Учреждение образования
«Барановичский государственный университет»

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г. Выпуск 6, июнь, 2018. Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала Кочурко Василий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, Заслуженный работник образования Республики Беларусь, ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор серии

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

Ответственный секретарь серии

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

Редактор текстов на английском языке

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

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

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

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

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

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

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

Репозиторий БарГУ

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

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

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

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

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

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

Ласковнёв 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).

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 С. А. Березнюк
Технический редактор Е. И. Березич
Компьютерная вёрстка С. А. Березнюк
Корректор С. А. Березнюк

Подписано в печать 12.06.2018. Формат 60 × 84$^{1}/_{8}$. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 13,80. Уч.-изд. л. 9,20. Тираж 75 экз. Заказ 1375.

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, 2018

Репозиторий БарГУ

Установа адукацыі
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

Веснік БарДУ

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г. Выпуск 6, чэрвень, 2018. Серыя «Тэхнічныя навукі»

Заснавальнік: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ

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

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

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ СЕРЫІ

Галоўны рэдактар серыі

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

Адказны сакратар серыі

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

Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

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

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

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

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

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

Гардзіенка Анатолій Іларыёнавіч, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар 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).

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).

Репозиторий БарГУ

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

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

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

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

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

Нярода Міхаіл Уладзіміравіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхналогіі машынабудавання ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, 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.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-выдавецкай групы С. А. Беразнюк
Тэхнічны рэдактар А. І. Бярэзіч
Камп'ютарная вёрстка С. А. Беразнюк
Карэктар С. А. Беразнюк

Падпісана да друку 12.06.2018. Фармат 60 × 84 $^1/_8$. Папера ксераксная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 13,80. Ул.-выд. арк. 9,20. Тыраж 75 экз. Заказ 1375.
Кошт свабодны.
Паліграфічнае выкананне: Гродзенскае абласное ўнітарнае паліграфічнае прадпрыемства «Слонімская тыпаграфія». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 1/203 ад 07.03.2014, № 2 ад 25.02.2014.
Адрас: вул. Хлюпіна, 16, 231800 Слонім, Гродзенская вобл.

© БарДУ, 2018

Рэпозиторий БарГУ

Educational institution
“Baranovichi State University”

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013. Volume 6, June, 2018. Engineering Series

Promoter: educational institution “Baranovichi State University”.

EDITORIAL BOARD

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

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

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Editor of the issue

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

Executive secretary of the issue

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

English Text Editor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Репозиторий БарГУ

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichi. Phone: +375 163 45 46 28.
E-mail: vestnik@barsu.by.

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

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

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

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

Published: educational institution "Baranovichi State University".

Issued in Russian, Belarusian and English.

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

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

Signed print 12.06.2018. Format 60 x 84 $^{1}/_{8}$. Paper xerox. Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 13.80. Acc.-pub. s. l. 9.20. Circulation of 75 copies. Order 1375.
Free price.
Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary Enterprise "Slonim printing establishment". The state registration certificate of the publisher, manufacturer and publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2 of 25.02.2014.
Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim, Grodno region.

© BarSU, 2018

Репозиторий БарГУ

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Акулович Л. М., Ермашкевич Д. Б., Буйнич В. Г. Автоматизированное проектирование технологий изготовления деталей из листового металлопроката 10
Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Ворошухо О. Н. Магнитно-абразивная обработка цилиндрических канавок с радиусным профилем 20
Алифанов А. В., Богданович И. А., Лях А. А., Малеронок В. В. Исследование электрофизических свойств стальных образцов после магнитно-импульсной обработки 33
Алифанов А. В., Голубев В. С., Алехнович В. Н., Романчук И. А., Милюкова А. М., Толкачева О. А. Плазменная наплавка износостойких порошковых материалов на рабочие поверхности стальных деталей 39
Волчек О. М., Кондратчик Н. Ю., Наривончик Ю. С. Влияние регенерации рабочей жидкости в гидросистеме на механизированный комплекс с использованием механического диспергатора 45
Милюкова А. М., Горчанин А. И., Матяс А. Н., Малеронок В. В. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлорежущих сверл из быстрорежущей стали 50
Мойсейчик А. Е., Мойсейчик Е. А. Эффективность использования температурного параметра для диагностики агрегатов и конструкций машин 57
Молочко А. М., Рогозина Е. В. Экспериментальные методы исследования динамики резания при точении 62
Пигнастый О. М., Дударев Н. А. О моделировании производственного процесса с использованием предметно-технологического и потокового уровней описания 70
Сиваченко Л. А., Корзун И. М. Обоснование основных подходов проектирования вибрационных грохотов 75
Сотник Л. Л. Анализ результатов исследований зависимости производительности от основных факторов вибровалкового измельчителя 81

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Бурдейко В. А., Дубень И. В. Машина и рабочие органы для сбора колорадского жука 87
Крупенин П. Ю. Математическая модель движения кормовой суспензии в каналах роторного импульсного аппарата 96
Леонов О. А., Шкаруба Н. Ж., Вергазова Ю. Г., Антонова У. Ю. Метрологическое обеспечение контроля гильз цилиндров при ремонте дизелей 104

Репозиторий БарГУ

ЗМЕСТ

МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

Акуловіч Л. М., Ермашкевіч Д. Б., Буйніч В. Р. Аўтаматызаванае праектаванне тэхналогій вырабу дэталяў з ліставога металапракату 10
Акуловіч Л. М., Сяргееў Л. Я., Варашуха А. М. Магнітна-абразіўная апрацоўка цыліндрычных канавак з радыусным профілем 20
Аліфанаў А. В., Багдановіч І. А., Лях А. А., Маляронак У. У. Даследаванне электрафізічных уласцівасцяў сталёвых узораў пасля магнітна-імпульснай апрацоўкі 33
Аліфанаў А. В., Голубеў В. С., Аляхновіч У. Н., Раманчук І. А., Мілюкова Г. М., Талкачова В. А. Плазменная наплаўка зносаўстойлівых парашковых матэрыялаў на рабочыя паверхні сталёвых дэталяў 39
Волчак В. М., Кандратчык Н. Ю., Нарывончык Ю. С. Уплыў рэгенерацыі рабочай вадкасці ў гідрасістэме на механізаваны комплекс з выкарыстаннем механічнага дыспергатара 45
Мілюкова Г. М., Гарчанін А. І., Мацяс А. М., Маляронак У. У. Магнітна-імпульсная ўмацавальная апрацоўка металарэжучых свярдзёлкаў з хуткарэжучай сталі 50
Майсейчык А. Я., Майсейчык Я. А. Эфектыўнасць выкарыстання тэмпературнага параметра для дыягностыкі агрэгатаў і канструкцый машын 57
Малочка В. І., Рагозіна К. В. Эксперыментальныя метады даследавання дынамікі рэзання пры тачэнні 62
Пігнасты А. М., Дудараў М. А. Об мадэляванні вытворчага працэсу з выкарыстаннем прадметна-тэхналагічага і патокавага ўзроўняў апісання 70
Сівачэнка Л. А., Корзун І. М. Абаснаванне асноўных падыходаў праектавання вібрацыйных грохатаў 75
Сотнік Л. Л. Аналіз вынікаў даследаванняў залежнасці прадукцыйнасці ад асноўных фактараў выбравалковага здрабняльніка 81

ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАІНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

Бурдзейка В. А., Дубень І. В. Машына і рабочыя органы для збору каларадскага жука 87
Крупенін П. Ю. Матэматычная мадэль руху кармавой суспензіі ў каналах ротарнага імпульснага апарата 96
Ляонаў А. А., Шкаруба Н. Ж., Вяргазава Ю. Г., Антонава У. Ю. Метралагічнае забеспячэнне кантролю гільз цыліндраў пры рамонце дызеляў 104

Рэпозиторий ВарГУ

CONTENTS

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Akulovich L. M., Yermashkevich D. B., Buynich V. G. Automated design of technologies for manufacture of parts from sheet rolled metal 10
Akulovich L. M., Sergeev L. E., Voroshuho O. N. Magnetic-abrasive processing of cylindrical radius profile rollers 20
Alifanov A. V., Bogdanovich I. A., Lyah A. A., Maleronok V. V. Study of electrophysical properties of steel samples after magnetic-impulse treatment 33
Alifanov A. V., Golubev V. S., Alehnovich B. N., Pomanchuk I. A., Milukova A. M., Tolkacheva O. A. Plasma surfacing of wear-resistant powder materials on working surfaces of steel parts 39
Vauchok V. M., Kondratchik N. Y., Naryvonchyk Y. S. The influence of the regeneration of the working fluid in a hydraulic system in the mechanized complex using a mechanical disperser 45
Miliukova A. M., Harchanin A. I., Matias A. N., Maleronok V. V. Magnetic-impulse hardening treatment of metal-cutting drills from high speed steel 50
Moyseychik A. E., Moyseychik E. A. Efficiency of using the temperature parameter for the diagnostics of machines' units and constructions 57
Molochko V. I., Rogozina E. V. Experimental methods of research of the dynamics of cutting during turning 62
Pignastiy O. M., Dudarev N. A. About simulation of production with the use of subject-technological and flow levels of description 70
Sivachenko L. A., Korzun I. M. Substantiation of the basic approaches to design the vibrating screens 75
Sotnik L. L. Analysis of the results of research of dependence of productivity on the main factors of vibrating-rolling grinder 81

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

Burdeyko V. A., Duben I. V. Machine and operating tools for collecting of colorado potato beetle 87
Krupenin P. Y. The mathematical model of feed suspension movement in the channels of rotary impulse device 96
Leonov O. A., Shkaruba N. Zh., Vergasova Y. G., Antonova W. Y. Metrological assurance of control of cylinder liners in the repair of diesel engines 104

Репозиторий БарГУ

УДК 658.51:621.81

Л. М. Акулович, **Д. Б. Ермашкевич**, **В. Г. Буйнич**
Учреждение образования «Белорусский аграрный технический университет», Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 619 05 04, leo-akulovich@yandex.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

Рассмотрена методология сквозного автоматизированного проектирования технологий изготовления деталей машин из металлопроката. Сквозное проектирование основано на интеграции объектно-ориентированных модулей по технологическим переделам. Приведены граничные условия применения в единых технологических процессах операций раскроя листового металлопроката и операций механической обработки. Метод структурного синтеза сквозных технологических процессов использует базу данных рациональных схем обработки конструктивно-технологических элементов. Предложен алгоритм функционирования системы сквозного автоматизированного проектирования технологических процессов.

Ключевые слова: металлопрокат; автоматизация; схемы обработки; проектирование; интеграция; конструктивно-технологический элемент; раскрой листового металлопроката; синтез технологических процессов.

Рис. 7. Библиогр.: 12 назв.

L. M. Akulovich, D. B. Yermashkevich, V. G. Buynich
Belarusian State Agrarian Technical University, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus, 99 Nezavisimosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 619 05 04, leo-akulovich@yandex.ru

AUTOMATED DESIGN OF TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURE OF PARTS FROM SHEET ROLLED METAL

The methodology of end-to-end automated design of technologies for manufacturing machine parts from rolled metal is considered. End-to-end automated design is based on the integration of object-oriented modules for technological redistribution. The boundary conditions of application of sheet rolled metal cutting operations and machining operations in unified technological processes are given. The method of structural synthesis of end-to-end technological processes uses a database of rational schemes for processing structural and technological elements. The algorithm of functioning of the system of end-to-end automated design of technological processes is proposed.

Key words: rolled metal; automation; schemes of processing; design; integration; constructive and technological element; cutting of sheet metal rolling; synthesis of technological processes.

Fig. 7. Ref.: 12 titles.

Введение. Рыночная экономика внесла существенные изменения в технологический облик машиностроительных производств Республики Беларусь. Эти изменения выразились в частой сменяемости номенклатуры выпускаемых изделий и необходимости обеспечивать их конкурентоспособность. В результате около 70% продукции машиностроения выпускается на предприятиях с мелко- и среднесерийным характером производства.

Частая сменяемость номенклатуры выпускаемых изделий ограничивает сроки, отводимые на технологическую подготовку производства [1]. Поэтому для изготовления заготовок деталей машин становится экономически выгодным использовать листовой металлопрокат. Например, в сельхоз- и станкостроении, производстве строительных и дорожных машин

© Акулович Л. М., Ермашкевич Д. Б., Буйнич В. Г., 2018

Репозиторий БарГУ

его доля в общем объеме заготовок достигает 80%. Как следствие, увеличился спрос на технологии и оборудование для резки листового металлопроката. При этом заготовки деталей машин должны иметь минимальные припуски для последующей механической обработки. В настоящее время в заготовительных производствах появились современные комплексы термической и гидроабразивной резки. Технологические возможности современного оборудования термической резки листового материала значительно расширились, что позволяет во многих случаях производить окончательную обработку отверстий, проемов и сложных контуров деталей с обеспечением заданных чертежом требований точности и шероховатости поверхностей [2]. Например, установки для лазерной и плазменной резки заготовок из листа обеспечивают точность позиционирования по осям ±0,01 мм, а погрешность вырезаемых контуров — ±0,1 мм. Высокая точность позиционирования обеспечивает точность взаимного расположения вырезаемых контуров заготовки, адекватную требованиям чертежа детали. Точность и качество получаемых на таком оборудовании поверхностей соизмеримы с аналогичными показателями, обеспечиваемыми механической обработкой. Возможность раскроя сложных контуров деталей из листового материала, высокая производительность резки (до 20 м / мин), малые ширина реза и зона термического влияния (диаметр луча составляет сотые доли миллиметра), отсутствие механического воздействия на обрабатываемый материал позволяют в единых технологических процессах использовать способы термической резки взамен некоторых операций механической обработки.

Однако в машиностроении традиционно сложилось разделение производств по технологическим переделам. Приобретая современное оборудование для резки металлопроката, предприятия совершенствуют только технологию раскроя, а последующие операции остаются без изменения. Поэтому возникла производственная необходимость совмещения в единых технологических процессах операций раскроя и последующей механической обработки. Это позволит пересмотреть припуски на механическую обработку в сторону их уменьшения, экономить металл, снизить трудоемкость изготовления изделий. Уменьшить расход металла можно также за счет максимального использования деловых отходов металлопроката. Таким образом, возникла производственная необходимость совмещения в единых технологических процессах операций раскроя и последующей механической обработки. Это позволит пересмотреть припуски на механическую обработку в сторону их уменьшения, экономить металл, снизить трудоемкость изготовления изделий.

Внедрение конкурентоспособных технологий, обеспечивающих высокое качество и минимальную себестоимость продукции, неизбежно приводит к увеличению удельного веса работ по технологической подготовке производства и, как следствие, к необходимости ее автоматизации с целью уменьшения затрат и снижения сроков освоения новых изделий. В таких производствах для решения задач технологической подготовки наиболее эффективным является компьютеризация проектирования технологических процессов [1; 3—5]. Применяемые в машиностроении системы автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов (ТП) характеризуются ориентацией по технологическим переделам и не учитывают возможности новых технологий резки металлопроката. Это приводит к завышенным припускам на механическую обработку, повышенным трудозатратам и перерасходу металла и инструмента. Решение проблемы кроется в разработке сквозных технологических процессов. Все это обусловливает создание САПР ТП сквозных технологических процессов изготовления деталей машин, позволяющих разрабатывать как единые технологические процессы изготовления деталей, так и управляющие программы для оборудования с числовым программным управлением [2].

Результаты исследований и их обсуждение. Базовой основой проектирования технологий в САПР являются состав технологической информации и методы ее представления. Большинство известных [3; 5—9] САПР ТП осуществляют проектирование в интерактивно-алгоритмическом режиме с большей или меньшей степенью автоматизации проектных

Репозиторий БарГУ

процедур, а для обработки деталей сложной конфигурации (например, корпусных и т. п.) — в диалоговом режиме с незначительной степенью автоматизации. Современные САПР ТП реализуют методы проектирования: автоматический [10], полуавтоматический, интерактивный (диалоговый) и «по аналогу» [5; 6; 8; 9]. Каждый из указанных методов проектирования имеет свои достоинства и недостатки. Например, при разработке технологий изготовления относительно несложных деталей, поддающихся группированию в технологические группы, интерактивный режим не эффективен, а при использовании автоматического режима в большинстве случаев требуется адаптация разработанного технологического процесса к условиям производства.

Известно, что в процессе эксплуатации диалоговых систем на предприятиях накапливаются типовые, групповые, единичные технологии, унифицированные операции, планы обработки конструктивных элементов и поверхностей, т. е. постепенно создается произвольная база знаний, адекватная уровню технологической квалификации пользователей. Однако такой подход требует длительного времени адаптации к условиям предприятия, поскольку база знаний создается постепенно, по мере разработки технологических процессов, а также требует высокой квалификации технологов предприятия.

С учетом достигнутого уровня развития САПР ТП концепция сквозного проектирования технологий изготовления деталей из листового металлопроката включает структуру системы, входные и выходные данные, совмещение в едином технологическом процессе операции раскроя заготовок и последующей их механической обработки. Разработанная концепция, являясь основой создания алгоритмов и программ, должна выполнять следующие основные функции:

– рациональную раскладку деталей для последующего раскроя заготовок прямоугольной (на гильотинных ножницах) и произвольной формы (на машинах термической резки);

– сквозное автоматизированное проектирование технологических процессов по схеме: раскладка, раскрой, холодная штамповка, термическая обработка, механическая обработка, лакокрасочные и гальванические покрытия;

– формирование комплекта стандартной технологической документации;

– обмен информацией с другими информационными системами предприятия.

Для реализации этих функций САПР сквозного проектирования технологий должна обеспечить решение следующих основных задач по автоматизации этапов проектирования:

– ведение автоматизированного архива деталей и сборочных единиц;

– ввод информации с электронного чертежа детали, созданного в различных графических системах (AutoCAD, T/FLEX, Компас и др.);

– создание и ведение единой базы данных (БД) технологического назначения, обеспечивающей передачу данных модулям, выполняющим основные функции системы, и обмен информацией с информационными системами предприятий;

– сквозное проектирование технологических процессов (ТП) автоматическим методом с использованием комплексных технологических процессов (КТП) и диалоговым методом, в том числе структурным синтезом с использованием конструктивно-технологических элементов (КТЭ);

– проектирование карт раскроя с расчетом их показателей эффективности;

– проектирование управляющих программ (УП) для оборудования с ЧПУ;

– формирование комплектов стандартной технологической документации.

Программные модули по запросу выбирают состав изделия, характеристики узлов и деталей из архива изделий интегрированной системы. Далее для разработки документации по технологическим переделам используются условно-постоянные параметры единой БД технологического назначения, с возможностью их дополнения и (или) редактирования. Результаты работы модулей передаются в архив технологических процессов интегрированной системы. Архивы интегрированной системы содержат информацию о результатах работы модулей.

Структурная схема такой интегрированной САПР ТП изготовления деталей из металлопроката приведена на рисунке 1.

Репозиторий БарГУ

Рисунок 1. — Фрагмент структурной схемы интегрированной системы

Рисунок 2. — Структура входных и выходных данных интегрированной системы

При функционировании интегрированной САПР ТП изготовления деталей из металлопроката используются входные и выходные данные (рисунок 2). Входные данные системы делятся на условно-постоянные и переменные.

Выходными данными системы являются:

– технологические процессы механической обработки, холодной штамповки, лакокрасочных и гальванических покрытий, термической обработки деталей с выходными документами;

– технологические процессы раскроя деталей из металлопроката.

Технологические процессы хранятся в системе в структурированном виде, на их базе формируется выходная документация.

Для определения граничных условий назначения в технологические процессы изготовления деталей машин из металлопроката операций термической резки были проведены экспериментальные исследования по влиянию современных способов термической резки металлопроката на точность и шероховатость поверхностей заготовок. Эксперименты проводились по программе центрального композиционного ротатабельного планирования второго порядка. Из листового металлопроката различной толщины плазменной и лазерной резкой вырезали заготовки деталей круглой формы определенных диаметров, на которых измеряли диаметральный размер и параметр *Ra* шероховатости поверхности реза. Варьируемые факторы: толщина листа *S*, мм, и радиус реза *R*, мм. По фактической величине диаметров вычисляли отклонения от номинальных размеров (мм), после чего определяли квалитеты точности. Результаты экспериментальных исследований были обработаны методами математической статистики с использованием табличного процессора MS-Excel 2010, и установлены уравнения регрессии второго порядка в виде

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2.$$

Репозиторий БарГУ

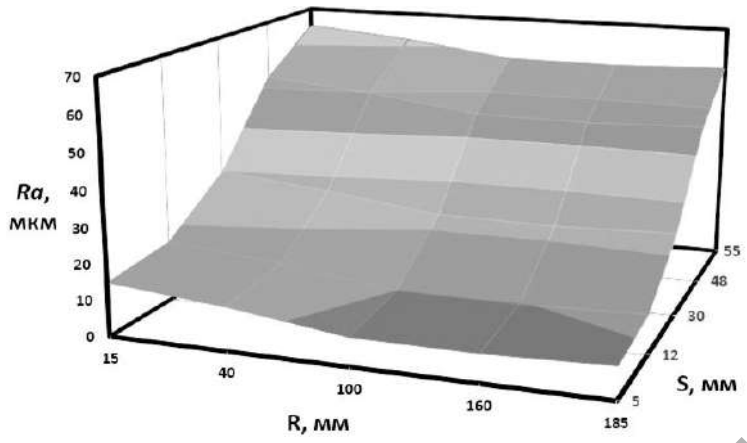


Рисунок 3. — Влияние толщины листа *S* и радиуса реза *R* на величину параметра *Ra* шероховатости поверхности реза при плазменной резке

В результате исследований получены математико-статистические модели зависимостей от варьируемых факторов величин отклонений от номинальных размеров и параметров шероховатости *Ra* поверхностей, полученных плазменной и лазерной резкой. Приведем пример графической зависимости влияния толщины листа *S* и радиуса реза *R* на величину параметра *Ra* шероховатости поверхности реза при плазменной резке (рисунок 3).

Все полученные модели оценивались на адекватность по критерию Фишера и являются адекватными при 5%-м уровне значимости.

При лазерной резке на точность размеров и шероховатость поверхностей оказывают влияние как толщина листа металлопроката, так и радиус реза. Экспериментально установлено, что плазменной резкой можно обрабатывать поверхности по 10…14-му квалитету точности (ГОСТ 25346-89) с шероховатостью *Ra* 8,0…63,0 мкм, а лазерной резкой — по 10…12-му квалитету точности с шероховатостью *Ra* 2,5…10,0 мкм. По результатам экспериментальных исследований сформулированы основные условия выбора операций резки в технологии обработки конструктивно-технологических элементов изделия. Для плазменной резки: $S \le 55$ мм, квалитет не точнее 14-го, шероховатость поверхности $Ra \ge 16{,}0$ мкм (при $S \le 12$ мм), $D1 \ge (0{,}9..1{,}4)S$ (при обработке цилиндрических поверхностей), $D3 \ge (0.9..1.4)S$ при условии $D3 \ge 3$ мм (при обработке конических поверхностей). Для лазерной резки: $S \le 25$ мм, квалитет не точнее 12-го, шероховатость поверхности $Ra \ge 10{,}0$ мкм, $D1 \ge (0{,}3..0{,}4)S$ (при обработке цилиндрических поверхностей), $D3 \ge (0{,}3..0{,}4)S$ (при обработке конических поверхностей). Для гидроабразивной резки: 8 мм $\le S \le$ 100 мм, квалитет не точнее 12-го, шероховатость поверхности $Ra \ge 4{,}0$ мкм, $D1 \ge 2$ мм (при обработке цилиндрических поверхностей). Принятые обозначения: *S* — толщина обрабатываемой поверхности, мм; *D*1 — диаметр обрабатываемого сквозного цилиндрического отверстия, мм; *D*3 — меньший диаметр обрабатываемого сквозного конического отверстия, мм.

На основании результатов экспериментальных исследований, а также анализа поверхностей деталей-представителей, изготавливаемых из металлопроката, разработана библиотека КТЭ, содержащая 45 КТЭ различных типов (поверхности, отверстия, пазы, окна, канавки и др.) со схемами их обработки, включая операции лазерной и плазменной резки, а также с условиями выбора оптимальных схем обработки КТЭ в зависимости от требуемой точности. Фрагмент библиотеки КТЭ приведен на рисунке 4.

Поскольку КТЭ являются обобщением повторяющихся элементов деталей, у которых могут быть изменены размеры (при этом не изменяется соотношение между размерами) или технологические характеристики, то они по определению являются параметризованными элементами. Параметры КТЭ разделены на два вида: геометрические (длина, ширина, диаметр и т. п.) и технологические (точность обработки и шероховатость поверхности).

Репозиторий БарГУ

Эскиз КТЭ	Условия выбора схемы обработки поверхностей КТЭ	Схемы обработки поверхностей КТЭ
КТЭ - окно в сплошном материале на плоской поверхности	Шероховатость Ra ≥ 3,2 мкм Квалитет точности: не точнее 12-го	– фрезерование концевой фрезой или долбление (сквозные) – фрезерование концевой фрезой
	Шероховатость поверхности окна Ra ≥ 4,0 мкм 8 мм ≤ L5 ≤ 100 мм Квалитет точности: не точнее 12-го	– гидроабразивная резка – фрезерование концевой фрезой или долбление (сквозные) – фрезерование концевой фрезой
	Шероховатость поверхности окна Ra ≥ 10,0 мкм L5 ≤ 25 мм Квалитет точности: не точнее 12-го	– фрезерование концевой фрезой или долбление (сквозные) – фрезерование концевой фрезой – лазерная (или гидроабразивная при L5 ≥ 8 мм) резка
	Шероховатость поверхности окна Ra ≥ 16,0 мкм 25 мм < L5 ≤ 55 мм Квалитет точности: не точнее 14-го	– фрезерование концевой фрезой или долбление (сквозные) – фрезерование концевой фрезой – плазменная резка

Рисунок 4. — Фрагмент библиотеки КТЭ

Библиотека КТЭ использована при разработке программного обеспечения БД. Разработанная база данных КТЭ позволяет интегрировать подпрограммы конструкторско-технологической модели в программное обеспечение создаваемой системы и обеспечить формирование технологических процессов методом синтеза операций.

Учитывая недостатки «диалоговых» систем, в основу функционирования САПР технологии изготовления деталей из металлопроката нами положен автоматический метод. В основе его — формализованные комплексные технологические процессы (КТП), содержащие операции, модели оборудования и переходы на определенную группу деталей с условиями их назначения. Комплексный технологический процесс представляет собой избыточный типовой технологический процесс для любой детали, входящей в группу с примерно общими конструктивными и технологическими признаками.

Являясь базой знаний, аккумулирующей опыт предприятий и теорию технологии машиностроения, КТП могут создаваться заново на оригинальные группы деталей и адаптироваться к конкретным условиям предприятия. Адаптация этой системы заключается в настройке БД и технологических алгоритмов к условиям конкретного предприятия. Технологические процессы, полученные в автоматическом режиме, могут корректироваться в полуавтоматическом режиме с дальнейшим переходом в автоматический режим. Для деталей сложной конфигурации используется диалоговый режим или проектирование по аналогу.

Каждый КТП в структуре САПР ТП механической обработки представлен в виде массивов: управляющий массив (УМ); комплексная операция (КО); содержание операции (СО).

Структура управляющего массива (УМ) используется для определения состава технологического процесса в виде упорядоченного перечня комплексных операций.

В УМ перечислены все возможные комплексные операции, которые могут встречаться при обработке деталей определенной группы с логическими условиями их назначения. В результате анализа логических условий выбираются комплексные операции, из которых формируется состав проектируемого технологического процесса.

Комплексная операция (КО) представляет собой массив, имя которого получено из обрабатываемого управляющего массива. В КО описывается перечень входящих операций, на каждую операцию задается перечень моделей оборудования и, в случае необходимости, условия, при выполнении которых будут назначаться операции и модели оборудования.

Массивы КО могут входить как в один, так и в несколько УМ, что дает возможность не дублировать, а использовать один и тот же массив КО в разных УМ.

Репозиторий БарГУ

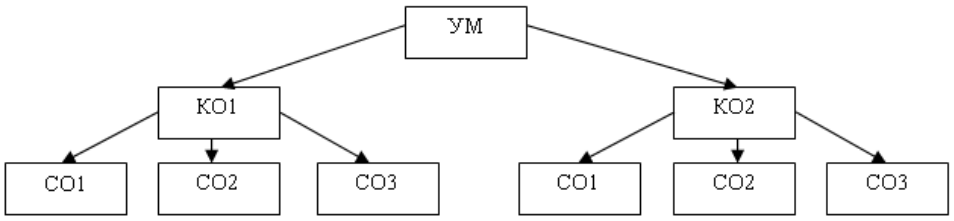


Рисунок 5. — Типовая структура КТП

Содержание операции представляет собой массив, имя которого получено из записи СО массива комплексной операции. В содержании операции задается перечень переходов, которые входят в данную операцию с условиями их назначения. Это могут быть технологические, вспомогательные, контрольные и ненормируемые переходы (рисунок 5).

