

Учреждение образования
«Барановичский государственный университет»

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 7, июнь, 2019.

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала Кочурко Василий Иванович, 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, ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Заместитель главного редактора журнала Климук Владимир Владимирович, кандидат экономических наук, доцент, проректор по научной работе учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор серии

Алифанов Александр Викторович, лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования и автоматизации производства учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Ответственный секретарь серии

Горбач Юлия Евгеньевна, старший преподаватель кафедры информационных технологий и физико-математических дисциплин инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Редактор текстов на английском языке

Пинюта Ирина Вячеславовна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры профессиональной иноязычной подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Дубень Игорь Викторович (*ответственный за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»*), кандидат технических наук, доцент кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии инженерного факультета, декан факультета довузовской подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий и организации технического сервиса учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Белый Алексей Владимирович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Гордиенко Анатолий Илларионович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Девойно Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть» (Минск, Республика Беларусь).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Ивашко Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Калугин Юрий Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (Гродно, Республика Беларусь).

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов, автомобилей и машин для природообустройства учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сельскохозяйственных машин учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Ласковнѳ Александр Петрович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, академик-секретарь отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Шелег Валерий Константинович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Адрес редакции:

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by .

Подписные индексы: 00993 — для индивидуальных подписчиков; 009932 — 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» включѳн в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включѳн в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-1/2016.

Издатель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой С. А. Березнюк

Технический редактор Е. И. Березич

Компьютерная вѳрстка С. А. Березнюк

Корректор С. А. Березнюк

Подписано в печать 14.06.2019. Формат 60 × 84¹/₈. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,75. Уч.-изд. л. 8,10. Тираж 75 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 Слоним, Гродненская обл.

© БарГУ, 2019

Установа адукацыі
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

Веснік БарДУ

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 7, чэрвень, 2019.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

Заснавальнік: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ

Галоўны рэдактар часопіса Качурка Васіль Іванавіч, доктар сельскагаспадарчых навук, прафесар, акадэмік Беларускай інжынернай акадэміі, акадэмік Міжнароднай акадэміі тэхнічнай адукацыі, акадэмік Міжнароднай акадэміі навук педагагічнай адукацыі, акадэмік Акадэміі эканамічных навук Украіны, Заслужаны работнік адукацыі Рэспублікі Беларусь, рэктар установы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Намеснік галоўнага рэдактара часопіса Клімук Уладзімір Уладзіміравіч, кандыдат эканамічных навук, дацэнт, прарэктар па навуковай рабоце ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ СЕРЫІ

Галоўны рэдактар серыі

Аліфанаў Аляксандр Віктаравіч, лаўрэат Дзяржаўнай прэміі Рэспублікі Беларусь у галіне навукі і тэхнікі, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры абсталявання і аўтаматызацыі вытворчасці ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Адказны сакратар серыі

Горбач Юлія Яўгеньеўна, старшы выкладчык кафедры інфармацыйных тэхналогій і фізіка-матэматычных дысцыплін інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

Пінюта Ірына Вячаславаўна, кандыдат педагагічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры прафесійнай іншамоўнай падрыхтоўкі ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Гаўрыленя Андрэй Канстанцінавіч (*адказы за напрамак «Машынабудаванне і машыназнаўства»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Дубень Ігар Віктаравіч (*адказы за напрамак «Працэсы і машыны аграрна-інжынерных сістэм»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі інжынернага факультэта, дэкан факультэта давузаўскай падрыхтоўкі ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Анісковіч Генадзь Іосіфавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры тэхналогіі і арганізацыі тэхнічнага сервісу ўстановы адукацыі «Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Белы Аляксей Уладзіміравіч, член-карэспандэнт Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, намеснік дырэктара па навуковай рабоце Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Гардзіенка Анатолій Іларыёнавіч, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, галоўны навуковы супрацоўнік Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Дзявойна Алег Георгіевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык Навукова-даследчай інавацыйнай лабараторыі плазменных і лазерных тэхналогій філіяла Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта «Навукова-даследчая частка» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Драмук Уладзімір Аляксеевіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Івашка Віктар Сяргеевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры тэхнічнай эксплуатацыі аўтамабіляў Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Калугін Юрый Канстанцінавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры машыназнаўства і тэхнічнай эксплуатацыі аўтамабіляў установы адукацыі «Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы» (Гродна, Рэспубліка Беларусь).

