

Учреждение образования
«Барановичский государственный университет»

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 4, июнь, 2016.

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 Никишова Алла Васильевна, кандидат филологических 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 экономики и организации производства инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Редактор текстов на английском языке

Манкевич Жанна Борисовна, кандидат психологических наук, старший преподаватель кафедры теории и практики английского языка учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общенаучных дисциплин 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 механизации и энергообеспечения производства инженерного факультета, декан факультета довузовской подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент 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).

Бетяга Григорий Филиппович, кандидат технических наук, доцент, начальник технологического научно-производственного центра учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Гордиенко Анатолий Илларионович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, начальник Центра индукционных технологий 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).

Добышев Анатолий Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации животноводства и электрификации сельскохозяйственного производства учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, декан 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 и автомобилей учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, заведующий лабораторией пластичности Белорусского национального технического университета (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).

Нерода Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Спиридонов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, доцент, директор Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (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@tut.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 (машиностроение и машиноведение; процессы и машины агроинженерных систем).

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включён в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Издатель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь

Заведующий редакционно-издательским отделом Е. Г. Хохол
Технический редактор В. В. Кукреш
Компьютерная вёрстка В. В. Кукреш
Корректор С. А. Березнюк

Подписано в печать 13.06.2016. Формат 60 × 84 ¹/₈. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10,70.
Уч.-изд. л. 5,40. Тираж 75 экз. Заказ .

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: открытое акционерное общество «Красная звезда». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя печатных изданий № 2/7 от 28.10.2013.

Юридический адрес: пер. 1-й Загородный, 3, 220073 Минск.

Почтовый адрес: ул. Советская, 80, 225409 Барановичи.

© БарГУ, 2016

Репозиторий БарГУ

Установа адукацыі
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

Веснік БарДУ

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 4, чэрвень, 2016.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

Заснавальнік: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

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 Нікішова Ала Васільеўна, кандыдат філалагічных 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 эканомікі і арганізацыі вытворчасці інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

Манкевіч Жанна Барысаўна, кандыдат псіхалагічных навук, старшы выкладчык кафедры тэорыі і практыкі англійскай мовы ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Гаўрылена Андрэй Канстанцінавіч (*адказны за напрамак «Машынабудаванне і машыназнаўства»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры агульнанавуковых дысцыплін інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Дубень Ігар Віктаравіч (*адказны за напрамак «Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт кафедры механізацыі і энергазабеспячэння вытворчасці інжынернага факультэта, дэкан факультэта даву-заўскай падрыхтоўкі ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Анісковіч Генадзь Іосіфавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт установы 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 ін-стытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Бяцэня Рыгор Піліпавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, начальнік тэхналагічнага навукова-практычнага цэнтра ўстановы адукацыі «Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Гардзіенка Анатолій Іларыёнавіч, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, начальнік Цэнтра індукцыйных тэхналогій 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).

Добышаў Анатолій Сямёнавіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры механізацыі жывёлага-доўлі і электрыфікацыі сельскагаспадарчай вытворчасці ўстановы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспа-дарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Драмук Уладзімір Аляксеевіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дэкан інжынернага факультэта 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 і аўтамабіляў установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клачкоў Аляксандр Віктаравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная 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).

Нярода Міхаіл Уладзіміравіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхналогіі машынабудавання ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Спірыдонаў Мікалай Васільевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры тэхналогіі машынабудавання Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Таміла Вячаслаў Анатольевіч, 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@tut.by

Падпісныя 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 навуках (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-выдавецкага аддзела А. Г. Хахол

Тэхнічны рэдактар В. У. Кукраш

Камп'ютарная вёрстка В. У. Кукраш

Карэктар С. А. Березнюк

Падпісана да друку 13.06.2016. Фармат 60 × 84 ¹/₈. Папера ксераксная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,70. Ул.-выд. арк. 5,40. Тыраж 75 экз. Заказ .

Кошт свабодны.

Паліграфічнае выкананне: адкрытае акцыянернае таварыства «Чырвоная зорка». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 2/7 ад 28.11.2013.

Юрыдычны адрас: завул. 1-ы Загарадны, 3, 220073 Мінск.

Паштовы адрас: вул. Савецкая, 80, 225409 Баранавічы.

Educational Institution
“Baranovichi State University”

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013

Issue 4, June, 2016.

Series “Engineering”

Promoter: Educational Institution “Baranovichi State University”.

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief: Vasily Ivanovich Kochurko, Rector of Baranovichi State University, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, Academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of the Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Deputy Chief Editor: Alla Vasilyevna Nikishova, Ph. D. in Philology, Vice-rector for Scientific Work of Baranovichi State University, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

THE EDITORIAL BOARD OF THE EDITION

Editor of the issue

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

Executive secretary of the issue

Juliya E. Gorbach, Senior lecturer of the Economic Organization of Production Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Editor of English texts

Zhanna B. Mankevich, Senior lecturer of the English Language Theory and Practice Chair of Slavic and Germanic Languages Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Psychology (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

Igor V. Duben (*in charge of the heading “Processes and Machines of Agroengineering Systems”*), Dean of the Pre-University Training Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

Grigory F. Betenya, Head of the Technology Research and Production Center of the Belarusian State Agrarian Technical University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Anatoly I. Gordienko, Head of the Induction Technology Center of the State Research Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Anatoly S. Dobyshev, Professor of the Animal Husbandry Mechanization and Electrification of Agricultural Production Chair of “The Belarusian State Agricultural Academy”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir A. Dremuk, Head of Engineering Department of Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

Anatoly N. Kartashevich, Head of the Tractors and Vehicles Chair of the Belarusian State Agricultural Academy, Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus).

Alexandr V. Klochkov, Professor, Professor of the Belarusian State Agricultural Academy, Doctor of Technical Sciences (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir V. Klubovich, Head of the Plasticity Laboratory of the Belarusian National Technical University, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Michail V. Neroda, Head of the Mechanical Engineering Chair of Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Nicholai V. Spiridonov, Professor of the Mechanical Engineering Chair of the Belarusian National Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Vyacheslav A. Tomilo, Director of the State Scientific Institution "The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Editorial address:

Voikov Str. 21, 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 E. G. Hohol

Technical editor V. V. Kukresh

Desktop Publishing V. V. Kukresh

Proofreader S. A. Bereznyuk

Signed print 13.06.2016. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox. Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 10.70. Acc.-pub. s. l. 5.40. Circulation of 75 copies. Order

Free price.