Конструкторско-технологическую модель любой детали можно представить как совокупность входящих в нее КТЭ. Для каждого КТЭ должны быть определены геометрические параметры, варианты технологии его обработки, а также условия выбора требуемого варианта. На основании фактических значений геометрических параметров для каждого КТЭ происходит выбор из базы данных требуемого варианта технологии его обработки. Технологический процесс изготовления детали синтезируется из выбранных вариантов технологии обработки всех входящих в эту деталь КТЭ.

Разновидностью этого метода является структурный синтез технологического процесса с использованием КТЭ. Формирование технологического процесса изготовления детали методом структурного синтеза происходит путем совмещения выбранных вариантов обработки всех КТЭ детали. Каждую деталь можно представить в виде совокупности ее КТЭ (*см.* рисунок 2). Соответственно, конструкторско-технологическая модель детали — это совокупность входящих в нее КТЭ. Для каждого КТЭ должны быть определены геометрические параметры, варианты технологии обработки, а также условия выбора требуемого варианта технологии обработки. На основании фактических значений геометрических параметров для каждого КТЭ происходит выбор требуемого варианта технологии его обработки. Технологический процесс изготовления детали синтезируется из выбранных вариантов технологии обработки всех входящих в эту деталь КТЭ (рисунок 6).

Рисунок 6. — Схема формирования технологического процесса изготовления детали методом структурного синтеза

Репозиторий БарГУ

Такой подход дает возможность после адаптации к условиям предприятия сразу проектировать технологические процессы изготовления деталей без длительного накопления данных, создать технологию обработки, качество которой определяется не квалификацией технолога, а степенью отлаженности алгоритмов, внесенных в базу знаний.

С другой стороны, этот подход не исключает вмешательства технолога в процесс проектирования на любом этапе. Каждый технолог может сформировать и заложить в систему те технологические решения, которые для него актуальны, а система будет использовать эти решения в процессе автоматического проектирования технологии, ориентируясь на входные данные — информацию чертежа конкретной детали и нормативно-справочные данные конкретного предприятия (оборудование, оснастка и т. д.). Задача технолога состоит в том, чтобы использовать готовые многовариантные алгоритмизированные технологические модули, содержащие конкретные технологические решения и условия, обеспечивающие их выбор в автоматическом режиме.

Совместно с автоматическим режимом работы в САПР ТП могут использоваться также и другие режимы:

– полуавтоматический, позволяющий редактировать технологический процесс, сформированный в автоматическом режиме (на уровне оборудования, операций и переходов);

– интерактивный, построенный на проектировании технологического процесса посредством диалога пользователя с САПР ТП. Технолог, взаимодействуя с базой данных системы через интерфейс, в диалоговых окнах формирует маршрут обработки, оснащает и нормирует технологический процесс, задает его параметры. Интерактивные (диалоговые) САПТ ТП универсальны, позволяют проектировать технологические процессы на детали любого типа. Однако процесс проектирования является более трудоемким по сравнению с автоматическим методом проектирования;

– «по аналогу», основанный на заимствовании уже готовых технологических решений из технологического процесса изготовления детали-аналога с подобными конструктивно-технологическими признаками. При использовании этого метода нет необходимости вносить исходные данные и проектировать новый технологический процесс «с нуля», поэтому трудоемкость проектирования минимальная при условии наличия соответствующей детали-аналога.

Предложенная концепция автоматизации сквозного проектирования технологических процессов изготовления деталей из металлопроката учитывает технологические возможности современного оборудования, базируется на интеграцию систем САПР «Раскрой», САПР ТП механической обработки и САПР управляющих программ и включает систематизацию входных данных, использование комплексных технологических процессов и их формализацию, создание единой базы данных. Представим блок-схему алгоритма функционирования интегрированной САПР ТП раскроя листового металла и механической обработки заготовок, ориентированной на проектирование технологических процессов в автоматическом режиме (рисунок 7).

Программные модули по запросу выбирают состав изделия, характеристики узлов и деталей из архива изделий интегрированной системы. Далее для разработки документации по технологическим переделам используются условно-постоянные параметры базы данных, с возможностью их дополнения и(или) редактирования. Результаты работы модулей передаются в архив технологических процессов автоматизированной системы [11].

Архивы интегрированной системы содержат информацию о результатах работы модулей: 1) структура изделий; 2) характеристики изделий, узлов, деталей; 3) расход материалов на изделия; 4) технологические процессы изготовления изделий, узлов и деталей.

Использование в САПР комплексных технологических процессов не требует высокой квалификации технологов предприятия, так как в КТП заложена база знаний опытных специалистов. В качестве основы для создания совмещенной интегрированной системы использованы также некоторые известные и прошедшие проверку практикой технологические решения по автоматизации технологической подготовки машиностроительного производства.

Репозиторий БарГУ

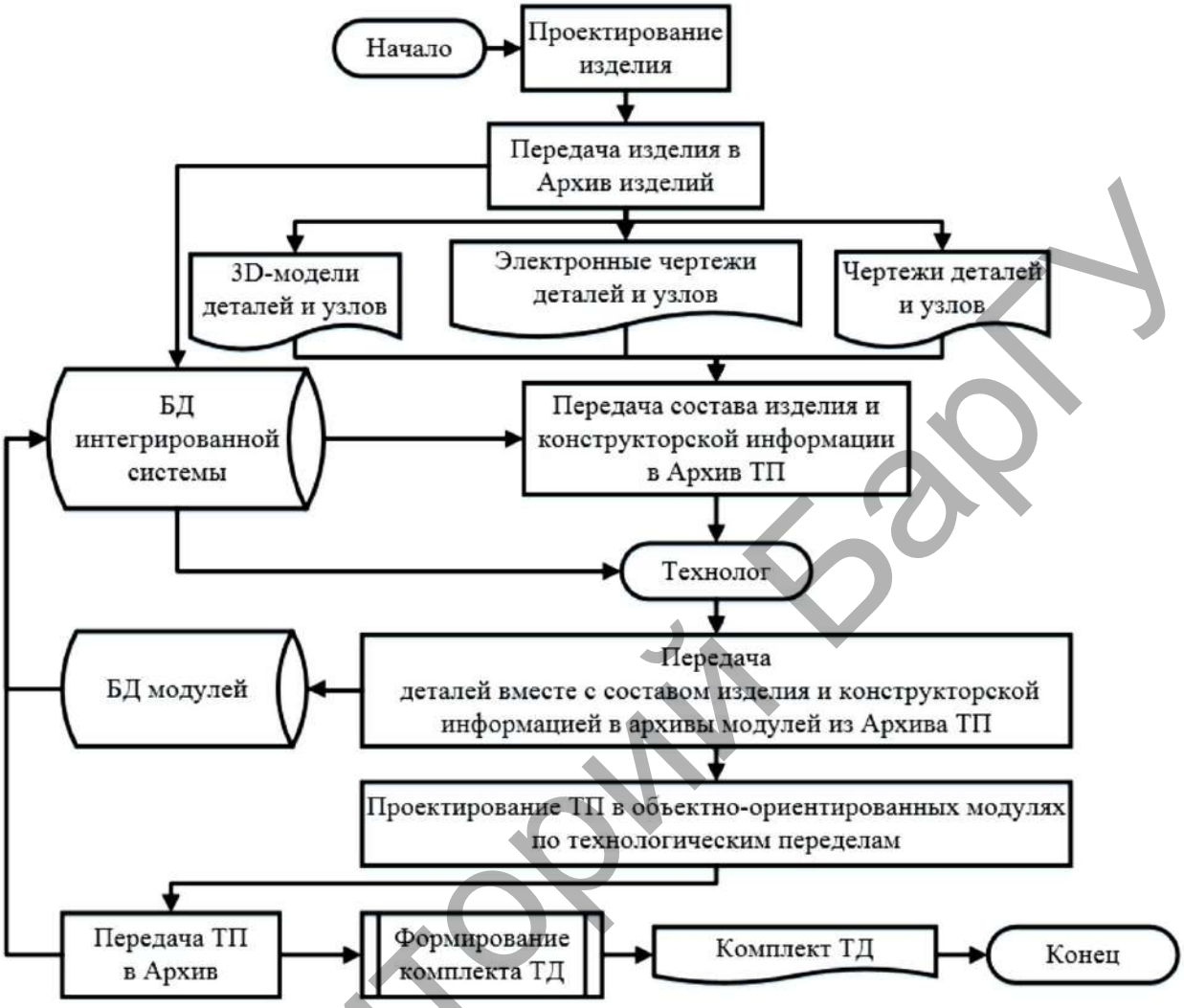


Рисунок 7. — Блок-схема алгоритма функционирования интегрированной системы

Внедрение САПР сквозного проектирования технологий изготовления деталей из металлопроката в производство ОАО «Минский Агросервис» обеспечило экономию металлопроката до 10% за счет снижения припусков на обработку и сокращение сроков подготовки производства на 20—25% [12].

Заключение. Технологические возможности современного оборудования для раскроя листового металлопроката значительно расширились, что позволяет во многих случаях производить обработку отверстий, окон, контуров деталей окончательно с обеспечением заданных чертежом требований точности и шероховатости поверхностей. Возможность раскроя сложных контуров деталей из листового материала с обеспечением необходимой точности взаимного расположения вырезаемых контуров заготовки явились посылкой использования способов резки листового металлопроката совместно с операциями механической обработки в единых технологических процессах.

Концепция сквозного автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления деталей машин из металлопроката базируется на интеграцию объектно-ориентированных модулей и совмещение операций по различным технологическим переделам. На основе экспериментальных исследований разработаны математико-статистические

Репозиторий БарГУ

модели параметров точности и шероховатости поверхностей заготовок при плазменной и лазерной резке листового металла, что позволило установить границы возможного совмещения в едином технологическом процессе операций резки металлопроката и механической обработки поверхностей деталей. Проектирование технологических процессов основывается на методе синтеза. Для этого конструкция детали разбивается на множество конструктивно-технологических элементов (КТЭ). Разработаны алгоритмы функционирования системы сквозного автоматизированного проектирования. Внедрение САПР ТП обеспечивает экономию металлопроката за счет снижения припусков на обработку и позволяет уменьшить сроки подготовки производства.

Список цитируемых источников

1. *Акулович, Л. М.* Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении / Л. М. Акулович, В. К. Шелег. — Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2012. — 488 с.

2. *Таваева, А. Ф.* Автоматизация проектирования раскроя листового материала и подготовка управляющей программы для машин с ЧПУ в САПР «СИРИУС» / А. Ф. Таваева, А. А. Петунин ; под ред. Д. В. Куренкова. — Екатеринбург : УрФУ им. Б. Н. Ельцина, 2015. — 28 с.

3. Система автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей на станкостроительных предприятиях Витебской области / Н. Н. Попок [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. Машиностроение, технологии. — 2011. — № 11. — С. 2—11.

4. *Куликов, Д. Д.* Интеллектуальные программные комплексы для технической и технологической подготовки производства. Системы проектирования технологических процессов / Д. Д. Куликов, Е. И. Яблочников, В. С. Бабанин. — СПб. : СПбГУ ИТМО, 2011. — 136 с.

5. Проектирование технологического процесса механической обработки в САПР ТП ВЕРТИКАЛЬ / ФГОУВПО «Сибирский федеральный университет» ; Хакас. техн. ин-т. — Абакан, 2010. — 49 с.

6. *Жолобов, А. А.* Технология автоматизированного производства / А. А. Жолобов. — Минск : ДизайнПРО, 2000. — 623 с.

7. Основы автоматизации машиностроительного производства / под. ред. Ю. М. Соломенцева. — М. : Высш. шк., 1999. — 312 с.

8. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Н. М. Капустин [и др.] ; под ред. Н. М. Капустина. — М. : Высш. шк., 2004. — 415 с.

9. *Аверченков, В. И.* Автоматизация проектирования технологических процессов / В. И. Аверченков, Ю. М. Казаков. — Брянск : БГТУ, 2004. — 228 с.

10. Система автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки деталей PRAMEN. Руководство пользователя. ОРГС 4664.013.И3. — Минск : ОАО «Институт Белоргстанкинпром», 2005. — 135 с.

11. Функциональная структура системы автоматизированного проектирования технологических процессов для машиностроительных предприятий / А. Г. Гривачевский [и др.] // Проблемы создания информационных технологий : сб. науч. тр. / под ред. Г. Г. Маньшина. — М. : Техполиграфцентр, 2014. — Вып. 25. — С. 39—44.

12. *Акулович, Л. М.* Автоматизация раскроя заготовок деталей из профильного металлопроката / Л. М. Акулович, Д. Б. Ермашкевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2017. — № 1. — С. 76—84.

Поступила в редакцию 15.03.2018

Репозиторий ВГУ

УДК 621.923

Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, О. Н. Ворошухо
Учреждение образования «Белорусский аграрный технический университет»,
Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 99,
220023 Минск, Республика Беларусь, leo-akulovich@yandex.ru

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАВОК С РАДИУСНЫМ ПРОФИЛЕМ

Представлены результаты моделирования топографии магнитного поля в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке беговой дорожки шарикового подшипника. Показано, что охват беговой дорожки полюсным наконечником с обратным радиусом обеспечивает равномерное распределение магнитной индукции в рабочем зазоре. Использование серповидной формы рабочего зазора увеличивает давление ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность. Приводится расчёт величины давления ферроабразивного порошка на локальные участки обрабатываемой поверхности. По результатам экспериментальных исследований показано, что магнитно-абразивная обработка беговой дорожки шарикового подшипника по сравнению с суперфинишированием снижает высоту микронеровностей до двух раз и увеличивает остаточные сжимающие напряжения в среднем на 20%.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка; полюсный наконечник; серповидный зазор; топография магнитного поля; сложнопрофильные поверхности.

Рис. 7. Табл. 3. Библиогр.: 20 назв.

L. M. Akulovich, L. E. Sergeev, O. N. Voroshuho
Belarusian State Agrarian Technical University, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus,
99 Nezavisimosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, leo-akulovich@yandex.ru

MAGNETIC-ABRASIVE PROCESSING OF CYLINDRICAL RADIUS PROFILE ROLLERS

The results of modeling of the topography of the magnetic field in the working gap are presented in the case of magnetic-abrasive processing of the ball bearing treadmill. It is shown that the coverage of the treadmill with a pole tip with a return radius ensures a uniform distribution of the magnetic induction in the working gap. Using the crescent shape of the working gap increases the pressure of the ferro-abrasive powder on the treated surface. Calculation of the magnitude of the pressure of the ferro-abrasive powder on the local parts of the treated surface is given. According to the results of experimental studies, it has been shown that magnetic-abrasive processing of the ball bearing tread path in comparison with superfinishing reduces the microroughness height up to 2 times and increases the residual compressive stresses by an average of 20%.

Key words: magnetic-abrasive processing; pole tip; crescent gap; topography of the magnetic field; composite surfaces.

Fig. 7. Table 3. Ref.: 20 titles.

Введение. Развитие высокоэффективных технологий изготовления заготовок деталей машин (точная штамповка, прокатка, точное литье, порошковая металлургия и т. п.) все более приближает заготовки к требованиям чертежей самих деталей как по форме, так и по точности. Это особенно актуально для поверхностей сложного профиля и является мотивацией совершенствования финишных способов механической обработки и создания принципиально новых методов, в том числе основанных на ином характере взаимодействия инструмента с поверхностью детали.

В машиностроительном производстве применяют разнообразные способы формообразования и финишной обработки сложнопрофильных поверхностей деталей машин с обеспечением заданных параметров точности, шероховатости и физико-механических свойств. В настоящее

© Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Ворошухо О. Н., 2018

Репозиторий БарГУ

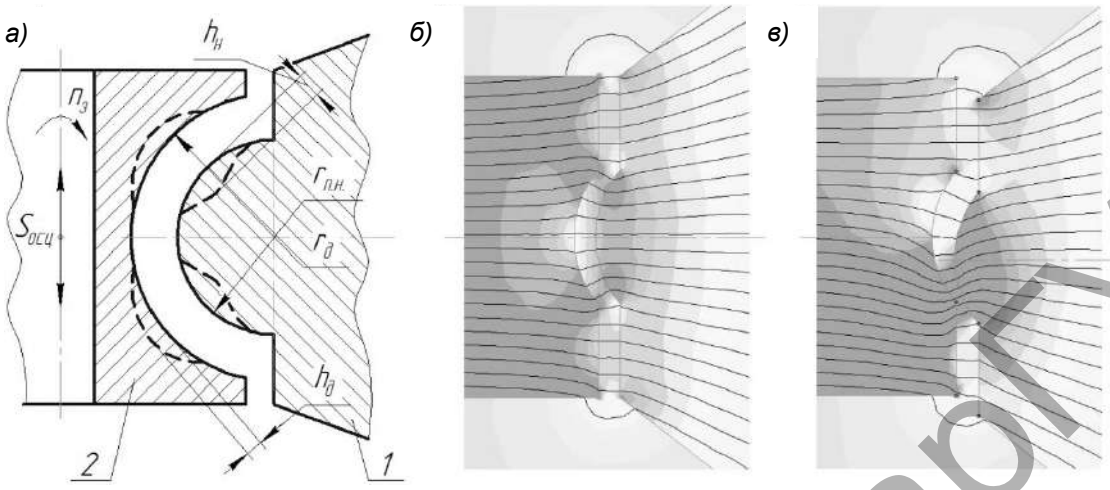
время реализация практически всех способов обработки сложнопрофильных поверхностей осуществляется на оборудовании с числовым программным обеспечением (ЧПУ) [1]. При этом для финишной абразивной обработки требуется создание дорогостоящих специальных инструментов, у которых профиль режущего контура должен быть адекватным профилю обрабатываемой поверхности. Однако при обработке поверхностей таким инструментом на отдельных участках с переменной кривизной режимы резания не одинаковые, а также имеет место изменение значений фактических углов резания (переднего, заднего, углов в плане). Это является причиной возникновения погрешностей формы и разброса величин параметров шероховатости. В результате параметры качества на различных участках могут значительно отличаться друг от друга, и для обеспечения требований чертежа могут потребоваться дополнительные доводочные операции, которые, как правило, выполняются вручную и являются трудоемкими.

В конструкциях изделий машиностроения, и особенно в трансмиссии и подвеске мобильных машин, широко используются детали типа тел вращения с рабочими поверхностями, форма которых отличается от цилиндрической (подшипники качения, шарниры рулевого привода, шаровые опоры и т. п.). К рабочим поверхностям таких деталей предъявляются особо высокие требования как по точности формы и величине параметров шероховатости, так и по показателям физико-механических свойств поверхностного слоя. Так, например, в шарикоподшипниках основная рабочая поверхность — дорожка качения — испытывает циклические напряжения под действием переменных контактных нагрузок, что вызывает контактную усталость. Поэтому долговечность дорожки качения колец шарикоподшипников в значительной мере зависит от точности геометрической формы (волнистость, некруглость и т. п.) и шероховатости поверхности. Образование волнистости всегда сопровождается неравномерностью распределения шероховатости и микротвердости на вершинах и впадинах волн, что составляет дополнительный источник разрушения поверхности при эксплуатации [2].

Особое место в конструкциях машин занимают цилиндрические канавки с радиусным профилем, которые используют в подшипниках качения, в узлах гидроаппаратуры для уплотнения подвижных и неподвижных соединений и т. п. Ниже рассматриваются финишные способы обработки цилиндрических канавок с радиусным профилем на примере беговых дорожек шариковых подшипников качения. При изготовлении колец шарикоподшипников помимо показателей качества поверхностей должны достигаться высокая производительность и экономичность изготовления шарикоподшипников. В технологии производства шарикоподшипников заключительной операцией обработки дорожки качения является финишная абразивная обработка, в основном это суперфиниширование. После заключительной операции поверхность дорожки качения должна иметь шероховатость *Ra* не более 0,16 мкм, допуск круглости — не более 2 мкм, волнистость поверхности — не более 0,2 мкм. Суперфиниширование удаляет только неровности исходного микропрофиля, а погрешности макрогеометрии остаются, поэтому необходимая точность контура должна быть обеспечена на предшествующих операциях. Одинаковую высоту микронеровностей обеспечить на предшествующих операциях технологически затруднительно, поэтому на различных участков поверхности имеет место разная высота микронеровностей профиля. Таким образом, при использовании суперфиниширования для обработки точных поверхностей сложного профиля имеет место неравномерный съем металла с различных участков профиля.

Решение проблемы кроется в использовании гибких инструментов, режущий контур которых формируется в процессе обработки под действием энергии магнитного поля, и разработке новых технологий, позволяющих обрабатывать материалы с высокими механическими свойствами без применения больших динамических усилий. К числу таких технологий относится магнитно-абразивная обработка (МАО) [3—5], которая обеспечивает получение шероховатости поверхности R_a = 0,01…0,4 мкм. По сравнению с традиционными способами абразивной обработки МАО способствует образованию высокого качества поверхности и структуры поверхностного слоя за счет невысокой температуры в зоне резания. Формирование контура режущего инструмента из частиц ферроабразивного порошка (ФАП) при МАО происходит под действием магнитного поля.

Репозиторий БарГУ



1 — полюсный наконечник; *2* — внутреннее кольцо подшипника;

$r_д$ — радиус дорожки; $r_{п.н.}$ — радиус полюсного наконечника; $h_н$, $h_д$ — локальные отклонения геометрических форм полюсного наконечника и беговой дорожки соответственно

Рисунок 1. — Схема МАО беговой дорожки кольца подшипника *(а)*; топография магнитного поля в среднем *(б)* и крайнем *(в)* положениях рабочего зазора при осцилляции

Результаты исследований и их обсуждение. Силовой характеристикой магнитного поля (величиной магнитной индукции *B*), определяющей эффективность воздействия на частицы ФАП по длине образующей детали, можно управлять изменением формы рабочего зазора за счет профилирования полюсного наконечника. Установлено, что с чем меньшими рабочими зазорами ведется обработка, тем эффективнее влияние величины зазора на геометрическую точность обработанной поверхности. Например, в работе [6] предложена и исследована схема МАО с прямолинейным вдоль оси детали *2* движением осцилляции при обработке внутренних колец подшипников (рисунок 1). При этом были использованы полюсные наконечники *1* с профилем рабочих поверхностей, эквидистантным обрабатываемой поверхности.

Исследования топографии магнитного поля в рабочем зазоре при МАО беговой дорожки шарикоподшипника с относительным осциллирующим движением полюсных наконечников электромагнитов показывают, что формируемое магнитное поле в среднем и крайних положениях рабочего зазора (*см.* рисунок 1, *б* и *в*) вызывает миграцию частиц ФАП вдоль из правой части рабочего зазора в левую и наоборот. Причиной наблюдаемой миграции является разрыв цепочек частиц на периферийных участках профиля рабочего зазора при движении осцилляции. В результате значительная часть порошка переносится с поверхностью детали из одного рабочего зазора в другой и непрерывно перераспределяется по длине профиля в рабочем зазоре.

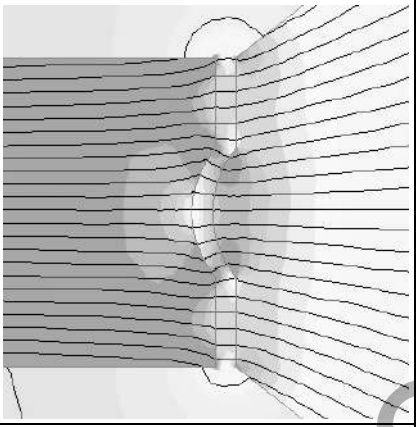
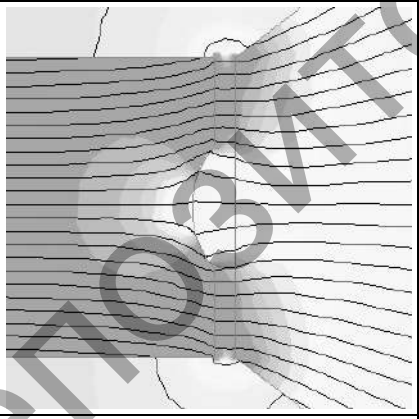
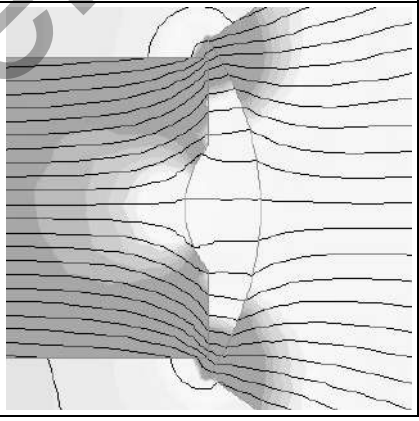
Однако различным участкам дуги профиля соответствует разная интенсивность миграции частиц и, следовательно, различное режущее воздействие частиц ФАП на обрабатываемую поверхность. При сближении полюсного наконечника и обрабатываемой поверхности при осцилляции (*см.* рисунок 1, *б* и *в*) происходит периодическое уплотнение порошка на боковых участках профиля. Это приводит к интенсификации процесса резания на этих участках и, как следствие, к локальным отклонениям (глубиной до 0,5…1 мкм) геометрических форм как беговой дорожки $h_д$ внутреннего кольца подшипника, так и полюсного наконечника $h_н$.

Для обеспечения равномерности съема металла с различных участков профиля беговой дорожки подшипника были проведены исследования по влиянию формы полюсного

Репозиторий БарГУ

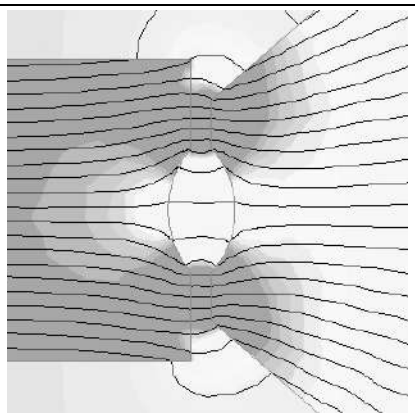
наконечника на однородность магнитного поля в рабочей зоне при МАО беговой дорожки. Были проведены исследования четырех видов формы полюсного наконечника путем компьютерного моделирования топографии магнитного поля в рабочем зазоре, основанного на расчете величин магнитной индукции по методу конечных элементов, с использованием программы Femm. Рассмотрим топографию магнитного поля в рабочем зазоре (рисунок 2), и результаты моделирования (таблица 1).

Т а б л и ц а 1. — Формы профиля полюсных наконечников

Профиль наконечника		Топография магнитного поля в рабочем зазоре	Величина магнитной индукции в зоне беговой дорожки *B*, Тл	Распределение магнитной индукции по контуру беговой дорожки подшипника *B*, Тл	
номер	вид			по краям дорожки	в центре
1	Эквидистантный		0,9…1,2	1,2	0,9
2	Плоский		0,85…0,45	0,85	0,45
3	Радиусный с охватом ширины кольца		0,35…0,3	0,35	0,3

Репозиторий БарГУ

Окончание таблицы 1

Профиль наконечника		Топография магнитного поля в рабочем зазоре	Величина магнитной индукции в зоне беговой дорожки *B*, Тл	Распределение магнитной индукции по контуру беговой дорожки подшипника *B*, Тл	
номер	вид			номер	вид
4	Радиусный с охватом ширины дорожки		0,5…0,6	0,6	0,5

Моделированием магнитного поля установлено, что эквидистантные полюсные наконечники (*см.* таблицу 1, вид 1), которые использовались в работе Л. К. Минина [6] при обработке дорожки подшипника, обеспечивают неравномерную обработку по периметру дорожки из-за наличия концентраторов магнитной индукции по краям беговой дорожки. Величина магнитной индукции по краям беговой дорожки имеет максимальное значение, а к центру уменьшается. Для равномерной обработки беговой дорожки необходимо обеспечить равномерную величину индукции магнитного поля по периметру беговой дорожки подшипника.

