

Учреждение образования
«Барановичский государственный университет»

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 8, июнь, 2020.

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 технологии и оборудования машиностроения 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

Леон Ольга Вячеславовна, кандидат филологических наук, доцент кафедры теории и практики германских языков учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович Ирина Аркадьевна (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроения 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, главный научный сотрудник государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

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

Девоино Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт» (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 Купаль» (Гродно, Республика Беларусь).

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов, автомобилей и машин для природообустройства учреждения образования «Белорусская государственная орден 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 орден 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).

Сиваченко Леонид Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортных и технологических машин межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет» (Могилев, 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» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам

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

Издатель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко

Технический редактор Л. Н. Щербук

Компьютерная вёрстка С. М. Глушак

Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 16.06.2020. Формат 60 × 84¹/₈. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 16,00. Уч.-изд. л. 9,35. 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 Слоним, Гродненская обл.

© БарГУ, 2020

Установа адукацыі
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

Веснік БарДУ

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 8, чэрвень, 2020.

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 тэхналогіі і абсталявання машынабудавання 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

Леон Вольга Вячаславаўна, кандыдат філалагічных навук, дацэнт кафедры тэорыі і практыкі германскіх моў ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Багдановіч Ірына Аркадзеўна (*адказы за напрамак «Машынабудаванне і машыназнаўства»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхналогіі і абсталявання машынабудавання ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Дубень Ігар Віктаравіч (*адказы за напрамак «Працэсы і машыны аграінжынерных 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, галоўны навуковы супрацоўнік дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

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

Дзявойна Алег Георгіевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык Навукова-даследчай інавацыйнай лабараторыі плазменных і лазерных тэхналогій філіяла Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта «Навукова-даследчы палітэхнічны інстытут» (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).

Сівачэнка Леанід Аляксандравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры транспартных і тэхналагічных машын міждзяржаўнай адукацыйнай установы вышэйшай адукацыі «Беларуска-Расійскі ўніверсітэт» (Магілёў, Рэспубліка Беларусь).

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

Шлэг Валерыі 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 Г. Ю. Сідарэнка

Тэхнічны рэдактар Л. М. Шчарбук

Камп'ютарная вёрстка С. М. Глушак

Карэктар Н. М. Каладко

Падпісана да друку 16.06.2020. Фармат 60 × 84 1/8. Папера ксерасная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 16,00. Ул.-выд. арк. 9,35. Тыраж 100 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 Слоніў, Гродзенская вобл.

© БарДУ, 2020

Educational institution
“Baranovichi State University”

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013.

Volume 8, June, 2020.

Engineering Series

Founder: 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

Executive 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 at the Chair of Machine-Building Technology and Equipment, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Executive secretary of the issue

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

English Text Editor

Olga V. Leon, Ph. D in Philological Science, Associate Professor at the Chair of Theory and Practice of Germanic Languages, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Iryna A. Bogdanovich (*in charge of the heading “Machine Building and Engineering Science”*), Ph. D of Technical Science, Associate Professor, Head of the Chair of Technology and Equipment of Mechanical Engineering, 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, Chief Researcher at the State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, the Republic of Belarus).

Andrei K. Gavrilena, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Chair of Technical Support of Agricultural Production and Agronomy of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, 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 branch of Belarusian National Technical University “Research Division” (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Viktor S. Ivashko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at 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 at the Chair of Engineering Science and Automobile Technical Maintenance of “Yanka Kupala State University of Grodno” (Grodno, the Republic of Belarus).

Anatoly N. Kartashevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of Tractors, Cars and Machines for Environmental Engineering 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 at 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).

Leonid A. Sivachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Chair of Transport and Technological Machines, Interstate Higher Education Institution “Belarusian-Russian University” (Mogilev, 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 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.

Publishing: 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 A. Y. Sidorenko

Technical editor L. N. Scherbuk

Desktop Publishing S. M. Glushak

Proofreader N. N. Kolodko

Passed for printing 16.06.2020. Format 60 × 84 1/8. Xerox Paper. Digital printing. Font Times. Conv. pr. s. l. 16,00. Acc.-pub. s. l. 9,35. Circulation of 100 copies. Order

Free price.

Printing: Grodno Regional Printing Unitary Enterprise “Slonim Printing Establishment”. Certificate about state registration of publishers, manufacturers and distributors of printings № 1/203 from 07.03.2014, № 2 from 25.02.2014.

Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim, Grodno region.

© BarSU, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Алифанов А. В., Горецкий Г. П., Цуран В. В., Богданович И. А., Толкачева О. А. Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру и механические свойства сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей	10
Борис Е. В. Исследование статических боковых смещений ленты грузовой и порожняковой ветвей ленточного конвейера	17
Данилов В. А., Борис Е. В. Повышение долговечности приводов машин и механизмов на основе применения профильных моментопередающих соединений	25
Данилов В. А., Селицкий А. Н. Погрешность профилирования и качество синусоидальных цилиндрических поверхностей при ротационном точении эксцентрично установленным круглым резцом	35
Дьяченко О. В., Криуша С. М., Кардаполова М. А., Голубев В. С., Вегера И. И. Лазерное модифицирование газотермических покрытий из нержавеющей сталей	44
Жигалов А. Н., Богдан Д. Д., Горавский И. А. Исследования влияния аэродинамического звукового упрочнения на свойства твердых сплавов	53
Жигалов А. Н., Горавский И. А., Богдан Д. Д. Оптимизация износа и ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента сплава В35, упрочненного аэродинамическим звуковым методом	69
Милюкова А. М., Алифанов А. В., Михлюк А. И., Горчанин А. И., Матяс А. Н. Улучшение физико-механических свойств сталей для изготовления труб путем магнитно-импульсной обработки	79
Наливко О. И., Русан С. И., Сиваченко Л. А., Сиваченко Т. Л. Исследования напряженно-деформационного состояния проволочного рабочего элемента измельчительной машины	90
Потапов В. А., Сиваченко Л. А. Цепной агрегат с волновой рабочей камерой и адаптивным механизмом силового воздействия для переработки влажных сырьевых материалов	98

