] // Вести БелГУТа: наука и транспорт. — 2016. — № 1 (32). — С. 201—208.
6. Михайлов, К. М. Моделирование напряженно-деформированного состояния опоры измельчающего барабана кормоуборочного комбайна / К. М. Михайлов, М. И. Михайлов // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 4. — С. 77—84.
7. Резник, Н. Е. Силосоуборочные комбайны / Н. Е. Резник. — М. : Машиностроение. — 448 с.
8. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин / Е. С. Босой [и др.]. — М. : Машиностроение, 1978. — 568 с.

Поступила в редакцию 08.09.2022.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках.

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

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

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

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

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

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

ДЛЯ ЗАМЕТОК