Карташэвіч Анатолій Мікалаевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык кафедры трактараў, аўтамабіляў і машын для прыродаўладкавання ўстановы адукацыі «Беларуская дзяржаўная ордэнаў Кастрычніцкай Рэвалюцыі і Працоўнага Чырвонага Сцяга сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клачкоў Аляксандр Віктаравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры сельскагаспадарчых машын установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная ордэнаў Кастрычніцкай Рэвалюцыі і Працоўнага Чырвонага Сцяга сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клубовіч Уладзімір Уладзіміравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, загадчык лабараторыі пластычнасці Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Ласкаўнёў Аляксандр Пятровіч, доктар тэхнічных навук, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, акадэмік-сакратар аддзялення фізіка-тэхнічных навук Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Таміла Вячаслаў Анатолевіч, доктар тэхнічных навук, дацэнт, дырэктар Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Шэлег Валерый Канстанцінавіч, член-карэспандэнт Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык кафедры тэхналогіі машынабудавання Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Адрас рэдакцыі:

вул. Войкава, 21, 225404 г. Баранавічы.

Тэлефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by.

Папісныя індэксы: 00993 — для індывідуальных падпісчыкаў; 009932 — для арганізацый.

Пасведчанне аб рэгістрацыі сродкаў масавай інфармацыі № 1533 ад 30.07.2012, выдадзенае Міністэрствам інфармацыі Рэспублікі Беларусь.

У адпаведнасці з загадам Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь ад 21 студзеня 2015 г. № 16 навукова-практычны часопіс «Веснік БарДУ» серыя «Тэхнічныя навукі» ўключаны ў Пералік навуковых выданняў Рэспублікі Беларусь для апублікавання вынікаў дысертацыйных даследаванняў па тэхнічных навук (машынабудаванне і машыназнаўства; працэсы і машыны аграінжынерных сістэм).

Навукова-практычны часопіс «Веснік БарДУ» ўключаны ў РІНЦ (Расійскі індэкс навуковага цытавання), ліцэнзійны дагавор № 06-01/2016.

Выдавец: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

Выходзіць на рускай, беларускай і англійскай мовах.

Часопіс распаўсюджваецца на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

Загадчык рэдакцыйна-выдавецкай групы С. А. Беразнюк

Тэхнічны рэдактар А. І. Бярэзіч

Камп'ютарная вёрстка С. А. Беразнюк

Карэктар С. А. Беразнюк

Падпісана да друку 14.06.2019. Фармат 60 × 84 1/8. Папера ксерасная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 12,75. Ул.-выд. арк. 8,10. Тыраж 75 экз. Заказ

Кошт свабодны.

Паліграфічнае выкананне: Гродзенскае абласное ўнітарнае паліграфічнае прадпрыемства «Слоніўская тыпаграфія». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 1/203 ад 07.03.2014, № 2 ад 25.02.2014.

Адрас: вул. Хлюпіна, 16, 231800 Слонім, Гродзенская вобл.

© БарДУ, 2019

Educational institution
“Baranovichi State University”

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013.

Volume 7, June, 2019.

Engineering Series

Promoter: educational institution “Baranovichi State University”.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief Vasilii Ivanovich Kochurko, Doctor of Agriculture, Professor, Member of the Belarusian Academy of Engineering, Member of the International Academy of Technical Education, Member of the International Academy of Pedagogical Education, Member of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Distinguished educator of the Republic of Belarus, Rector of the educational institution “Baranovichi State University” (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Deputy Editor-in-Chief Vladimir Vladimirovich Klimuk, Ph. D. in Economic Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for research of the educational institution “Baranovichi State University” (Baranovichi, the Republic of Belarus).

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Editor of the issue

Aleksandr V. Alifanov, State-Prize Winner of the Republic of Belarus in Science and Technology, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Equipment and Manufacturing Automation Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Executive secretary of the issue

Juliya E. Gorbach, Senior lecturer of the Information Technology and Physical and Mathematical Disciplines Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

English Text Editor

Iryna V. Piniuta, Ph. D. in Education, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Professional Foreign Language Training of Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Andrei K. Gavrilena (*in charge of the heading “Machine Building and Engineering Science”*), Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Technical Support of Agricultural Production and Agronomy Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Igor V. Duben (*in charge of the heading “Processes and Machines of Agro-engineering Systems”*), Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Technical Support of Agricultural Production and Agronomy Chair, Dean of the Pre-University Training Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gennady I. Aniskovich, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, the Republic of Belarus).

Alexey V. Bely, A. M. of the National Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific Work of the State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, the Republic of Belarus).

Anatoly I. Gordienko, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the State Research Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, the Republic of Belarus).