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Войтович М. М. Исследование износа протекторов всесезонных автомобильных шин для грузовых механических транспортных средств	106
Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Сергей А. И. Исследование эксплуатационных свойств полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях внутреннего сгорания	111
Филиппов А. И., Аутко А. А., Заяц Э. В., Чеботарев В. П., Дубень И. В. Оборудование для дозирования и ленточного внесения удобрений к универсальному агрегату АУ-М1	119

ЗМЕСТ

МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

Аліфанаў А. В., Гарэцкі Г. П., Цуран У. У., Багдановіч І. А., Талкачова В. А. Даследаванне ўплыву высокатэмпературнай тэрма механічнай апрацоўкі на структуру і механічныя ўласцівасці сталяў, якія прымяняюцца для вырабу рубільных нажоў	10
Борыс Я. В. Даследаванне статычных бакавых зрушэнняў стужкі грузавых і парожніх галін стужачнага канвеера	17
Данілаў В. А., Борыс Я. В. Павышэнне даўгавечнасці прывадаў машын і механізмаў на аснове прымянення профільных момантаперадаючых злучэнняў	25
Данілаў В. А., Сяліцкі А. М. Хібнасць прафілявання і якасць сінусідаальных цыліндрычных паверхняў пры ратацыйным тачэнні эксцэнтрычна ўстаноўленым круглым разцом	35
Дз'ячэнка В. У., Крыуша С. М., Кардаполава М. А., Голубеў В. С., Вегера І. І. Лазернае мадыфікаванне газатэрмічных пакрыццяў з нержавеючых сталяў	44
Жыгалаў А. М., Богдан Д. Д., Гараўскі І. А. Даследаванні ўплыву аэрадынамічнага гукавога ўмацавання на ўласцівасці цвёрдых сплаваў	44
Жыгалаў А. М., Гараўскі І. А., Богдан Д. Д. Аптымізацыя зношвання і рэсурсу металарэжучага цвёрдасплаўнага інструмента сплаву В35, умацаванага аэрадынамічным гукавым метадам	69
Мілюкова Г. М., Аліфанаў А. В., Міхлюк А. І., Гарчанін А. І., Мацяс А. М. Паляпшэнне фізіка-механічных уласцівасцей сталяў для вырабу труб шляхам магнітна-імпульснай апрацоўкі	79
Наліўка А. І., Русан С. І., Сівачэнка Л. А., Сівачэнка Т. Л. Даследаванне напружана-дэфармаванага стану драцянога рабочага элемента здрабняльнай машыны	90
Патапаў У. А., Сівачэнка Л. А. Ланцуговы агрэгат з хвалевай рабочай камерай і адаптыўным механізмам сылавога ўздзеяння для перапрацоўкі вільготных сыравінных матэрыялаў	98

ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

Піваварчык А. А., Гаўрыленя А. К., Вайтовіч М. М. Даследаванне зношвання пратэктараў усесезонных аўтамабільных шин для грузавых механічных транспартных сродкаў	106
Піваварчык А. А., Гаўрыленя А. К., Сяргей А. І. Даследаванне эксплуатацыйных уласцівасцей паўсінтэтычных маторных маслаў, выкарыстоўваемых у дызельных рухавіках унутранага згарання	111
Філіпаў А. І., Аутка А. А., Заяц Э. У., Чабатароў В. П., Дубень І. В. Абсталяванне для дазіравання і стужачнага ўнясення ўгнаенняў да ўніверсальнага агрэгата АУ-М1	119

CONTENTS

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Alifanov A. V., Goretsky G. P., Tsuran V. V., Bogdanovich I. A., Tolkacheva O. A. The research of the influence of ausforming on the structure and mechanical properties of steels applied for manufacturing chipping knives	10
Borys Ya. The research of static lateral displacements of the belt track of the carrying and return belt conveyor lines	17
Danilau V. A., Borys Ya. Increasing the durability of machinery drives based on the application of profile torque-transmitting joints	25
Danilau V. A., Sialitskiy A. N. Profiling error and quality of sinusoidal cylindrical surfaces under rotary turning with an eccentric circular tool	35
Dyachenko O. V., Kriusha S. M., Kardapolova M. A., Golubev V. S., Vegera I. I. Laser modification of gas-thermal coatings from stainless steels	44
Jigalov A. N., Bogdan D. D., Goravskii I. A. The studies of the influence of aerodynamic sound hardening on the properties of hard alloys	53
Jigalov A. N., Goravskii I. A., Bogdan D. D. Optimization of the wear and resource of a metal-cutting carbide tool of B35 alloy strengthened by the aerodynamic sound method	69
Milyukova A. M., Alifanov A. V., Mikhlyuk A. I., Gorchanin A. I., Matyas A. N. The improvement of physical and mechanical properties of steels for manufacturing pipes by magnetic-pulse treatment	79
Naliuko O. I., Rusan S. I., Sivachenko L. A., Sivachenko T. L. The research of stress-strain state of a wire operating element of a grinding machine	90
Potapov V. A., Sivachenko L. A. A chain unit with a wave working chamber and adaptive mechanism of force influence for reprocessing humid raw materials	98

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Vaitovich M. M. The research of the tread wear of all-season automobile tires for mechanical cargo vehicles	106
Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Sergei A. I. The study of performance attributes of semi-synthetic motor oils used in diesel internal combustion engines	111
Filippov A. I., Autko A. A., Zayats E. V., Chebotarev V. P., Duben I. V. The equipment for dosing and band fertilization to the AU-M1 universal unit	119

УДК 621.98.044.7

А. М. Милюкова, А. В. Алифанов, А. И. Михлюк, А. И. Горчанин, А. Н. Матяс
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь,
+375 (017) 267 60 10, annart@mail.ru,

УЛУЧШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ ПУТЕМ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Проведены исследования микроструктур и прочностных свойств (ударная вязкость, предел текучести, твердость) после магнитно-импульсной обработки при различных режимах. Показано, что магнитно-импульсное воздействие при определенных оптимальных режимах позволяет улучшить физико-механические свойства исследуемых марок для изготовления насосно-компрессорных труб.