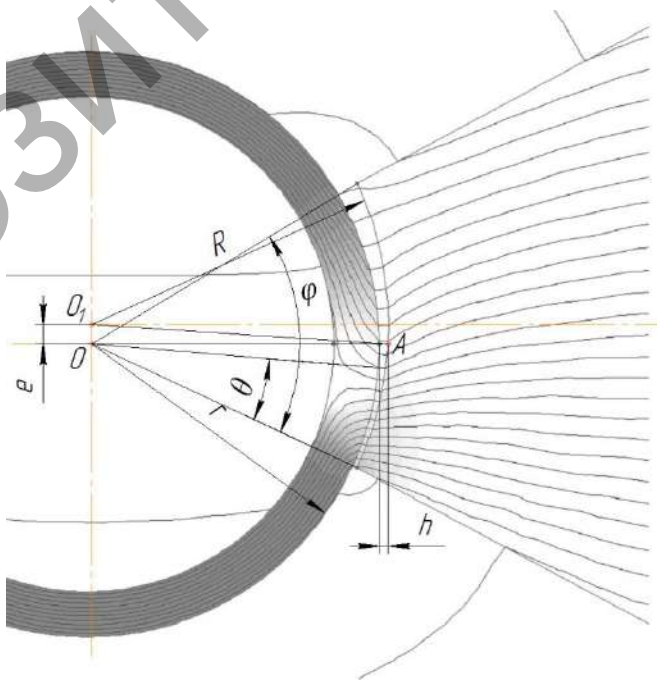


Рисунок 2. — Схема топографии магнитного поля при серповидной форме рабочего зазора при МАО беговой дорожки кольца подшипника

Репозиторий БарГУ

Исследование топографии магнитного поля в рабочем зазоре с плоскими полюсными наконечниками (*см.* таблицу 1, вид 2) показало, что величина магнитной индукции в беговой дорожке будет иметь меньшее значение, так как концентраторами выступают цилиндрические поверхности кольца подшипника и при этом величина магнитной индукции от центра беговой дорожки к её краям является неравномерной.

В рабочем зазоре с радиусными полюсными наконечниками с охватом ширины кольца (*см*. таблицу 1, вид 3) величина магнитной индукции равномерна по периметру беговой дорожки, но не достигает требуемой величины для удержания ферроабразивного порошка, весь порошок концентрируется в зоне цилиндрических поверхностей.

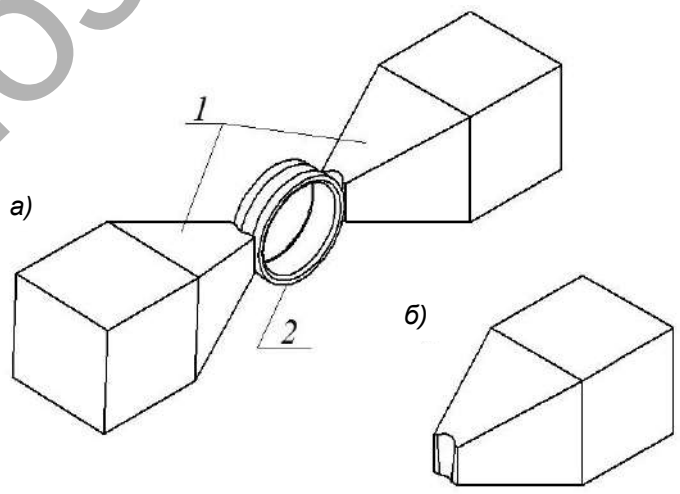
Исполнение радиусных полюсных наконечников с охватом ширины дорожки (*см.* таблицу 1, вид 4), позволило получить требуемую величину магнитной индукции по периметру беговой дорожки с сохранением её равномерности. В зонах, где форма полюсного наконечника эквидистантна форме обрабатываемого кольца подшипника, величина магнитной индукции имеет наибольшее значение, что создаёт «запирающие» зоны и не даёт ФАП выйти из зоны обработки беговой дорожки. В зоне обработки беговой дорожки величина магнитной индукции в 2 раза меньше, чем в «запирающих» зонах.

По результатам исследований топографии магнитного поля предложена и реализована схема обработки беговых дорожек внутренних колец подшипников качения (рисунок 3, *а*). В представленной схеме для обработки используются серповидные полюсные наконечники с радиусным охватом ширины дорожки подшипника.

При МАО в серповидном рабочем зазоре (*см.* рисунок 2) на отдельные участки поверхности воздействует различное по величине давление ферроабразивной «щетки», адекватное величине градиента магнитного поля.

Величина зазора в диаметральном сечении имеет различное значение, что резко изменяет градиент магнитной индукции по высоте рабочей зоны. Неравномерность распределения магнитного потока в различных частях рабочей зоны усиливается концентрацией ферроабразивного порошка в серповидном воздушном зазоре.

Математическое моделирование заключается в расчете величины давления ФАП на обрабатываемую деталь в рабочем зазоре. Рассмотрим схему МАО с полюсными наконечниками, имеющими конфигурацию в соответствии с предлагаемым расчетом по величине силы, приходящейся на единицу площади обрабатываемой поверхности детали.



1 — полюсные наконечники; *2* — кольцо подшипника

Рисунок 3. — Схема МАО беговых дорожек внутреннего кольца подшипника (*а*) и профиль полюсного наконечника (*б*)

Репозиторий БарГУ

Деталь помещается в рабочую зону, пространство которой между полюсными наконечниками и ее поверхностью заполняется ФАП (*см.* рисунок 2). Обозначим угол охвата полюсного наконечника электромагнита φ, величина которого изменяет давление ФАП на обрабатываемую поверхность. Расстояние OO_1 является эксцентритетом *e*.

Обозначим через $c = R - r$ средний зазор между деталью и полюсным наконечником, от которого производится отсчет угловой координаты некоторой точки внутри рабочего зазора. Тогда для OAO_1

$$OA = r + h = e\cos\theta + \sqrt{(r+c)^2 - e^2\sin^2\theta} = e\cos\theta + (r+c)\sqrt{1 - \left(\frac{e}{r+c}\right)^2\sin^2\theta},$$

где $e \approx c$ и поскольку $R >> e$, то $\frac{e^2}{(r+c)^2}$ пренебрежимо мало и может быть исключено из дальнейшего рассмотрения. В результате имеем:

$$\frac{h}{c} = 1 + \left(\frac{e}{c}\right)\cos\theta. \qquad (1)$$

Отношение $\frac{h}{c}$ или ε является относительным эксцентриситетом. Считаем, что высота детали велика по сравнению с радиусом *R* и поэтому не учитываем краевые эффекты. Считаем, что $x = r\theta$ и полагаем, что согласно [7],

$$\frac{dp}{d\theta} = 6\eta V r\frac{h - h_0}{h^3}, \qquad (2)$$

где V — скорость вращения детали, м / с;

h_0 — значение величины рабочего зазора, при котором давление p = max.

Подставляя *h* из уравнения (1) в (2) и, интегрируя, получаем

$$p = \frac{6\eta V r}{c^2}\left[\int\frac{d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^2} - \frac{h_0}{c}\int\frac{d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\right]. \qquad (3)$$

Поскольку ферроабразивная «щетка» выдерживает только определенные давления, то следует принимать реалистические граничные условия, заключающиеся в установлении области $0 \le \theta \le \frac{\pi}{2}$ $p = 0$ при $\theta = 0$ и $\theta = \theta_2$.

$$\frac{dp}{d\theta} = 0 \text{ при } \theta = \theta_1 \text{ и } \theta = \theta_2.$$

Используя метод замены переменных [8], определяем интегралы в выражении (3), что позволяет найти давление *p*:

$$p = \frac{6\eta V r}{c^2}\left[\frac{\varepsilon(2+\varepsilon\cos\theta)\sin\theta}{(2+\varepsilon^2)(1+\varepsilon\sin\theta)^2}\right].$$

Репозиторий БарГУ

Для определения давления необходимо установить, какая сила действует на конкретный локальный участок обрабатываемой поверхности. Чтобы найти это значение, рассмотрим элементарную площадь *dA*, соответствующую *dA* cosθ и *dA* sinθ, — вдоль линии центров OO_1 и перпендикулярностей. Силу *F*, приходящуюся на единицу площади *dA*, раскладываем на *F*sinθ и *F*cosθ, и поскольку *F*sinθ представляет тангенциальную составляющую, производящую удержание частиц ФАП в рабочем зазоре, то рассмотрению она не подлежит. Основной интерес представляет нормальная составляющая *F*cosθ ввиду того, что ее воздействие на обрабатываемую поверхность определяет эффективность съема материала.

Угол φ определяется габаритными размерами и профилем полюсного наконечника, а угол θ характеризует зону резания на участке серповидного зазора, величина которой в зависимости от вида серповидного зазора может иметь различные значения.

Чтобы найти угол φ, предлагается соотношение

$$F\cos\theta = Br\int_0^{\frac{\pi}{2}} p\cos\theta\,d\theta = Br\left(p\sin\theta\Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - \int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{dP}{d\theta}\sin\theta\,d\theta\right) = Br\left(p - 6\eta Vr\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{h-h_0}{h^2}\sin\theta\,d\theta\right) =$$

$$= Brp - 6\eta VBr^2\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{h-h_0}{h^2}\sin\theta\,d\theta.$$

Согласно выражению (4),

$$F\cos\varphi = \frac{6\eta VBr^2}{c^2}\left(\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{\sin\theta\,d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^2} - \frac{h_0}{c}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{\sin\theta\,d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\right) =$$

$$= \frac{6\eta VBr^2}{c^2}\left(\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^2} - \frac{h_0}{c}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3} - \int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{\sin\theta\,d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^2} + \frac{h_0}{c}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{\sin\theta\,d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\right).$$

Опуская ряд промежуточных вычислений, получаем при ε < 1 (серповидный зазор)

$$F\cos\varphi = \frac{6\eta VBr^2}{c^2}\left(\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{\cos\theta\,d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^2} - \frac{h_0}{c}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{\cos\theta\,d\theta}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\right) =$$

$$= \frac{6\eta VBr^2}{c^2}\left(\begin{array}{l}\dfrac{1}{1-\varepsilon^2}\left(1-\dfrac{2\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}arctg\dfrac{(1-\varepsilon)}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}\right) - \dfrac{h_0}{c}\dfrac{1}{2\left(1-\varepsilon^2\right)}\times \\ \times\left(1+\dfrac{1}{1-\varepsilon^2}\left(1-\dfrac{2\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}arctg\dfrac{(1-\varepsilon)}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}\right)+\dfrac{2\varepsilon}{1-\varepsilon^2}\left(\varepsilon-\dfrac{2}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}arctg\dfrac{(1-\varepsilon)}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}\right)\right)\end{array}\right).$$

Таким образом, *F*cosφ непосредственно определяет силу, с которой ферроабразивная «щетка» воздействует на каждый локальный участок обрабатываемой поверхности, и осуществление ее расчета через геометрические параметры профиля полюсного наконечника позволяет обеспечить качество обработки различных деталей сложного профиля.

Репозиторий БарГУ

Для проверки теоретических положений были проведены экспериментальные исследования. В качестве образцов использовали кольца подшипников $d_{вн} = 60$ мм из стали 12Х2Н4А (ГОСТ 4543-71) твердостью 61…63 *HRC*. Финишная обработка деталей по заводской технологии состояла из шлифования и последующего суперфиниширования, по сравниваемой — из шлифования и МАО.

Согласно специальным техническим условиям структура подшипниковых сталей должна состоять из скрытокристаллического или мелкокристаллического мартенсита и мелких избыточных карбидных включений.

Существенное влияние на износостойкость и усталостную прочность деталей машин оказывают физико-механические свойства поверхностного слоя [9]. Практика и результаты исследований показали, что в некоторых случаях одинаковые по точности и шероховатости поверхности деталей машин имеют различные эксплуатационные свойства [10; 11]. Это объясняется тем, что шероховатость как самостоятельный параметр не может характеризовать физическое состояние поверхностного слоя металла. У поверхностей с одинаковой конечной шероховатостью могут быть неодинаковый характер и величина остаточных напряжений, различная микротвердость. Установлено [12; 13], что каждый метод обработки оказывает определенное воздействие на геометрические параметры и физические свойства поверхностного слоя деталей машин.

Влияние МАО на физическое состояние металла поверхностного слоя обусловлено абразивным резанием (диспергирование металла), пластической деформацией микронеровностей (выглаживание), химическими реакциями (воздействие на металл химически активных веществ, находящихся в рабочей среде), а также электромагнитными и адгезионными явлениями [14]. Это вызывает необходимость проведения исследований влияния ряда технологических факторов МАО на физико-механические свойства поверхностного слоя.

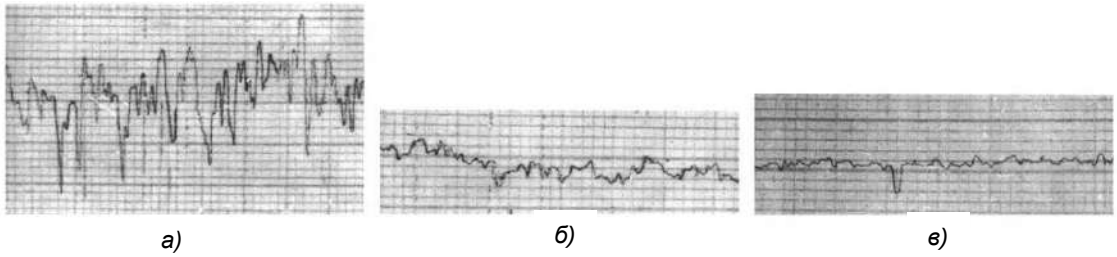
Рассмотрим топографию поверхности деталей после различных операций финишной обработки (рисунок 4). Шероховатость *Ra* после шлифования, суперфиниширования и МАО составляет 0,6; 0,2 и 0,1 мкм соответственно.

Представим профилограммы поверхностей после таких методов обработки (рисунок 5).

а) *б)* *в)*

а — шлифование; *б* — суперфиниширование; *в* — МАО

Рисунок 4. — Топография поверхности стали 12Х2Н4А после финишной обработки. ×150



а) *б)* *в)*

а — шлифование; *б* — суперфиниширование; *в* — МАО. ×(ГУ — 200, ВУ — $4 \cdot 10^{-3}$)

Рисунок 5. — Профилограммы поверхности стали 12Х2Н4 после финишной обработки

Репозиторий БарГУ

Варьирование режимами осуществлялось следующим образом: *V* — скорость вращения, 5 м / с; δ — рабочий зазор, 1 мм; Δ — зернистость ферроабразивного порошка, 160/200 мкм. Смазочно-охлаждающие технологические средства — СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, ФАП Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81.

Переменными факторами являлись: *B* — магнитная индукция, 0,8…1,1 Тл; *t* — время обработки, 45…120 с. Оборудование — магнитно-абразивный станок ФАС-1.

При неупорядоченном расположении микронеровностей, образованных традиционными методами обработки, наиболее благоприятным является профиль, обладающий развитой несущей поверхностью [15]. Для обеспечения граничного трения следует иметь оптимальное значение шероховатости поверхностного слоя *Ra* = 0,08…0,63 мкм. Поверхностный слой, образованный при шлифовании имеет большую высоту микронеровностей, чем при суперфинишировании и МАО, что может привести к снижению его несущей способности и повышению вероятности падения давления в масляном слое. МАО образует наиболее приближенный к оптимальному микрорельеф, который, однако, по сравнению с суперфинишированием отличается меньшей упорядоченностью. Вместе с тем сглаживание вершин и впадин микронеровностей увеличивает действительную площадь контакта трущихся поверхностей. Согласно работе [16], контактная жесткость и износостойкость поверхностей тем выше, чем больше их опорная площадь и меньше углы профиля микронеровностей, что и характерно для слоя, созданного МАО.

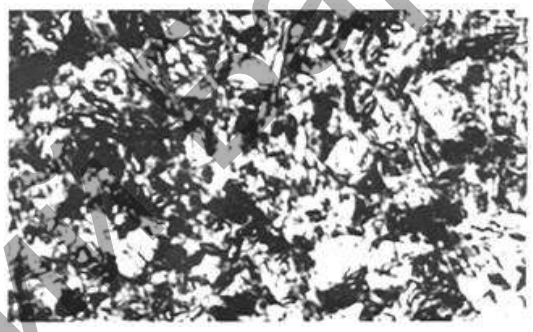


Рисунок 6. — Структура стали 12Х2Н4А после термообработки (цементация, закалка, отпуск). ×100

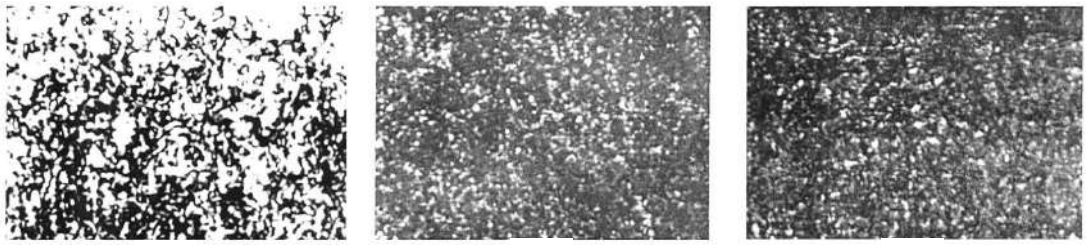
Рассмотрим исходную структуру стали 12Х2Н4А после цементации, закалки и отпуска (рисунок 6). Данная структура имеет типовую морфологию кристаллов в составе твердого раствора (мартенсита) и полностью отвечает особенностям фазовых мартенситных превращений [17].

При шлифовании высоколегированной закаленной стали в результате вторичной закалки образуется поверхностный слой, имеющий аустенитно-мартенситную структуру. Его структура отличается от структуры стали после обычной закалки повышенным содержанием остаточного аустенита (до 80%) и увеличенным параметром кристаллической решетки. Поскольку пластической деформации в первую очередь подвергаются зерна остаточного аустенита, то в процессе обработки скопления дислокаций сосредотачивается именно в аустенитной фазе, что часто приводит к образованию микро- и макротрещин. В связи с этим при циклическом воздействии контактных нагрузок деформированные зоны остаточного аустенита служат концентраторами напряжений и способствуют снижению прочности [18].

Представим структуру поверхностного слоя стали 12Х2Н4А после шлифования *(а)*, хонингования *(б)* и МАО *(в)* (рисунок 7). При травлении детали после шлифования не ее поверхности выявлены границы зерен остаточного аустенита. Глубина этого слоя составляет 30…50 мкм. Как указывалось выше, в деталях, подвергшихся контактным циклическим нагрузкам, на последующих финишных операциях следует удалять образовавшийся белый поверхностный слой. После суперфинишированиия и МАО структура имеет мелкодисперсное строение с равномерно распределенными мелкими округленными зернами карбидов. Такая структура способствует росту контактной прочности и износостойкости и в полной мере соответствует требованиям специальных технических условий.

Представлены данные по определению остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после различных операций финишной обработки (таблица 2). Поскольку при МАО процесс преимущественно носит характер тонкого пластического деформирования, то происходит образование сжимающих напряжений, как и после суперфинишированиия.

Репозиторий ЗГУ



а) *б)* *в)*

Рисунок 7. — Микроструктура поверхностного слоя

Представим сравнительные результаты определения остаточного аустенита и размеров кристаллической решетки в поверхностном слое деталей после различных методов обработки (таблица 3). Время обработки при МАО в среднем составляет 60 с.

После МАО структура приповерхностного слоя преобразовалась в мелкодисперсную с трудноразличимыми размерами зерен. Карбиды пластинчатой формы исчезли, превратившись в мелкие округлые зерна, равномерно распределенные по всему полю косого шлифа.

Т а б л и ц а 2. — Величина остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое после различных методов финишной обработки

Метод обработки	Величина остаточных напряжений, МПа
Исходное состояние (цементация, закалка, отпуск)	660
Шлифование	750
Суперфиниширование	810
Магнитно-абразивная обработка	980

Т а б л и ц а 3. — Влияние метода финишной обработки на количество остаточного аустенита и величину блоков когерентного рассеяния

Метод обработки	Остаточный аустенит, %	Размер областей когерентного рассеяния, нм
Исходное состояние (цементация, закалка, отпуск)	20,7	36,7
Шлифование	25,1	48,2
Суперфиниширование	16,2	43,9
МАО	14,8	42

Применение таких финишных операций, как суперфиниширование и МАО, приводит к устранению дефектного слоя глубиной 50 мкм и образованию характерного микрорельефа и структуры поверхности, обеспечивающих более качественные характеристики материала по сравнению со шлифованием. В отличие от суперфиниширования, МАО обеспечивает увеличение остаточных сжимающих напряжений на поверхности деталей в среднем на 20% при равных размерах областей когерентного рассеяния.

Уменьшение содержания остаточного аустенита при МАО обусловлено деформациями, возникающими в поверхностном слое при обработке, так как остаточный аустенит имеет низкую устойчивость в условиях деформации даже при небольших температурах. Кроме того, при МАО удаляется искаженный шлифованием поверхностный слой, который характеризуется большим количеством остаточного аустенита, чем матрица.

Репозиторий БарГУ

Исследованиями [19; 20] установлено, что если превалирует фактор теплового воздействия, то в поверхностном слое формируются растягивающие остаточные напряжения I рода. Проведенные исследования показывают: при МАО в тонком поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия, а это свидетельствует, что основной причиной их возникновения является пластическая деформация при резании.

Характеристики тонкой кристаллической структуры поверхностного слоя (остаточные напряжения II рода и блоки когерентного рассеивания) значительно влияют на прочность металлов и сплавов. Состояние высокой прочности сталей и сплавов характеризуется наличием больших искажений решетки и значительной дисперсностью блоков. Наибольшее влияние на остаточные напряжения II рода и дисперсность блоков когерентного рассеяния оказывают магнитная индукция в рабочем зазоре и зернистость порошка, меньшее влияние — время обработки.

Величина и характер распределения остаточных напряжений I рода по глубине поверхностного слоя после МАО показали, что в тонком поверхностном слое формируются остаточные напряжения сжатия, достигающие 1,1 ГПа. Максимальные значения напряжения имеют непосредственно у поверхности и снижаются до 0 на глубине 10 мкм.

Заключение. По результатам исследований топографии магнитного поля реализована схема обработки беговых дорожек внутренних колец подшипников качения, в которой для обработки используются серповидные полюсные наконечники с радиусным охватом ширины дорожки подшипника. Реализация данной схемы обработки при проведении экспериментов обеспечила равномерный процесс микрорезания по всей периферии беговой дорожки подшипника и увеличила качество поверхности в 2 раза по сравнению с суперфинишированием. Произведён математический расчёт величины давления ФАП на обрабатываемую поверхность.

Проведённые исследования, показали, что МАО обеспечивает увеличение остаточных сжимающих напряжений на поверхности деталей в среднем на 20% при равных размерах областей когерентного рассеяния. После МАО структура имеет мелкодисперсное строение с равномерно распределенными мелкими округленными зернами карбидов, что способствует росту контактной прочности и износостойкости деталей машин.

Список цитируемых источников

1. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. — Минск : Беларус. навука, 2014. — 375 с.

2. Финишная обработка поверхностей / С. А. Клименко [и др.] ; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. — Минск : Беларус. навука, 2017. — 377 с.

3. *Коновалов, Е. Г.* Основы электроферромагнитной обработки / Е. Г. Коновалов, Ф. Ю. Сакулевич. — Минск : Наука и техника, 1974. — 272 с.

4. *Wantuch, E.* Magnetic-abrasive Beatbeitung / E. Wantuch, H. Zutze // New Fertigungs technologies. — 2002. — No. 5. — S. 232—237.

5. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. — Минск : Физико-техн. ин-т, 1997. — 416 с.

6. *Минин, Л. К.* Магнитно-абразивное полирование наружных поверхностей вращения высокоточных деталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л. К. Минин. — Минск : Акад. наук БССР, 1975. — 24 с.

7. *Мур, Д.* Основы применения трибоники / Д. Мур. — М. : Мир, 1978. — 482 с.

8. *Никольский, С. М.* Курс математического анализа / С. М. Никольский. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. — 592 с.

9. Подшипники качения. Справочник / под ред. В. Н. Нарышкина, Р. В. Коросташевского. — М. : Машиностроение, 1984. — 280 с.

10. *Гаркунов, Д. Н.* Триботехника / Д. Н. Гаркунов. — М. : Машиностроение, 1989. — 328 с.

11. Трение, изнашивание и смазка. Справочник : в 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В Алисина. — Кн. 1. — М. : Машиностроение, 1978. — 400 с.

Репозиторий ВГУ

12. *Никифоров, А. Д.* Современные проблемы науки в области технологии машиностроения / А. Д. Никифоров. — М. : Высш. шк., 2006. — 356 с.

13. *Ящерицын, П. И.* Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. — Минск : Выш. шк., 1990. — 416.

14. *Yascheritsin, P. I.* The comparative appraisal of quality characteristecs of holes after different finishing methods / P. I. Yascheritsin, L. E. Sergeev, M. I. Sidorenko // Adv. Perform. Mater, 1997. — Vol. 4. — No. 3. — P. 337—347.

15. *Сакулевич, Ф. Ю.* Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. — Минск : Наука и техника, 1981. — 326 с.

16. *Ящерицын, П. И.* Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П. И. Ящерицын, А. К. Цокур, М. Л. Еременко. — Минск : Наука и техника, 1973. — 148 с.

17. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник : в 2 т. / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. — М. : Металлургия, 1991. — Т. 1, кн. 2. — 462 с.

18. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / А. Н. Резников [и др.] ; под ред. А. Н. Резникова. — М. : Машиностроение, 1977. — 390 с.

19. *Кулаков, Ю. М.* Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков. — М. : Машиностроение, 1979. — 216 с.

20. *Ящерицын, П. И.* Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П. И. Ящерицын. — Минск : Наука и техника, 1974. — 606 с.

Поступила в редакцию 15.03.2018

Репозиторий БарГУ

УДК 621.373:621.3.014.12

А. В. Алифанов[1], И. А. Богданович[1], А. А. Лях[2], В. В. Малеронок[1]
[1]Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru
[2]Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220004 Минск, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Исследовано влияние частоты переменного тока и режимов магнитно-импульсной обработки стальных образцов на величину напряжения тока, проходящего через скин-слой.

Ключевые слова: стальные образцы; токи высокой частоты; скин-слой; магнитно-импульсная обработка; напряжение тока.
Рис. 5. Библиогр.: 4 назв.

A. V. Alifanov[1], I. A. Bogdanovich[1], A. A. Lyah[2], V. V. Maleronok[1]
[1]Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru
[2]Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevicha Str., 220004 Minsk, the Republic of Belarus

STUDY OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF STEEL SAMPLES AFTER MAGNETIC-IMPULSE TREATMENT

The influence of frequency of alternating current, that passes through the skin layer, and modes of magnetic-impulse treatment of steel samples on the voltage value is investigated.

Keywords: steel samples; high-frequency currents; skin layer; magnetic-impulse treatment; voltage.
Fig. 5. Ref.: 4 titles.

Введение. Под воздействием магнитно-импульсной обработки (МИО) на поверхности стального изделия образуется упрочненный слой толщиной до 70 мкм и более. В этом слое устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла [1].

Анализ физико-механических свойств материала, подвергшегося высокоэнергетическому воздействию, можно проводить различными методами как разрушающего, так и неразрушающего контроля, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. К числу наиболее существенных недостатков можно отнести следующее: применение дорогостоящего лабораторного оборудования и значительные затраты времени как на проведение самого исследования, так и в процессе подготовки к нему [2; 3].

Для исследования влияния параметров МИО на упрочняющий эффект металлических образцов предлагается более простой и удобный в использовании метод исследования свойств упрочненного слоя стальных изделий, основанный на проявлении скин-эффекта при прохождении через металлический образец тока высокой частоты. Скин-эффект, или поверхностный, — эффект уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения в глубь проводящей среды. В результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению,

© Алифанов А. В., Богданович И. А., Лях А. А., Малеронок В. В., 2018

Репозиторий БарГУ

а преимущественно в поверхностном слое. А так как при магнитно-импульсном упрочнении происходит воздействие именно на верхние слои изделия, то анализ данного эффекта позволит говорить о качестве упрочнения (однородность, мелкодисперсность).

Основная часть. ***Методика проведения экспериментов.*** Исследования проводились на электроизмерительном комплексе, разработанном и изготовленном в ФТИ НАН Беларуси с использованием метода исследования скин-слоя, образующегося при протекании токов высокой частоты (ТВЧ) (метод и схема устройства разработаны в БарГУ) [4].

Комплекс состоит из трех частей: одна предназначена для генерирования ТВЧ с целью создания в стальном образце скин-слоя, вторая часть — для генерирования постоянного тока и измерения напряжения при прохождении тока через скин-слой. Через напряжение расчетным путем можно выйти на электросопротивление скин-слоя. Третья часть представляет собой измерительную ячейку для установки опытного стального образца.