Oleg G. Devoino, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Research Laboratory of Innovative Plasma and Laser Technology of the Belarusian National Technical University branch “Research Section” (Minsk, the Republic of Belarus).

Vladimir A. Dremuk, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Technical Support of Agricultural Production and Agronomy Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Viktor S. Ivashko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Automobile Technical Maintenance Chair of the Belarusian National Technical University (Minsk, the Republic of Belarus).

Yury K. Kalugin, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Engineering Science and Automobile Technical Maintenance Chair of “Yanka Kupala State University of Grodno”(Grodno, the Republic of Belarus).

Anatoly N. Kartashevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Tractors, Cars and Machines for Environmental Engineering Chair of the Belarusian State of the Orders of the October Revolution and the Order of the Labour Red Banner Agricultural Academy (Gorki, the Republic of Belarus).

Alexandr V. Klochkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor Agricultural Machinery Chair of the Belarusian State of the Orders of the October Revolution and the Order of the Labour Red Banner Agricultural Academy (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir V. Klubovich, Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Chief Researcher of the State Research Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, the Republic of Belarus).

Alexandr P. Laskovnyov, Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Academician-secretary of the Physics and Technical Sciences Department of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, the Republic of Belarus).

Vyacheslav A. Tomilo, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Pressure Treatment of the Belarusian National Technical University (Minsk, the Republic of Belarus).

Valery K. Sheleh, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Mechanical Engineering Chair of the Belarusian National Technical University (Minsk, the Republic of Belarus).

Editorial address:

21 Voykova Str., 225404 Baranovichi. Phone: +375 163 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by.

Subscription indices: 00993 — for individual subscribers; 009932 — for companies.

The certificate of the registration of mass media № 1533 of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information of Belarus.

In accordance with the order of the board of the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus on January 21, 2015 № 16 the scientific and practical journal “Bulletin of BarSU” the series “Engineering” was included on the list of the scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of dissertation research in engineering sciences (mechanical engineering and machines, processes and machines of agroengineering systems).

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

Published: educational institution “Baranovichi State University”.

Issued in Russian, Belarusian and English.

The journal is distributed on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor S. A. Bereznyuk
Technical editor E. I. Berezich
Desktop Publishing S. A. Bereznyuk
Proofreader S. A. Bereznyuk

Signed print 14.06.2019. Format 60 x 84 ¹/₈. Paper xerox. Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 12.75. Acc.-pub. s. l. 8.10. Circulation of 75 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 St., 231800 Slonim, Grodno region.

© BarSU, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Сенчуров Е. В., Дубновицкий С. К. Магнитно-абразивная обработка маховичков водопроводных вентиляей	10
Алехнович В. Н., Алифанов А. В., Милюкова А. М., Толкачева О. А. Разработка наплавочного плазмотрона, работающего на постоянно-импульсном напряжении	19
Алехнович В. Н., Алифанов А. В., Милюкова А. М., Толкачева О. А. Разработка порошкового питателя, позволяющего осуществлять работу наплавочного плазмотрона в постоянно-импульсном режиме	24
Алифанов А. В., Богданович И. А., Русан С. И., Цуран В. В. Обоснование разработки усовершенствованного высокоточного, высокопроизводительного метода заточки режущего лезвия геликоидальных рубильных ножей	29
Голубев В. С., Вегера И. И., Чернашеюс О., Чаевский В. В. Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя	34
Горчанин А. И., Милюкова А. М., Лях А. А. Повышение эффективности упрочняющей магнитно-импульсной обработки ножей со сложным профилем лезвия	43
Жигалов А. Н. Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом	49
Кулешов А. К., Углов В. В., Русальский Д. П. Формирование износостойких слоистых покрытий из карбидов молибдена, вольфрама и кобальта на твердосплавном инструменте	64
Малеронок В. В., Алифанов А. В., Богданович И. А. Метод исследования упрочненного слоя металлических образцов с использованием токов высокой частоты	70
Михайлов М. И., Мельников В. В. Повышение работоспособности вытяжных конусов стана тонкого волочения	76

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Клочков А. В., Шкуратов С. С. Скорость падения зерен в восходящем воздушном потоке	83
Михайлов К. М., Михайлов М. И. Моделирование напряженно-деформированного состояния опоры измельчающего барабана кормоуборочного комбайна	90
Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Сергей А. И. Исследование кинематической вязкости полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях механических транспортных средств	96