Printing performance: Open Joint Stock Company "Red Star". Certificate of the state registration of the publisher, the manufacturer and the distributor of publications № 2/7 since 28.10.2013.

Legal address: 3, 1 Zagorodni Pereulok, 220073 Minsk.

Postal address: 80 Sovietskaya Str., 225409 Baranovichy.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Машиностроение и машиноведение

Алифанов А. В., Горецкий Г. П., Милюкова А. М., Лях А. А., Шишмолин В. Н. Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на микротвёрдость и микроструктуру образцов сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей	11
Бакулин Б. А., Калугин Ю. К. Анализ химического состава и физико-механических свойств материалов для изготовления деталей батанного механизма ткацкого станка	22
Жоглик И. Н. Эмиссия моноэнергетических ионов V^{2+} , Ti^{2+} , Zr^{2+} в вакуумном электродуговом разряде	29
Здор Г. Н. Экспериментальные исследования прессования вытяжных матриц совместным действием статических и динамических нагрузок высокой интенсивности	35
Ищенко М. В. Износ конвейерной ленты в условиях абразивной химически активной среды калийного предприятия	44
Маркевич М. И., Чапманов А. М., Малышко А. Н., Солодуха В. А., Соловьев Я. А., Сарычев О. Э., Щербакова Е. Н. Формирование и исследование диодов Шоттки на основе силицидов платины и никеля	48
Михайлов М. И. Анализ нагрузочного резервирования сборных внутренних фрез	55
Ракицкий А. А. Исследование усталостной прочности деталей машин с термонапылёнными порошковыми покрытиями в условиях циклического растяжения/сжатия	62

Процессы и машины агроинженерных систем

Бегеня Г. Ф., Анискович Г. И., Кривцов А. В., Рогожинский С. Н. Инновационная технология упрочнения дисков роторов и оснований башмаков режущего аппарата косилок	68
Богданович П. Н., Михайлов М. И., Михайлов К. М. Исследование влияния электрофрикционного упрочнения ножей режущего барабана кормоуборочного комбайна на их износостойкость	77

ЗМЕСТ

ТЭХНІЧНЫЯ НАВУКІ

Машынабудаванне і машыназнаўства

Аліфанаў А. В., Гарэцкі Г. П., Мілюкова Г. М., Лях А. А., Шышмолін В. Н. Даследаванне ўплыву рэжымаў магнітна-імпульснай апрацоўкі на мікрацвёрдасць і мікраструктуру ўзораў сталяў, якія прымяняюцца для вырабу рубільных нажоў	11
Бакулін Б. А., Калугін Ю. К. Аналіз хімічнага складу і фізіка-механічных уласцівасцяў матэрыялаў для вырабу дэталей батаннага механізма ткацкага станка	22
Жоглік І. М. Эмісія монаэнергетычных йонаў V^{2+} , Ti^{2+} , Zr^{2+} у вакуумным электрадугавым разрадзе	29
Здор Г. М. Эксперыментальныя даследаванні прэсавання выцяжных матрыц сумесным дзеяннем статычных і дынамічных нагрузкаў высокай інтэнсіўнасці	35
Ішчанка М. В. Зношванне канвеернай стужкі ва ўмовах абразіўнага хімічна актыўнага асяроддзя калійнага прадпрыемства	44
Маркевіч М. І., Чапланаў А. М., Малышка А. М., Саладуха В. А., Салаўёў Я. А., Сарычаў А. Э., Шчарбакова А. М. Фарміраванне і даследаванне дыёдаў Шоткі на аснове сіліцыдаў плаціны і нікеля	48
Міхайлаў М. І. Аналіз нагрузачнага рэзервавання зборных унутраных фрэз	55
Ракіцкі А. А. Даследаванне стомленаснай трываласці дэталей машын з тэрмананпыленымі парашковымі пакрыццямі ва ўмовах цыклічнага расцяжэння/сціскання	62

Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм

Бяценья Р. Ф., Анісковіч Г. І., Крыўцоў А. В., Рагажынскі С. М. Інавацыйная тэхналогія ўмацавання дыскаў ротараў і асноў башмакоў рэжучага апарата касілак	68
Багдановіч П. М., Міхайлаў М. І., Міхайлаў К. М. Даследаванне ўплыву электрафрыкцыйнага ўмацавання нажоў рэжучага барабана кормаўборачнага камбайна на іх зносаўстойлівасць	77

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

Machine Building and Engineering Science

Alifanov A. V., Goretsky G. P., Milyukova A. M., Lyakh A. A., Shishmolin V. N. Research of influence of magnetic-pulse treatment modes on microhardness and microstructure steel samples used for chipper knives manufacture	11
Bakulin B. A., Kalugin Ju. K. Analysis of chemical composition and physical-mechanical properties of materials for loom bata mechanism parts production	22
Zhohlik I. N. Emission of monoenergetic flow of V^{2+} , Ti^{2+} , ZR^{2+} ions in vacuum electroarc discharge	29
Zdor G. N. Experimental study of exhaust pressing matrix via the combined action of static and dynamic loads of high intensity	35
Ishchenko M. V. The conveyor belt wear in an abrasive and chemically active environment of the potash plant	44
Markevich M. I., Chaplanov A. M., Malyshko A. N., Solodukha V. A., Solovyev Ya. A., Sarichev O. E., Shcherbakova E. N. Formation and investigation of Schottky diodes based on platinum and nickel silicide	48
Mikhailov M. I. Analysis of prefabricated internal cutters load backup	55
Rakitsky A. A. Investigation of fatigue strength of machine components with thermal spray coatings under cyclic push/pull conditions	62

Processes and Machines of Agroengineering Systems

Betenya G. F., Aniskovich G. I., Krivtsov A. V., Rogozhinsky S. N. Innovative technology for rotor discs and mower cutterbar shoe base strengthening	68
Bogdanovich P. N., Mikhailov M. I., Mikhailov K. M. Research of influence of electrofriction hardening of forage harvester cutting drum knives on their wear resistance	77

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 631.353.722

Г. Ф. Бетенья¹, Г. И. Анискович¹, А. В. Кривцов², С. Н. Рогожинский¹

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 99, 220023 Минск,
Республика Беларусь, +375 (017) 267 64 45, tnpc-bgatu@mail.ru