Ключевые слова: насосно-компрессорные трубы; сталь; магнитно-импульсная обработка; энергия; импульс; упрочнение; физико-механические свойства; микроструктура.

Рис. 8. Табл. 9. Библиогр.: 6 назв.

A. M. Milyukova, A. V. Alifanov, A. I. Mikhlyuk, A. I. Gorchanin, A. N. Matyas
State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”,
10 Kuprevich St., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 60 10, annart@mail.ru,

THE IMPROVEMENT OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS FOR MANUFACTURING PIPES BY MAGNETIC-PULSE TREATMENT

Microstructures and strength properties (impact strength, yield strength, hardness) after magnetic-pulse treatment under various conditions were studied. It is shown that the magnetic-pulse effect under certain optimal conditions can improve the physical and mechanical properties of the studied grades for the manufacture of tubing.

Keywords: tubing; steel; magnetic pulse treatment; energy; impulse; hardening; physical and mechanical properties; microstructure.

Fig. 8. Table 9. Ref.: 6 titles.

Введение. Целью работы является исследование влияния магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) на физические и механические свойства различных марок сталей, изготовленных ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга “БМК”» для насосно-компрессорных труб. Физико-механические свойства под влиянием МИО определяются твердостью, микротвердостью, структурными и фазовыми превращениями, величиной, знаком и глубиной остаточных напряжений, деформацией кристаллической решетки.

На протяжении последних лет учеными и специалистами государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (ФТИ, Минск) и учреждения образования «Барановичский государственный университет» (БарГУ, Барановичи) успешно развивается новое для Республики Беларусь научное направление — магнитно-импульсная упрочняющая обработка поверхностей металлических изделий. При воздействии МИО на сплавы устраняются дефекты в их кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла в поверхностном слое, что снижает трещинообразование, стабилизирует структуру, обеспечивает повышение прочности изделий и, соответственно, увеличивает их срок эксплуатации [1].



Рисунок 1. — Насосно-компрессорные трубы

В настоящее время накоплен достаточно большой научный и экспериментальный опыт использования сильного импульсного электромагнитного поля для повышения износостойкости разнообразных инструментов, применяемых в дерево- и металлообрабатывающей, машиностроительной, пищевой отраслях промышленности как на предприятиях Республики Беларусь, так и за рубежом [2; 3].

К процессам, направленным на упрочнение поверхности стальных изделий под воздействием магнитного импульса, кроме деформаций, приводящих к созданию различных дефектов и уплотнению

структуры вблизи поверхности, относятся также фазовые превращения «аустенит—мартенсит», миграции примесей вблизи границ зерен, возникновение мелкодисперсной структуры на поверхности заготовки, связанное с образованием новых границ между зернами и дроблением пластинок цементита [3—5]. Осуществление этих процессов непосредственно связано с неоднородностью материала стали, локальным выделением теплоты вблизи границ зерен при протекании индукционных токов и магнитострикционными эффектами (в случае изделий, выполненных из магнитных сталей) [3].

В нефтегазодобывающей промышленности по всему миру в большом количестве применяются стальные насосно-компрессорные трубы (далее — НКТ) с резьбой (рисунок 1). Резьба НКТ нуждается в повышенных эксплуатационных характеристиках, поскольку многократная сборка и разборка частей трубы для обеспечения необходимой длины приводит к достаточно быстрому износу резьбовых соединений. Для упрочнения резьбы применяют различные методы и конструкторские решения (нанесение износостойких покрытий, специальные замки и др.).

В ФТИ были проведены научно-исследовательские работы для российского предприятия по упрочнению резьбы НКТ, которые показали, что под воздействием МИО при определенной энергии воздействия в резьбе образуется упрочненный слой глубиной до 100 мкм с повышенной микротвердостью, что подтверждает целесообразность применения для этой цели МИО [6].

Оборудование и методика. Для исследований возможности повышения износостойкости НКТ методом МИО открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод» предоставило сегменты труб из различных марок стали по международным стандартам. Приведем перечень исследуемых образцов (таблица 1) и химического состава марок сталей (таблица 2), применяемых для получения НКТ. Все они являются нелегированными конструкционными сталями, которые используются для изготовления горячекатаного полового профильного сварного проката.

Т а б л и ц а 1. — Перечень образцов труб из марок сталей, применяемых для изготовления НКТ

Номер образца	Плавка	Партия	Марка стали	Диаметр трубы (мм)	Толщина стенки (мм)
1	274967	175545	B/C/X42	88,9	7,62
2	369594	175636	S355J2H (1.0576)	70,0	12,50
3	368809	175285	32Г2А	88,9	13,00
4	273677	174136	Grade GT U110 mod 2	139,7	10,54
5	369238	175405	S355J0H (1.0547)	146,0	9,00
6	274456	175567	Grade GT U110 mod 1	139,7	9,17 (9,4)

Т а б л и ц а 2. — Химический состав исследуемых марок сталей, %

Марка стали	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
V/C/X42	≤ 0,28	< 1,65	< 0,03	< 0,03	0	—	—
S355J2H /1.0576/ (EN 10219-1)	≤ 0,22	< 1,6	< 0,03	< 0,03	< 0,55	—	—
32Г2А (ОСТ 14-21-77)	≤ 0,3	1,2...1,45	< 0,02	< 0,02	0,2...0,35	< 0,3	< 0,3
Grade GT U110 mod2 (C110 U)	1...1,1	0,1...0,35	< 0,03	< 0,03	< 0,1-0,3	—	—
S355J0H /1.0547/ (EN 10219-1)	≤ 0,22	< 1,6	< 0,03	< 0,03	< 0,55	—	—
Grade GT U110 mod1	1...1,1	0,1...0,35	< 0,03	< 0,03	< 0,1...0,3	—	—

Для МИО образцов сталей использовались магнитно-импульсные установки (МИУ), оснащенные цилиндрическими индукторами, изготовленные в лаборатории объемных гетерогенных систем ФТИ (рисунок 2).