ЗМЕСТ

МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

Акуловіч Л. М., Сяргееў Л. Я., Сенчуроў Я. В., Дубнавіцкі С. К. Магнітна-абразіўная апрацоўка махавічкоў водаправодных вентыляў	10
Аляхновіч В. М., Аліфанаў А. В., Мілюкова Г. М., Талкачова В. А. Распрацоўка наплавачнага плазматрона, які працуе на пастаянна-імпульсным напружанні	19
Аляхновіч В. М., Аліфанаў А. В., Мілюкова Г. М., Талкачова В. А. Распрацоўка парашковага сілкавальніка, які дазваляе ажыццяўляць работу наплавачнага плазматрона ў пастаянна-імпульсным рэжыме	24
Аліфанаў А. В., Багдановіч І. А., Русан С. І., Цуран У. У. Абаснаванне распрацоўкі ўдасканаленага высокадакладнага, высокапрадукцыйнага метада заточвання рэжучага ляза гелікаідальных рубільных нажоў	29
Голубеў В. С., Вегера І. І., Чарнашэюс А., Чаеўскі В. В. Лазерная апрацоўка матэрыялаў са змяненнем хімічнага складу паверхневага слою	34
Гарчанін А. І., Мілюкова Г. М., Лях А. А. Павышэнне эфектыўнасці ўмацавальнай магнітна-імпульснай апрацоўкі нажоў са складаным профілем ляза	43
Жыгалаў А. М. Матэматычная мадэль і методка параметрычнай аптымізацы зношвання і рэсурснай стойкасці рэжучага цвёрдасплаўнага інструмента, умацаванага аэрадынамічным гукавым метадам	49
Куляшоў А. К., Углоў У. В., Русальскі Д. П. Фарміраванне зносаўстойлівых слаістых пакрыццяў з карбідаў малібдэна, вольфрама і кобальта на цвёрдасплаўным інструменце	64
Маляронак У. У., Аліфанаў А. В., Багдановіч І. А. Метад даследавання ўмацаванага пласта металічных узораў з выкарыстаннем токаў высокай частаты	70
Міхайлаў М. І., Мельнікаў У. В. Павышэнне працаздольнасці выцяжных конусаў стана тонкага валачэння	76

ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

Клачкоў А. В., Шкуратаў С. С. Хуткасць падзення зярнят ва ўзыходзячым паветраным патоку	83
Міхайлаў К. М., Міхайлаў М. І. Мадэляванне напружана-дэфармаванага стану апоры здрабняльнага барабана кормаўборачнага камбайна	90
Півавэрчык А. А., Гаўрыленя А. К., Сяргей А. І. Даследаванне кінематычнай вязкасці паўсінтэтычных маторных масел, якія выкарыстоўваюцца ў дызельных рухавіках механічных транспартных сродкаў	96

CONTENTS

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Akulovich L. M., Sergeev L. E., Senchurov E. V., Dubnovitskiy S. K. Magneto-abrasive machining of flywheels of the water supply valves	10
Alehnovich V. N., Alifanov A. V., Miliukova A. M., Tolkachova O. A. Development of the supply plasmatron working on constant-pulse voltage	19
Alehnovich V. N., Alifanov A. V., Miliukova A. M., Tolkachova O. A. Development of powder feeder, allowing the operation of the surface plasmotron in constant-pulse mode	24
Alifanov A. V., Bogdanovich I. A., Rusan S. I., Tsuran V. V. Justification of the development of an improved high-precision, high-performance method of cutting blade of helicoidal cutting blades	29
Golubev V. S., Vegera I. I., Chernasheyus O., Chaevsky V. V. Laser treatment of materials with change of chemical composition of the surface layer	34
Harchanin A. I., Miliukova A. M., Lyah A. A. Improving the efficiency of the hardening magnetic-pulse processing of blades with a complex blade profile	43
Jigalov A. N. Mathematical model and method of parametric optimization of run-out and resource durability of cutting hardware tool hardened by aerodynamic sound method	49
Kuleshov A. K., Uglov V. V., Rusalsky D. P. Formation of wear resistant layered coatings of molybdenum carbides, tungsten and cobalt on a hard alloy tool	64
Maleronok V. V., Alifanov A. V., Bogdanovich I. A. Research method of the metal samples strengthened layer using high-frequency currents	70
Mikhailov M. I., Melnikov V. V. Improvement of the efficiency of exhaust cones of a fine-drawing mill	76

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

Klochkov A. V., Shkuratov S. S. Speed of grain fall in a rising air flow	83
Mikhailov K. M., Mikhailov M. I. Modeling of the tense-deformed state of the support of the chopping drum of forage harvester	90
Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Sergey A. I. Study of kinematic viscosity of semisynthetic motor oils, used in diesel engines of mechanical vehicles	96