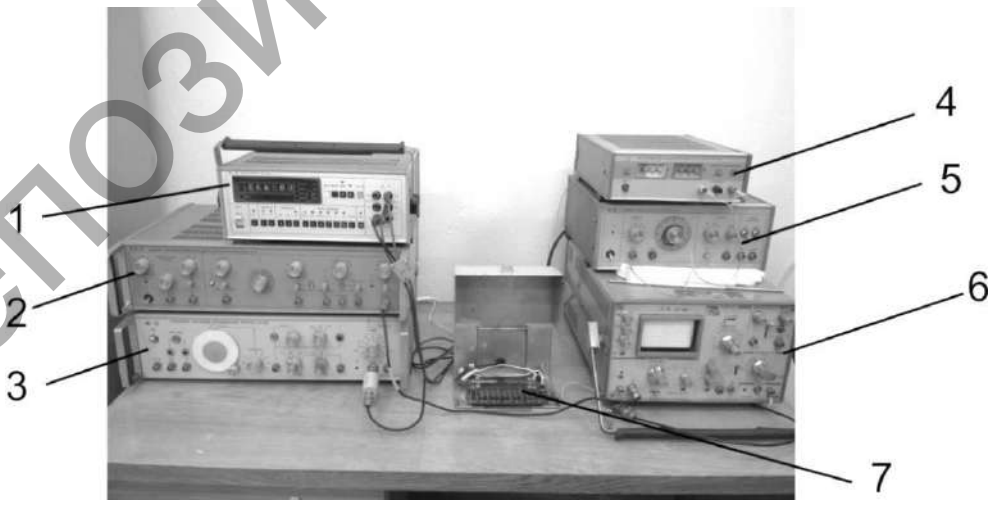
Представим электроизмерительный комплекс для исследования влияния режимов МИО на напряжение, возникающее в скин-слое при прохождении ТВЧ (рисунок 1). Для генерирования ТВЧ служат генератор сигналов специальной формы Г6-28 и генератор сигналов специальной формы Г6-34, для создания постоянного тока — источник питания постоянного тока Б5-43. Для проведения измерений используются вольтметр В7-46 и осциллограф С1-65.

Для проведения исследований были изготовлены образцы из стали 40Х (без термообработки и с термообработкой — закалкой) диаметром 10 мм и длиной 100 мм, а также использовались металлорежущие сверла из стали Р6М5 (закалённые) с такими же размерами.

Измерительная ячейка (рисунок 2) служит для определения электрических параметров образца *3*, который устанавливается в специальные зажимы *2*.

При проведении исследований менялась частота переменного тока от 1 МГц до 0,05 МГц и, соответственно, толщина скин-слоя, а также изменялись энергия и количество импульсов, и определялось их влияние на величину напряжения в скин-слое.

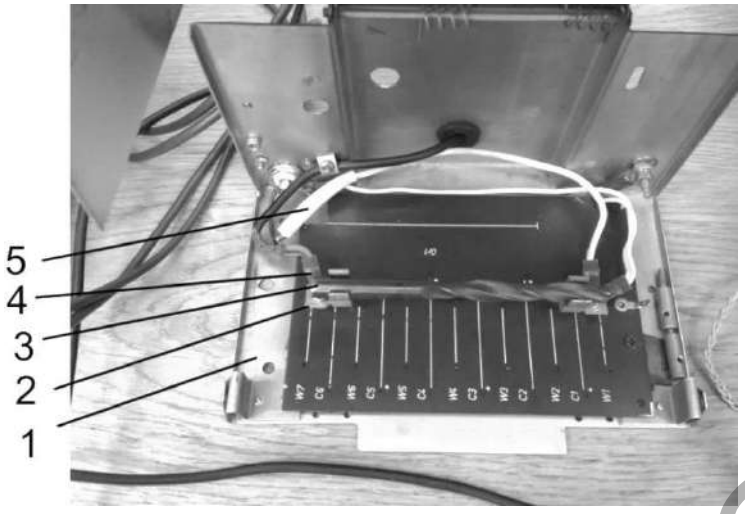
Представлены результаты исследований влияния частоты переменного тока, толщины скин-слоя, энергии и количества импульсов на величину напряжения в скин-слое (рисунки 3—5).



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

Рисунок 1 — Электроизмерительный комплекс для исследования влияния режимов МО на электросопротивление

Репозиторий БарГУ



1 — заземленный корпус; *2* — зажим; *3* — образец; *4* — контакт для подвода тока высокой частоты; *5* — подводящие и измерительные провода

Рисунок 2. — Измерительная ячейка для определения электрических параметров образцов

Приведены результаты исследований образцов из стали 40Х, как закалённых, так и незакалённых, при следующих режимах: энергия 4 кДж, количество импульсов от 1 до 10 (*см.* рисунок 3) и энергия 6 кДж, количество импульсов от 1 до 10 (*см.* рисунок 4).

Из рисунков видно, что в незакалённых образцах напряжение в скин-слое приближается к нулю и почти не зависит от толщины скин-слоя. Это можно объяснить тем, что в незакалённых образцах содержится мало различных дефектов (искажений кристаллической решетки, остаточных напряжений и др.) и, следовательно, эффект воздействия МИО сводится к минимуму (как известно, при МИО устраняются внутренние дефекты). При осуществлении термообработки происходит искривление кристаллических решеток и возникают другие дефекты, за счет чего увеличивается электросопротивление токопрово-дящего слоя, что и наблюдается на рисунках 3 и 4. Причем, толщина скин-слоя также влияет на величину напряжения: с увеличением толщины уменьшается электросопротив-ление и наоборот. В соответствии с изменениями электросопротивления изменяется и напряжение тока в скин-слое.

Увеличение энергии и количества импульсов приводит к уменьшению напряжения, что можно объяснить повышением температуры до определенных величин, при которых улучшается структура металла. Превышение определенной температуры приводит к обратному эффекту — увеличению зернистости структуры и, соответственно, повышению электросопротивления скин-слоя и напряжения тока.

На рисунке 5 отображено влияние энергии и количества импульсов при МИО стальных закаленных сверл из стали Р6М5 на величину напряжения в скин-слое. Величина энергии импульса составляла во всех экспериментах 10 кДж, а число импульсов менялось от 1 до 10. Частота тока менялась от 1 МГц до 0,005 МГц, а толщина скин-слоя увеличивалась, соответственно, от 23 до 318 мкм.

Видно (*см.* рисунок 5), что напряжение, а следовательно, и электросопротивление скин-слоя сначала резко падает с ростом количества импульсов, а затем постепенно возрастает, причем при 7-8 импульсах интенсивно, после чего опять начинает уменьшаться. Установлено также, что с уменьшением частоты тока от 1 МГц до 0,005 МГц глубина скин-слоя увеличивается от 23 мкм до 318 мкм, а напряжение в начале эксперимента (до обработки МИО) уменьшается от 16,73 мВ до 5,195 мВ (частота изменяется при этом от 1 МГц до 0,005 МГц), а в конце (10 импульсов), напряжение уменьшается от 15,368 мВ до 2,733 мВ (частота также меняется от 1 до 0,005 МГц).

Репозиторий БарГУ

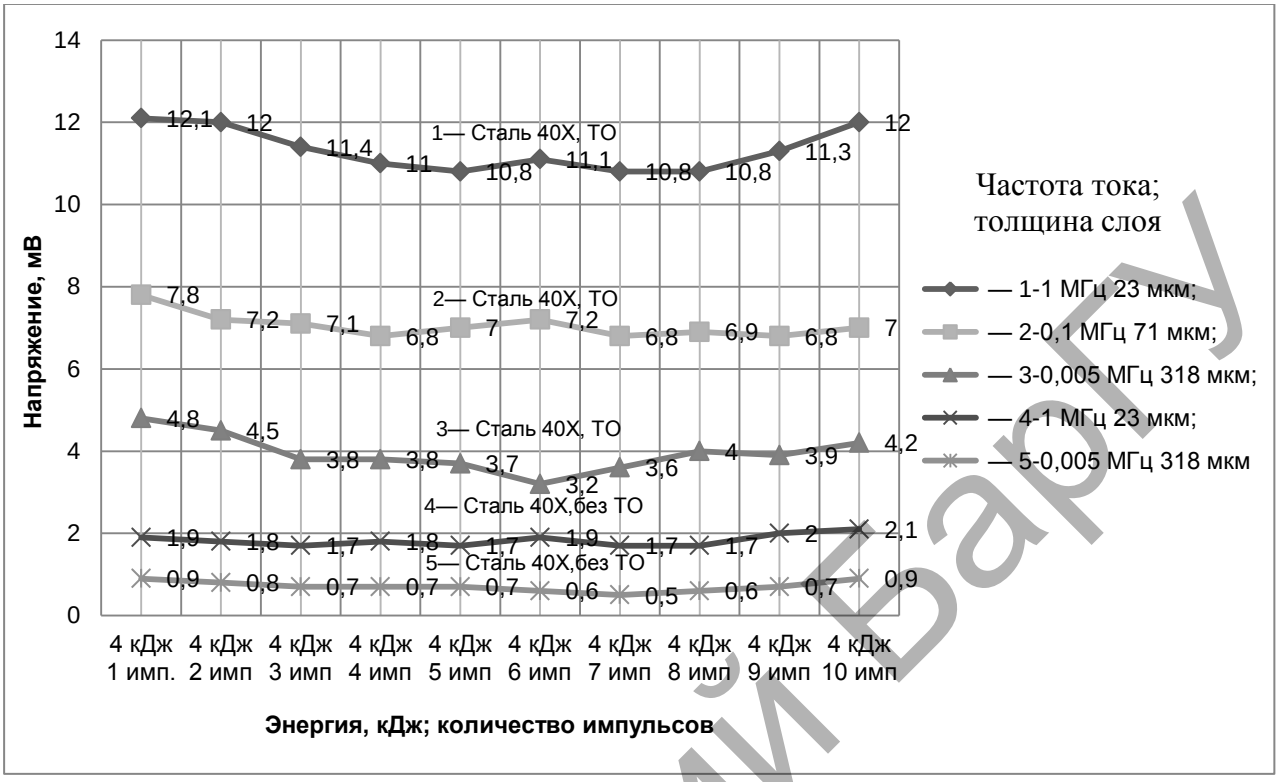


Рисунок 3. — Влияние частоты тока, энергии и количества импульсов при обработке образцов на величину напряжения в скин-слое (материал образца — сталь 40Х)

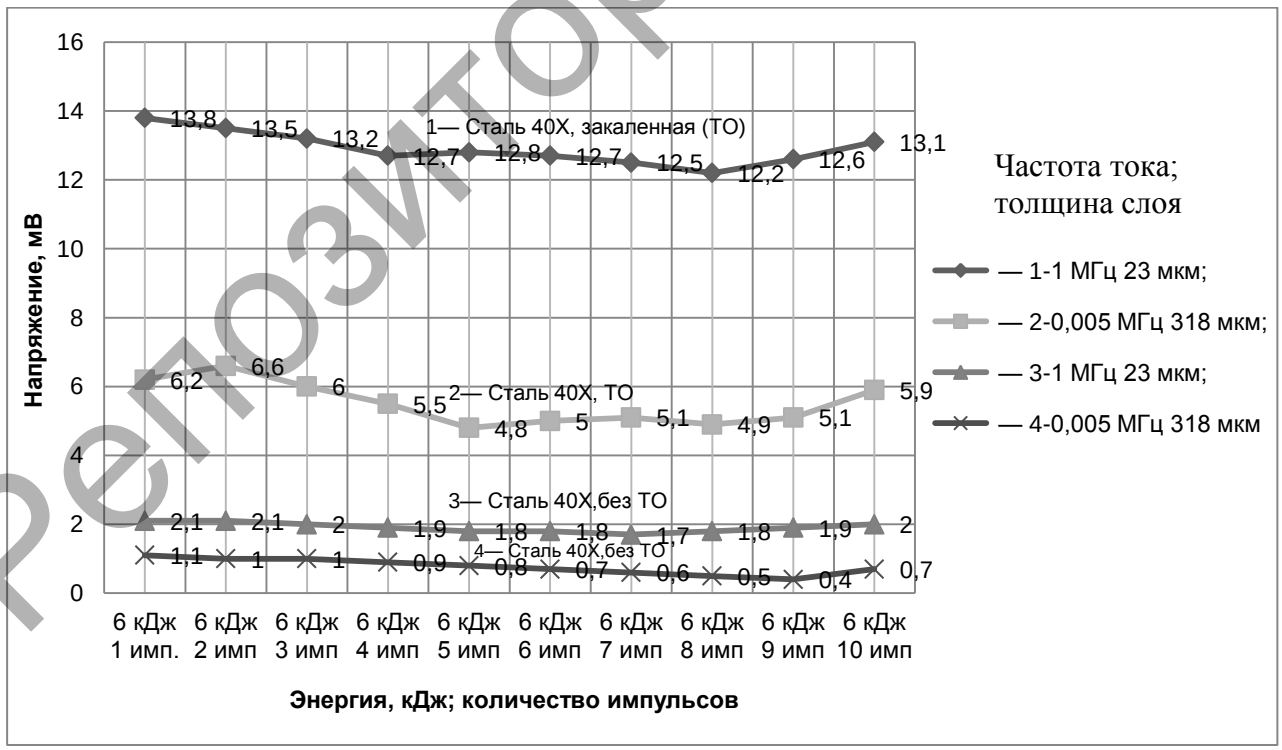


Рисунок 4. — Влияние частоты тока, энергии и количества импульсов при обработке образцов на величину напряжения в скин-слое (материал образца — сталь 40Х)

Репозиторий БарГУ

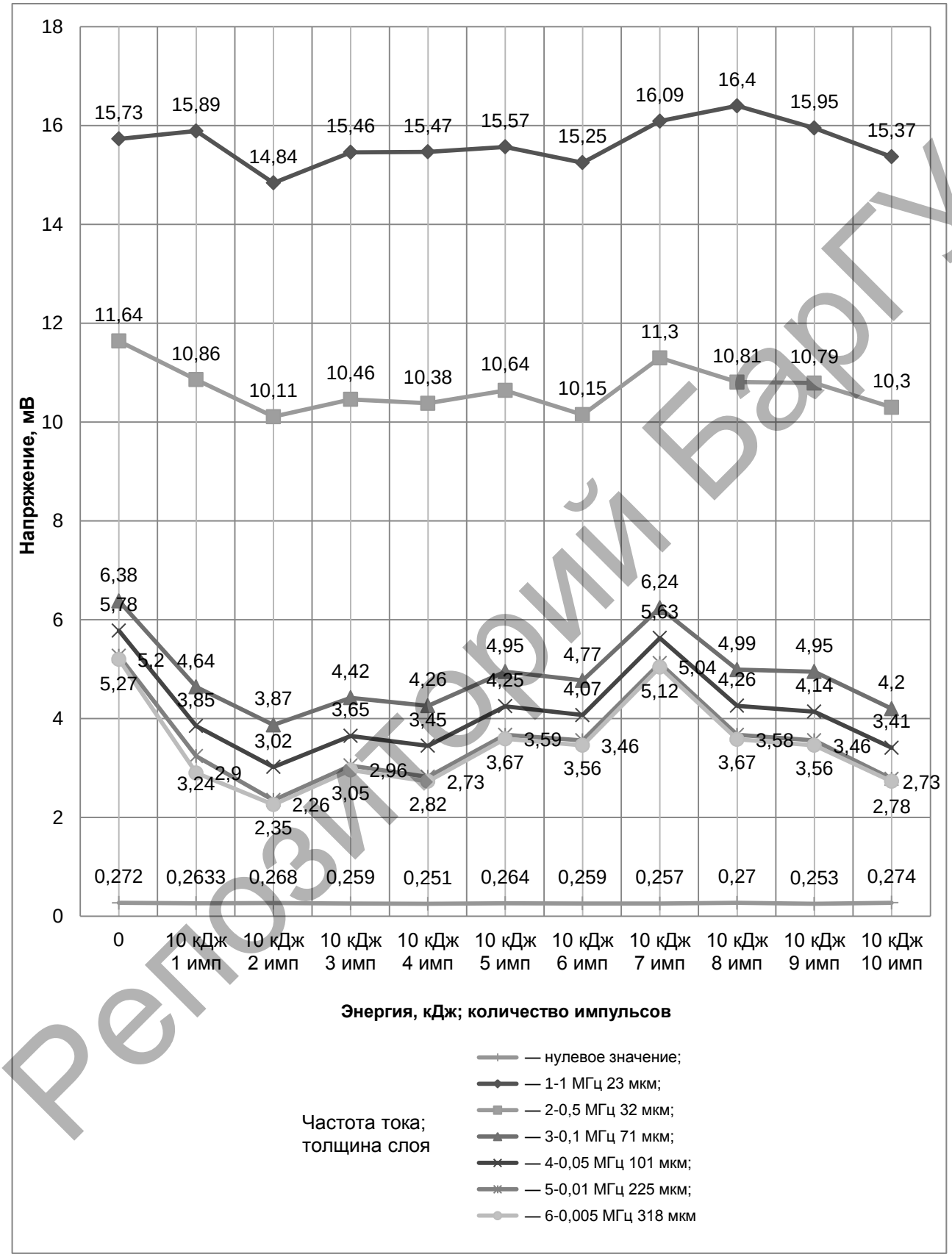


Рисунок 5. — Влияние энергии и количества импульсов при МИО образцов из стали Р6М5 на величину напряжения в скин-слое

Репозиторий БарГУ

Характер изменений величины напряжения с увеличением количества импульсов (*см.* рисунок 5), имеет более сложный характер, чем на рисунках 3 и 4 (для закаленных стальных образцов из стали 40Х). Это можно объяснить тем, что поверхность сверл имеет гораздо более сложный вид, чем у цилиндрических образцов, и, кроме того, сверла обладают острыми кромками. Значит, исследования со сверлами и другими подобными инструментами (метчиками, развертками, зенкерами, фрезами и т. п.) необходимо продолжить.

Заключение. Предложен метод исследования электрофизических свойств стальных образцов, основанный на появлении скин-эффекта при прохождении тока высокой частоты (ТВЧ). С помощью данного метода проведены исследования влияния режимов МИО закаленных и незакаленных образцов из стали 40Х, а также сверл из стали Р6М5 на величину напряжения тока, проходящего через скин-слой, с целью определения структурной неоднородности этого слоя. Установлено, что с ростом энергии и числа импульсов напряжение тока сначала уменьшается (в случае сверл — довольно резко), а затем постепенно возрастает, что объясняется повышением температуры в образцах до определенных величин, при которых улучшается структура металла. Превышение определенной температуры приводит к обратному эффекту — увеличению зернистости и неоднородности структуры и, соответственно, повышению электросопротивления скин-слоя и напряжения тока.

Список цитируемых источников

1. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. — 2012. — № 3. — С. 77—82.

2. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. — Киев : Наук. думка, 1981. — 584 с.

3. *Кане, М. М.* Основы научных исследований в технологии машиностроения / М. М. Кане. — Минск : Выш. шк. — 1987. — 231 с.

4. *Алифанов, А. В.* Исследование влияния магнитно-импульсной обработки поверхностного слоя стальных образцов на их физико-механические свойства / А. В. Алифанов, И. А. Богданович, В. В. Малеронок. — Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. — 2017. — Выпуск 5. — С. 18—24.

Поступила в редакцию 05.04.2018

Репозиторий БарГУ

УДК 621.9.048.7+621.78

А. В. Алифанов, В. С. Голубев, В. Н. Алехнович, И. А. Романчук, А. М. Милюкова, О. А. Толкачева
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Беларусь, +375 (17) 369 85 52, alifanov_aav@mail.ru

ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В статье рассмотрены вопросы плазменной наплавки порошковых самофлюсующихся материалов на никелевой основе на упрочняемые поверхности стальных образцов.

Ключевые слова: плазменная наплавка; порошки самофлюсующиеся; сталь 65Г; сталь 60ПП; износостойкие покрытия, повышение твердости.

Табл. 1. Рис. 5. Библиогр.: 10 назв.

A. V. Alifanov, V. S. Golubev, B. N. Alehnovich, I. A. Pomanchuk, A. M. Milukova, O. A. Tolkacheva
Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevicha Str., 220004 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, alifanov_aav@mail.ru

PLASMA SURFACING OF WEAR-RESISTANT POWDER MATERIALS ON WORKING SURFACES OF STEEL PARTS

The article deals with plasma surfacing of powdered self-fluxing materials on a nickel base on the hardening surfaces of steel samples.

Key words: plasma surfacing; self-fluxing powders; steel 65 G; steel 60 PP; wear-resistant surfaces; hardening.
Table 1. Fig. 5. Ref.: 10 titles.

Введение. Основными причинами выхода из строя ответственных деталей, например рабочих органов сельхозмашин, являются износ, деформация, выкрашивание, растрескивание рабочих поверхностей и кромок, что ведет к поломке изделия и простоя оборудования в целом. Каждый из этих видов разрушения требует от используемого материала наличия определенных свойств. Так, для повышения стойкости к механическому или абразивному износу необходимо увеличение твердости материала. Однако повышение твердости может вызывать увеличение хрупкости и, следовательно, появление выкрашивания рабочей поверхности и кромок, которое будет вызывать еще более интенсивный износ. Уменьшить склонность к выкрашиванию и трещинообразованию возможно только повышением его вязкости, повышая работу ударного разрушения. Таким образом, для создания материала с оптимальными характеристиками для ответственных деталей необходимо, чтобы они обладали сложносочетаемыми свойствами. Тем не менее, решить проблему можно с использованием технологий создания слоистых материалов, формируя на поверхности рабочие слои с необходимыми эксплуатационными свойствами [1—5]. В настоящее время существует большое количество технологий и методов для получения слоев необходимой глубины с заданными свойствами. Наплавка самофлюсующихся порошков с помощью плазмотрона (плазменная наплавка) позволяет получить более качественные износостойкие покрытия, например, по сравнению с широко применяемой на практике электродуговой наплавкой в среде защитных газов или покрытыми электродами при сохранении высокой производительности и возможности обработки в автоматизированном режиме [5].

Целью данного исследования является разработка процесса плазменной наплавки высокопрочных самофлюсующихся порошковых материалов на стальные, в том числе тонкостенные, изделия с использованием постоянно-импульсного режима работы плазмотрона. Такой

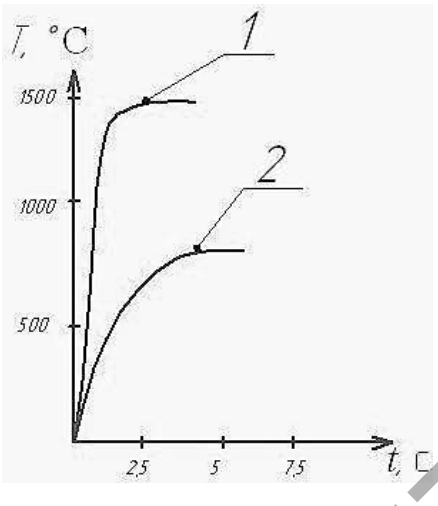
© Алифанов А. В., Голубев В. С., Алехнович В. Н., Романчук И. А., Милюкова А. М., Толкачева О. А., 2018

Репозиторий БарГУ

режим работы позволяет уменьшить опасность проплавления наплавляемой тонкостенной поверхности, уменьшить термические поводки, повысить качество наплавленного слоя.

Оборудование, приборы и методика. Для выполнения поставленной задачи была разработана конструкция плазмотрона повышенной надежности с катодом из вольфрама, легированного лантаном, диаметром 4 мм. Источник питания дежурной и основной дуги может выдавать на выходе постоянное и постоянно-импульсное напряжение. Для обеспечения подачи в зону плазменной струи упрочняющего порошка в постоянном и импульсном режиме разработали и изготовили специальную конструкцию порошкового питателя. В конструкции использовался эффект кипящего слоя и применялся вибрирующий дозирующий электрод.

Надежность разработанной конструкции плазмотрона обеспечивается водяным охлаждение анодного медного сопла и катодного узла с вольфрамовым электродом, соединенных для водоохлаждения проточной водой последовательно, а также анод и катод, электроизолированные между собой. Важным моментом, определяющим рабочую надежность разработанного плазмотрона, является его герметичность. Для этого уплотнительные кольца располагают на торцевых поверхностях анода и катода. При осевом сжатии (сборке плазмотрона) они автоматически сжимаются, что позволяет осуществить герметизацию конструкции в целом. Уплотнительные кольца изготавливаются из высокотемпературной, высокоэластичной силиконовой резины.



1 — на поверхности образца, *2* — на глубине 2,0 мм от нагреваемой поверхности

Рисунок 1. — Динамика нагрева плазменной струей на заданных участках образца

В ходе экспериментов провели исследования особенностей нагрева упрочняемой поверхности плазменной струей, генерируемой в постоянно-импульсном режиме. Температуру измеряли на поверхности в центре образца и на глубине 2,0 мм от обрабатываемой поверхности с помощью модернизированной головки АПИР на базе полупроводникового фотодиода и пирометром TemPro 300. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3, а твердость наплавленных слоев измерялась твердомером ТК-2М и ультразвуковым измерителем твёрдости МЕТ У1А.

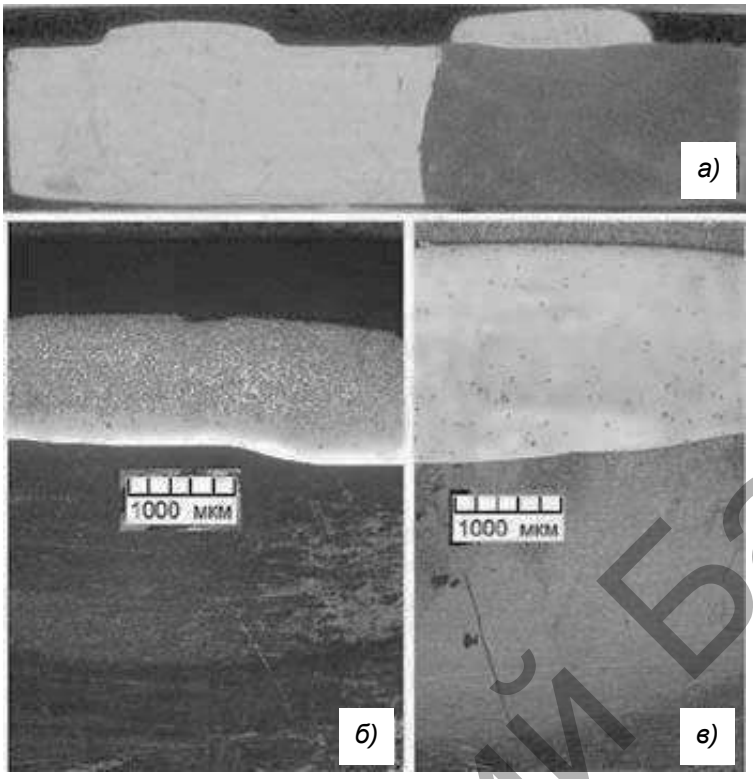
Динамика нагрева поверхности плоского образца плазменной струей в режиме плазменно-импульсного нагрева мощностью 1,5 кВт на поверхности и на глубине 2,0 мм приведена графически (рисунок 1).

Основная часть. В результате постоянно-импульсного нагрева на поверхности и в глубине образца возникают «тепловые волны». При наличии импульсной составляющей тока плазмотрона с частотой следования импульса 0,5 Гц колебания температуры на нагреваемой поверхности образца относительно максимального значения составляют 150°С. Увеличение частоты следования импульсов в 5 раз приводит к уменьшению колебания температуры на поверхности образца до 5°С. Колебания же температуры на глубине 2,0 мм от нагреваемой поверхности наблюдаются при частоте следования импульсов не более 0,1 Гц.

Разработанный и изготовленный в Физико-техническом институте Национальной академии наук Беларуси комплект оборудования для плазменной наплавки с использованием постоянной и постоянно-импульсной плазмы [6] позволил осуществить наплавку износостойкого порошкового материала на детали — образцы ножей кормоуборочного комбайна «Ягуар» (материал — сталь 65Г и сталь 60ПП).

Представлен внешний вид макрошлифа из наплавленного на стальные образцы самофлюсующегося порошкового сплава на никелевой основе марки ПГ-10Н-01 (рисунок 2).