² Частное предприятие «ФРОС-М», ул. Минская, д. 1а, 223058 д. Лесковка, Минский р-н, Минская обл.,
Республика Беларусь, +375 (29) 656 63 39, up.frosm@gmail.com

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДИСКОВ РОТОРОВ И ОСНОВАНИЙ БАШМАКОВ РЕЖУЩЕГО АППАРАТА КОСИЛОК

В статье приведены результаты исследований элементного состава, структуры и основных механических свойств упрочнённых импульсной закалкой дисков роторов и оснований башмаков режущего аппарата роторных косилок. Подтверждена возможность изготовления этих сложнопрофильных деталей из углеродистых сталей с упрочнением импульсным закалочным охлаждением быстродвижущимся потоком воды. Упрочнение деталей осуществляется в закалочных устройствах, разрабатываемых индивидуально с учётом конструкций ротора и оснований башмака. При этом деталям обеспечиваются отвечающие условиям эксплуатации значения твёрдости, ударной вязкости, прочности, характерное структурное строение.

Ключевые слова: диск ротора; основание башмака; импульсная закалка; устройство закалочного охлаждения; твёрдость; ударная вязкость.

Табл. 2. Рис. 7. Библиогр.: 7 назв.

G. F. Betenya¹, G. I. Aniskovich¹, A. V. Krivtsov², S. N. Rogozhinsky¹

¹ Educational Establishment “Belarusian State Agrarian Technical University”, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus, 99, Independence ave., 220023, Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 64 45, tnpc-bgatu@mail.ru

² Private enterprise “FROS-M”, 1a, Minskaya str., 223058 Leskovka, Minsk district, Minsk region, the Republic of Belarus, +375 (29) 656 63 39, up.frosm@gmail.com

INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR ROTOR DISCS AND MOWER CUTTERBAR SHOE BASE STRENGTHENING

The article deals with the results of the experimental study of elemental composition, structure and basic mechanical properties of rotor discs and mower cutterbar shoe base strengthened by pulse hardening. The possibility of producing these complex profile parts made of carbon steel hardened by quench cooling pulse of a fast-moving stream of water is confirmed. Hardening of parts is carried out in the quenching devices, constructed individually and taking into account the construction of the rotor and shoe bases. At the same time the parts are provided with hardness, toughness, strength, necessary structural composition, in accordance with the operating conditions.

Key words: rotor disk; shoe base; pulse hardening; quenching cooling device; hardness; toughness.

Table 2. Fig. 7. Ref.: 7 titles.

Введение. В конструкциях современных дисковых и роторных косилок к днищу основного бруса крепятся башмаки, которыми режущий аппарат опирается на почву, обеспечивая шарнирно закреплённому бусу копирование рельефа поля в вертикальной плоскости. Вдоль бруса устанавливаются роторы,

каждый из которых имеет два шарнирно закреплённых косилочных ножа. В процессе работы частота вращения диска ротора составляет около $3\ 000\ \text{мин}^{-1}$.

Диск ротора является сложным в геометрическом исполнении изделием. Он относится к классу пространственных сложнопрофильных конструкций. Кроме этого, как правило, диск ротора состоит из разнородных конструкционных материалов (стальная тонкостенная основа толщиной $4\text{...}5\ \text{мм}$, вставки для крепления косилочных ножей, сварные швы).

Основания башмаков (основное и дополнительное) брусьев режущих аппаратов косилок также являются сложными в геометрическом исполнении изделиями. Они представляют собой конструкцию коробчатого типа. Основания башмаков изготавливаются из тонколистового стального проката толщиной $4\text{...}5\ \text{мм}$. Ширина оснований $200\text{...}370\ \text{мм}$, длина $440\text{...}480\ \text{мм}$.

Показаны эскизы объектов исследований (диск ротора, основания башмаков) бруса режущего аппарата косилок (рисунок 1, а—в).

В процессе работы основание башмака и диск ротора подвергаются интенсивному коррозионно-механическому и абразивному изнашиванию, а также воздействию значительных динамических нагрузок, что требует придания этим деталям в процессе изготовления соответствующих условиям эксплуатации физико-механических и эксплуатационных свойств [1].

Материалы и методы исследования. Анализ зарубежных аналогов дисков роторов и оснований башмаков (немецких фирм CLAAS и KRONE, французской фирмы KUHN, словенской фирмы SILVERCUT) показал, что эти изделия должны обладать высокими прочностью (не менее $1\ 500\ \text{МПа}$), ударной вязкостью (не менее $0,6\ \text{МДж} / \text{м}^2$), твёрдостью (не менее $35\text{...}40\ \text{HRC}$) и относительным удлинением (не менее $6\text{...}8\%$).

Диски роторов и основания башмаков изготавливаются зарубежными фирмами из высокопрочных и износостойких бористых сталей. Прочность и износостойкость дисков и оснований башмаков, работающих в крайне тяжёлых условиях, преимущественно достигается применением изотермической заковки.

На предприятиях отечественного сельскохозяйственного машиностроения до настоящего времени практически не применяются технологии по упрочнению термообработкой пространственно-сложных тонкостенных стальных заготовок и сварных конструкций. Поэтому работы по упрочнению таких изделий относятся к разряду инновационных.

На сегодня отставание в области отечественного производства конкурентоспособных дисков и оснований башмаков бруса косилок, не уступающих по техническому уровню зарубежным аналогам, начинает сокращаться. Примером технического решения проблемы освоения отечественного производства этой конкурентоспособной продукции является использование упрочняющей технологии импульсного закалочного охлаждения потоком воды или водного раствора кальцинированной соды.

Данная технология [2] прошла проверку в производственных условиях на целом ряде предприятий Министерства промышленности Республики Беларусь и Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. Она является объектом конструкторской и опытно-технологической разработки с высокой степенью завершённости [3].