УДК 621.3.082:373

В. В. Малеронок, А. В. Алифанов, И. А. Богданович,

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования
Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь,
+375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Разработаны способ и схема измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделий из токопроводящих материалов как показателя качества (однородности, мелкодисперсности, бездефектности) после проведения магнитно-импульсной, ионно-плазменной и других видов высокоэнергетических обработок, заключающийся в измерении потенциала (падение напряжения) на упрочненном слое с последующим расчетом полного электрического сопротивления (прямопропорциональной величины) по заданной величине силы электрического тока, отличающийся от аналогов тем, что в процессе измерения применяется зондирующий сигнал переменного тока высокой частоты, а для процесса измерения используется параллельная схема подключения исследуемого изделия в измерительную цепь.

Ключевые слова: металлическое изделие; полное электрическое сопротивление; переменный ток высокой частоты; упрочненный слой; скин-эффект; измерительная электрическая цепь.

Рис. 1. Библиогр.: 7 назв.

V. V. Maleronok, A. V. Alifanov, I. A. Bogdanovich

Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str.,
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375(29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

RESEARCH METHOD OF THE METAL SAMPLES STRENGTHENED LAYER USING HIGH-FREQUENCY CURRENTS

The author has developed a method and scheme for measuring the total electrical resistance of a hardened layer of products made of conductive materials as an indicator of quality (homogeneity, fine dispersion, defect-free) after conducting magnetic-pulse, ion-plasma and other types of high-energy treatments. The method consists in measuring the potential (voltage drop) on the hardened layer with the subsequent calculation of the total electrical resistance (a directly proportional magnitude) from a given value of the electric current strength. The method differs from analogues in the fact that a probing signal of an alternating current of high frequency is used in the process of measurement, and, as for the process of measurement, a parallel circuit is used to connect the testing product to the measuring circuit.

Keywords: metal product; electrical impedance; high frequency alternating current; hardened layer; skin effect; measuring electrical circuit.

Fig. 1. Ref.: 7 titles.

Введение. Известен мостовой способ измерения электрического сопротивления [1], основанный на включении измеряемого сопротивления в мостовую схему с последующей балансировкой этой схемы и определении неизвестного сопротивления по условию баланса мостовой схемы.

С помощью этого способа можно достаточно точно определять величину сопротивления в широком диапазоне, кроме того, он может быть использован как на постоянном токе, так и на переменном. Недостатками этого способа является то, что при измерении очень малых сопротивлений ($10^{-2} \dots 10^{-4}$ Ом), для обеспечения необходимой чувствительности моста, требуется через измеряемое сопротивление пропускать очень большие токи ($10 \dots 10^2$ А), а при измерении больших сопротивлений (более 1 МОм) — повышать напряжение на исследуемом изделии до величины $10^2 \dots 10^3$ В, что ограничивает область его применения.

Существует способ измерения электрического сопротивления [2], заключающийся в том, что через измеряемое сопротивление пропускают электрический ток, после чего выполняют первое измерение величины тока и падения напряжения на измеряемом сопротивлении, далее по их значениям определяют первое значение сопротивления; после первого измерения изменяют величину проходящего тока через измеряемое сопротивление путем включения последовательно с измеряемым сопротивлением дополнительного сопротивления; затем выполняют второе измерение величины тока и падения напряжения на измеряемом сопротивлении и по их значениям определяют второе значение сопротивления, а измеряемое сопротивление определяют по приведенной формуле с учетом значений внутреннего сопротивления устройства измерения сопротивления без дополнительного сопротивления. Технический результат заключается в расширении функциональных возможностей известного способа.

Достоинствами данного способа являются: простота, хорошая точность измерения и малые затраты на реализацию. Недостаток — невозможность определения электрического сопротивления упрочненного поверхностного слоя материала, который является показателем качества высокоэнергетической обработки изделий из металлов.

Известен способ определения удельного электрического сопротивления поверхностного слоя материала [3], включающий измерение электрического сопротивления контакта поверхностного слоя материала с металлической плитой методом амперметра-вольтметра, отличающийся тем, что дополнительно измеряют силу прижима поверхностного слоя материала к металлической плите в контакте, параметр шероховатости и твердость поверхностного слоя материала и определяют удельное сопротивление поверхностного слоя материала по выведенной формуле.

Достоинство данного способа — возможность определения качества поверхности после механической обработки с высокой точностью. Основным его недостатком является то, что электрическое сопротивление зависит от состояния поверхности (шероховатости), что не позволяет говорить о качестве упрочненного слоя и величине полного электрического сопротивления по всей длине изделия.