Репозиторий БарГУ



а — внешний вид макрошлифов; *б* — использованный травитель марбле; *в* — ниталь

Рисунок 2. — Внешний вид макрошлифов наплавок. × 4

Режим наплавки и результаты измерений твёрдости ($H_{\mu1}$, $H_{\mu2}$) приведены в таблице 1, где $G_{п.г}$, $G_{т.г}$, $G_{з.г}$ — объёмные расходы плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов (аргон) соответственно; $G_п$ — массовый расход порошкового присадочного материала, $I_д$ — величина тока дуги, А; $U_д$ — величина напряжения на дуге, В. Измерения $H_{\mu1}$ выполнялись на шлифованной поверхности наплавленного слоя твердомером ТК-2М, а $H_{\mu2}$ — в поперечном сечении (шлифе) с помощью ультразвукового измерителя твёрдости МЕТ У1А.

Т а б л и ц а 1. — Параметры режима наплавки

$I_д$, А	$U_д$, *V*	$G_{п.г}$, л / мин	$G_{т.г}$, л / мин	$G_{з.г}$, л / мин	$G_п$, г / мин	$H_{\mu1}$, *HRC*	$H_{\mu2}$, *HRC*
60	30	2,8	2,3	9,4	4	47…52	48…50

В обоих случаях получены близкие по значению величины H_μ, однако полученные значения меньше регламентированной твёрдости порошкового сплава ПГ-12Н-01 (56…62 *HRC*).

Возможно, данные различия связаны с неоднородным распределением микротвердости по глубине наплавленного слоя (рисунок 3), небольшой его толщиной и относительно «мягким» подслоем из стали 65Г (≈ 30 *HRC*). Граница раздела покрытия — основного металла располагается на расстоянии примерно 2 мм от поверхности вдоль линии измерения микротвердости слоя (линия МН на рисунке 3). С учётом глубины проплавления основного металла 0,3 мм толщина наплавленного покрытия составляет примерно 1,7 мм при ширине зоны наплавки 9 мм.

Репозиторий БарГУ

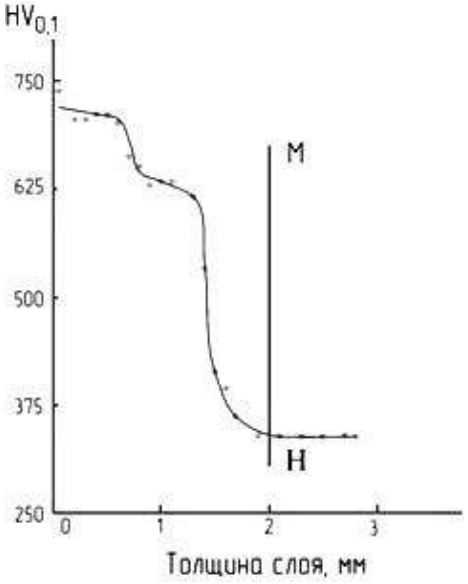


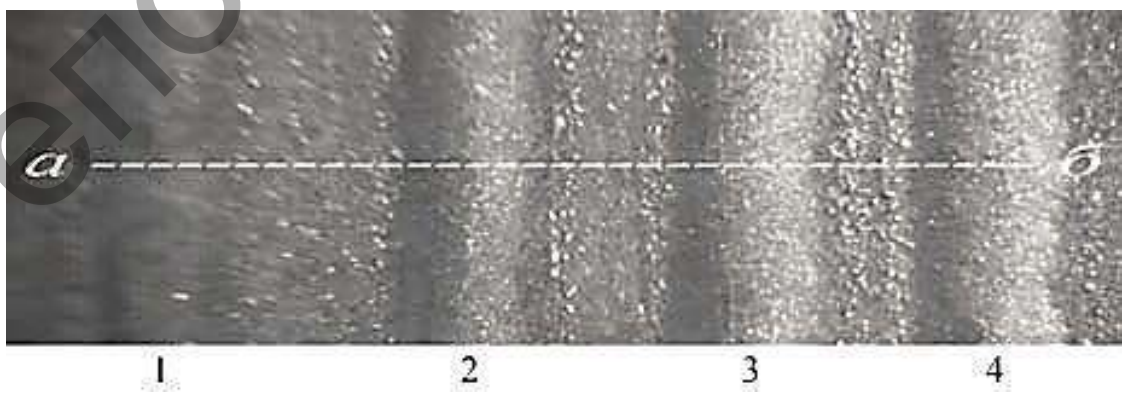
Рисунок 3. — Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного слоя вглубь основы

Справа от разграничительной линии МН регистрировались значения микротвердости основного металла (≈ 340 $HV_{0,1}$), изменяющиеся в пределах 260…350 $HV_{0,1}$ при увеличении расстояния от 3 мм до 6 мм. Слева от линии МН, по направлению к поверхности наплавленного слоя, микротвердость увеличивается примерно в два раза при уменьшении расстояния от 2 мм до 1,3 мм.

Основной причиной такого распределения микротвердости на этом участке, по-видимому, является значительное разбавление материала покрытия основным металлом, а также наличие на поверхности подслоя обезуглероженного слоя [7; 8]. При дальнейшем уменьшении расстояния до поверхности наплавленного слоя (h меньше 1,3 мм) измеренная микротвердость увеличивается с 620 $HV_{0,1}$ до ≈ 740 $HV_{0,1}$, причем наблюдается ее «ступенчатое» распределение, причина которого заключается в текстурированности данного участка покрытия.

Исследовано влияние расстояния от сопла плазмотрона до поверхности подслоя $l_{сп}$ на размеры и микротвердость наплавленных слоёв. При скорости перемещения плазмотрона v = 1 200 мм / мин и $l_{сп}$ = 8…12 мм формировались отдельные дорожки шириной 3,0…3,5 мм (рисунок 4) и длиной 50 мм; максимальная толщина покрытий при этом не зависит от величины расстояния от сопла до подложки и составляет примерно 200 мкм. Наличие на периферии наплавленных валиков отдельных частиц нерасплавленного порошка (рисунок 4) свидетельствует о том, что размеры зоны ввода присадочного порошкового материала больше размеров сварочной ванны (ванны расплавленного металла).

Шлиф (для исследований) вырезался по линии *а—б* (рисунок 4) перпендикулярно поверхности наплавки и протравливался в нитале. Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного покрытия имеет немонотонный характер (рисунок 5). Причем максимальная микротвердость наплавленного порошкового сплава ПГ-10Н-01 превышает 725 $HV_{0,1}$.



а—б — линия разреза, *1* — $l_{сп}$ = 9 мм; *2* — $l_{сп}$ = 10 мм; *3* — $l_{сп}$ = 11 мм; *4* — $l_{сп}$ = 12 мм

Рисунок 4. — Вид (фрагмент) наплавленного материала на сталь 60ПП. × 7

Репозиторий БарГУ

Уменьшение микротвердости для сталей 65Г и 60ПП составляет 260 $HV_{0,1}$ и 410 $HV_{0,1}$ соответственно в переходном слое (подслое) между покрытием и основным металлом. Это связано, по-видимому, с наличием в этой области обезуглероженного слоя, не полностью удалённого в процессе предшествующей обработки. При увеличении расстояния вглубь образца, т. е. вправо от разграничительной линии МН, регистрируется возрастание микротвёрдости с максимумом при h = 0,6…0,7 мм, а затем уменьшение до величины, характерной для исходного металла (260…350 $HV_{0,1}$). Измеренные значения микротвёрдости в максимуме распределения (590…620 $HV_{0,1}$) свидетельствуют о протекании процессов перекристаллизации в этой области, связанных с релаксацией тепла источника нагрева.

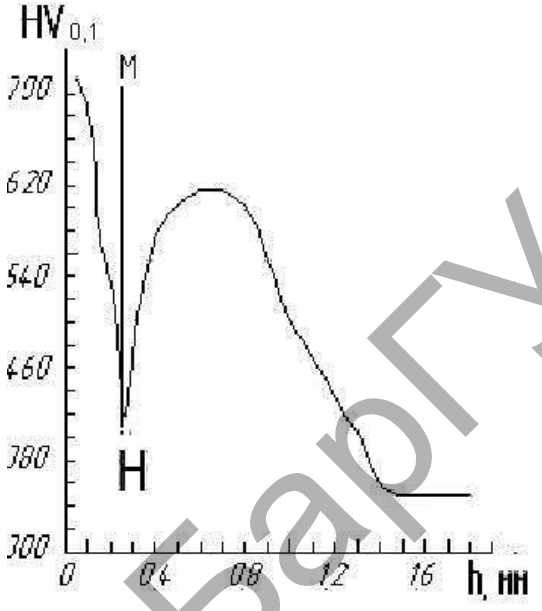


Рисунок 5. — Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного слоя вглубь основы

Формирование зон с повышенной микротвёрдостью на расстояниях h = 0,5…1,0 мм от поверхности наплавленного покрытия не только увеличивает твёрдость и суммарную глубину упрочнения, но и повышает вероятность возникновения поперечных трещин, зарождающихся в основном металле и продолжающихся в покрытии [9].

Работоспособность деталей в условиях абразивного и других видов износа зависит от характеристик композиции «покрытие — основной металл», сформированной в приповерхностных слоях в результате плазменно-порошковой наплавки. Наличие слоя с пониженной микротвердостью на границе «покрытие — подслой», с одной стороны, уменьшает износостойкость всей композиции «покрытие — основной металл», но, с другой стороны, этот слой обладает демпфирующими свойствами [10], что очень важно при работе упрочнённой детали в условиях ударно-абразивного воздействия.

Заключение. Выполненные эксперименты показали правильность выбранных конструкторских и технических решений и подходов при создании наплавочного плазмотрона и подготовки комплекса оборудования для плазменно-порошковой наплавки с целью упрочнения и восстановления быстроизнашивающихся деталей различного функционального назначения из конструкционных материалов.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать предложенный способ наплавки в качестве упрочняющей обработки ответственных стальных изделий, а также для устранения небольших локальных повреждений (износа) деталей сельскохозяйственного и общего машиностроения.

Репозиторий БарГУ

Список цитируемых источников

1. *Фрумин, И. И.* Современные типы наплавленного металла и их классификация / И. И. Фрумин // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный металл : сб. науч. тр. — Киев : Навук. думка, 1977. — С. 3—17.

2. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский [и др.]. — Киев : Техника, 1990. — 195с.

3. *Астапчик, С. А.* Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. — Минск : Белорус. наука, 2008. — 252 с.

4. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2010. — 320 с.

5. *Рябцев, И. А.* Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев. — Киев : Экотехнология, 2004. — 160 с.

6. Разработка конструкции плазмотрона на постоянно-импульсном напряжении для наплавки высокопрочных порошковых материалов / А. В. Алифанов [и др.] // Техника и технологии: инновации и качество : материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., 19 дек. 2017 г., г. Барановичи. — Барановичи : БарГУ, 2018. — С. 131—133.

7. Электродуговая наплавка металлоповерхностей в среде защитного газа с поперечными колебаниями электрода / В. С. Ивашко [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин : материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф., 15—18 апр. 2008 г. : в 2 ч. — СПб., 2008. — Ч. 1. — С. 126—132.

8. Изменение структуры поверхности углеродистых сталей при лазерном модифицировании / В. И. Гуринович [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. — Минск, 2013. — Кн. 2. — С. 169—176.

9. *Сидоров, А. И.* Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. — М. : Машиностроение, 1988. — 188 с.

10. *Хасуи, А.* Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки ; под ред. В. С. Степанина, Н. Г. Шестеркина. — М. : Машиностроение, 1985. — 240 с.

Данная работа была выполнена благодаря поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта Т17-008.

Поступила в редакцию 11.05.2018

Репозиторий БарГУ

УДК 622.23.05

О. М. Волчек, Н. Ю. Кондратчик, Ю. С. Наривончик
Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 724 98 08, leolya07@mail.ru

ВЛИЯНИЕ РЕГЕНЕРАЦИИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ГИДРОСИСТЕМЕ НА МЕХАНИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАНИЧЕСКОГО ДИСПЕРГАТОРА

Гидрофицированные машины (в частности, механизированные крепи) широко используются при разработке калийных месторождений. Крепь очистного забоя предназначена для поддержания кровли, сохранения очистной выработки в рабочем и безопасном состоянии, обеспечения механизации процессов создания и управления породами кровли. Управление всеми механизмами производится с помощью гидросистемы, в которой используются индустриальные или моторные масла. При длительной эксплуатации в них могут накапливаться побочные продукты окисления, загрязнения и прочие примеси.

В статье приведен сравнительный анализ работы механизированного комплекса с применением регенерации рабочей жидкости в гидросистеме при использовании механического диспергатора и без ее применения.

В результате применения гидромеханического диспергатора (ГМД) происходит увеличение наработки до отказа гидрооборудования механизированной крепи в целом в 1,89 раза и насосной станции — в 1,27 раза.

Ключевые слова: гидрофицированная машина; диспергатор; масло; установка; отказ.
Рис. 2. Табл. 1. Библиогр.: 4 назв.

V. M. Vauchok, N. Y. Kondratchik, Y. S. Naryvonchyk
Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 724 98 08, leolya07@mail.ru

THE INFLUENCE OF THE REGENERATION OF THE WORKING FLUID IN A HYDRAULIC SYSTEM IN THE MECHANIZED COMPLEX USING A MECHANICAL DISPERSER

Hydraulic machines, e. g. mechanized supports, are widely used in the development of potash deposits. The mechanized support of clearing edge is intended to maintain the roof, preserve the clearing system in working and safe condition, and ensure the mechanization of processes of creation and management the roof rocks. All the mechanisms are controlled by a hydraulic system that uses industrial or motor oils. With long-term operation, they may accumulate by-products of oxidation, contamination and other impurities. The article compares the operation of a mechanized complex with the use of regenerated working fluid in a hydraulic system using a mechanical dispersant and without its application. As a result of using a hydro-mechanical dispersant, the increase in the operating time to failure of the hydraulic equipment of the mechanized support is 1.89 times, and the pump station is increased by 1.27 times.

Key words: hydraulic machine; dispersant; oil; installation; failure.
Fig. 2. Table 1. Ref.: 4 titles.

Введение. При длительной эксплуатации индустриальных и моторных масел (в гидросистемах) в них могут накапливаться побочные продукты окисления, загрязнения и прочие примеси. Все они вместе оказывают пагубное влияние на эксплуатационные характеристики масел, резко снижая их качество. Поэтому регенерация индустриальных масел является целесообразной и оправданной [1].

При регенерации индустриальных масел применяется целая совокупность операций, которые основываются на разнообразных физических, физико-химических и химических процессах.

© Волчек О. М., Кондратчик Н. Ю., Наривончик Ю. С., 2018

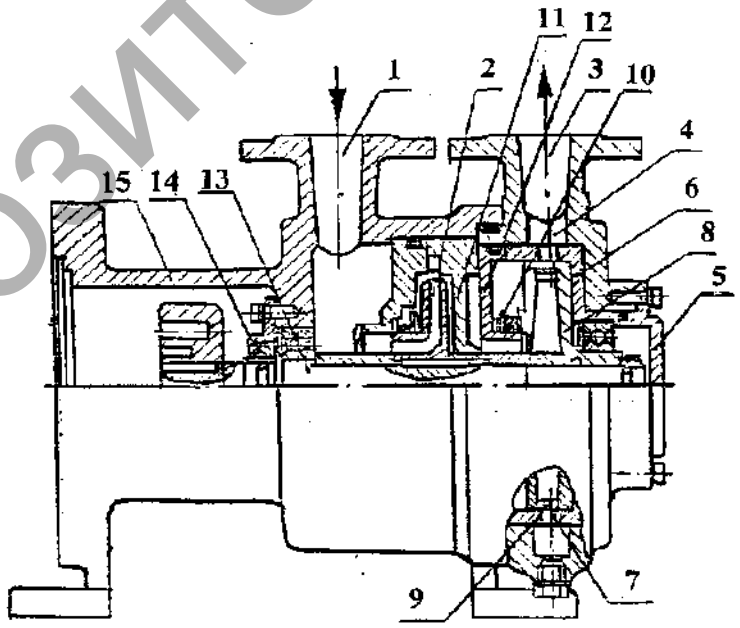
Репозиторий БарГУ

Конечной целью регенерации является удаление из масел продуктов старения и загрязнения. При обработке рекомендуют соблюдать определенную последовательность методов: а) механические — для удаления свободной воды и твердых загрязнений; б) теплофизические — для выпаривания и вакуумной перегонки; в) физико-химические (коагуляция и адсорбция).

Основная часть. Опыт показывает, что надежность гидрофицированных машин зависит от эксплуатационных свойств рабочей жидкости (РЖ), применяемой в гидросистемах. Только за счет ее замены или регенерации можно существенно повысить ресурс эксплуатируемой машины. В этой связи большое внимание должно уделяться техническому обслуживанию гидросистем, рациональному нормированию допустимых уровней загрязненности и способам диагностики [2]. Учитывая важность проблемы очищения РЖ, используемой в гидравлической системе механизируемых крепей очистных комплексов, разработана специальная установка для приготовления и регенерации РЖ на добычном участке с использованием роторного аппарата с модуляцией потока (РАМП), а также гидравлические системы, позволяющие использовать РАМП вместо подпиточного насоса в насосных станциях типа СНТ.

Для соединения функций эмульсионного аппарата, регенерационной техники и подпиточного насоса в одном устройстве, на базе РАМП разработан гидромеханический диспергатор (ГМД), конструктивные особенности которого позволяют диспергировать загрязненную РЖ до величины диаметра твердых частиц не более 4…5 мкм [2].

Порядок работы ГМД следующий: прошедшая эксплуатацию в гидравлической системе загрязненная РЖ поступает во входной патрубок *1* (рисунок 1) посредством вращения рабочего колеса (ступени) *2*, затем, пройдя через направляющий аппарат *11* и диафрагму *12*, поступает под давлением в полость вращающегося ротора *8*, а через его отверстия *9* и отверстия *7* неподвижного статора *6* — в рабочую камеру *4*, где подвергается интенсивному кавитационному воздействию. Продиспергированная в ГДМ РЖ вновь поступает в гидросистему очистного комплекса по патрубку *3*.



1 — входной патрубок; *2* — рабочее колесо (ступень); *3* — выходной патрубок; *4* — рабочая камера; *5* — крышка; *6* — статор; *7*— отверстия статора; *8* — ротор; *9* — отверстия ротора; *11* — направляющий аппарат; *12* — диафрагма; *13* — вал; *14* — магнитное уплотнение; *15* — корпус

Рисунок 1. — Конструктивная схема ГМД

Репозиторий БарГУ

В основе конструкции ГМД лежит роторно-статорная система, во время работы которой обрабатываемая среда подвергается широкому комплексу воздействия различных физических факторов: вибрационному в полости ротора *8* и ультразвуковому в рабочей камере *4*; сдвиговым напряжениям в зазоре; турбулентному и струйному вблизи отверстий ротора; кавитационному — в каналах ротора *9* и рабочей камере [2].

Принцип действия роторного аппарата с модуляцией потока основан на явлении кавитации в эмульсии, протекающей через отверстия переменного сечения с большими градиентами давления и скорости. Объясняется это тем, что во время прохождения подаваемой под давлением в полость ротора обрабатываемой среды (которая через окна ротора и статора нестационарно вытекает в рабочую камеру в процессе ее торможения, когда отверстия статора перекрываются), вследствие инерции смеси возникают большие отрицательные импульсы давления, приводящие к акустической кавитации. Последняя, создавая большие давления и температуры в микролокальных областях жидкости, способствует интенсивному диспергированию.

Особенностью работы роторного аппарата с модуляцией потока, как интенсифицирующего аппарата при производстве шахтных эмульсий, является то, что акустические колебания в нем возбуждаются в турбулентно движущейся жидкости, и периодические колебания давления накладываются на беспорядочные турбулентные пульсации, обеспечивая таким образом значительные скорости обтекания частиц дисперсной фазы, что благоприятно влияет на процесс диспергирования. Амплитуда переменного давления и относительные скорости движения частей аппарата таковы, что в обрабатываемой среде возникает как акустическая, так и гидродинамическая кавитация [2]. Все это позволяет, используя для получения рабочих жидкостей РАМП, вводить в обрабатываемую среду огромные плотности энергии различных видов и создать за исключительно короткий промежуток времени наиболее благоприятную обстановку для ускорения протекания гидродинамических и химических процессов в гетерогенных средах.

В качестве механизированного комплекса рассмотрим агрегатную крепь (рисунок 2) модели БС2.1П производства «Вестфалия Люнен» (Германия) [3]. Под агрегатной (агрегатированной) крепью понимают такую крепь, все секции которой своими домкратами передвижения связаны (агрегатированы) со ставом забойного конвейера. Передвижения секций кинематически взаимоувязаны, вследствие чего секции пригодны для дистанционного и автоматического управления, позволяют сократить время на их передвижки. Данная модель используется на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий» и зарекомендовала себя лучшей в качестве оптимального варианта по соотношению цена/качество [3].

Крепь состоит из отдельных одностоечных секций, связанных между собой конвейером и гидрокоммуникациями. Каждая секция крепи состоит из одной гидростойки *5* двухстороннего действия, одинарной раздвижности; основания *1*, соединенного с оградительной частью перекрытия шарнирным четырехзвенником *2* поддерживающего козырька *4*; бокового выдвижного борта у оградительной части для перекрытия *3* межсекционных зазоров; двух гидродомкратов передвижения *6*, расположенных по бокам основания и соединяющих секции с забойным конвейером.

В процессе анализа надежности механизиро-ванных крепей учитывались отказы гидрооборудования, вызываемые взаимодействием его элементов с рабочей жидкостью, применяемой в гидросистеме. Отказы из-за поломок гидроэлементов не учитывались (например, изгибы штоков гидроцилиндров, разрывы проушин крепления гидроцилиндров передвижения секций крепи, механические повреждения рукавов гидроразводки и др.) [3].

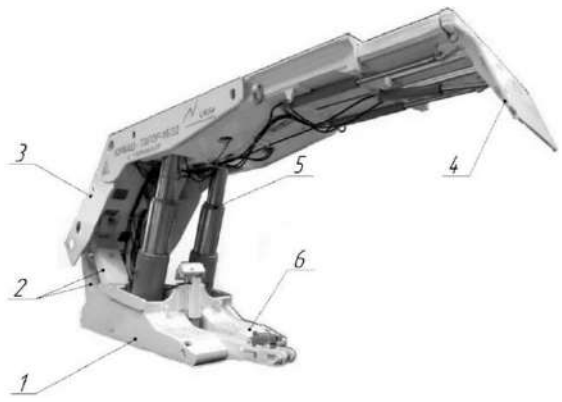


Рисунок 2. — Эскиз секции крепи

Репозиторий БарГУ

Приведем данные о количестве отказов гидроэлементов крепи и насосной станции, происходящих в результате взаимодействия с рабочей жидкостью, при работе с ГМД и о средних наработках до отказа гидроэлементов (таблица 1).

Т а б л и ц а 1. — Отказы различных гидроэлементов крепи и средние наработки до отказа

Элементы гидрооборудования крепи	Количество отказов элементов		Средняя наработка до отказа совокупности однотипных элементов, T_i, передвижек секций	
Гидрооборудование секций крепи				
	без ГМД	с ГМД	без ГМД	с ГМД
Гидростойка	10,0	6,0	22746,00	17910,0
Гидроцилиндр передвижения	15,0	9,0	15164,00	11940,0
Гидрозамок стойки	32,0	17,0	8027,00	6321,0
Уплотнительные кольца отсекателя	958,0	516,0	264,5,00	208,3
Гидроблок управления	169,0	85,0	1605,00	1264,0
Гидрооборудование в целом	1186,0	633,0	216,00	169,8
Среднее значение	395,0	211,0	8083,25	6302,0
Насосная станция				
Манжеты, плунжеры, гидроблок	7,5	6,0	22746,00	17910,0
Предохранительный клапан	10,0	7,0	19509,70	15362,0
Разгрузочный клапан	5,1	4,0	34145,00	26866,0
Управляющий клапан	6,2	4,0	34247,10	26866,0
Насосная станция в целом	26,5	21,0	6448,00	5117,0
Среднее значение	10,8	8,5	31812,96	18428,0

Количество отказов элементов:
– гидрооборудования секции крепи —

$$\frac{395}{211}=1,89;$$

– насосной станции —

$$\frac{10,8}{8,5}=1,27.$$

Средняя наработка до отказа:
– гидрооборудования секции крепи —

$$\frac{8083,25}{6302}=1,27;$$

– насосной станции —

$$\frac{31812,96}{18428}=1,61.$$

Репозиторий БарГУ

Интенсивность отказов различных по функциональному назначению гидроцилиндров, стоечных гидроблоков управления и других элементов крепи определяется из выражения

$$\eta_i = \frac{1}{T_i \cdot N_{\text{сз}} \cdot N_{\text{эл}}},$$

где η_i — интенсивность отказов гидроэлемента, 1/передвижку секций; T_i — средняя наработка до отказа совокупности однотипных элементов передвижных секций; $N_{\text{сз}}$ — количество секций крепи, установленных в очистном забое; $N_{\text{эл}}$ — количество гидроэлементов одинакового функционального назначения, установленных на секции крепи.

Интенсивности отказов отдельных гидроэлементов одинакового функционального назначения, установленных на секции крепи, составляет: гидростойка $\eta_{\text{ГС}} = 0{,}553 \cdot 10^{-6}$; гидроцилиндр передвижной $\eta_{\text{ГЦП}} = 0{,}415 \cdot 10^{-6}$; стоечный гидроблок $\eta_{\text{ГБС}} = 1{,}57 \cdot 10^{-6}$; уплотнительные кольца $\eta_{\text{УК}} = 47{,}532 \cdot 10^{-6}$; гидроблок управления $\eta_{\text{ГБУ}} = 7{,}833 \cdot 10^{-6}$ [4].

Средняя интенсивность отказов ($\eta_{\text{СК}}$) совокупности различных гидроэлементов для одной секции крепи БС2.1П, отказывающих в результате их взаимодействия с рабочей жидкостью гидросистемы определяется по формуле

$$\eta_{\text{СК}} = \eta_{\text{ГС}} + \eta_{\text{ГЦП}} + \eta_{\text{ГБС}} + \eta_{\text{УК}} + \eta_{\text{ГБУ}} = 57{,}903 \cdot 10^{-6} \text{ 1/передвижку секции.}$$

При этом средняя наработка до отказа совокупности гидроэлементов секции вычисляется следующим образом:

$$T_{\text{СК}} = \frac{1}{\eta_{\text{СК}}} = 17\,270 \text{ передвижек секций.}$$

Заключение. Улучшение качества рабочей жидкости в гидросистеме крепи при установке в насосной станции ГМД приводит к увеличению наработки до отказа T_i гидрооборудования механизированной крепи в целом в 1,89 раза и насосной станции — в 1,27 раза. Однако и при установке ГМД абсолютное количество отказов (97,3%) приходится на гидроэлементы аппаратуры управления гидроцилиндрами секций крепи, а в насосной станции (71,4%) — на предохранительный, разгрузочный и управляющий клапаны.

Список цитируемых источников

1. Опыт и перспективы применения столбовой системы разработки на Старобинском месторождении / Б. И. Петровский [и др.] // Повышение эффективности технологических процессов горных работ на калийных рудниках : сб. науч. тр. — Л, 1980. — С. 48—59.

2. Опыт двухслойной выемки мощного пласта сложного строения / Б. И. Петровский [и др.] // Технология и безопасность горных работ в калийных рудниках : сб. науч. тр. — Пермь, 1985.— С. 17—22.

3. Результаты шахтных испытаний двухслойной выемки Третьего пласта на Старобинском калийном месторождении / Б. И. Петровский [и др.] // Горный журн. — 1985. — № 12.— С. 34—36.

4. *Петровский, Б. И.* Разработка пологих пластов лавами на калийных рудниках Республики Беларусь / Б. И. Петровский [и др.] // Минеральные ресурсы и человек : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. ; Варна, 17—19 сент. 2002. — Варна, 2002. — Т. 2. — С. 157—162.

Поступила в редакцию 06.04.2018

Репозиторий БарГУ

УДК 621.98.044.7

А. М. Милюкова[1], А. И. Горчанин[1], А. Н. Матяс[1], В. В. Малеронок[2]
[1]Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 22014,1 Минск, Беларусь, +375 (17) 369 85 52, annart@mail.ru
[2]Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404, Барановичи, Беларусь

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СВЕРЛ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Для металлорежущего инструмента всегда была актуальна проблема повышения периода стойкости. В данной работе показана возможность упрочнения спиральных сверл из быстрорежущей стали с повышением стойкости в 1,8 раза методом магнитно-импульсной обработки по оптимальному технологическому режиму.

Ключевые слова: металлорежущее сверло; сталь Р6М5; температура; режущая кромка; радиус округления; упрочнение; магнитно-импульсная обработка; стойкость.
Рис. 9. Библиогр.: 8 назв.