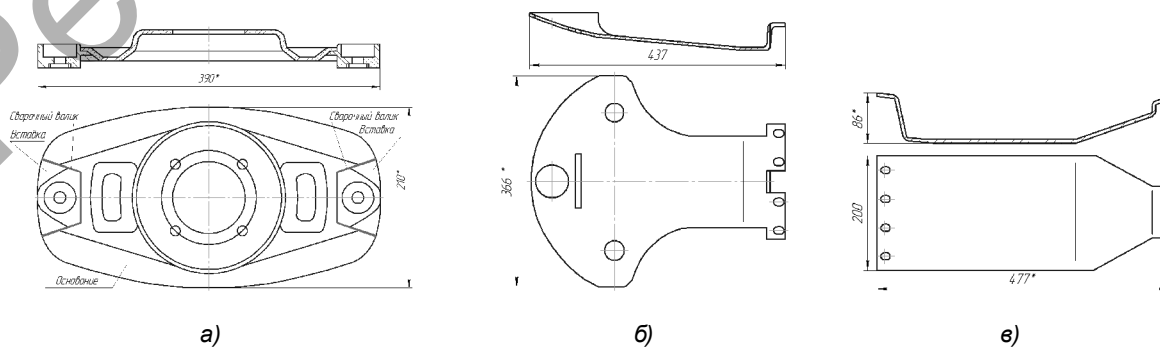


Рисунок 1. — Эскизы диска ротора (а), основного (б) и дополнительного основания (в) башмаков бруса режущего аппарата косилок

Технология импульсного закалочного охлаждения жидкостью (далее — ТИЗОЖ) является отечественной, энерго- ресурс- и природосберегающей, обладает патентной чистотой и защищённостью [4]. Ей присуща высокая производительность, которая лимитируется пропускной способностью нагревательных печей. Основным классификационным признаком ТИЗОЖ является отнесение её к нанотехнологии, при реализации которой при заданных параметрах режима охлаждения в изделиях из конструкционной стали формируется наноструктурированное состояние, характеризующееся размером характерных структурных элементов в диапазоне 30...80 нм [5]. В зарубежной практике наиболее распространённым аналогом такого технического решения является технология под названием “Conit” (интеллектуальная собственность норвежской фирмы Kverneland) [6].

В соответствии с технологической схемой ТИЗОЖ нагретая до температуры аустенитизации и при выдержке ~10 мин стальная ремонтная заготовка (далее — РЗ) устанавливается в устройство закалочного охлаждения (далее — УЗО) и фиксируется. После этого в зазоры между РЗ и ограждающими поверхностями, формируемыми матрицей и пуансоном УЗО, подаётся быстродвижущийся поток охлаждающей жидкости (далее — ОЖ). Температура аустенитизации и скорость потока ОЖ (свыше 30 м / с) задаётся в определённом интервале. Как правило, УЗО имеют индивидуальное назначение. Их основными конструктивными элементами являются матрица и пуансон, с помощью которых моделируются потоки жидкости вокруг объекта закалки. Особенно важно это для деталей сложной пространственной геометрии. Однородное (равномерное) охлаждение РЗ сложной формы достигается равномерным потоком ОЖ, омывающей поверхность объекта закалки.

Для обеспечения конкурентоспособности дисков роторов и оснований башмаков исследования проводились с использованием горячекатаного стального проката из следующих марок сталей: сталь 25ХГСА и 30ХГСА (ГОСТ 4543-71) [7], бористая сталь RAEX B27 (Финляндия) — для основы диска и оснований башмаков; сталь 35Л (ГОСТ 1050-88) [8] — для вставок диска; сварочная проволока Св18ХГС, Нп30ХГСА (ГОСТ 10543-98) [9] — для сварных швов.

Анализ элементного состава, исследование структуры, измерение твёрдости и микротвёрдости стальных образцов выполнялись на базе аккредитованного испытательного центра Государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии».

Исследования элементного состава выполнены на аттестованном атомно-эмиссионном спектрометре ЭМАС-200Д. Погрешность метода в данном случае составляет 3...5 относительных процентов. Анализ на углерод проводили на экспресс-анализаторе АН 7529, анализ на серу — на экспресс-анализаторе АС 7932.

Исследование микроструктуры проводилось на световом микроскопе MeF-3 фирмы Reichert (Австрия) при увеличении $\times 100$, $\times 200$ и $\times 500$. Структура определялась по ГОСТ 8233-56 [10], размер зерна — по ГОСТ 5639-82 [11], полосчатость — по ГОСТ 5640-68 [12].

Твёрдость по Бринеллю измерялась на твердомере ТШ-2М по ГОСТ 9012-59 [13], твёрдость по Роквеллу — на твердомере ТК14-250 по ГОСТ 9013-59 [14].

Результаты исследований и их обсуждение. На первоначальном этапе проводились исследования элементного состава и структуры образцов сталей в состоянии поставки (таблица 1).

Т а б л и ц а 1. — Результаты исследования элементного состава образцов сталей

Материал	В процентах						
	C	S	Mn	Si	Ni	Cr	Fe
Сталь 35	0,37	0,016	0,51	0,31	0,02	0,07	Основа
09Г2С	0,11	0,0055	1,5	0,79	0,06	0,08	Основа
Сталь 20	0,18	0,014	0,40	0,23	0,02	0,07	Основа
30ХГСА	0,29	0,0055	0,90	1,0	0,04	0,86	Основа
60ПП	0,58	0,008	0,16	0,21	0,02	0,05	Основа
B27	0,26	0,0045	1,1	0,26	0,03	0,26	Основа

В результате анализа установлено, что по элементному составу с учётом погрешности измерений материал образцов соответствует: стали марки 35, стали марки 20 (ГОСТ 1050-88 [15]), стали марки 09Г2С (ГОСТ 19281-89 [16]), стали марки 30ХГСА, стали марки 25Г (ГОСТ 4543-71 [17]), стали марки 60ПП (ТУ 14-1-1926-76 [18]).

Структура образца из стали 35 (рисунок 2, *а*) феррито-перлитная, размер зерна находится в диапазоне 10...20 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,015 мм, что соответствует № 9 по ГОСТ 5639-82 [19], твёрдость образца — 165 НВ.

Структура образца 09Г2С (см. рисунок 2, *б*) феррито-перлитная, размер зерна находится в диапазоне 5...15 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,011 мм, что соответствует № 10 по ГОСТ 5639-82 [20]. Присутствует полосчатость 1 балла по ГОСТ 5640-68 [21]. Твёрдость образца составляет 165 НВ.

Структура образца сталь 20 (см. рисунок 2, *в*) феррито-перлитная, размер зерна находится в диапазоне 10...25 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,017 мм, что соответствует № 8 и № 9 по ГОСТ 5639-82 [22], твёрдость образца — 140 НВ.