В [4] представлен способ, содержащий в своей основе метод амперметра-вольтметра и реализующийся с помощью корпуса, изготовленного из диэлектрического материала, в котором установлены два токопроводящих и два измерительных электрода; крышки из диэлектрического материала, прикрепленной к корпусу винтами; клемм, пружин возврата и трубочин, прикрепленных к корпусу при помощи винтов. Техническим результатом изобретения является повышение точности измерения толщины поверхностного токопроводящего слоя изделия. Подключение устройства, реализованного по данному способу, осуществляется от источника постоянного тока, например, источника постоянного питания Б5-47, через реостат R , милливольтметр, в качестве которого может быть использован прибор М 1202, пакет переключателей Π_1 , а также эталонный реостат R_3 к токоподводящим электродам. С измерительных электродов через пакетный переключатель Π_2 напряжение подается на потенциометр постоянного тока.

Достоинствами рассмотренного способа являются: 1) простота измерения толщины токопроводящего слоя; 2) высокая контактная жесткость соединения измерительных электродов с исследуемой поверхностью. Недостатки способа: 1) невозможность измерения электрического сопротивления упрочненного слоя произвольной толщины, так как измерение производится на постоянном токе; 2) требуется изготовление специальных установок-держателей со строгим диэлектрическим изолированием четырех контактов; 3) ограничения в определении потенциала (падения напряжения) на глубине до десятых долей миллиметра, хотя упрочненный слой изделий после высокоэнергетической обработки начинается с единиц микрометров.

Анализ приведенных способов измерения показал, что они достаточно сложны в использовании и обладают недостатками, которые ограничивают их применение на практике. Целью настоящей работы является упрощение способа измерения и расширение его возможностей с обеспечением необходимой точности.

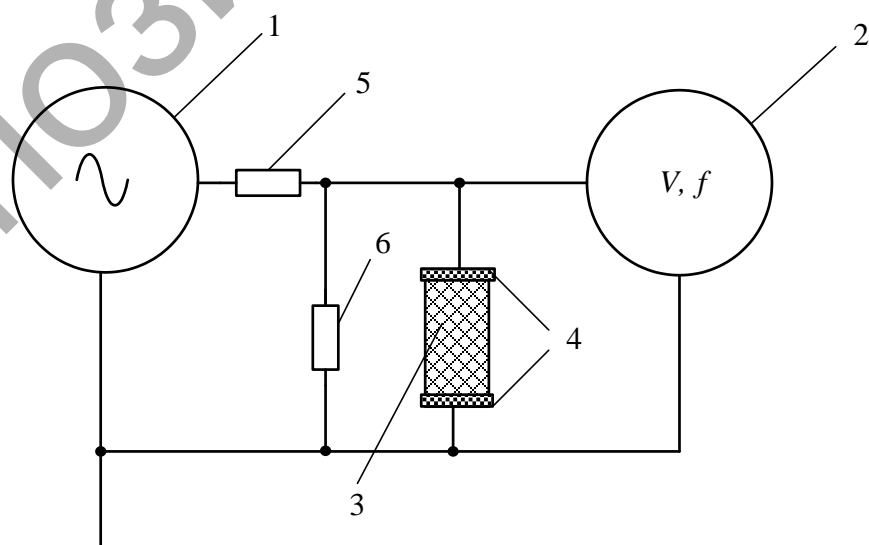
Основная часть. В данной работе предлагается оригинальный способ для контроля качества упрочненной поверхности изделий после термической, ионно-плазменной, магнитно-импульсной и других высокоэнергетических обработок. Он предназначен для измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделий, который является показателем качества (однородности, мелкодисперсности, отсутствия или уменьшения количества структурных дефектов) после проведения обработки.

Способ также может быть использован в области измерительной техники при создании приборов по измерению электрического сопротивления слоя материала произвольной толщины, что актуально для выполняемого задания.

Для реализации предложенного способа измерения необходимо применение генератора сигналов высокой частоты. В случае приложения к электропроводящему изделию высокочастотного напряжения области, расположенные внутри проводника, будут обладать большим индуктивным сопротивлением. Это явление известно как скин-эффект. В результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое [5]. Учитывая тот факт, что при высокоэнергетических методах обработки (магнитно-импульсная, ионно-плазменная и др.) происходит воздействие именно на близкие к поверхности слои изделия, то изменение сопротивления поверхностного слоя изделия будет свидетельствовать об изменении структуры материала вблизи поверхности. Изменение структуры (увеличение однородности, образование мелкодисперсной структуры, устранение дефектов) приводит не только к изменению электрического сопротивления приповерхностных слоев, но и к их упрочнению. Таким образом, можно определить корреляцию между изменением сопротивления и изменением структуры приповерхностных слоев [6].

