

ISSN 2309-1339



ВЕСТНИК БАРГУ

BARSU HERALD

СЕРИЯ  
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SERIES  
ENGINEERING



№ 2 (12) 2022

# 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); **Devoino O. G.**, DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (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., Милюкова А. М., Богданович И. А.** Моделирование процесса магнитно-импульсной обработки с предварительным нагревом осевого режущего инструмента

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

**Патапаў У. А., Русан С. І., Сівачэнка Л. А.** Камбінаваны метады сілавага аналізу прываднага механізма ланцужнага 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 гидрозолье 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 противорезущих брусьев кормоуборочных комбайнов

**Груданов В. Я., Ткачева 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 004.94; 621.373

**В. В. Малеронок<sup>1</sup>, А. В. Алифанов<sup>2,3</sup>**, доктор технических наук, профессор,**А. М. Милюкова<sup>2</sup>**, кандидат технических наук,**И. А. Богданович<sup>3</sup>**, кандидат технических наук, доцент<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», ул. Уборевича, 77, 220096 Минск, Республика Беларусь, s-tm.v.v@mail.ru, +375 (29) 561 28 88<sup>2</sup>Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь<sup>3</sup>Учреждение 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. Maleronok<sup>1</sup>, A. V. Alifanov<sup>2,3</sup>**, DSc in Technical Sciences, Professor,**A. M. Miliukova<sup>2</sup>**, PhD in Technical Sciences, **I. A. Bogdanovich<sup>3</sup>**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor<sup>1</sup>Educational Institution “Belarusian State Aviation Academy”, 77 Uborevicha Str., 220096 Minsk, the Republic of Belarus, s-tm.v.v@mail.ru, +375 (29) 561 28 88<sup>2</sup>State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 10 Academician Kuprevicha Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus<sup>3</sup>Educational 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 (тепловой 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 запаасаемую 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].

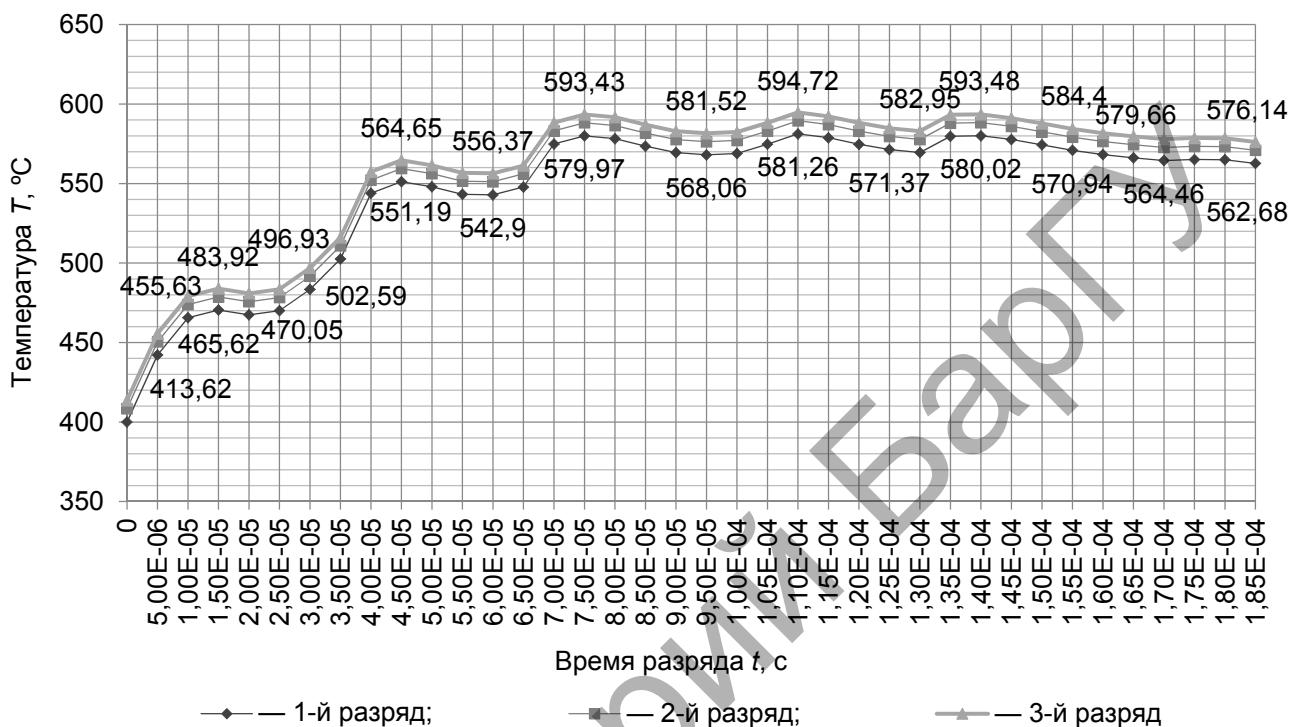
В качестве обрабатываемого инструмента выбрано сверло диаметром 10 мм из стали Р6М5, выполнено построение его 3D-модели.