A. M. Miliukova[1], A. I. Harchanin[1], A. N. Matias[1], V. V. Maleronok[2]
[1]Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevicha Str., 220004 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, annart@mail.ru
[2]Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str., 225404, Baranovichi, the Republic of Belarus

MAGNETIC-IMPULSE HARDENING TREATMENT OF METAL-CUTTING DRILLS FROM HIGH SPEED STEEL

For metal-cutting tools, the problem of increasing their durability has always been relevant. In this work it is shown the possibility of hardening of spiral drills from high-speed steel with an increase in resistance by 1.8 times by applying the method of magnetic-pulse processing for the optimum technological regime.

Key words: metal-cutting drill; steel R6M5; temperature; cutting edge; rounding radius; hardening; magnetic-impulse processing; durability.
Fig. 9. Ref.: 8 titles.

Введение. На протяжении ряда последних лет учеными и специалистами Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» и учреждения образования «Барановичский государственный университет» успешно развивается новое для Республики Беларусь научно-техническое направление: магнитно-импульсная упрочняющая обработка поверхностей металлических изделий, где используется сложный механизм воздействия сильного импульса электромагнитного поля на их эксплуатационные характеристики [1; 2].

Разработаны и изготовлены магнитно-импульсные установки (МИУ) с различными технико-экономическими показателями, специальные цилиндрические и плоские индукторы для упрочняющей обработки цилиндрических и плоских изделий. За это время накоплен достаточно большой научный и экспериментальный материал, благодаря которому решаются проблемы повышения износостойкости разнообразных инструментов, применяемых в деревообрабатывающей, машиностроительной, пищевой отраслях промышленности как на белорусских предприятиях, так и за рубежом.

© Милюкова А. М., Горчанин А. И., Матяс А. Н., Малеронок В. В., 2018

Репозиторий БарГУ

В результате воздействия электромагнитного поля на стальные изделия в специальных индукторах магнитно-импульсных установок измельчается и становится более однородной структура металла поверхностного слоя, выравниваются внутренние напряжения, частично устраняются дефекты в кристаллической решетке, что обеспечивает повышение прочности и износостойкости обработанных изделий [3, 4].

Основным преимуществом применения магнитно-импульсной обработки (МИО) по сравнению с известными методами упрочнения является то, что не меняются геометрические параметры упрочненных изделий, отсутствует коробление и другие изменения готового изделия. Процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической безопасностью.

В работах [5—7] приведены результаты исследований влияния режимов МИО различных стальных изделий (дереворежущих ножей, ножей для резки сахарной свеклы, дисков хлопкоочистительных машин и др.) на их структуру и стойкостные показатели. Во всех исследуемых случаях структура поверхностного слоя улучшалась, а стойкость изделий повышалась. В состав исследуемых сталей, из которых были изготовлены изделия, входили различные легирующие элементы: хром, никель, марганец. В металло- и деревообрабатывающей отраслях промышленности широко применяют инструмент (сверла, развертки, хвостовые фрезы, метчики и др.), изготовленный из быстрорежущих марок стали. В состав быстрорежущих сталей, например Р6М5, входят такие высокопрочные тугоплавкие элементы, как вольфрам и молибден, наличие которых может снижать эффективность упрочняющей МИО.

В данной работе исследовано влияние режимов МИО на структуру и твердость поверхностного слоя сверл быстрорежущей стали Р6М5 и на их показатели стойкости. С целью определения возможности упрочнения стального хвостового инструмента из стали Р6М5 были проведена упрочняющая МИО партии сверл при различных технологических режимах, металлографические исследования образцов стали Р6М5 до и после МИО, сравнительные лабораторные испытания упрочненных сверл.

Оборудование и методика. Упрочнение образцов и партии металлорежущих сверл из стали Р6М5 диаметром 10 мм осуществляли на модернизированной МИУ-2 с максимальной запасаемой энергией 15 кДж в индукторе диаметром 23 мм, который работает с частотой 8 кГц.

Из сверла шлифы приготовлены 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. Температуру образцов инструмента после каждой МИО и каждого сверления отверстий измеряли с помощью термопары ТХА (ГОСТ 1790). Радиусы округления режущих кромок образцов сверл проведены на металлографическом микроскопе ММР-4.

Проведение испытаний сверл осуществлялось по методике, указанной в ГОСТ 2034, раздел 3 [8]. Для испытаний сверл по вышеуказанной методике необходимо на сверлильном станке с механизированной подачей в образцах стали марки 45 (ГОСТ 1050) твердостью 187…207 *HB* просверлить глухие отверстия глубиной 30 мм с применением смазочно-охлаждающей жидкости. Параметр шероховатости поверхности образца не должен быть более *Rz* 40мкм (*Ra* 12…20 мкм).

В соответствии с используемой методикой испытания сверл спиральных из стали Р6М5 диаметром 10 мм должны проводиться на следующих режимах: скорость резания 22 м / мин, подача 0,17 мм / об., количество просверленных отверстий при испытаниях на работоспособность — 15.

После испытаний на режущих кромках не должно быть выкрашиваний, сколов, и сверла должны быть пригодны к дальнейшей работе.

Репозиторий БарГУ

Основная часть. ***Результаты исследований*.**

Проведение упрочняющей МИО образцов стали Р6М5, вырезанных из хвостовой части сверла диаметром 10 мм, осуществлялось по двум режимам:

Режим I	МИУ-2, цилиндрический индуктор Ø23 мм, 10 кДж, 7 импульсов по 1 импульсу с остыванием
Режим II	МИУ-2, цилиндрический индуктор Ø23 мм, 10 кДж, 7 импульсов сериями

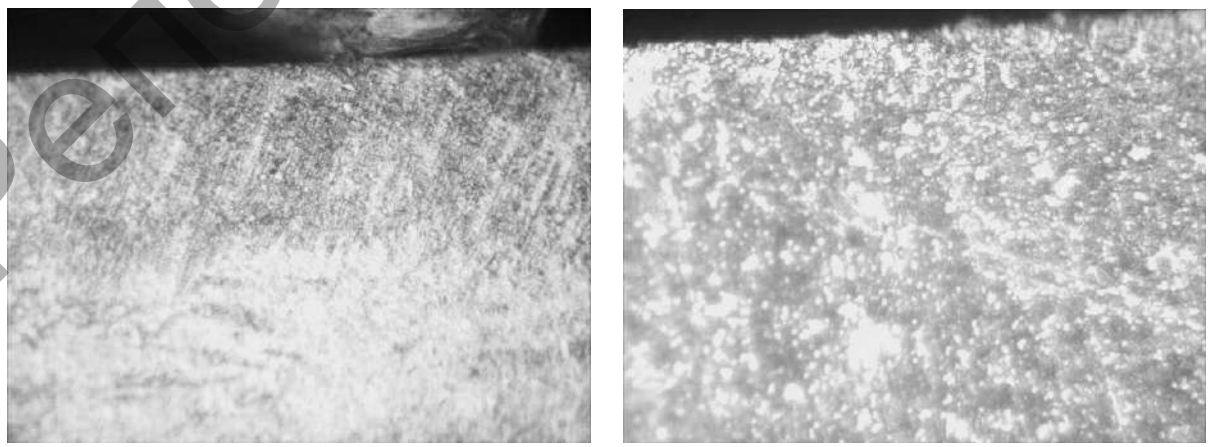
Образец из стали Р6М5 на поверхности шлифа до и после МИО имеет твердость *HRC* 58 и *HRC* 60 соответственно. Микроструктура исходного образца стали Р6М5 без упрочнения МИО представлена на рисунке 1.

Проведена МИО образца стали Р6М5 по режиму I. При этом образец нагрелся до температуры 350°С. Рассмотрим микроструктуру образца стали Р6М5 после МИО по режиму I (рисунок 2).

Металлографический анализ полученных результатов показывает, что исходная структура мартенсита отпуска с большим количеством дисперсных специальных карбидов типа МеС вследствие воздействия МИО подверглась модификации поверхностного слоя на глубину 80…100 мкм.

По результатам проведенных исследований образцов, вырезанных из сверл (измерений твердости и металлографического анализа структур до и после МИО), определены рациональные технологические режимы упрочняющей МИО сверл.

Рисунок 1. — Микроструктура исходного образца стали Р6М5 без МИО. × 400



а) *б)*

Рисунок 2. — Микроструктура образца стали Р6М5 после МИО по режиму I. × 400 *(а)*; ×1 000 *(б)*

Репозиторий БарГУ

Испытания в лабораторных условиях. Сравнительные лабораторные испытания проводили на опытной партии сверл из одной поставки (3 шт.) диаметром 10 мм, состоящей из контрольного сверла (1 шт.) без МИО и упрочненных МИО сверл (2 шт.) по двум технологическим режимам, отличающимся количеством импульсов. До испытаний сверла из стали Р6М5 диаметром 10 мм из одной партии (упрочненные МИО и неупрочненные) визуально ничем не отличались. На рисунке 3 показаны основные кромки и поверхности, состояние которых контролировалось при испытаниях.

Испытания на работоспособность, проведенные по методике [8], на образце стали 45 толщиной 40 мм (рисунок 4) показали результаты, представленные на графике (рисунок 5).

Отверстия в образце стали 45 выполнены на глубину 30 мм всеми сверлами. Качество отверстий соответствует техническим требованиям. После окончания сверления одного отверстия проводилось измерение температуры сверла. Представлена зависимость температуры нагрева каждого сверла от количества просверленных отверстий (15 шт.), по которой можно судить об общей температуре нагрева инструмента и о качестве режущих кромок сверл (степени их затупления): чем выше температура нагрева, тем больше затупились режущие кромки сверла (*см.* рисунок 5).

На графике зависимости температуры нагрева сверла видно, что сверло, упрочненное МИО по режиму I, нагревалось меньше других сверл, что свидетельствует о лучших эксплуатационных характеристиках режущих кромок этого сверла.

Рисунок 3. — Внешний вид режущих кромок и поверхностей металлорежущего спирального сверла

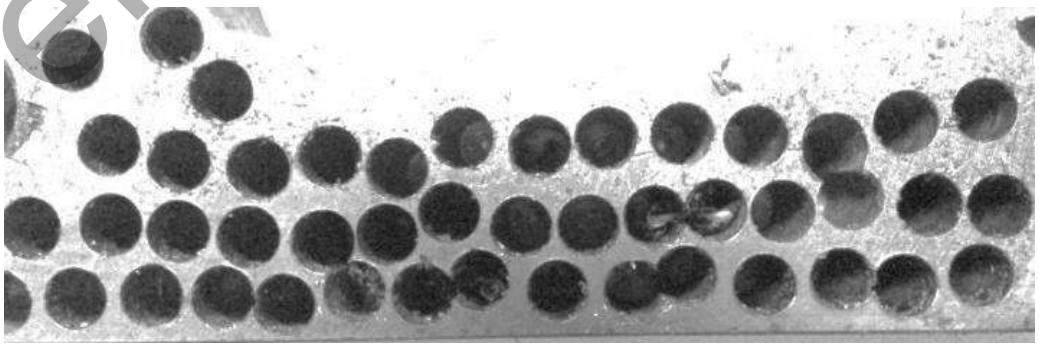


Рисунок 4. — Внешний вид образца стали 45 после испытаний партии сверл на работоспособность

Репозиторий БарГУ

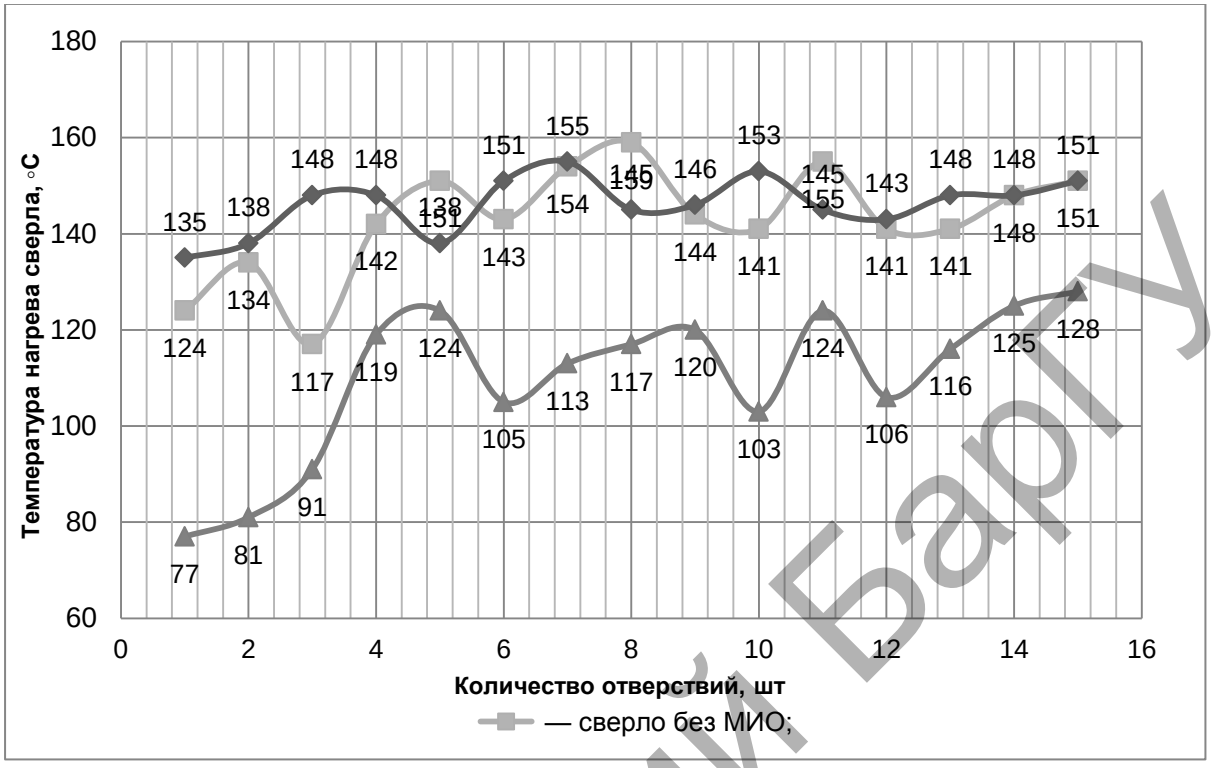


Рисунок 5. — Зависимость температуры нагрева сверла от количества просверленных отверстий

а) *б)* *в)*

а — контрольное сверло без МИО; *б* — сверло после МИО по режиму I; *в* — сверло после МИО по режиму II

Рисунок 6. — Внешний вид режущих кромок и поверхностей партии сверл из стали Р6М5 после испытаний

Визуально режущие кромки, перемычки и задние поверхности сверл (рисунок 6, *б* и *в*), упрочненных МИО, подверглись меньшему износу и перегреву по сравнению с контрольным сверлом без МИО (*см.* рисунок 6, *а*).

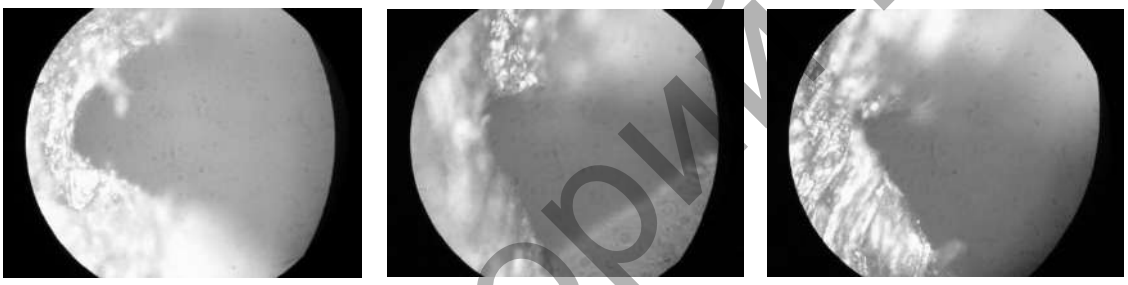
По результатам испытаний можно сделать следующие выводы: 1) на режущих кромках партии сверл нет выкрашиваний, сколов, и сверла пригодны к дальнейшей работе; 2) режущая кромка сверла, упрочненного по режиму I, подверглась меньшему износу и имеет повышенную работоспособность.

Исследование степени затупления режущих кромок сверл после механических испытаний. После окончания механических испытаний проведены измерения радиуса округления режущей кромки по длине лезвия. Измерения проводились в трех точках (рисунок 7): у основания (ближе к центру сверла), на середине лезвия и у вершины с точностью ±0,5 мкм.

Репозиторий БарГУ

Представим фотографии образцов сверл после механических испытаний (рисунок 8). Результаты измерений радиусов округления представлены на графике (рисунок 9).

Рисунок 7. — Точки проведения измерений радиуса округления



а) *б)* *в)*

Рисунок 8. — Радиус округления образцов сверл после механических испытаний в вершине лезвия: без МИО *(а)*, после МИО по режиму I *(б)*, после МИО по режиму II *(в)*

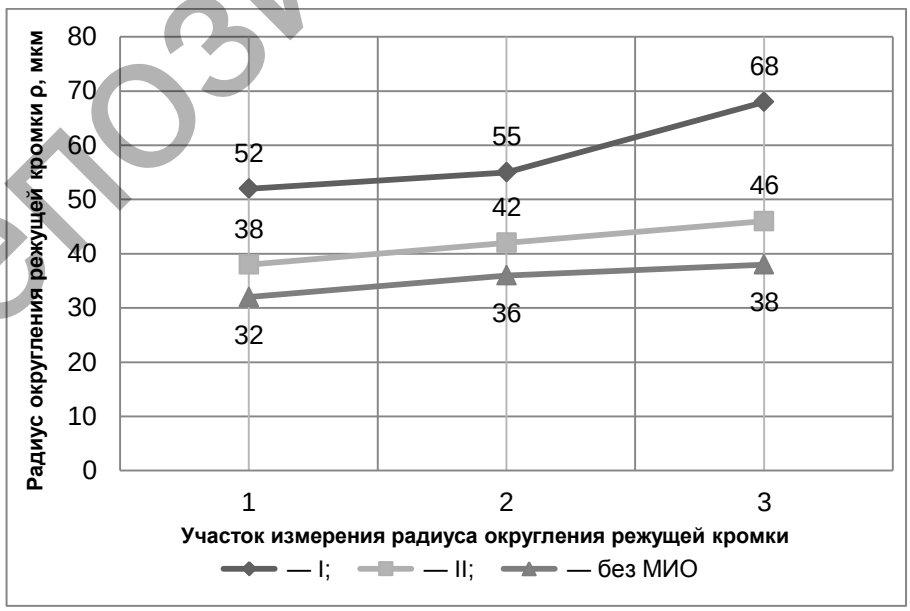


Рисунок 9. — Изменение радиуса округления режущей кромки сверл после механических испытаний

Репозиторий БарГУ

Учитывая, что степень затупления режущих кромок определяет фактическую стойкость сверла, можно считать, что стойкость сверла прямо пропорциональна радиусу округления. Из графика следует, что наилучшие показатели по стойкости имеет сверло после МИО по режиму I, с увеличением стойкости более чем в 1,8 раза. Сверло после МИО по режиму II имеет меньшее значение стойкости в сравнении со сверлом, упрочненным МИО по режиму I, однако его стойкость заметно превышает стойкость неупрочненного сверла.

Следовательно, интенсивность прироста радиуса округления (т. е. степени затупления) у сверла без МИО значительно возрастает по сравнению с упрочненными сверлами, что характеризуется более резким увеличением угла подъема кривой. Предположительно с течением времени значение показателей увеличения стойкости также будет возрастать.

Заключение. Показано, что для инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, в частности металлорежущих сверл спиральных, упрочняющий эффект с увеличением периода стойкости в 1,8 раза позволяет получить МИО на установке МИУ-2 по режиму 7 импульсов с энергией 10 кДж.

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. Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на микротвердость и микроструктуру образцов сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей / А. В. Алифанов [и др.] // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. — 2016. — Вып. 4. — С. 11—21.

4. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // Весці Нац. акад. навук. Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.

5. *Алифанов, А. В.* Магнитно-импульсная обработка стальных изделий / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // Перспективные материалы и технологии : сб. науч. тр. Гл. 25. — Витебск : ВГТУ, 2013. — С. 520—542.

6. *Горчанин, А. И.* Исследование ножей для резки сахарной свеклы, упрочненных магнитно-импульсной обработкой / А. И. Горчанин, А. М. Милюкова // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. — 2017. — Вып. 5. — С. 37—42.

7. Особенности влияния электромагнитного импульсного поля на тонколистовые стальные изделия / А. М. Милюкова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13—15 сент. 2017 г. : в 3 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2017. — Кн. 1. — С. 182—189.

8. Сверла спиральные. ГОСТ 2034. Часть 1 : Сб. ГОСТов. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 2003. — 20 с.

Данная работа была выполнена в рамках договора с ОАО «558 Авиационный ремонтный завод» № ОУ 314-08/16 ОТ 15.08.2016 в 2017 году.

Поступила в редакцию 11.04.2018

Репозиторий БарГУ

УДК 620.179.13

А. Е. Мойсейчик[1], Е. А. Мойсейчик[2]
[1]Белорусский национальный технический университет, 220013, Минск,
просп. Независимости, 65, +375 (17) 293 91 12
[2]Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь
+375 (17) 299 92 59, emoisseitchik@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПАРАМЕТРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ АГРЕГАТОВ И КОНСТРУКЦИЙ МАШИН

Рассмотрены физические основы использования температуры как диагностического параметра агрегатов и конструкций машин. Выделены особенности функционирования отдельных агрегатов и конструкций автосамосвалов БелАЗ и проанализирована практика их тепловой диагностики.

Ключевые слова: тепловой мониторинг; узлы и сооружения; техническое состояние.
Рис. 1. Библиогр.: 23 назв.

A. E. Moyseychik[1], E. A. Moyseychik[2]
[1]Belarusian National Technical University, 220013, Minsk, Nezavisimosti Ave, 65, +375 (17) 293 91 12
[2]Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str.,
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (17) 299 92 59, emoisseitchik@mail.ru

EFFICIENCY OF USING THE TEMPERATURE PARAMETER FOR THE DIAGNOSTICS OF MACHINES' UNITS AND CONSTRUCTIONS

The physical grounds for using temperature as a diagnostic parameter to investigate machines' units and constructions are considered. The peculiarities of functioning of separate units and constructions of dump trucks of the Belarusian automobile plant are singled out, and the practice of their thermal diagnostics is analyzed.

Key words: thermal monitoring; units and constructions; technical condition.
Fig. 1. Ref.: 11 titles.

Введение. В машиностроении и эксплуатации автотракторной техники методам тепловой диагностики в последние годы уделяется возрастающее внимание. При тяжелых режимах работы наличие бортовых систем диагностики существенно сказывается на эксплуатационной надежности и долговечности машин.

Основная часть. Особенно актуальна вышеуказанная проблема для эксплуатирующихся карьерных автосамосвалов [1—9]. Использование температуры в качестве диагностического параметра оценки работоспособности узлов и агрегатов машин предопределено физической природой процессов, протекающих при их кинематической работе, в результате которой до 95% механических и других форм энергии превращаются в тепловую и вызывают повышение температуры трущихся деталей, смазывающих и охлаждающих сред, пластически деформированных зон несущих элементов конструкций. В основных агрегатах автомобилей и тракторов, например, двигателях внутреннего сгорания, температуру охлаждающей среды контролируют постоянно и по ней судят о его работоспособности. В остальных агрегатах, содержащих смазывающие среды (гидромеханические передачи, коробки переключения передач, редукторы ведущих мостов, гидравлические системы), постоянного контроля их температуры не ведется. Но для большегрузных карьерных автосамосвалов нагрузки на трансмиссионные узлы намного выше, чем соответствующие нагрузки для автомобилей других типов. Так, эксперименты [8] показали, что между температурой масла редукторов мотор-колес (РМК) автосамосвалов

© Мойсейчик А. Е., Мойсейчик Е. А., 2018

Репозиторий БарГУ

БелАЗ и коэффициентом использования их грузоподъемности существует тесная корреляционная зависимость. Нагрев масла в РМК часто превышает 120°С, а в летнее время при температуре окружающего воздуха 30°С зафиксировано максимальное значение температуры масла в РМК около 161°С [8]. Нагрев масла в основном происходит за счет теплообмена с нагретыми поверхностями трущихся деталей и разогретыми металлическими частицами, попадающими в масло с поверхностей трения. При повышенных температурах трансмиссионное масло теряет свои смазывающие свойства и это приводит к ускорению износа поверхностей трения агрегатов. В других трансмиссионных узлах нагрев происходит по тому же механизму, что и в РМК. Другая группа узлов и конструкций машин работает при воздействии переменных и динамических нагрузок (пневматические шины, несущие рамы, балки, детали агрегатов и т. п.). В зонах изменений формы сечений, конструктивно-технологических дефектов, трещин в металлических изделиях при работе возникают области пластических [10] или вязкопластических деформаций [6; 7], в которых протекают процессы внутреннего трения. Нагрев материала в таких зонах происходит по механизму деформационного теплообразования [10].

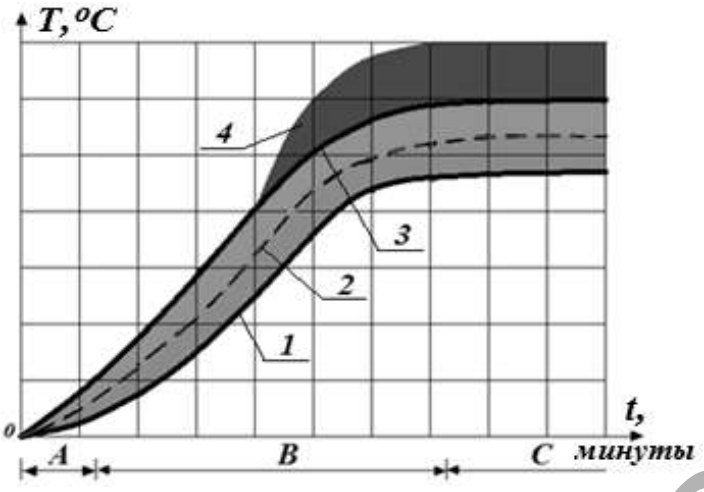
Высокая частота отказов шин карьерных автосамосвалов является причиной значительных затрат на поддержание работоспособности колес карьерных автосамосвалов (25…30% и более от суммы расходов на транспортирование массы [6]). Так, отказы шин карьерных автосамосвалов БелАЗ-75131 происходят, в основном, из-за износа протектора и порезов (около 96%). Появлению таких дефектов в шинах способствуют вздутия в материале шин, отслоения каркаса, расслоения и другие факторы, за появление которых ответственны процессы генерации теплоты при вязкопластических деформациях и термоактивация разрушения. В шинах модели 33.00R51 температура материала растет со средней скоростью 10°С / ч в первые 10 часов работы автосамосвалов БелАЗ-75131, а в дальнейшем увеличивается не более, чем на 1…3°С / ч, достигая за время работы примерно 110°С [6]. Проведенные авторами работы [6] исследования зависимости температуры шин от средней температуры окружающего воздуха ($t_{ср}$, °С), средней эксплуатационной массы, приходящейся на шины колес передней ($Q_{п.о}$, °С) и задней оси ($Q_{з.о}$, °С), средней эксплуатационной скорости автосамосвала БелАЗ-75131($V_{ср.э}$, км / ч) позволили получить [6] регрессионные модели для ($t_{ш.п.о}$, °С) и ($t_{ш.з.о}$, °С):

$$t_{ш.з.о} = 31{,}7 + 0{,}6\ t_{ср} + 0{,}148\ Q_{з.о}\ \ V_{ср.э};$$

$$t_{ш.п.о} = 26{,}5 + 0{,}6\ t_{ср} + 0{,}172\ Q_{п.о}\ \ V_{ср.э}.$$

Тепловое состояние движущихся шин зависит от многих факторов (размеров шины, геометрии рисунка протектора, механических и теплофизических характеристик материала шины, внутреннего давления в шине, нагрузки на колесо, скорости и продолжительности движения, температуры окружающего воздуха, температуры дорожного покрытия, его шероховатости и влажности) [11]. От температуры шины зависит сопротивление механическим воздействиям резины и корда шин, их сцепление, сопротивление качению колеса и долговечность шины [11]. Так, при повышении температуры от 0 до 100°С прочность капронового корда снижается до 20%, а резины и ее адгезии к корду — примерно в 2 раза [11]. При температуре выше критической для данного материала это снижение значительно. При металлокордном каркасе шин максимальные температуры в шинах на 10…20°С ниже, чем в шинах с неметаллическим каркасом. Такое явление объясняется большой теплопроводностью металлокорда, приводящей к распределению тепла на область шины, смежную с деформируемой. Нагрев произвольного агрегата (изделия) карьерного автосамосвала при различных режимах его работы можно схематически представить в пространстве «температура агрегата (T) — продолжительность работы автосамосвала (t)» (рисунок 1). На отрезке A происходит нагрев в начальной стадии работы агрегата, на временном отрезке B развивается регулярный нагрев, а отрезок C соответствует работе агрегата в стационарном режиме. Схему рисунка 1 иллюстрируют данные исследований О. М. Ларина [11], проявившие

Репозиторий БарГУ



1 — нормативная температура агрегата; *2* — допустимая температура агрегата; *3* — критическая температура агрегата; *4* — потенциально опасная температура агрегата

Рисунок 1. — Схема температурных режимов работы агрегата, изделия

различные температурные режимы работы материала шин. Оптимальной для долговечности и работоспособности шины является температура 70…75°С (при температуре окружающего воздуха 20°С). Температуру нагрева до 100°С автор работы [11] считает допустимой, интервал температур 100…121°С — критическим, а температуры выше 121°С — потенциально опасными для работоспособности шины. Для карьерных автосамосвалов БелАЗ критические температуры материала шин совпадают с данными исследования [11].