Для реализации предложенного способа измерения электрического сопротивления упрочненного слоя изделий из металлов с применением токов высокой частоты в данной работе предлагается использовать параллельную схему включения исследуемого изделия в измерительную цепь (рисунок 1).

Параллельная схема включения изделия в измерительную цепь содержит один генератор сигналов высокой частоты, два кольцевых контакта, один осциллограф с полосой пропускания, удовлетворяющей отношению 3 : 1 частоты зондирующего сигнала, стабилизирующий резистор (50 Ом), шунтирующий резистор (5...10 Ом).



1 — генератор высокой частоты; 2 — осциллограф; 3 — исследуемое изделие; 4 — кольцевые контакты-хомуты; 5 — стабилизирующий резистор; 6 — шунтирующий резистор

Рисунок 1. — Параллельная схема

Сигнальный выход генератора соединен с первым выводом стабилизирующего резистора, который вторым своим выводом соединен с первым выводом шунтирующего резистора, первым кольцевым контактом и сигнальным входом осциллографа; последний, в свою очередь, своим общим проводом соединен со вторым кольцевым контактом, вторым выводом шунтирующего резистора и общим проводом генератора. Изделие своими концами подключается между первым и вторым кольцевыми контактами.

Алгоритм измерения электрического сопротивления при параллельной схеме включения изделия в измерительную цепь. Для получения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделия необходимо произвести измерение падения напряжения на изделии при прохождении тока высокой частоты. Выбранная частота должна обеспечивать глубину проникновения сигнала, соответствующую толщине упрочненного слоя[7]:

$$f = \frac{503^2 \cdot \rho}{\Delta^2 \cdot \mu_r}, \quad (1)$$

где f — частота сигнала;

ρ — удельное сопротивление материала заготовки;

Δ — толщина токопроводящего слоя (скин-слоя);

μ_r — относительная магнитная проницаемость.

При параллельном соединении, перед проведением измерения на упрочненном изделии, необходимо получить контрольную осциллограмму напряжения сигнала высокой частоты без установки изделия в измерительную цепь и зафиксировать амплитудное значение напряжения полного сопротивления шунтирующего резистора ($U_{ш.полн}$). По полученному значению ($U_{ш.полн}$) с помощью заданной величины силы тока (I_3) зондирующего сигнала необходимо произвести расчет полного сопротивления шунтирующего резистора:

$$R_{ш.полн} = \frac{U_{ш.полн}}{I_3}, \quad (2)$$

Затем необходимо установить изделие в измерительную цепь и произвести повторное измерение с фиксацией амплитудного значения падения напряжения ($U_{и}$) на параллельно соединенных шунтирующем сопротивлении и исследуемом изделии. Так как соединение параллельное, то $U_{и}$ выражается формулой:

$$U_{и} = I_3 \left(\frac{1}{R_{ш.полн}} + \frac{1}{R_{полн}} \right), \quad (3)$$

где $R_{полн}$ — полное электрическое сопротивление упрочненного слоя изделия.

Затем по заданному значению тока (I_3) и выражая $R_{полн}$ из (3) производят расчет полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделия:

$$R_{полн} = \frac{I_3 \cdot R_{ш.полн}}{U_{и} \cdot R_{ш.полн} - I_3^2}. \quad (4)$$

Или с учетом (2):

$$R_{полн} = \frac{I_3 \cdot U_{ш.полн}}{U_{и} \cdot U_{ш.полн} - I_3^2}. \quad (5)$$

Если по данному алгоритму произвести измерение полного электрического сопротивления до проведения обработки изделия и после него, то полученная информация говорит о качестве появившегося упрочненного слоя (однородность, мелкодисперсность, отсутствие искривления кристаллической решетки), которое напрямую влияет на величину полного электрического сопротивления.

Принцип работы при параллельной схеме включения изделия в измерительную цепь (см. рисунок 1). Перед началом измерения сопротивления упрочненного слоя изделия производят контрольное снятие осциллограммы напряжения сигнала высокой частоты (без установки изделия). Зондирующий сигнал выбирают с частотой, обеспечивающей проникновение на глубину, равную толщине упрочненного слоя изделия (1). Сигнальный выход генератора 1 подключают через стабилизирующий резистор 5 (50 Ом), который обеспечивает стабильность частоты генерации (при такой схеме измерительной цепи), к первому выводу шунтирующего резистора 6 (5...10 Ом), к которому подключают параллельно осциллограф 2. Производится измерение амплитудного значения падения напряжения на полном сопротивлении шунтирующего резистора ($U_{ш. полн}$).