Для определения оптимального режима упрочнения резьбы проведена металлография микроструктуры шлифов всех сегментов труб, выполнены измерения твердости и микротвердости поверхности, температуры нагрева образцов после первого, второго, третьего импульсов воздействия, суммарного макронапряжения до и после МИО при различных технологических режимах (энергии воздействия 6, 8, 10 кДж по 2...4 импульса) на магнитно-импульсных установках МИУ-2, МИУ-3. Использовался цилиндрический индуктор диаметром 23 мм индуктивностью 20 мГн, который на МИУ-3 работает с частотой 6 кГц, а на МИУ-2 — с частотой 18 кГц.

Из сегментов труб приготовили шлифы на пробоприготовительном комплексе с применением шлифовально-полировального станка DIGIPREP 251. Микроструктуру шлифов до и после МИО исследовали на световом микроскопе MCF-3 фирмы Reichert (Австрия).

Определение твердости образцов проводили по методу Роквелла (ГОСТ 9013) на стационарном полуавтоматическом приборе ТК-2М с механическим и электрическим приводом с погрешностью измерения ±3 %. Температуру образцов до и после каждой МИО измеряли с помощью мультиметра ALEX 9808+ с термопарой ТХА (ГОСТ 1790) с погрешностью измерения ±1 % при температуре от -20...+400 °С и с погрешностью измерения ±1,5 % при температуре от 400 до 1 000 °С.



Рисунок 2. — Магнитно-импульсные установки с различными техническими характеристиками для обеспечения упрочняющего воздействия на стальные изделия

Измерение температуры носит скорее качественный сравнительный характер, а не количественный, так как под воздействием МИО высокая температура (700...1 000 °С) возникает в локальных очагах с большей или меньшей концентрацией различных дефектов. В результате этого и происходят структурно-фазовые преобразования. Но высокая температура мгновенно рассеивается по всему объему образца, и на поверхности измеряемая температура достигает 20...100 °С. Однако в различных сталях и при различных режимах МИО температура заметно меняется, что говорит о большем или меньшем проникновении в образец тепловой энергии.

Из сегментов труб изготовили стандартные образцы для испытаний на ударный изгиб (10 × 10 × 50 мм) из марок стали № 2, 3, 4; образцы для испытаний на растяжение (по ГОСТ 1497, тип III) из марок стали № 1, 5, 6.

Испытания на ударный изгиб проводили по ГОСТ 9454 на маятниковом копре PSWO 30 при следующих условиях: максимальная энергия удара при испытаниях — 300 Дж (15 кгс · м), скорость маятника в момент удара — 5,6 м / с, температура воздуха составляла 20 °С, при охлаждении образцов опускалась до -25 °С (охлаждение проводили в жидком азоте в связи с тем, что трубы могут использоваться в северных широтах).

Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497 на разрывной машине с использованием штангенциркуля в соответствии с требованиями ГОСТ 166, микрометра в соответствии с требованиями ГОСТ 6507, тензометров в соответствии с требованиями ГОСТ 18957.

Результаты исследований и их обсуждение. Образцы, изготовленные из исследуемых марок стали, подвергли МИО на МИУ (высокочастотной МИУ-2 и низкочастотной МИУ-3) при различных технологических режимах: энергии воздействия 6, 8, и 10 кДж по 2...4 импульса.

В таблице 3 представлены результаты измерений твердости *HRB*, микротвердости *HV* поверхности образцов стали, температуры нагрева поверхности образцов после первого, второго, третьего импульсов МИО, среднесуммарное макронапряжение до и после обработки. Следует отметить, что контрольные образцы являются эталонами, у которых зарубежными изготовителями зафиксированы основные свойства.

Анализ результатов исследований (см. таблицу 3) показывает, что у образцов из различных марок сталей даже при одинаковых режимах МИО изменение микротвердости и среднесуммарное макронапряжение (учитывающее результаты обработки всех образцов из данной стали) отличаются в некоторых случаях довольно значительно. Наиболее существенные изменения микротвердости (столбец 7 в таблице 3) выделены жирным шрифтом.

Интересные результаты получили при МИО образцов из стали X42: у образца 1.3, обработанного на установке МИУ-2 двумя импульсами по 6 кДж, микротвердость увеличилась на 13,1 %; у образца 1.2, обработанного на установке МИУ-3 тремя импульсами по 8 кДж, микротвердость уменьшилась на 4,8 %. Видно, что у образца 1.2 исходная микротвердость до МИО намного выше (170,8 *HV*), чем у образца 1.3 (142,9 *HV*). Видимо, в результате воздействия на образец 1.2 трехкратного импульса большей энергии (8 кДж), чем при воздействии на образец двух импульсов по 6 кДж, произошло эффективное устранение или исправление различных дефектов в поверхностном слое (искажение кристаллической решетки, внедрение атомов, внутренние напряжения и др.), что привело к некоторому снижению микротвердости.

Увеличение микротвердости на 13,1 % при воздействии МИО на образец 1.3 связано, по-видимому, с образованием мелкозернистой структуры и, соответственно, с появлением большого количества межзеренных границ.

Т а б л и ц а 3. — Свойства образцов исследуемых марок стали до и после МИО при различных технологических режимах