Структура образца 30ХГСА (см. рисунок 2, *г*) феррито-перлитная, размер зерна находится в диапазоне 10...20 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,015 мм, что соответствует № 9 по ГОСТ 5639-82 [23], твёрдость образца — 220 НВ.

Структура образца В27 (см. рисунок 2, *е*) феррито-перлитная, основной размер зерна находится в диапазоне 3...10 мкм, наблюдаются зёрна размером до 25 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,011...0,015 мм, что соответствует № 10 и № 9 по ГОСТ 5639-82 [24]. Присутствует полосчатость 1 балла по ГОСТ 5640-68 [25]. Твёрдость образца составляет 195 НВ.

Структура образца 60ПП (см. рисунок 2, *д*) феррито-перлитная, с отдельными включениями цементита, располагающимися по границам зёрен в виде разорванной сетки. Размер зерна находится в диапазоне 10...30 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,015 мм, что соответствует № 9 по ГОСТ 5639-82 [26]. С двух сторон присутствует обезуглероженный слой: с одной стороны толщиной 30...80 мкм, с другой — 10...60 мкм. Твёрдость образца составляет 130...135 НВ.

Из приведённых марок сталей для исследовательских испытаний изготавливались плоские образцы шириной 65 мм, длиной 200 мм и толщиной 4 и 5 мм. Плоские образцы подвергались упрочнению

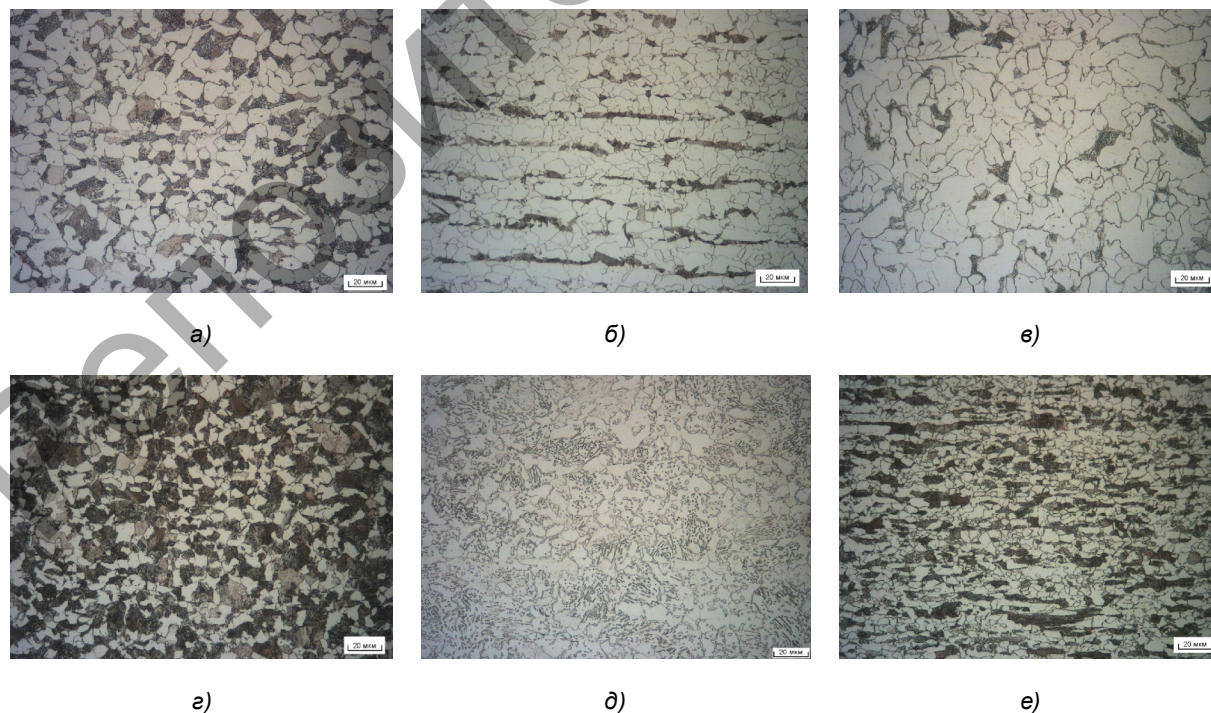


Рисунок 2. — Микроструктура материала образцов: сталь 35 (*а*), сталь 09Г2С (*б*), сталь 20 (*в*), сталь 30ХГСА (*г*), сталь 60ПП (*д*), сталь В27 (*е*). × 500

с использованием ТИЗОЖ, подробно изложенной в [27]. Избыточное давление воды составляло 0,40 МПа. Температура аустенитизации образцов устанавливалась для стали 35 — 850°C, стали 25ХГСА — 890...950°C, стали RAEX B27 — 890°C, стали 09Г2С — 950°C. Продолжительность цикла охлаждения составляла 1 с. Закалённые плоские образцы подвергались низкому отпуску при температуре 200°C с продолжительностью выдержки в течение 1 ч и среднему отпуску при температуре 300 и 350°C с продолжительностью выдержки 1 ч. После отпуска образцы из стали 35 и стали RAEX B27 охлаждались на воздухе. Образцы из стали 25ХГСА после отпуска охлаждались погружением в воду.

Упрочнённые пластины использовались для проведения структурного анализа, исследования твёрдости и ударной вязкости (КСУ).

Исследование ударной вязкости проводилось на стандартных образцах толщиной 2 мм (тип 4) и 5 мм (тип 3) по ГОСТ 9454-78 [28].

Представлены результаты испытаний на ударную вязкость и твёрдость упрочнённых образцов (таблица 2).

На основании проведённых исследований в качестве материала для дисков ротора и оснований башмаков принят листовой прокат из стали 25ХГСА (ГОСТ 4543) [29].

Заготовки диска ротора изготавливались с применением пластического деформирования в штампах в холодном состоянии с предварительным отжигом. Сборка заготовки диска со вставками осуществлялась с применением сварки в среде углекислого газа. В качестве сварочных электродов применялась проволока Св18ХГС (Нп30ХГСА).

Заготовки оснований башмаков также изготавливались с применением холодного пластического деформирования с предварительным отжигом в штампах.