Затем устанавливают обработанное изделие 3 в кольцевые контакты 4. Сигнал с генератора 1 через стабилизирующий резистор 5 подается на параллельное соединение шунтирующего резистора 6 и исследуемого изделия 3, подключенного через кольцевые контакты 4. Сигнал проходит через параллельное соединение элементов 3 и 6 на общий провод. Подключенный параллельно 3 и 6 осциллограф 2 позволяет измерить амплитудное значение падения напряжения на соединенных параллельно шунтирующем резисторе 5 и исследуемом изделии 3 ($U_{и}$). Так как сигнал является высокочастотным и частота рассчитана с учетом толщины упрочненного слоя, то сигнал протекает только по требуемой глубине (проявляется скин-эффект). Располагая заданным значением силы тока сигнала (I_3) генератора 1, производят расчет полного сопротивления по формуле (5).

Применение переменного тока высокой частоты в предложенном способе измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделий после проведения магнитно-импульсной, ионно-плазменной и других видов высокоэнергетических обработок позволяет производить настройку соответствующих измерительных устройств под любую толщину упрочненного слоя.

Заключение. Разработанный метод обладает достаточной простотой при анализе результатов упрочнения металлических изделий посредством высокоэнергетических методов обработки, и в сочетании с другими методами анализа (измерение твердости изделия и проведение микроскопии структуры поверхности) дает наиболее полную картину результатов упрочнения. Методика проведения представляет собой экспресс-оценку качества упрочненной поверхности по анализу падения напряжения (электрического сопротивления) на упрочненном слое.

Список цитируемых источников

1. Основы метрологии и электрические измерения : учеб. для вузов / Б. Я. Авдеев [и др.] ; под общ. ред. Е. М. Душина. — 6-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.
2. Способ измерения электрического сопротивления : пат. 2137144 РФ, МПК G01R27/00 / В. В. Долгих, Е. В. Кириевский, С. В. Василевская ; заявитель Новочеркас. гос. техн. ун-т. — № 1998123405/22 ; заявл. 28.04.1998 ; опубл. 10.09.1999 // Официальный бюл. / Рос. агентство по патентам и товар. знакам. — 1999.
3. Способ определения удельного электрического сопротивления поверхностного слоя материала : пат. 2426137 РФ, МПК G01R27/16 / В. В. Фадин, М. И. Алеутдинова ; заявитель Учреждение Российской академии наук «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (ИФПМ СО РАН)». — № 2010114405/28 ; заявл. 12.04.2010 ; опубл. 10.08.2011 // Официальный бюл. / Федер. служба по интеллектуал. собственности, патентам и товар. знакам. — 2011.

4. Устройство для измерения толщины поверхностного токопроводящего слоя изделия : пат. 2167392 РФ, МПК G01R27/16, G01B7/06 / В. И. Бутенко, А. В. Пушкарный ; заявитель Таганрог. гос. радиотехн. ун-т. — № 1999100307/22; заявл. 05.01.1999 ; опубл. 20.05.2001 // Официальный бюл. / Рос. агентство по патентам и товар. знакам. — 2001.

5. Анализ существующих инженерных математических моделей учета поверхностного эффекта в токопроводящих жилах силовых кабелей / А. А. Алферов [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2015. — № 2. — С. 62—69.

6. Алифанов, А. В. Исследование упрочненных магнитно-импульсной обработкой поверхностных слоев металлических изделий с помощью токов высокой частоты / А. В. Алифанов, В. В. Малеронок, Д. А. Ционенко // Актуальные проблемы прочности : монография : в 2 т. / под общ. ред. В. В. Рубаника. — Витебск, 2018. — Т. 2. — Гл. 6. — С. 111—124.

7. Шпиганович, А. Н. Анализ влияния высших гармонических составляющих на безотказность электроизоляционных покрытий [Электронный ресурс] / А. Н. Шпиганович, С. В. Довженко // Журн. науч. публ. аспирантов и докторантов. — 2008. — Режим доступа: <http://www.jurnal.org/articles/2008/elect7.html>. — Дата доступа: 17.04.2019.

Данная работа выполнялась в рамках задания 4.1.25 Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Плазменные и пучковые технологии».

Поступил в редакцию 11.03.2019