Авторы работы [12] основной физической причиной теплообразования в шине при ее движении считают способность резины «нагреваться при адиабатическом расширении». Это утверждение подкреплено ссылкой на [13]. В статье [14] экспериментально исследовано явление охлаждения—нагрева (эластокалорический эффект (ЭКЭ)) латексной резины при периодическом воздействии на нее растягивающей силы. В эксперименте на ленточных образцах из латексной резины шириной 5 мм, толщиной 0,6 мм и длиной от 7,3 до 44 мм варьировали относительной деформацией (от 200 до 700%) и частотой циклов нагружения (от 0,1 до 4 Гц). Латексная резина рассматривалась авторами [14] как высокоэластичный полимер, структура которого представляет собой звенья, соединенные в единую цепь. Такой материал обладает аномально низкой энтропией и отрицательным коэффициентом теплового расширения резины [14]. При растяжении резины цепи образца удлиняются с соответствующим снижением энтропии деформируемых объемов материала (при сжатии — обратный эффект). Указанные суждения позволили авторам [14] заключить, что причиной нагрева образца при растяжении и охлаждения его при обратном сжатии является энтропийная упругость. В эксперименте выявлено три диапазона частот циклов (низкие — от 0,1 до 0,3 Гц, средние — от 0,4 до 0,8 Гц, высокие — от 1 до 4 Гц), при которых проявляются различные ЭКЭ в резине (охлаждение, саморазогрев, уменьшение ЭКЭ). В первом диапазоне частот образец охлаждается ниже комнатной температуры, что является результатом следующих процессов при деформировании [14]. Быстрое (адиабатическое) растяжение приводит к нагреву резины. При дальнейшем теплообмене с окружающим воздухом растянутый образец охлаждается. Затем развивается быстрое (адиабатическое) сжатие и температура образца падает ниже начальной. Последующий разогрев при сжатии происходит медленнее, чем охлаждение развивалось при растяжении. Вследствие этого после ряда циклов устанавливается температура в образце ниже начальной (комнатной температуры).

Репозиторий БарГУ

В среднечастотном диапазоне в образце проявляется эффект саморазогрева из-за внутреннего трения.

При частотах растяжения—сжатия резины более 1 Гц величина ЭКЭ значительно падает. Причиной этого является деформирование полимерных цепей, сшитых между собой перекрестными связями. При растяжении такие цепи вытягиваются, перекрестные связи при обратном сжатии приходят в исходное состояние. При больших частотах сеть полимерных цепей и перекрестных связей изменяется при растяжении, а при сжатии образца времени на полное восстановление структуры недостаточно. Это и приводит к уменьшению ЭКЭ. Максимальная измеренная величина ЭКЭ в латексной резине достигает 14 К при относительной деформации образца, равной 700%, и частотах от 0,1 до 0,3 Гц [14].

В работах [15—20] исследовано изменение температуры различных участков шин от внутреннего давления в них, величины и частоты нагрузки на колесо и других факторов. В этих работах, выполненных независимо, в различные годы убедительно доказывается, что теплообразование в конструктивных элементах шин связано с гистерезисными потерями при деформировании различных участков шин. Деформирование элементов шин вызывает в материале большие внутренние напряжения, которые приводят к разрыву макромолекул резины, образованию макрорадикалов, способных инициировать различные механохимические реакции в резинах [21]. Разрыв изолированных макромолекул при механическом воздействии (механокрекинг) происходит при превышении внешними напряжениями прочности химической связи между атомами основной цепи макромолекулы, величина которой колеблется в пределах 4-6 Н-связь [21]. Механохимические реакции протекают в соответствии с законами химической термодинамики и сопровождаются тепловыми и другими эффектами. Эти реакции приводят к разрушению (механодеструкции) резин (полимеров), которая сопровождается эмиссией электронов, люминесценцией, а при наличии условий для торможения электронов, и рентгеновским излучением [21]. Это позволяет визуализировать процесс деформирования и разрушения резин с помощью тепловизионных приборов [9; 10; 18; 19]. Эмиссия электронов вызывает появление в макромолекулах резины стабильных активных центров. Следствием этого является существенное повышение активности резины в последующих реакциях окисления и структурирования [21]. Механодеструкция резин зависит от их физического состояния в момент деструкции; структуры макромолекул, условий протекания химического процесса (температура, скорость воздействия, среда, наличие примесей и т. д.) [21]. Механохимические реакции приводят к старению полимеров [21; 22], в результате чего следует ожидать различий в теплообразовании в новых и состаренных шинах. В работе [20] экспериментально показано, что «чем старее шина, тем выше ее температура» при деформировании.

В статье [19] приведены экспериментальные данные по тепловой нагруженности шины, работающей без избыточного давления в режиме качения колеса. Полученные результаты показали, что деформации шины в зоне контакта с опорной поверхностью вызывают меньший нагрев шины, чем изгибные деформации в элементах боковины. Поэтому шины при движении без избыточного давления нагреваются значительно интенсивнее в области боковины, чем в зоне протектора. Приращение температуры в боковине шины на 100…120% выше, чем по протектору [19]. В подобных условиях работают шины многих сельскохозяйственных машин [23]. Для обеспечения минимального давления на почву шины часто работают в режиме низкого и сверхнизкого рабочего давления (при давлении 35…100 кПа). Однако низкое рабочее давление в шинах сказывается на их сохранности и сроке службы. Очень низкое давление приводит к дефектам боковин, разгерметизации, разрушению шин. Повышенное давление в шинах вызывает увеличение износа протектора, неравномерный износ резины.

Заключение. В ходе исследования получены следующие результаты:

1) выполненный анализ экспериментальных исследований различных авторов доказывает перспективность технической диагностики тепловым методом агрегатов и узлов тяжело нагруженной автотракторной техники, источником теплообразования в которых являются процессы трения (двигатели, трансмиссионные узлы) или деформационное теплообразование в материалах (пневматические шины, стальные элементы с трещинами и др.);

Репозиторий БарГУ

2) контроль тяжело нагруженных и потенциально опасных агрегатов и несущих конструкций следует проводить в режиме мониторинга их теплового состояния системой бортовой диагностики с использованием как контактных, так и бесконтактных датчиков температуры;

3) применение тепловой диагностики шин сельхозтехники позволит найти оптимальные режимы их эксплуатации;

4) для более широкого применения теплового метода при диагностике автотракторной техники, в том числе техники сельскохозяйственного назначения, необходимо выполнение дополнительных исследований.

Список цитируемых источников

1. *Бобровицкий, В. И.* Механическое оборудование: техническое обслуживание и ремонт / В. И. Бобровицкий, В. А. Сидоров. — Донецк : Юго-Восток, 2011. — 238 с.

2. *Богданов, С. А.* Разработка метода определения изменения технического состояния агрегатов трансмиссии автомобилей по показателям их теплового состояния : автореф. дис. … канд. техн. наук / С. А. Богданов. — Харьков, 1987. — 23 с.

3. *Зайцев, А. В*. Разработка метода теплового расчета ведущих мостов автомобилей : автореф. дис. … канд. техн. наук / А. В. Зайцев. — Курган, 1999. — 19 с.

4. *Бердик, Б. Г.* Смазочное масло как элемент конструкции, неразрушающего контроля и диагностики техники при эксплуатации по состоянию / Б. Г. Бердик // Контроль. Диагностика. — 2005. — № 5. — С. 23—26.

5. *Хорешок, А. А.* Влияние условий эксплуатации на тепловое состояние редукторов мотор-колес автосамосвалов БелАЗ / А. А. Хорешок, Д. В. Стенин, Н. А. Стенина // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 2. — С. 28—30.

6. *Горюнов, С. В.* Прогнозирование эксплуатационной температуры пневматических шин карьерных автосамосвалов / С. В. Горюнов, В. М. Шарипов // Изв. ИГТУ «МАМИ». — 2012. — Т. 1. —№ 2(14). — С. 89—92.

7. *Шарипов, В. М.* Прогнозирование долговечности пневматических шин карьерных автосамосвалов / В. М. Шарипов, С. В. Горюнов. — М. : Горная книга, 2015. — С. 127—130.

8. *Стенин, Д. В.* Оценка влияния загрузки на надежность редукторов мотор-колес карьерных автомобилей / Д. В. Стенин, Н. А. Стенина, Ю. Е. Воронов // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. — 2017. — № 2. — С. 94—99.

9. *Вавилов, В. П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. — М. : Спектр, 2009. — 544 с.

10. *Мойсейчик, Е. А*. Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом / Е. А. Мойсейчик // Прикладная механика и техн. физика. — 2013. — № 1. — С. 134—142.

11. *Ларін, О. М.* Теоретичні основи оцінки працездатності шин легкового автомобіля у експлуатації : дис. … д-ра техн. наук : 05.22.20 / О. М. Ларін. — Киев, 2001. — 392 с.

12. *Гринчук, П. С.* Теплообмен с воздухом и профиль температуры в движущейся крупногабаритной шине / П. С. Гринчук, С. П. Фисенко // Инженер.-физич. журн. — 2016. — Т. 89. —№ 6. — С. 1 387—1 391.

13. *Кубо, Р.* Термодинамика / Р. Кубо. — М. : Мир, 1970. — 304 с.

14. Эластокалорический эффект в резине при периодическом воздействии растягивающей силы / Е. В. Морозов [и др.] // Журн. техн. Физики. — 2016. — Т. 86. — Вып. 11. — С. 75—79.

15. *Ларин, А. А.* Исследование формирования теплового состояния пневматических шин в процессе стационарного качения [Электронный ресурс] / А. А Ларин, И. М. Баранник. — Режим доступа: repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/16402. — Дата доступа: 04.04.2018.

16. *Lin, Yeong-Jyh.* Temperature prediction of rolling tires by computer simulation / Lin Yeong-Jyh, Hwang Sheng-Jye // Math. Comp.Simul. — 2004. — Vol. 67. — Pp. 235—249.

17. *Коханенко, В. Б.* Порівняльні дослідження температурних полів шин автомобілів / В. Б. Коханенко, А. М. Юрченко, О. М. Ларін // Автошляховик України. — 2002. — № 3. — С. 20—22.

18. *McCarty, J. L.* Temperature Distribution in an Aircraft Tire at Low Ground Speeds / J. Locke McCarty, J. A. Tanner // NASA Technical Paper 2195. Langley Research Center. — Hampton, 1983. — 34 p.

19. *Еремин, Г. П.* Экспериментальное исследование тепловой нагруженности безопасных колес / Г. П. Еремин, А. Б. Карташов, А. А. Смирнов // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. — 2015. — № 4. — С. 49—56.

20. *Бабичева, О. Ф.* Определение диапазона температурного режима троллейбусных шин [Электронный ресурс] / О. Ф. Бабичева, Н. П. Лукашова // Коммунал. хоз-во городов : науч.-техн. сб. № 74. — Режим доступа: http:// eprints.kname.edu.ua/4139/1/393-396_БАБИЧЕВА_О. Ф..pdf. — Дата доступа: 04.04.2018.

21. *Карасёва, С. Я.* Химические реакции полимеров / С. Я. Карасёва, В. С. Саркисова, Ю. А. Дружинина. — Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2012. — 125 с.

22. *Зайков, Г. Е.* Почему стареют полимеры / Г. Е. Зайков // Сорос. образоват. журн. — 2000. — Т. 6. — № 12. — С. 48—55.

23. *Клепикова, С.* Обувь для трактора [Электронный ресурс] / С. Клепикова // Агротехника и технологии. — Режим доступа: www.agroinvestor.ru/technologies/article/15063-obuv-dlya-traktora. — Дата доступа: 03.04.2018.

Поступила в редакцию 14.04.2018

Репозиторий БарГУ

УДК 621.91

В. И. Молочко, Е. В. Рогозина
Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь + 375 (163) 48 73 97, katya.korobkina@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

В статье проанализированы факторы, влияющие на величину сил сопротивления резанию. Показано, что экспериментальные методы исследования динамики резания предпочтительнее теоретических, так как эмпирические формулы по сравнению с теоретическими зависимостями дают более точные результаты. Рассмотрены методы обработки экспериментальных данных при использовании в качестве аппроксимирующих степенных зависимостей типа $y = Ax^q$. Представлена методика получения общих зависимостей составляющих сил резания от режимных параметров на основе частных зависимостей, полученных экспериментальным путем. Рассмотрена методика проведения лабораторной работы по определению тангенциальной составляющей силы резания P_z с использованием однокомпонентного механического динамометра.

Ключевые слова: сила сопротивления резанию; динамика резания; тангенциальная составляющая силы резания.
Рис. 1. Библиогр.: 3 назв.

V. I. Molochko, E. V. Rogozina
Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belurus, 21 Voykova str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, + 375(163) 48 73 97, katya.korobkina@mail.ru

EXPERIMENTAL METHODS OF RESEARCH OF THE DYNAMICS OF CUTTING DURING TURNING

The article deals with the factors that affect the volume of the cutting resistance forces. It is shown that experimental methods for studying cutting dynamics are preferable to theoretical ones, since empirical formulas, in comparison with theoretical relationships, give more accurate results. Methods for processing experimental data are considered, when used as approximating power-law dependencies of mode $y = Ax^q$. A method is presented for obtaining the general dependences of the cutting force components on the regime parameters on the basis of particular dependences which were obtained experimentally. The technique of performing laboratory work to determine the tangential component of cutting force Pz, using a one-component mechanical dynamometer is considered.

Key words: cutting resistance force; dynamics of cutting; tangential component of cutting force.
Fig. 1. Ref.: 3 titles.

Введение. При точении конструкционных материалов возникает реактивная сила сопротивления резанию *R*, для преодоления которой со стороны резца должна быть приложена равная ей, но противоположно направленная действующая сила резания *P*. Величина этой силы определяется установленными на станке режимными параметрами, определяющими интенсивность процесса резания, а также механическими свойствами обрабатываемого материала (прочность, твёрдость и пластичность). Существенное влияние на величину силы резания оказывают силы внешнего трения между инструментом и стружкой, инструментом и обработанной поверхностью заготовки, а также силы внутреннего трения между слоями разогретой стружки при образовании наростов, при сдвиге стружечных элементов по плоскостям скалывания в процессе обработки пластичных конструкционных материалов.

Определённое влияние на величину силы резания оказывают и другие факторы, например, геометрия режущего инструмента, наличие (или отсутствие) смазочно-охлаждающей жидкости, степень затупления инструмента и др.

© Молочко А. М., Рогозина Е. В., 2018

Репозиторий БарГУ

Основная часть. Для нахождения величины силы резания используют аналитические и экспериментальные методы исследования. Однако расчётные формулы, полученные аналитическим путём, неудобны для практического применения ввиду громоздкости конечных математических выражений. Попытки же их упрощенного представления (уравнение Зворыкина) приводят к существенной потере точности расчётов. К тому же в состав теоретических формул входят параметры, величины которых переменны, а законы их изменения заранее неизвестны. Это, например, коэффициенты внутреннего трения между разогретыми слоями срезаемой стружки, коэффициенты внешнего трения пары «обрабатываемый материал — конструкционный материал», углы наклона плоскостей скалывания при образовании суставчатой стружки. Механические характеристики прочности и твёрдости обрабатываемого материала также точно неизвестны (задаются в виде диапазона значений). Для нахождения величины и характера изменений указанных неизвестных параметров, особенно неизвестных параметров трения, требуется проведение специальных экспериментальных исследований в условиях высоких давлений и температур, характерных для процесса резания, воссоздание (моделирование) которых связано со значительными техническими трудностями.

Поскольку аналитические методы исследования динамики резания всё равно не могут быть реализованы без экспериментального определения ряда неизвестных параметров, прежде всего параметров трения, было признано более целесообразным выполнение экспериментов по непосредственному нахождению проекций силы резания P на координатные оси X, Y и Z, используя для этого специальные динамометрические средства измерения.

В теории резания, как правило, в качестве осей X и Y принимают направления векторов подач, а в качестве оси Z — направление, совпадающее с вектором главного движения. В частности, при точении в качестве оси X принято направление, параллельное продольной оси обрабатываемой заготовки, совпадающее с направлением вектора продольной подачи $S_{пр}$; в качестве оси Y — радиальное по отношению к обрабатываемой заготовке, совпадающее с вектором поперечной подачи $S_{поп}$, а в качестве оси Z — тангенциальное направление, т. е. направление, совпадающее с касательной к обрабатываемой заготовке в точке её контакта с режущей кромкой резца. В соответствии с установленными направлениями осей X, Y и Z, проекцию силы резания P_x при точении принято называть осевой, проекцию силы резания P_y — радиальной, проекцию силы резания P_z — тангенциальной составляющей силы резания P [1].

Если составляющие силы резания P рассчитаны или измерены, т. е. известны, то результирующую силу резания P можно найти по правилу диагонали параллелепипеда, построенного на составляющих силах резания P_x, P_y и P_z, а направление ее действия относительно координатных осей оценить с помощью направляющих косинусов, однако чаще всего в определении модуля и направления действия результирующей силы резания P нет необходимости, так как знание величин проекций P_x, P_y и P_z обеспечивает возможность решения основных задач динамики резания, связанных с практикой проектирования и эксплуатации металлорежущих станков и инструментов.

Так, например, знание величины осевой составляющей силы резания P_x позволяет оценить нагрузку, действующую на коробку подач токарного станка, что является основой для проведения прочностных расчетов и выбора габаритных размеров ее звеньев.

Радиальная составляющая силы резания P_y в значительной мере определяет конечную точность обработки на токарном станке, так как от этой силы зависят величина прогиба обрабатываемой детали, прочность и жесткость отдельных деталей технологической оснастки и самого токарного станка; кроме того сила P_y является составной частью нагрузки на резец, учет которой необходим при выборе поперечных размеров державки резца.

Наибольшей из трех является тангенциальная составляющая силы резания P_z; она определяет величину крутящего момента $M_{кр}$ на шпинделе станка, а также величину мощности $N_{рез}$, необходимой для осуществления процесса резания, что позволяет производить прочностные расчеты и выбор габаритных размеров звеньев коробки скоростей токарного

Репозиторий БарГУ

станка. Кроме того сила P_z совместно с составляющей силы резания P_y определяет нагрузку на режущий инструмент, что позволяет производить его расчеты на прочность и жесткость, включая расчеты на прочность твердосплавных напайных и неперетачиваемых многогранных пластин.

В общем случае при проведении экспериментальных исследований зависимость $y = f(x)$, т. е. зависимость между искомой функцией y и заданными значениями аргумента x получают в табличном виде. После нанесения экспериментальных точек (значений функции y_i) на поле чертежа возникает задача визуального подбора аппроксимирующей функции и обработки полученных экспериментальных данных с целью определения неизвестных постоянных параметров этой функции.

При аппроксимации однофакторных $y = f(x)$ экспериментальных зависимостей, к числу которых относятся частные зависимости составляющих сил резания от режимных параметров, например, от глубины резания t, подачи на оборот S_o и скорости резания V, частные зависимости тангенциальной составляющей силы резания от механических характеристик обрабатываемого материала (от предела прочности $\sigma_в$ или твердости HB) широко используются степенные функции типа $y = Ax^q$, с помощью которых описываются (рисунок 1) не только монотонно (т. е. без перегибов) возрастающие зависимости, у которых показатель степени $q > 0$, например, кривая 1 , у которой $q > 0$, прямая 2, у которой $q = 1$, кривая 3, у которой q лежит в диапазоне $0 < q < 1$, но и постоянные зависимости, являющиеся частным случаем степенной функции, у которых $q = 0$ (прямая 4), а также монотонно убывающие степенные зависимости (кривые 5 и 6), у которых $q < 0$.

В том случае, когда $q = 0$ или $q = 1$, т. е. когда численное значение показателя степени q известно, определению подлежит один неизвестный параметр степенной функции — это постоянный коэффициент A, который может быть найден путем использования при обработке экспериментальных данных метода среднего арифметического. Применение этого метода при аппроксимации экспериментальной зависимости $y = f(x)$ степенной функцией, у которой $q = 0$, т. е. постоянной функцией типа $y = A$ дает

$$A = \frac{y_1 + y_2 + \ldots + y_n}{n} = \frac{\sum_1^n y}{n} = \bar{y},$$

где $y_1, \ldots, y_n$ — ряд экспериментальных значений функции y_i, соответствующих заданным значениям исходного параметра x_i, а $\bar{y}$ — среднее арифметическое этих значений.

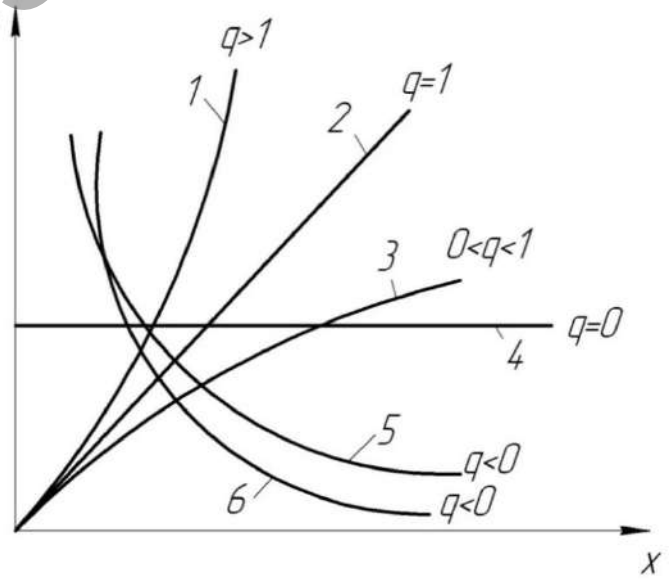


Рисунок 1. — Виды степенных зависимостей $y = Ax^q$

Репозиторий БарГУ

При аппроксимации экспериментальной зависимости $y = f(x)$ степенной функцией, у которой $q = 1$, т. е. линейной функцией типа $y = Ax$, постоянный параметр A определяется как среднее арифметическое угловых коэффициентов $A_1, A_2, \ldots, A_n$ ряда линий, соединяющих начало координат с каждой из n экспериментальных точек. Следовательно, в этом случае

$$A = \frac{A_1 + A_2 + \ldots + A_n}{n},$$

где $A_1 = \frac{y_1}{x_1}, A_2 = \frac{y_2}{x_2}, \ldots, A_n = \frac{y_n}{x_n}$, причем x_1, x_2, x_n — заданные значения исходного параметра x, a, $y_1, y_2, \ldots, y_n$ — соответствующие заданным значениям параметра x экспериментальные значения искомого параметра y.

Если экспериментальная зависимость $y = f(x)$ аппроксимируется линейной функцией типа $y = y_0 + Ax$, то тогда к числу неизвестных, подлежащих определению в результате обработки, экспериментальных данных добавляется и начальное значение функции y_0.

Неизвестность положения на оси ординат начальной точки пучка прямых, соединяющих эту точку с экспериментальными значениями функции $y_1, y_2, \ldots, y_n$, делает невозможным применение метода среднего арифметического для нахождения углового коэффициента A. В этом случае для определения неизвестных параметров аппроксимирующей функции используют метод наименьших квадратов [2]. При применении этого метода результирующая теоретическая линия проводится таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений (ошибок) экспериментальных значений y_i относительно теоретических значений y была минимальной, т. е. чтобы была минимальной функция

$$\sum_1^n E_i^2 = \sum_1^n (y_i - y)^2. \quad (1)$$

Подстановка в выражение (1) значения аппроксимирующей функции $y = y_0 + Ax$ дает

$$\sum_1^n E_i^2 = \sum_1^n (y_i - y_0 - Ax)^2. \quad (2)$$

После возведения в квадрат и некоторых преобразований функция (2) приводится к виду

$$\sum_1^n E_i^2 = \sum_1^n y_i^2 + n y_0^2 + A\sum_1^n x_i^2 - 2y_0 \sum_1^n y_i - 2A\sum_1^n y_i x_i + 2Ay_0 \sum_1^n x_i.$$

Чтобы найти значения параметров y_0 и A, при которых функция будет иметь минимальное значение, приравняем нулю частные производные $\frac{\partial \sum_1^n E_i^2}{\partial y_0} = 0$ и $\frac{\partial \sum_1^n E_i^2}{\partial A} = 0$.

Выполнив необходимые математические действия, получаем систему уравнений

$$A\sum_1^n x_i^2 + y_0 \sum_1^n x_i = \sum_1^n x_i y_i,$$

$$A\sum_1^n x + n y_0 = \sum_1^n y_i,$$

Репозиторий БарГУ

решение которой дает

$$A=\frac{\sum_1^n x_1 y_1-\bar{y}\sum_1^n x_i}{\sum_1^n x^2-\bar{x}\sum_1^n x}, \tag{3}$$

$$y_0=\bar{y}+A\bar{x}. \tag{4}$$

В формулах (3) и (4) $\bar{x}$ и $\bar{y}$ — средние арифметические значения параметров $\bar{x}=\frac{\sum_1^n x_i}{n}$ и $\bar{y}=\frac{\sum_1^n y_i}{n}$.

Если экспериментальная зависимость *y=f(x)* аппроксимируется криволинейной степенной зависимостью $y=Ax^q$, то её путем логарифмирования представляют в виде

$$\lg y=\lg A+q\lg x. \tag{5}$$

Указанную математическую операцию называют линеаризацией криволинейной степенной функции, так как в системе двойных логарифмических координат $\lg y=f(\lg x)$ выражение (5) фактически представляет собой уравнение прямой линии, не проходящей через начало координат. В связи с этим для определения неизвестных параметров $\lg A$ и q можно воспользоваться формулами (3) и (4), подставляя в них вместо численных значений x_i и y_i логарифмы этих чисел $\lg x_i$ и $\lg y_i$. Тогда получим

$$q=\frac{\sum_1^n \lg x_i\cdot\lg y_i-\overline{\lg y}\sum_1^n \lg x_i}{\sum(\lg x_i)^2-\overline{\lg x}\sum_1^n \lg x_i} \tag{6}$$

и

$$\lg A=\overline{\lg y}-q\overline{\lg x}=M, \tag{7}$$

откуда

$$A=10^M.$$

В формулах (6) и (7) $\overline{\lg y}$ и $\overline{\lg x}$ — средние арифметические значения $\overline{\lg y}=\frac{\sum_1^n y}{n}$ и $\overline{\lg x}=\frac{\sum_1^n x_i}{n}$.

При экспериментальных исследованиях влияния различных факторов на величину составляющих силы резания изменяют один из режимных параметров при сохранении постоянства всех других режимных и иных факторов, получая после обработки экспериментальных данных так называемые частные степенные зависимости в виде

$$\left.\begin{aligned} P_{x_t}&=C_{x_t}t^{x_{P_x}}\\ P_{y_t}&=C_{y_t}t^{x_{P_y}}\\ P_{z_t}&=C_{z_t}t^{x_{P_z}} \end{aligned}\right\} \quad (\text{при } S=S_{\text{н}} \text{ и } V=V_{\text{н}}); \tag{8}$$

Репозиторий БарГУ

$$\left.\begin{aligned} P_{x_s} &= C_{x_s} S^{y_{P_x}} \\ P_{y_s} &= C_{y_s} S^{y_{P_y}} \\ P_{z_s} &= C_{z_s} S^{y_{P_V}} \end{aligned}\right\} \quad (\text{при } t = t_{\text{н}} \text{ и } V = V_{\text{н}}) \tag{9}$$

$$\left.\begin{aligned} P_{x_V} &= C_{x_V} V^{Z_{P_x}} \\ P_{y_V} &= C_{y_V} V^{Z_{P_y}} \\ P_{z_V} &= C_{z_V} V^{Z_{P_z}} \end{aligned}\right\} \quad (\text{при } t = t_{\text{н}} \text{ и } S = S_{\text{н}}) \tag{10}$$

В формулах (8)—(10) $t_{\text{н}}$, $S_{\text{н}}$ и $V_{\text{н}}$ — начальные условия эксперимента, т. е. установленные на станке значения неизменяемых режимных параметров.