Материал и маркировка образца	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, °С	Твердость, HRB	Микротвердость средняя, HV, кг / мм ²			Среднесуммарное макронапряжение, МПа
				до МИО	после МИО	% изменения	
1	2	3	4	5	6	7	8
1. X42							
1.1	Контрольный	20*	75	158,7	—	0	Эталон
1.2	8 × 3, МИУ-3	27/33/36	75	170,8	162,6	-4,8	—
1.3	6 × 2, МИУ-2	43/70/80	75	142,9	161,6	13,1	—
2. S355J2H							
2.1	Контрольный			167,6	—	0	—
2.2	8 × 3, МИУ-3			167,6	200,7	19,7	—
							До МИО — 959, после МИО — 584
3. 32Г2А							
3.1	Контрольный	20*	92	229,1	—	0	Эталон
3.2	6 × 3, МИУ-3	25/30/34	93	219,5	259,9	18,4	—
3.3	7 × 3, МИУ-3	28/34/48	93	198,0	214,9	8,5	—
3.4	8 × 3, МИУ-3	27/33/36	93	219,5	268,0	22,0	—
							До МИО — 1 398, после МИО — -1021
4. Grade GT U110 mod 2							
4.1	Контрольный	20*	103	222,6	—	0	Эталон
4.2	6 × 3, МИУ-3	24/29/32	101	222,6	227,4	2,2	—
4.3	7 × 3, МИУ-3	27/40/41	101	246,5	252,1	2,3	—
4.4	8 × 3, МИУ-3	27/31/34	101	221,1	224,2	1,4	—
4.5	8 × 3, МИУ-2	43/70/86	101	213,4	213,4	0	—
4.6	10 × 3, МИУ-2	48/77/95	101	222,6	256,0	15,0	—
4.7	12 × 3, МИУ-2	52/85/100	101	222,6	259,9	17,0	—
							До МИО — -359, после МИО — -293
5. S355J0H							
5.1	Контрольный	20*		222,6	—	0	Эталон
5.2	8 × 3, МИУ-3	34/38/42		222,6	200,7	-6,6	—
5.3	6 × 3, МИУ-2			196,7	222,6		—
							До МИО — -358, после МИО — 732
6. Сталь Grade GT U110 mod 1							
6.1	Контрольный	20*	100	259,9	—	0	—
6.2	12 × 3, МИУ-2	52/85/100	101	256,0	263,9	1,6	—
							До МИО — -358, после МИО — 146

При обработке образца 2.2 из стали S355J2H тремя импульсами по 8 кДж каждый на низкочастотной установке МИУ-3 микротвердость образца увеличилась на 19,7 %, что связано, видимо, как и в предыдущем случае, с образованием мелкодисперсной структуры и большого количества межзеренных границ, а это, в свою очередь, произошло под влиянием температуры первичной рекристаллизации, возникшей в результате МИО.

Таким же образом можно объяснить существенные повышения микротвердости при воздействии МИО на образцы 3.2, 3.3 и 3.4 (сталь 32Г2А), 4.6 и 4.7 (сталь Grade, mod 2), 5.3 (сталь S355J0H) и 6.2 (сталь Grade, mod 1).

Интересно, что изменения микронапряжений в различных сталях при различных режимах МИО носят неоднозначный характер, что требует проведения дополнительных исследований.

Были проведены металлографические исследования всех образцов стали до и после МИО, результаты которых представлены на рисунках 3—8. Структура исследуемых марок стали представляет собой мелкозернистый отпущенный мартенсит. Структура двух образцов (1.2 и 1.3) стали X42 показана на рисунках 3 и 4, где видно, что при МИО на поверхности образуется модифицированный слой глубиной 8...20 мкм светлого цвета, который не поддавался травлению, так как, видимо, имеет повышенную плотность с выделением карбидов.

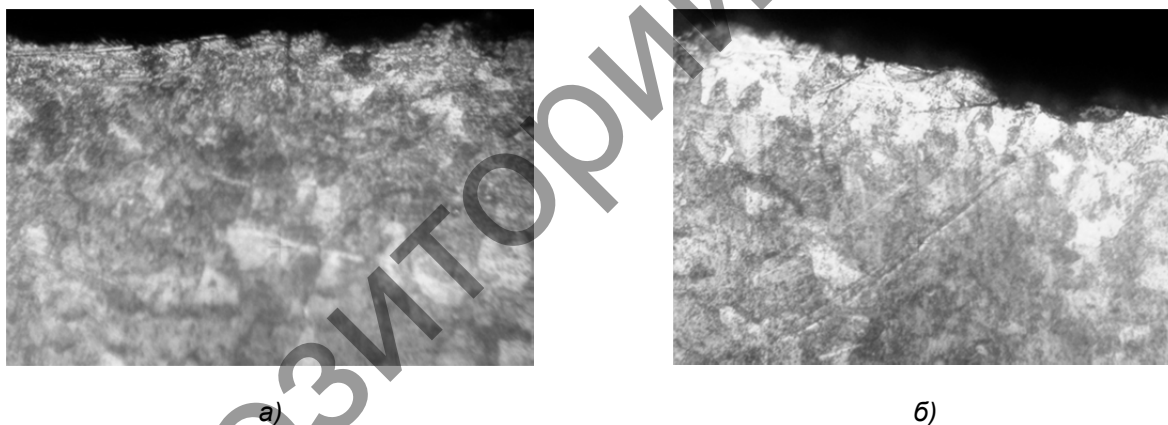


Рисунок 3. — Микроструктура образца 1.2 стали X42 до МИО (а), после МИО (б). × 400

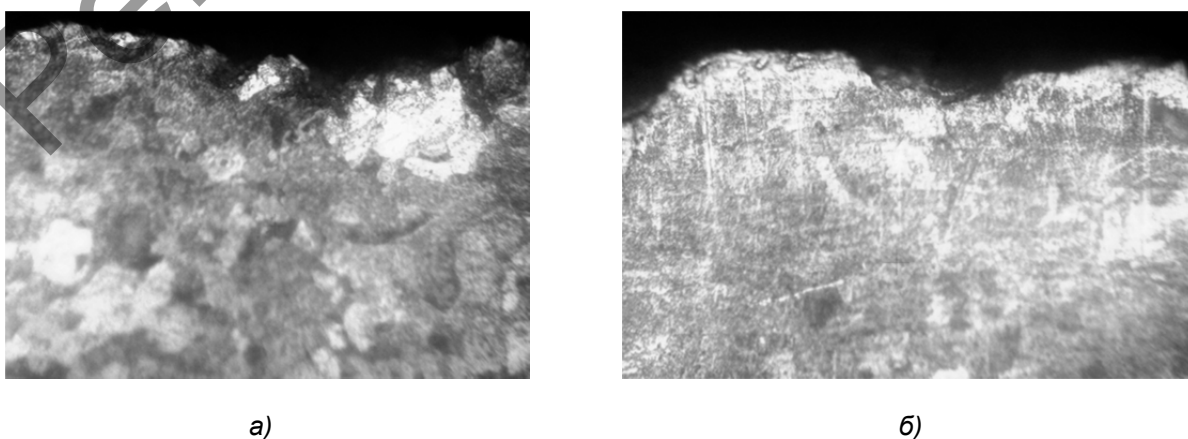


Рисунок 4. — Микроструктура образца 1.3 стали X42 до МИО (а), после МИО (б). × 400

Микроструктура образца стали S355J2H показана на рисунке 5, где видно, что после МИО (см. рисунок 5, б) поверхность покрыта крупными цементитными областями светлого цвета.