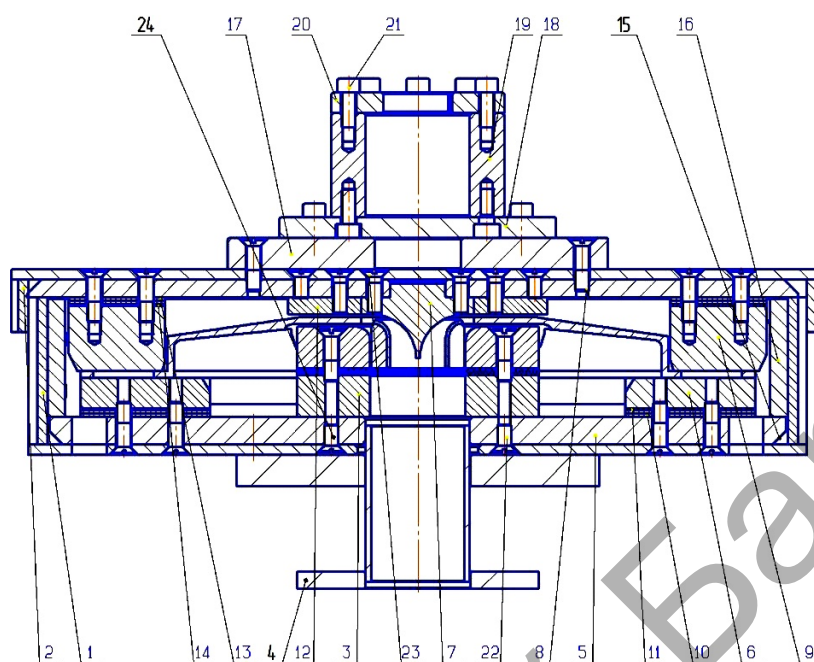
Для упрочнения заготовок деталей импульсной закалкой были разработаны закалочные устройства с учётом конструкций ротора и оснований башмака. В качестве примера представлена принципиальная схема устройства закалочного охлаждения для закалки дисков роторов (рисунок 3). Разработанные закалочные устройства прошли апробацию для импульсной закалки ротора и оснований башмака с применением системы закалочного охлаждения быстро движущимся потоком воды и использованием технического оснащения, соответствующего производственным условиям на материально-технической базе БГАТУ.

В соответствии с технологической схемой ТИЗОЖ нагретая до температуры аустенитизации и при выдержке (~10 мин) стальная РЗ устанавливается в УЗО и фиксируется. После этого в зазоры между РЗ и ограждающими поверхностями, формируемыми матрицей и пуансоном закалочного устройства, подается быстро движущийся поток ОЖ, температура и скорость которой задаётся в определённом интервале.

Упрочнённые опытные детали (диск ротора и основания башмаков) подвергались структурному анализу, исследованию твёрдости и микротвёрдости.

Т а б л и ц а 2. — Результаты исследования ударной вязкости и твёрдости упрочнённых образцов

Образец	Твёрдость, HRC	Ударная вязкость, KCU, Дж / см ²	
		интервал	среднее значение
Импортный (аналог) ротор	46...48	96,76...118,76	110,10
Сталь 25ХГСА (ТИЗОЖ 950°C, отпуск 200°C 1 ч, охлаждение в воде)	43...45	108,99...124,00	114,82
Сталь 25ХГСА (ТИЗОЖ 890°C, отпуск 350°C 1 ч, охлаждение в воде)	45	99,41...107,46	103,27
Сталь В27 (ТИЗОЖ 890°C, отпуск 200°C 0,5 ч, охлаждение на воздухе)	45	108,08...119,62	114,84
Сталь 35 (ТИЗОЖ 850°C, отпуск 300°C 1 ч, охлаждение на воздухе)	45	66,92...81,06	73,65

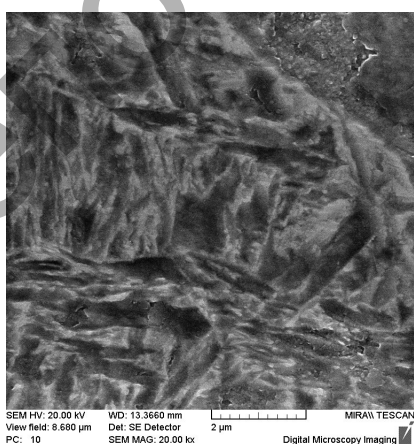


1 — основание; 2 — крышка; 3 — упор; 4 — фланец; 5 — плита основания;
6 — упор; 7, 15, 16 — вставки; 8 — плита верхняя; 9 — упор; 10, 11, 13, 14 — прокладки; 12, 17 — кольцо; 18 — пластина; 19 — втулка; 20 — полукольцо

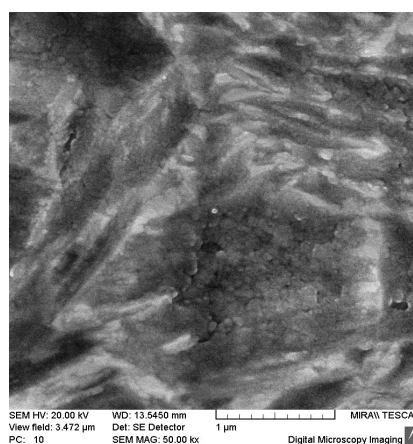
Рисунок 3. — Принципиальная схема закалочного устройства диска роторов

Для микроструктурного анализа использовался сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения Miра фирмы Tescan (Чехия). Исследования структурного строения образцов проводились при увеличении до $\times 80\,000$. Микроструктура образцов из стали 35 представляет собой троостомартенсит (рисунок 4). Видно, что троостомартенситные пластины разбиты на фрагменты. Установлено, что разбиение на классы по длине фрагментов троостомартенситных пластин образцов из стали 35 свидетельствует о преимущественном интервале от $0,02...0,04$ до $0,08...0,10$ мкм (около 95%).

Твёрдость по Роквеллу упрочнённых образцов из стали 35 изучалась на твердомере TP 5014-01 по ГОСТ 9013-59 [30]. Установлено, что среднее значение твёрдости закалённой поверхности упрочнённых



а)



б)

Рисунок 4. — Морфология троостомартенситных пластин в деталях из стали 35. $\times 20\,000$ (а). $\times 50\,000$ (б)

образцов, термообработанных при избыточном давлении в интервале от 0,30 до 0,50 МПа, составляет в среднем 46 HRC.