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).

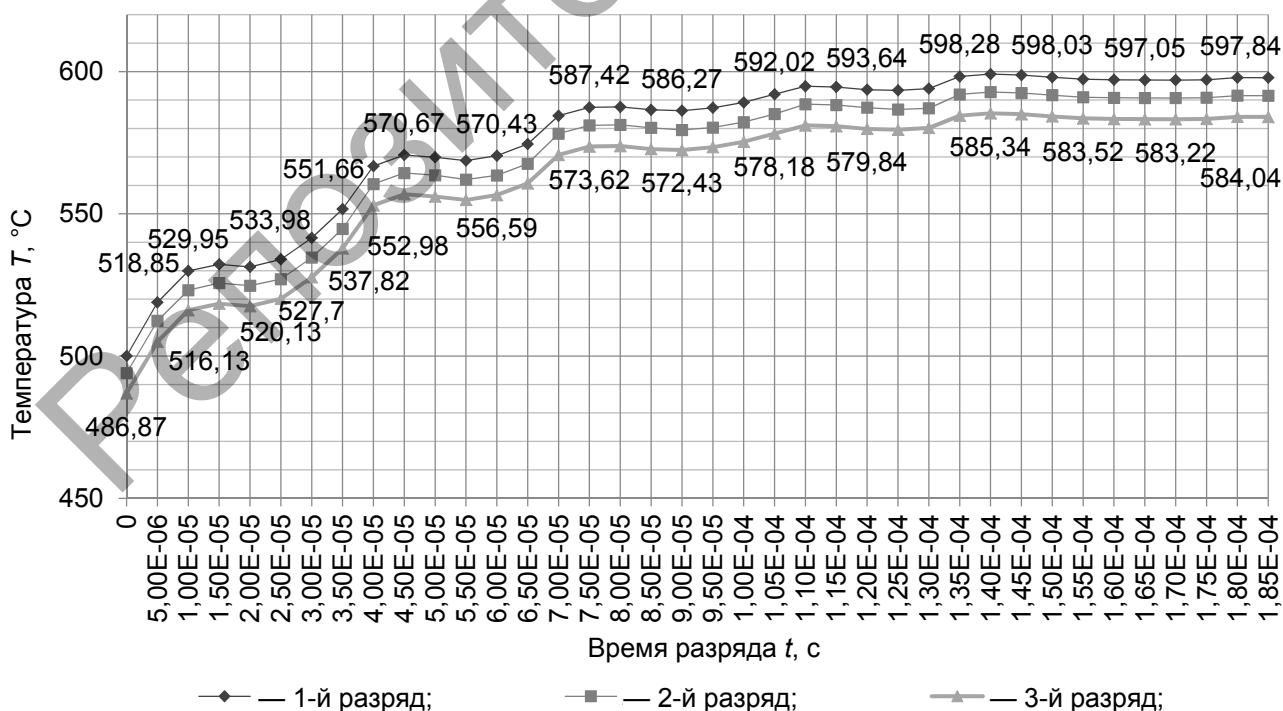
Так, МИО моделировали по двум режимам: с полной и половинной загрузкой.

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).



а)



б)

**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  $\Delta_{\text{отт}} = 1...3\text{ мм}$ , 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  $\Delta_{\text{min}}$  — 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 ( $T_{\text{пред}} = T_{\text{рекр}} - T_1$ ), °С	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 ( $T_1$ ), °С	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) ( $T_{\text{рекр}}$ ), °С	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

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

где  $D$  — рабочий диаметр индуктора;

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

$d$  — диаметр обрабатываемого инструмента;

$\Delta_{\text{min}}$  — 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 °С, а последующая обработка требует 3 импульса (10 кДж в каждом) до температуры первичной рекристаллизации стали Р6М5 530...600 °С. При этом подогрев до температуры, меньшей температуры рекристаллизации (400 °С), 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 °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 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](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.

Репозиторий БарГУ