Микроструктура образца стали S355J0H, показанная на рисунке 6, имеет значительно более мелкое зерно, чем аналогичная по химическому составу сталь S355J2H; после МИО (см. рисунок 6, б) видно, что образуется модифицированный уплотненный слой глубиной 8...20 мкм светлого цвета.

Из рисунка 7, на котором показаны микроструктуры образца из стали 32Г2А до МИО (а) и после МИО (б), видно, что текстурированные уплотненные слои (см. рисунок 7, а) после МИО распадаются на многочисленные отдельные сегменты, довольно равномерно распределённые на поверхности, что должно благоприятно повлиять на прочность образца.

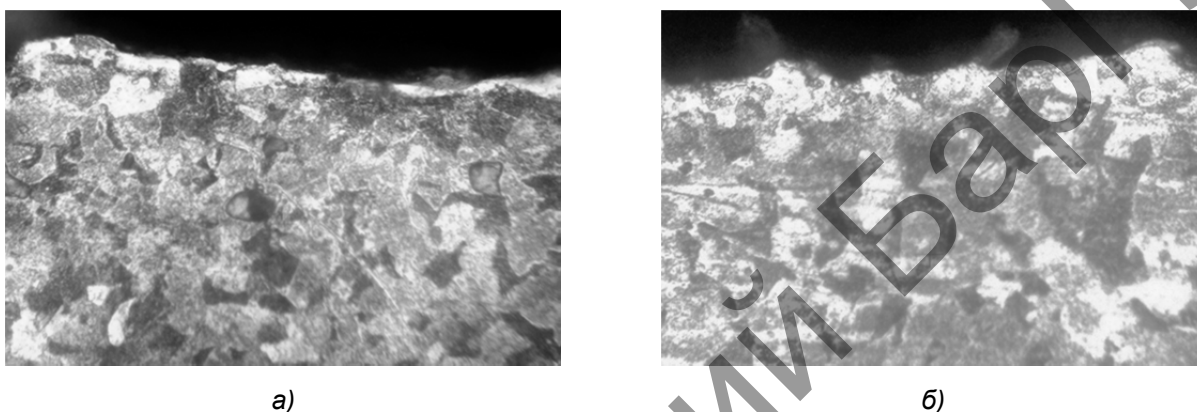


Рисунок 5. — Микроструктура образца 2.3 стали S355J2H до МИО (а), после МИО (б). × 400

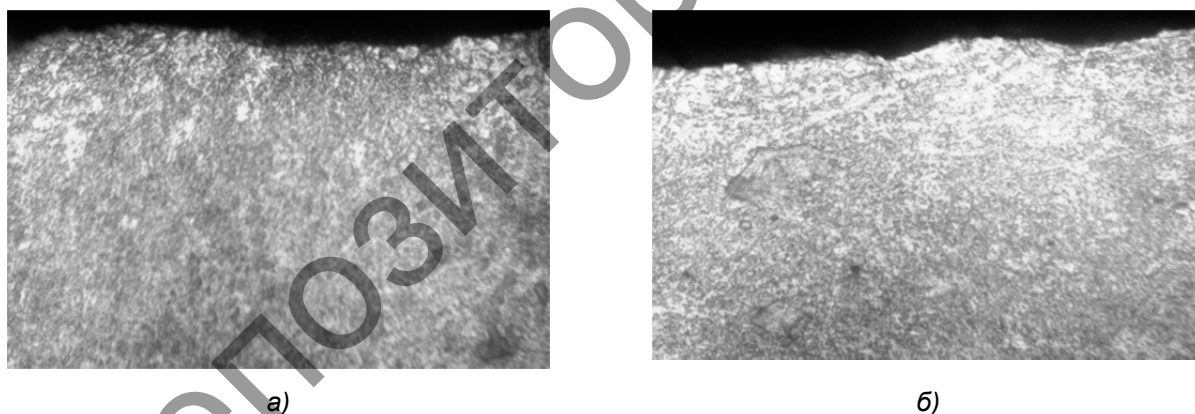


Рисунок 6. — Микроструктура образца 5.2 стали S355J0H до МИО (а), после МИО (б). × 400

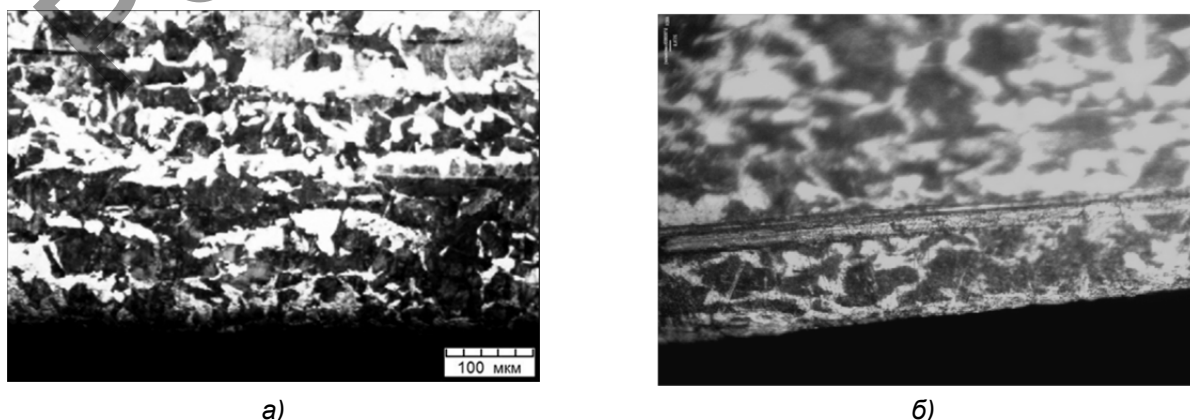


Рисунок 7. — Микроструктура образца 3.4 стали 32Г2А до МИО (а), после МИО (б). × 400

На рисунке 8 показаны микроструктуры образца 6.2 из стали Grade GT U110 mod 1 до МИО (а) и после МИО (б). Анализ микроструктуры показывает, что после МИО структура приобрела мелкозернистый, более однородный характер, благодаря чему должны улучшиться прочностные характеристики образца.