Исследования изготовленных из стали 35 оснований башмаков, упрочнённых импульсной закалкой с последующим низким отпуском, показали, что по элементному составу с учётом погрешности измерений материал детали соответствует стали марки 35 (C — 0,34%, S — 0,012%, Mn — 0,52%, Si — 0,21%, Ni — 0,07%, Cr — 0,11%, Fe — основа) ГОСТ 1050-88 [31].

Структура материала деталей (рисунок 5) представляет собой мелко- и среднеигльчатый мартенсит с размером игл 6...10 мкм по ГОСТ 8233-56 [32]. Присутствует обезуглероженный слой глубиной до 70 мкм, твёрдость по Роквеллу составляет 53 HRC.

Характерными участками для диска ротора являлись основа, вставка и сварочные валики (рисунок 6).

Структура образца представляет собой троостит с ферритом. С двух сторон присутствует обезуглероженный слой: с наружной стороны толщиной 100...200 мкм, с внутренней — 100...150 мкм.

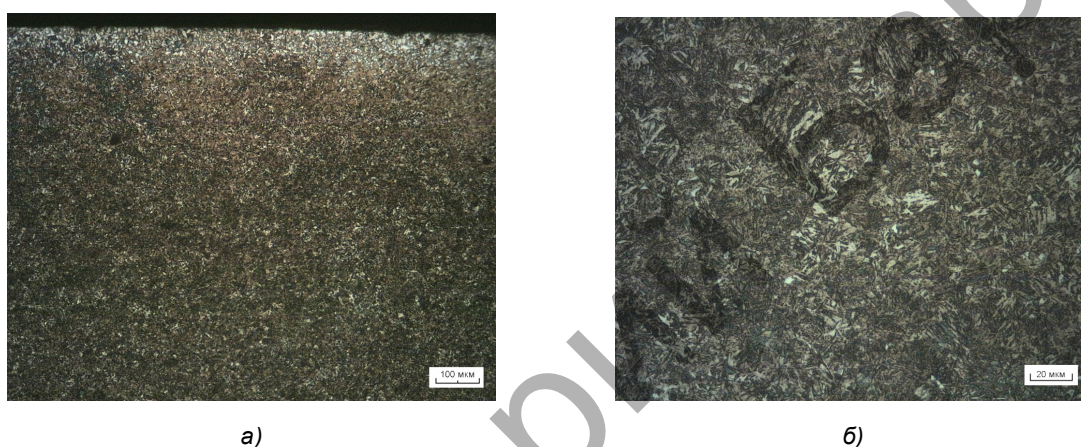


Рисунок 5. — Микроструктура оснований башмаков. $\times 100$ (а). $\times 500$ (б)

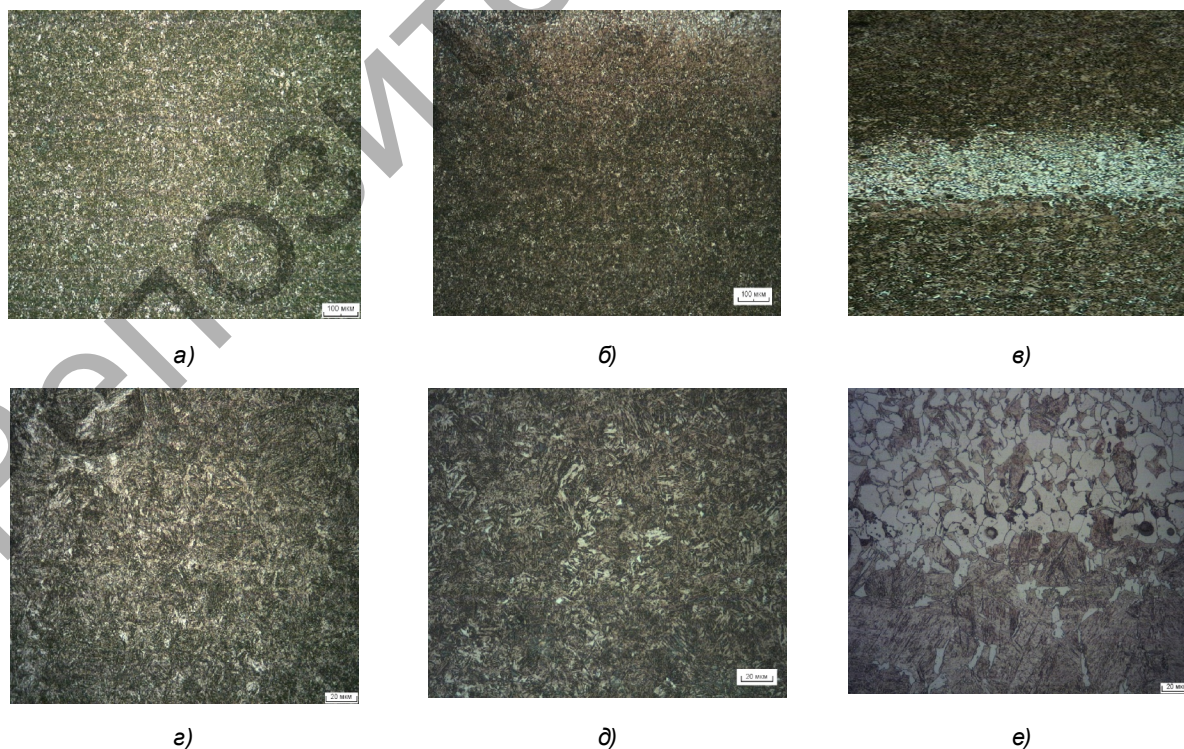


Рисунок 6. — Микроструктура основы (а, г), вставки (б, д) и сварочного валика (в, е) опытного образца ротора. $\times 100$ (а, б, в). $\times 500$ (г, д, е)