На основании анализа проведенных исследований были выбраны наиболее рациональные режимы МИО, при которых проявляется улучшение структуры образцов, повышение микротвердости поверхности, снижение суммарных остаточных макронапряжений, что позволит улучшить прочностные характеристики резьбы на трубах, изготовленных из исследованных марок стали.

По выбранным оптимальным режимам обработали образцы, изготовленные для проведения испытаний на растяжение и ударный изгиб, результаты которых представлены в таблицах 4—9.

Из таблицы 4 видно, что у образца из стали X42 после МИО несколько повысились пластические свойства, что, как правило, приводит к уменьшению хрупкости изделия, в данном случае резьбы насосно-компрессорной трубы.

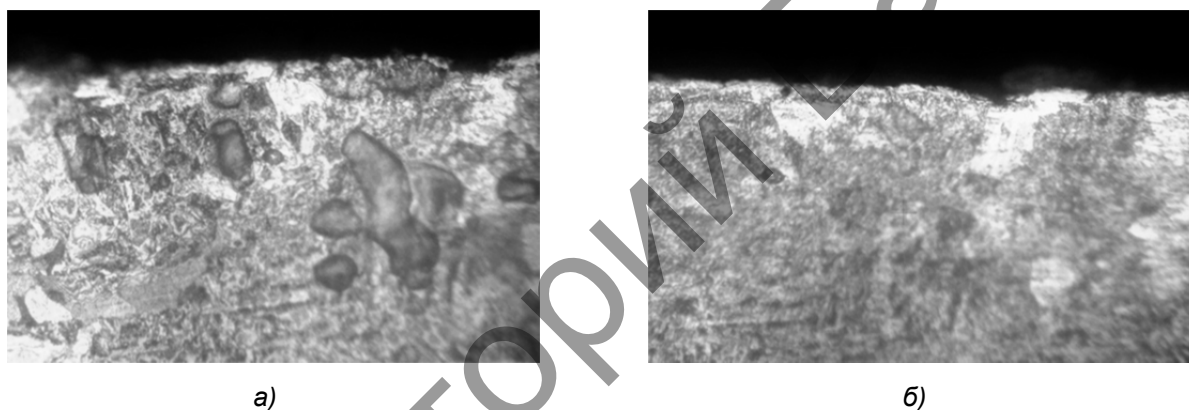


Рисунок 8. — Микроструктура образца 6.2 стали Grade GT U110 mod 1 до МИО (а), после МИО (б). $\times 400$

Т а б л и ц а 4. — Результаты испытаний образцов стали X42 после МИО на растяжение

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж \times кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2 импульсов, $^{\circ}\text{C}$	Результаты испытаний			
			Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н / мм ²	Временное сопротивление разрыву σ_b , Н / мм ²	Относительное сопротивление разрыву δ , %	Относительное сужение ψ , %
1.1	Контрольный	24*	125	550	28	52
1.3	6 \times 2, МИУ-2	40/52	156	529	24	48

Т а б л и ц а 5. — Результаты испытаний образцов стали S355J2H после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж \times кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, $^{\circ}\text{C}$	Вид испытаний и температура испытания T, $^{\circ}\text{C}$	Результаты испытаний		
				Площадь S_0 , см ²	KU, кгс \cdot м	KCU, Дж / см ²
2.1	Контрольный шлиф	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	19,5	244,0
2.2	8 \times 3, МИУ-3	43/45/49		0,8	18,0	225,0
2.3	8 \times 3, МИУ-3	42/44/50		0,8	23,4	293,0
2.4	8 \times 3, МИУ-3	43/46/54	Ударная вязкость, -25	0,8	17,1	209,5

Анализ проведенных исследований показал, что МИО образцов стали S355J2H при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов в 2...2,3 раза после трех импульсов воздействия. Величины исследованных прочностных свойств (ударная вязкость KU , KCU) при положительных и отрицательных температурах после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 2.1 до МИО, повысились в одном образце из трех (см. таблицу 5, образец 2.3). Образец 2.4, который подвергся ударному изгибу при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, показал заметно меньшие величины KU и KCU , что объясняется повышением хрупкости сталей при низких температурах.

Из таблицы 6 видно, что МИО образцов стали 32Г2А на низкочастотной установке МИУ-3 при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов почти в 2 раза после трех импульсов воздействия. Величины исследованных свойств (ударная вязкость KU , KCU) при положительных и отрицательных температурах после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 3.1 до МИО, понизились на 50 % у образцов 3.2, 3.3 и 3.4. Образец 3.5 после МИО показал некоторое увеличение KU и KCU , что можно объяснить образованием благоприятной структуры.

Из таблицы 7 видно, что МИО образцов стали Grade GT U110 mod 2 на высокочастотной установке МИУ-2 при выбранных технологических режимах повысила температуру образцов почти в 2 раза после трех импульсов воздействия и в 4,4 раза — после шести импульсов.