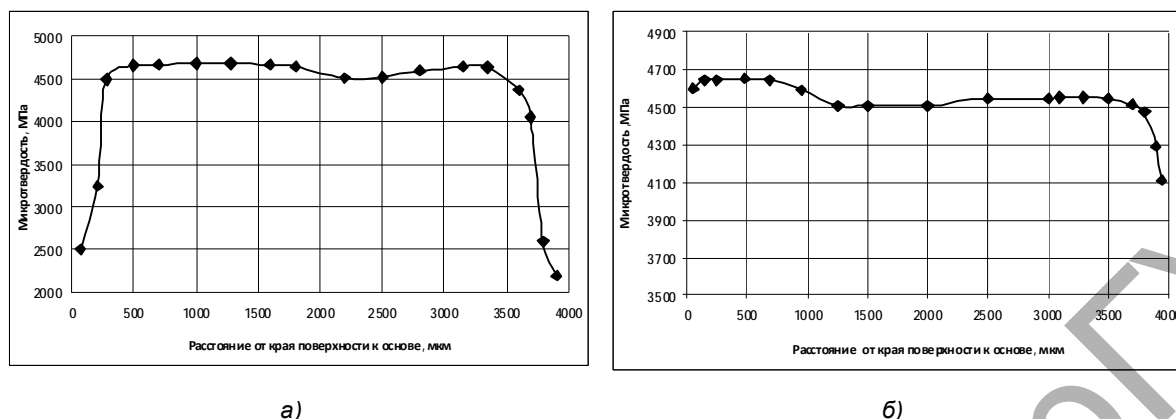


Рисунок 7. — Графики измерения микротвёрдости по сечению шлифов
опытного образца диска ротора (а) и основания башмака (б)

Измерение микротвёрдости диска ротора и основания башмака проводилось от наружного края к внутреннему (рисунок 7).

Микроструктура опытного образца основания башмака представляет собой мелкоигльчатый троостомартенсит с длиной игл 2...4 мкм. Одна из сторон поверхности обезуглерожена на глубину до 60 мкм. Твёрдость необезуглероженой поверхности составляет 48...49 HRC, обезуглероженой — 42...44 HRC.

Таким образом, исследования элементного состава, структуры и основных механических свойств дисков роторов и оснований башмаков бруса режущего аппарата косилок, изготовленных из углеродистых сталей и упрочнённых импульсной закалкой, показали, что по этим параметрам они не уступают зарубежным аналогам.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы: 1) для изготовления дисков ротора и оснований башмака рекомендуется использовать листовой прокат из стали 25ХГСА. Её применение соответствует требуемым эксплуатационным свойствам деталей, характеризующим прочностью, твёрдостью и ударной вязкостью; 2) при изготовлении дисков ротора и оснований башмака для их упрочнения обосновано применение технологии импульсного закалочного охлаждения водой, что обеспечивает требуемый для этих деталей уровень твёрдости, ударной вязкости, прочности, характерное структурное строение.

Список цитируемых источников

1. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И.Н. Шило [и др.]. Минск : БГАТУ, 2010. 320 с.
2. Объёмные нанокристаллические износостойкие детали рабочих органов сельскохозяйственной техники / Г.Ф. Бетенья [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. 2012. № 3. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. С. 46—51.
3. Бетенья Г.Ф., Анискович Г.И. Опыт упрочнения деталей из сталей пониженной прокаливаемости импульсным закалочным охлаждением жидкостью // Вестник БарГУ. 2013. Вып. 1. С. 152—159.
4. Технологический модуль для закалки деталей [Электронный ресурс] : пат. № U 2139 Респ. Беларусь / Бетенья Г.Ф. [и др.] ; заявл. 17.12.2004 ; опубл. 16.05.2005. URL: <http://bypatents.com/3-u2139-tehnologicheskij-modul-dlya-zakalki-detalejj.html> (дата обращения: 12.01.2016) ; Закалочное устройство для быстрого охлаждения тонкостенных заготовок [Электронный ресурс] : пат. № U 8779 Респ. Беларусь / Бетенья Г.Ф. [и др.] ; заявл. 26.04.2012 ; опубл. 30.12.2012. URL: <http://bypatents.com/3-u8779-zakalochnoe-ustrojstvo-dlya-bystrogo-ohlazhdeniya-tonkostennyh-zagotovok.html> (дата обращения: 12.01.2016).
5. Бетенья Г.Ф., Анискович Г.И. Модификация структуры и механических свойств стали пониженной прокаливаемости при импульсном закалочном охлаждении жидкостью // MOTOROL. Lublin—Pzeszow. 2013. Vol. 15. № 7. С. 80—86.
6. Soucek R., Pippig G. Maschinen und Gerate fur Bodenbearbeitung, Dungung und Aussaat. Berlin : Verl. Technik, 1990. 432 s.
7. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 4543-71 // Открытая база ГОСТов. URL: http://standartgost.ru_4543-71 (дата обращения: 12.01.2016).
8. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 1050-88 // Открытая база ГОСТов. URL: http://standartgost.ru_ (дата обращения: 12.01.2016).

9. Проволока стальная наплавочная. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 10543-98 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
10. Сталь. Эталоны микроструктуры [Электронный ресурс] : ГОСТ 8233-56 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
11. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Электронный ресурс] : ГОСТ 5639-82 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
12. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты [Электронный ресурс] : ГОСТ 5640-68 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
13. Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю [Электронный ресурс] : ГОСТ 9012-59 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
14. Металл. Метод измерения твёрдости по Роквеллу [Электронный ресурс] : ГОСТ 9013-59 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
15. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 1050-88 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
16. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 19281-89 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
17. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 4543-71 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
18. Прокат горячекатаный из углеродистой качественной конструкционной стали с пониженной прокаливаемостью марок 58 (55пп) и 60пп. Технические условия [Электронный ресурс] : ТУ 14-1-1926-76 // Электронный магазин стандартов. URL: <http://www.standards.ru/document/3368249.aspx> (дата обращения: 12.01.2016).
19. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Электронный ресурс] : ГОСТ 5639-82 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
20. Там же.
21. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты [Электронный ресурс] : ГОСТ 5640-68 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
22. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Электронный ресурс] : ГОСТ 5639-82 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
23. Там же.
24. Там же.
25. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты [Электронный ресурс] : ГОСТ 5640-68 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
26. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Электронный ресурс] : ГОСТ 5639-82 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
27. Объёмные нанокристаллические износостойкие детали рабочих органов сельскохозяйственной техники / Г.Ф. Бетенья [и др.]. С. 46—51.
28. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах [Электронный ресурс] : ГОСТ 9454-78 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
29. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 4543-71 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
30. Металлы. Метод измерения твёрдости по Роквеллу [Электронный ресурс] : ГОСТ 9013-59 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
31. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 1050-88 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
32. Сталь. Эталоны микроструктуры [Электронный ресурс] : ГОСТ 8233-56 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).

Поступила в редакцию 31.05.2016.