Т а б л и ц а 6. — Результаты испытаний образцов стали 32Г2А после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, $^{\circ}\text{C}$	Вид испытаний и температура испытания T , $^{\circ}\text{C}$	Результаты испытаний		
				Площадь S_0 , cm^2	KU , кгс · м	KCU , Дж / cm^2
3.1	Контрольный	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	6,5	81,0
3.2	8 × 3, МИУ-3	35/45/50		0,8	6,0	75,0
3.3	8 × 3, МИУ-3	38/48/52	Ударная вязкость, -25	0,8	4,1	50,2
3.4	8 × 3, МИУ-3	34/40/46		0,8	4,1	50,2
3.5	8 × 3, МИУ-3	32/41/45	Ударная вязкость, +20	0,8	6,8	83,3

Т а б л и ц а 7. — Результаты испытаний образцов стали Grade GT U110 mod 2 после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, $^{\circ}\text{C}$	Вид и температура испытания T , $^{\circ}\text{C}$	Результаты испытаний		
				Площадь S_0 , cm^2	KU , кгс · м	KCU , Дж / cm^2
4.1	Контрольный	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	1,4	17,5
4.2	6 × 6, МИУ-2	24/29/32(1) 63/76/85		0,8	2,0	25,0
4.3	6 × 6, МИУ-2	27/40/41(1) 64/96/109		0,8	1,9	23,7
4.4	6 × 6, МИУ-2	27/31/34(1) 51/60/86		0,8	1,7	21,3
4.5	Контрольный	24*	Ударная вязкость, -25	0,8	1,2	14,7
4.6	6 × 6, МИУ-2	50/60/70		0,8	1,3	15,9
4.7	6 × 6, МИУ-2	52/80/105		0,8	1,6	19,6
4.8	12 × 3, МИУ-2	53/86/100		0,8	2,2	27,0

Величины исследованных свойств (ударная вязкость KU , KCU) при положительных и отрицательных температурах после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольных образцах 4.1 и 4.5 до МИО, повысились почти во всех образцах. Только в образцах 4.5. и 4.6 они понизились (исследования проводились при отрицательной температуре, которые снижают пластичность образца). Эти результаты показывают высокую эффективность выбранных режимов МИО для стали Grade GT U110 mod 2 (см. таблицу 7).

Из таблиц 8, 9 видно, что МИО образцов из стали S355J0H на установке МИУ-3 при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов менее чем в 2 раза после трех импульсов воздействия. Величины исследованных прочностных свойств σ_b , ψ после МИО образца 5.2 в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 5.1 до МИО, несколько повысились. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ снизился в обоих образцах, относительное сопротивление разрыву δ увеличилось на 4 %. Величины ударной вязкости KU , KCU в сравнении с данными контрольного образца 5.4 повысились в образце 5.5, но понизились в образце 5.6.

Из таблицы 10 видно, что МИО образцов стали Grade GT U110 mod 1 на установке МИУ-2 при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов в 3 раза после шести импульсов воздействия. Величина σ_b после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 6.1 до МИО, повысилась в образце 6.3 на 3,6 %; относительное сужение ψ в образце 6.2 увеличилось на 10 %. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ повысился в обоих образцах, относительное сопротивление разрыву δ снизилось в обоих образцах на 4...6 %.

Т а б л и ц а 8. — Результаты испытаний образцов стали S355J0H после МИО на растяжение

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов МИО, °С	Результаты испытаний			
			Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н / мм ²	Временное сопротивление разрыву σ_b , Н / мм ²	Относительное сопротивление разрыву δ , %	Относительное сужение ψ , %
5.1	Контрольный	24*	379	716	32	54,8
5.2	6 × 3, МИУ-3	34/38/42	328	727	36	45,6
5.3	6 × 3, МИУ-3	33/36/42	336	712	36	68,6

Т а б л и ц а 9. — Результаты испытаний образцов стали S355J0H после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, °С	Вид и температура испытания T, °С	Результаты испытаний		
				Площадь S_0 , см ²	KU , кгс · м	KCU , Дж / см ²
5.4	Контрольный	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	19,6	245
5.5	6 × 3, МИУ-3	32/34/37		0,8	20,2	253
5.6	6 × 3, МИУ-3	31/33/38		0,8	18,5	231

Т а б л и ц а 10. — Результаты испытаний образцов стали Grade GT U110 mod 1 после МИО на растяжение

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура МИО нагрева через каждые 2 имп., °С	Результаты испытаний			
			Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н / мм ²	Временное сопротивление разрыву σ_b , Н / мм ²	Относительное сопротивление разрыву δ , %	Относительное сужение ψ , %
6.1	Контрольный	24	467	774	20	30
6.2	6 × 6, МИУ-2	64/68/73	494	723	14	33
6.3	6 × 6, МИУ-2	62/70/72	514	802	16	27

В результате анализа проведенных исследований можно сделать вывод, что при МИО на установке МИУ-2 образцы исследованных марок трубной стали нагреваются с большей скоростью и на большую величину, чем на МИУ-3.

Температура нагрева оказывает существенное влияние на структурные превращения в поверхностном слое образцов. Сравнительные исследования физико-механических свойств до и после МИО показали, что прочностные свойства (KU , KCU , $\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , ψ) повысились в большей мере (до 2 раз) при обработке на МИУ-2 при оптимальном режиме воздействия.

Заключение. Анализ результатов исследований микроструктур и прочностных свойств (ударная вязкость KU , KCU , предел текучести $\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , ψ) после МИО с различными режимами показали, что магнитно-импульсное воздействие при рекомендуемых оптимальных режимах позволяет улучшить физико-механические свойства исследуемых марок стали, изготовленных ОАО «БМЗ» по иностранным стандартам. При выполнении научных исследований определены параметры наиболее рациональных технологических режимов упрочняющей МИО шести марок стали для изготовления НКТ для нефтегазодобывающей промышленности.

Список цитируемых источников

1. Алифанов, А. В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. — Витебск : ВГТУ, 2017. — Гл. 2. — С. 31—52.
2. Малыгин, Б. В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
3. Магнотриксционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // Весн. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
4. Modeling of non-stationary diffusion of alloying elements on exposure of steel samples to magnetic pulses / A. Alifanov [et.] // 15-th International Scientific Conference “TRANSFER 2014” Alexander Dubcek University of Trencin, 23—24.10.2014, Trencin, Slovakia. — P. 10—14.
5. Импульсные методы обработки материалов / АН БССР, Физ.-техн. ин-т. — Минск : Наука и техника, 1977. — 216 с.
6. Исследование влияния магнитно-импульсного воздействия на структуру полых стальных изделий с поверхностью сложного профиля / А. В. Алифанов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2015. — Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / гл. ред. С. А. Астапчик. — С. 19—26.

Поступила в редакцию 05.05.2020