Проведение экспериментов с разными числовыми значениями неизменямых числовых параметров дает разные значения постоянных коэффициентов $C_{x_t} \dots C_{z_V}$; значения же показателей степени $X_{P_x} \dots Z_{P_z}$ остаются при этом неизменными. Из этого следует два вывода: 1) частные зависимости (8)—(10) не могут быть использованы для расчета составляющих силы резания без предварительного проведения экспериментов с требуемыми для данного конкретного случая значениями неизменяемых режимных параметров, что неудобно и практически трудно осуществимо; 2) постоянство показателей $X_{P_x} \dots Z_{P_z}$ при разных начальных условиях эксперимента дает основание для предположения об отсутствии взаимовлияния режимных параметров и сохранения численных величин этих показателей при переходе к многофакторным степенным зависимостям типа

$$P_y = C_{P_x} t^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} V^{z_{P_x}};$$

$$P_z = C_{P_y} t^{x_{P_y}} S^{y_{P_y}} V^{z_{P_y}}; \tag{11}$$

$$P_x = C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} V^{z_{P_z}}. \tag{12}$$

Считая, что расчет значений сил по однофакторным и многофакторным зависимостям должен дать одинаковый результат, приравняем поочередно

$$P_{x_1} = C_{x_t} t^{x_{P_x}} = C_{P_{x_1}} t^{x_{P_x}} S_{\text{н}}^{y_{P_x}} V_{\text{н}}^{z_{P_x}};$$

$$P_{x_2} = C_{x_s} S^{y_{P_x}} = C_{P_{x_2}} t_{\text{н}}^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} V_{\text{н}}^{z_{P_x}};$$

$$P_{x_3} = C_{x_V} V^{z_{P_z}} = C_{P_{x_3}} t_{\text{н}}^{x_{P_x}} S_{\text{н}}^{y_{P_x}} V^{z_{P_x}},$$

Репозиторий БарГУ

откуда получим три значения постоянного коэффициента C_{P_x} многофакторной зависимости:

$$C_{P_{x1}} = \frac{C_{x_t}}{S_{\text{н}}^{y_{P_x}} V_{\text{н}}^{z_{P_z}}}; \qquad C_{P_{x2}} = \frac{C_{x_s}}{t_{\text{н}}^{x_{P_x}} V_{\text{н}}^{z_{P_x}}}; \qquad C_{P_{x3}} = \frac{C_{x_V}}{t_{\text{н}}^{x_{P_x}} S_{\text{н}}^{y_{P_x}}}.$$

В качестве расчетного принимают среднее его значение, равное

$$C_{P_x} = \frac{C_{P_{x1}} + C_{P_{x2}} + C_{P_{x3}}}{3}.$$

Аналогичным образом определяются коэффициенты C_{P_y} и C_{P_z} многофакторных зависимостей (11) и (12), а именно

$$C_{P_y} = \frac{C_{P_{y1}} + C_{P_{y2}} + C_{P_{y3}}}{3} \qquad \text{и} \qquad C_{P_z} = \frac{C_{P_{z1}} + C_{P_{z2}} + C_{P_{z3}}}{3},$$

где

$$C_{P_{y1}} = \frac{C_{y_t}}{S_{\text{н}}^{y_{P_y}} V_{\text{н}}^{z_{P_y}}}; \qquad C_{P_{y2}} = \frac{C_{y_s}}{t_{\text{н}}^{x_{P_y}} V_{\text{н}}^{z_{P_y}}}; \qquad C_{P_{y3}} = \frac{C_{y_V}}{t_{\text{н}}^{x_{P_y}} S_{\text{н}}^{y_{P_y}}}$$

и

$$C_{P_{z1}} = \frac{C_{z_t}}{S_{\text{н}}^{y_{P_z}} V_{\text{н}}^{z_{P_z}}}; \qquad C_{P_{z2}} = \frac{C_{z_s}}{t_{\text{н}}^{x_{P_z}} V_{\text{н}}^{z_{P_z}}}; \qquad C_{P_{z3}} = \frac{C_{z_V}}{t_{\text{н}}^{x_{P_z}} S_{\text{н}}^{y_{P_z}}}.$$

Вычисленные подобным образом значения постоянных коэффициентов $C_{P_x}, C_{P_y}, C_{P_z}$ и показателей степеней $x_{P_x}, x_{P_y}, x_{P_z}$; $y_{P_x}, y_{P_y}, y_{P_z}$ и $z_{P_x}, z_{P_y}, z_{P_z}$ приведены в справочной литературе, например, [3]. Их величины определяются свойствами обрабатываемого и инструментального материалов, а также видом токарной обработки (обтачивание, подрезание торца, растачивание, отрезание и прорезание канавок).

Заключение. Проведение экспериментов с целью получения однофакторных степенных зависимостей по всем трем составляющим силы резания требует наличия трехкомпонентного динамометра и существенных временных затрат на обработку экспериментальных данных. Поскольку методика проведения экспериментального исследования во всех трех случаях идентична, то можно с целью экономии учебного времени ограничиться исследованием влияния режимных параметров *t*, *S* и *V* на одну тангенциальную составляющую силы резания P_z, которая является наибольшей из трех. В этом случае для проведения экспериментов достаточно наличия в учебной лаборатории одного простейшего однокомпонентного динамометра, например, механического типа. С помощью указанного динамометра возможно в зависимости от ресурса учебного времени решение двух задач: 1) определение степени влияния режимных параметров на величину силы резания P_z, т. е. определение величины показателей степени x_{P_z}, y_{P_z} и z_{P_z}; 2) определение степени влияния обрабатываемого

Репозиторий БарГУ

и инструментального материалов на величину силы резания P_z, т. е. нахождение численной величины постоянного коэффициента C_{Pz} в многофакторной зависимости силы резания P_z от режимных параметров.

Первую задачу можно решать без предварительной тарировки динамометра, используя при построении графиков и выводе однофакторных (частных) зависимостей вместо силы P_z пропорциональные ей показания П линейных перемещений регистратора прибора (в данном случае индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм) в виде $\Pi_t = C_t^{'} t^{x_{P_z}}$; $\Pi_s = C_s^{'} S^{y_{P_z}}$ и $\Pi_V = C_V^{'} V^{z_{P_z}}$.

Для решения второй задачи необходим тарировочный график динамометра. При наличии учебного времени операция тарирования должна быть составной частью лабораторной работы. При ограниченных временных ресурсах можно воспользоваться готовым тарировочным графиком. Зная масштаб силы, т. е. число силовых единиц силы, приходящихся на одно деление индикатора, следует определить значения постоянных C_t, C_s и C_V в пересчитанных однофакторных зависимостях $P_{z_t} = C_t t^{x_{P_z}}$; $P_{z_s} = C_s S^{y_{P_z}}$ и $P_{z_V} = C_V S^{z_{P_z}}$, после чего по описанной выше методике определить величину постоянного коэффициента C_{P_z} в многофакторной зависимости $P_z = C_{P_z} t^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} V^{z_{P_z}}$.

Список цитируемых источников

1. *Ящерицын, П. И.* Теория резания / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. — 2-е изд., испр. и доп. — Минск : Новое знание, 2007. — 512 с. : ил. — (Техническое образование).

2. *Ящерицын, П. И.* Основы резания материалов и режущий инструмент / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко. — 2-е изд., доп. и перераб. — Минск : Выш. шк., 1981. — 560 с. : ил.

3. Общемашиностроительные нормативы режимов резания : справочник : в 2 т. / А. Д. Локтев [и др.] ; под общ. ред. А. Д. Локтева. — М. : Машиностроение, 1991. — 640 с.

Поступила в редакцию 16.03.2018

Репозиторий БарГУ

UDC 658.51.012

О. М. Пигнастый, Н. А. Дударев
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Министерство науки и образования Украины, ул. Пушкинская, 79-2, Харьков, Украина, 61102, +38 (050) 634 30 60, info@kml.kh.ua

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДМЕТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО И ПОТОКОВОГО УРОВНЕЙ ОПИСАНИЯ

С использованием статистического подхода, который широко распространен в естественных науках, представлена модель производственного процесса производственно-технической системы с поточным способом организации производства. Состояние макропараметров производственного процесса производственно-технической системы задается множеством состояний предметов труда. Состояние отдельного предмета труда задано точкой в фазовом технологическом пространстве. Введена функция распределения предметов труда по состоянию и записано кинетическое уравнение для функции распределения предметов труда по состояниям технологической обработки. Записана замкнутая система динамических уравнений (уравнений баланса), описывающая поведение во времени значений первых моментов функции распределения, которые характеризуют плотность распределения межоперационных заделов и темп обработки предметов труда по технологическим операциям.

Ключевые слова: производственная линия; предмет труда; поточная линия; параметры состояния поточной линии; технологическая позиция; переходной период; системы управления производством; кинетическое уравнение; массовое производство; незавершенное производство; PDE-модель производства.

O. M. Pignastiy, N. A. Dudarev
National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ministry of Science and Education of Ukraine, 79-2 Pushkinskaya Str., 61102 Kharkov, Ukraine, +38 (050) 634 30 60, info@kml.kh.ua

ABOUT SIMULATION OF PRODUCTION WITH THE USE OF SUBJECT-TECHNOLOGICAL AND FLOW LEVELS OF DESCRIPTION

Using the statistical approach, which is widespread in the natural sciences, a model of the production process of the technological system with a streamlined method of organizing production is presented. The state of macroparametres of the production process of the technological system is determined by the set of states of subjects of labor. The state of a particular subject of labor is given by a point in the phase of technological space. The function of distribution of subjects of labor by state is introduced, and the kinetic equation for the distribution function of subjects of labor according to the conditions of technological processing is written.

A closed system of dynamic equations (balance equations), that describes the behavior in time of the meanings of the first moments of the distribution function, which characterize the distribution density of interoperational stocks and the rate of processing of subjects of labor by technological operations, is suggested.

Key words: production line; subject of labor; production line; parameters of the state of the production line; technological position; transition period; production management systems; kinetic equation; mass production; work in progress; PDE production model.
Ref.: 27 titles.

Introduction. Variety and complexity of manufacturing technologies of a product creating premises to simulation of the technological process of production-technical system based on idea of it as a complex of the subjects of labor, which are in different stages of technological processing [1—4]. However, it is almost impossible to trace a behavior of the separately taken subject of the labor because of quality and the probable nature of influence on the subject of the labor of a technology equipment [4, 5]. Effective approach to simulation of big systems is the statistical approach [6—9], considering technological process at two levels of the description on the subject-technological level [10] and flow level [11]. At the subject-technological level patterns of behavior

© Пигнастый О. М., Дударев Н. А., 2018

Репозиторий БарГУ

of separate elements of a system, on a flow level — their aggregated characteristics and communications between these characteristics are researched. Interconnection between levels is carried out through the kinetic equation [12—14]. This article is devoted to features of application of statistical approach to simulation of technological systems.

Main part. ***1. Subject-Technological Level of The Description of Technological Process.*** During execution of technological operation regarding work, the cost of technological resources by purposeful influence of a technology equipment is transferred [2; 5; 8; 15]. On each operation, inevitably there are oscillations of geometrical characteristics, physicomechanical properties of materials, which are caused by a complex of arbitrary and systematic production factors. Thus, technological process is accidental process of transition of subjects of the labor of one status in another because of influence of a technology equipment. Its status is defined as a status of number of subjects of the labor [5—9]. Coordinates in phase technological space to time point can provide the status of an subject of the labor (t, S, μ) [2; 6]: cost amount S_j ($) and intensity of transfer of expenses in unit of time μ_j ($ / hour) from a technology equipment on j subject of the labor, $0 < j <$ N. Coordinates S_j and μ_j also define technological paths of subjects of the labor in phase technological space $S_j = S_j(t)$. Intensity of transmission of expenses $\Delta S = \Delta S(t)$ from means of labor on j subject of the labor for runtime of technological operation Δt is accidental process [4; 7; 8; 15], which value in the fixed time point is defined by a random variable [6]

$$\mu = \frac{\Delta S}{\Delta t}. \tag{1}$$

The system status in some time point will be defined if micro parameters are determined S_j and μ_j, and in any other time point, it is found from equations of state of parameters of an subject of the labor [16]:

$$\frac{dS_j}{dt} = \mu_j, \frac{d\mu_j}{dt} = f_j(t, S), \tag{2}$$

$f_j(t, S)$ — production function for a technology equipment [17]. If the quantity of subjects of the labor are much more than unit, then to solve system (2) from $2N$ — the equations are almost impossible. Instead of reviewing of a status of subject of the labor of technological process with parameters S_j and μ_j, we will enter the normalized function of distribution of subject of the labor on statuses. Each point in this space will set a status of an subject of the labor [6; 14; 18]. It is reasonable to expect that in case of big N this function will be well approximated by the continuous function of distribution of subject of the labor on statuses $\chi(t, S, \mu)$.

2. Kinetic Description of Technological Process. We will break phase space into such number of cells that the cell sizes $\Delta\Omega = \Delta S \cdot \Delta\mu$ there were much less values of characteristic (1) parameters of technological system and at the same time contained in themselves a large number of subjects of the labor. Instead of fixing exact parameter values of subjects of the labor, we will characterize approximately a status of technological system by number of subjects of the labor in each cell $\Delta\Omega$ [6; 8; 13]. If the sizes of a cell are rather small, then the approximate description will bear in itself almost so detailed information, as exact. That value $\chi(t, S, \mu) \cdot d\Omega$ represents

Репозиторий БарГУ

number of subjects of the labor in an infinitesimal cell $\Delta\Omega$ phase technological space; we can on change of phase coordinate S and phase velocity μ, to judge also change of the function $\chi(t,S,\mu)$:

$$\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial t}+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial S}\cdot\mu+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial\mu}\cdot f(S)=J(t,S,\mu),\frac{dS}{dt}=\mu;\frac{d\mu}{dt}=f(S). \quad (3)$$

The equation (3) describes change averaged on an infinitesimal cell of phase technological space $\Delta\Omega$ characteristics of subjects of the labor S_j,μ_j. We will read function $\chi(t,S,\mu)$ the normalized

$$\int_0^\infty dS\cdot\int_0^\infty d\mu\cdot\chi(t,S,\mu)=N. \quad (4)$$

Production function $f(t,S)$ is defined from the given method of production. In case of relocation along technological regarding work, impact from the equipment of the route located with a density is made $\lambda(S)$. We can speak only about probability that after such influence the subject of the labor will be in this or that status. This probable nature of influence can be considered; having set function $\psi(t,S,\mu)$, defining probability that after influence the subject of the labor will consume technological resources with intensity μ. Function $\psi(t,S,\mu)$ it is possible to set, analyzing passport data of a technology equipment:

$$\int_0^\infty\psi(t,S,\mu)\cdot d\mu=1,\int_0^\infty\mu^k\cdot\psi(t,S,\mu)\cdot d\mu=[\psi]_k,\ k=1,2\ldots. \quad (5)$$

Quantity of the subjects of the labor, which were affected in unit of time from a technology equipment in a cell $dS\cdot d\mu$ with coordinates (S,μ) and moved as a result of influence to a cell $dS\cdot d\tilde{\mu}$ with coordinates $(S,\tilde{\mu})$, in proportion to the work of a flow of subjects of the labor $\chi(t,S,\mu)\cdot\mu$ on transition probability $\psi(t,S,\tilde{\mu})\cdot d\tilde{\mu}$. Number of the subjects of the labor, which were affected in unit of time from a technology equipment and the accepted values in limits $(\tilde{\mu};\tilde{\mu}+d\tilde{\mu})$ there is a value $\psi(\tilde{\mu})\cdot\lambda(S)\cdot\mu\cdot\chi(t,S,\mu)\cdot d\tilde{\mu}\cdot dS\cdot d\mu$. Along with it in a volume, element $dS\cdot d\mu$ subjects of the labor from volume arrive $dS\cdot d\tilde{\mu}$ by the reverse transition in quantity $\psi(\mu)\cdot\lambda(S)\cdot\tilde{\mu}\cdot\chi(t,S,\tilde{\mu})\cdot d\tilde{\mu}\cdot dS\cdot d\mu$, and the total number of subjects of the labor in a volume element changes in unit of time on value $dS\cdot d\mu\cdot J$

$$J=\lambda(S)\cdot\int_0^\infty\{\psi(\mu)\cdot\tilde{\mu}\cdot\chi(t,S,\tilde{\mu})-\psi(\tilde{\mu})\cdot\mu\cdot\chi(t,S,\mu)\}d\tilde{\mu}. \quad (6)$$

From where the kinetic equation (3)—(6) can be presented in the form [12]

$$\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial t}+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial S}\cdot\mu+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial\mu}\cdot f=\lambda\cdot\left\{\int_0^\infty\psi(\mu)\cdot\tilde{\mu}\cdot\chi(t,S,\tilde{\mu})d\tilde{\mu}-\mu\cdot\chi(t,S,\mu)\right\}. \quad (7)$$

In the majority practical cases equation (7) does not depend from a state of subjects of the labor before test of influence from the equipment from where

$$\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial t}+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial S}\cdot\mu+\frac{\partial\chi(t,S,\mu)}{\partial\mu}\cdot f=\lambda(S)\cdot\{\psi(\mu)\cdot[\chi]_1-\mu\cdot\chi\}. \quad (8)$$

Репозиторий БарГУ

The solution of the equation (8) gives an opportunity to calculate values of flow parameters of technological process, is connected to great difficulties [6; 13; 19].

3. Flow Description of Technological Process. We will describe a status of technological process on a flow level the moments of a distribution function of subject of the labor on statuses $\chi(t,S,\mu)$

$$\int_0^\infty \mu^k \cdot \chi(t,S,\mu)d\mu = [\chi]_k, k = 0,1,2\ldots. \quad (9)$$

It is known [1, 2, 7] that for the description of a status of production systems on a flow level use the two first the moment (9). The zero and first moments of a distribution function of subjects of the labor on statuses μ (9) have production interpretation: these are backlogs of subjects of the labor and their rate of movement along a technological chain [1; 2; 4]. Having increased the equation (8) on μ^k, $k = 0,1,2\ldots$ and having integrated on all range μ, we will receive not closed equations of balances of a status of flow parameters of technological system [6; 20]:

$$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = \int_0^\infty d\mu \cdot J,\ \frac{\partial[\chi]_k}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_{k+1}}{\partial S} = k \cdot f(t,S) \cdot [\chi]_{k-1} + \int_0^\infty d\mu \cdot \mu^k \cdot J,\ k = 1,2,3\ldots. \quad (10)$$

If average cost of resources $\langle \Delta S \rangle$, postponed during execution of technological operation regarding work the prime cost of the final product is much less S_d, what is characteristic of the technological process consisting of a large number of technological operations, the balance equations (10) in zero approximation in small parameter $\langle \Delta S \rangle / S_d << 1$ will take a form:

$$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = 0, \frac{[\chi]_k}{[\chi]_1} = [\psi]_{k-1}, \frac{\partial[\chi]_k}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_{k+1}}{\partial S} = k \cdot f(t,S) \cdot [\chi]_{k-1},\ k = 1,2,3\ldots. \quad (11)$$

The system of the balance equations (11) is closed. For technological system, which macrostate is described by two parameters — a productions reserve of subject of the labor on technological and operation by their rate of movement, the system of the balance equations (12) can be written as:

$$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1}{\partial S} = 0, \frac{[\chi]_2}{[\chi]_1} = [\psi]_1, \frac{\partial[\chi]_1}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_2}{\partial S} = f(t,S) \cdot [\chi]_1. \quad (12)$$

The equations (12) describe a status of technological process through parameters — backlogs of subjects of the labor and their rate of movement on a process flow.

Conclusion. It is at the first sight would be possible to conclude that with increasing of a number of elements unimaginably increase complexity of technological system and not to find in her behavior also traces of any regularity [21; 22]. A research of the production- technical systems that consist of a very large number of the subjects of the labor, which are in technological process allowed to reveal important feature of such systems [4; 22]. It is the behavior of similar technological systems is defined by the regularities of special type which received names of statistical regularities. The importance of application of statistical approach essence in giving "the simplified mechanism" for the description of macroscopic characteristics of production-technical systems [23—27]. In many ways, which shows practical interest, such description is quite enough.

Репозиторий БарГУ

References

1. *Форрестер Дж.* Основы кибернетики предприятия / Дж. Форрестер. — М. : Прогресс, 1961. — 341 с.
2. Планирование дискретного производства в условиях АСУ / В. В. Шкурба [и др.]. — Киев : Техника, 1975. — 296 с.
3. *Вильсон, А. Дж.* Энтропийные методы моделирования сложных систем : пер. с англ. / А. Дж. Вильсон. — М. : Наука, 1978. — 248 с.
4. Теория моделей в процессах управления (Информационный и термодинамический аспекты) / Б. Н. Петров [и др.]. — М. : Наука, 1978. — 224 с.
5. *Летенко, В. А.* Организация, планирование и управление машиностроительным предприятием : в 2 ч. / В. А. Летенко, Б. Н. Родионов. — М. : Высш. шк., 1979. — Ч. 2 : Внутризаводское планирование. — 232 с.
6. *Пигнастый, О. М.* Статистическая теория производственных систем / О. М. Пигнастый. — Харків : ХНУ, 2007. — 388 с.
7. *Первозванский, А. А.* Математические методы в управлении производством / А. А. Первозванский. — М. : Наука, 1975. — 616 с.
8. *Власов, В. А.* Моделирование технологических процессов изготовления промышленной продукции / В. А. Власов, И. А. Тихомиров, И.И. Локтев. — Томск : Изд. ГТПУ, 2006. — 300 с.
9. *Bartholdi, J. J.* Deterministic chaos in a model of discrete manufacturing / J. J. Bartholdi, D. D. Eisenstein, Y. F. Lim // Naval Research Logistics. — 2009. — 56(4). — P. 293—299.
10. *Азаренков, Н. А.* Методы и модели предметно-технологического описания производственных систем / Н. А. Азаренков, О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье : XXV Междунар. науч.-практ. конф. MicroCAD-2017 : Вестник НТУ «ХПИ». — 2017. — С. 344.
11. *Пигнастый, О. М.* Об основных направления исследования в статистической теории производственных систем / О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Комп`ютерне моделювання в наукоємних технологіях (КМНТ-2016) : зб. праць Міжнар. наук.-техн. конф. — Харків : ХНУ, 2016. — С. 325—328.
12. *Азаренков, Н. А.* Кинетическая теория колебаний параметров поточной линии / Н. А. Азаренков, О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Доповіді Нац. акад. наук України. — 2014. — № 12. — С. 36—43.
13. *Armbruster, D.* Thermalized kinetic and fluid models for reentrant supply chains. / D. Armbruster, C. Ringhofer // SIAM. Journal on Multiscale Modeling and Simulation. — 2005. — 3(4). — P. 782—800.
14. *Локтев, И. И.* Вопросы моделирования технологического процесса / И. И. Локтев // Изв. ГТПУ, 2005. — Т. 308, № 6. — С. 90—94.
15. *Пигнастый, О. М.* Стохастическая модель переноса технологических ресурсов на предмет труда в результате воздействия технологического оборудования. / О. М. Пигнастый // Научные ведомости Белгородского государственного университета. — 2016. — № 38/9. — С. 146—155.
16. *Пигнастый, О. М.* О построении целевой функции производственной системы / О. М. Пигнастый // Доповіді Нац. акад. наук України. — Київ : Академперіодика. — 2007. — № 5. — С. 50—55.
17. *Пигнастый, О. М.* Инженерно-производственная функция предприятия с серийным или массовым выпуском продукции / О. М. Пигнастый // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. — Харьков : НАКУ. — 2005. — № 42(3). — С. 111—117.
18. *Якимович, С. Б.* Формирование комплектов машин лесозаготовок на основе распределения состояний предметов труда по маршруту технологических процессов. / С. Б. Якимович, И. Ю. Володина. — М. : МГУЛ, 2001. — № 2. — С. 128—136.
19. *Либов, Р.* Введение в теорию кинетических уравнений. / Р. Либов. — М. : Мир, 1974. — С. 372.
20. *Пигнастый, О. М.* Стохастическое описание экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции / О. М. Пигнастый, В. П. Демуцкий, В. С. Пигнастая // Доповіді Нац. акад. наук України. — Київ : Академперіодика. — 2005. — № 7. — С. 66—71.
21. *Прыткин, Б. В.* Технико-экономический анализ производства. / Б. В. Прыткин. — М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2000. — С. 399.
22. *Прангишвили, И. В.* Энтропийные и другие системные закономерности : Вопросы управления сложными системами / И. В. Прангишвили. — Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова. — М. : Наука, 2003. — С. 428.
23. *Пигнастый, О. М.* Статистическое обоснование энтропийных закономерностей в моделях управления технологическими процессами. / О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Вісн. ХНУ. Сер. «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления». — 2012. — № 1037. — С. 168—174.
24. *Лысенко, Ю. Г.* Моделирование технологической гибкости производственно-экономических систем / Ю. Г. Лысенко, Н. В. Руменцев. — Донецк : ДонДУ, 2007. — С. 238.
25. *Бессонов, В. А.* Темповые производственные зависимости с ограниченным эффективным множеством / В. А. Бессонов, И. П Иванилов // Докл. Акад. наук СССР, 1989. — Т. 309, № 5. — С. 1033—1036.
26. *Lefeber, E.* Modeling, Validation and Control of Manufacturing Systems / E. Lefeber, R. A. Berg, J. E. Rooda // Proceeding of the 2004 American Control Conference. — Massachusetts, 2004. — P. 4583—4588.
27. *Berg, R.* Modelling and Control of a Manufacturing Flow Line using Partial Differential Equations /R. Berg, E. Lefeber, J. Rooda // IEEE. Transactions on Control Systems Technology. — 2008. — Vol. 16, № 1. — P. 130—136.

Поступила в редакцию 30.11.2017

Репозиторий БарГУ

УДК 621.928.24

Л. А. Сиваченко[1], И. М. Корзун[2]
[1] Учреждение образования «Белорусско-Российский университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Грушевская, 32, 212003 Могилев, Республика Беларусь, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru
[2]Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (163) 62 54 61, Tolotschinez@yandex.by

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ГРОХОТОВ

Вибрационная техника и технологии с каждым годом расширяют область своего применения и занимают все более прочные позиции в различных областях промышленности. В современном мире сортировочное оборудование применяется во многих отраслях промышленности. В настоящее время совершенствование процессов сортировки было и остается одним из приоритетных направлений модернизации горнодобывающей промышленности, в строительстве и производстве строительных материалов, а также в перерабатывающей промышленности.

Ключевые слова: пружинный грохот; просеивающая поверхность; вибрация; вибродвигатель.
Рис. 5. Библиогр.: 4 назв.

L. A. Sivachenko[1], I. M. Korzun[2]
[1]Belarusian-Russian University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 32 Grushevskaya Str., 212003 Moguilev, the Republic of Belarus, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru
[2]Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (163) 62 54 61, Tolotschinez@yandex.by

SUBSTANTIATION OF THE BASIC APPROACHES TO DESIGN THE VIBRATING SCREENS

Vibration technologies expand the field of their application and occupy ever more solid positions in various areas of industry. In the modern world, sorting equipment is used in many industries. Currently, the improvement of sorting processes has been and remains one of the priority directions for the modernization of the mining industry, in the construction and production of building materials, and in the processing industry.

Key words: spring screen; screening surface; vibration; vibrating motor.
Fig. 5. Ref.: 4 titles.

Введение. Вибрационные машины получают все более широкое применение в самых разнообразных отраслях промышленности. Это обусловлено конструктивной простотой вибромашин и во многих случаях более высокой, чем у обычных машин, технологической эффективностью. При всей своей конструктивной простоте вибромашины представляют сложности для расчета [1].

Вибрационные грохоты широко используются для сортировки сыпучих материалов по крупности, многие из таких устройств применяются в основном для решения следующих задач: 1) для выделения из потока дробленой горной массы сырья фракции определенной крупности, которая требуется для последующих технологических операций; 2) для выделения товарных продуктов заданных классов крупности, например, для получения узких фракций крупности строительного щебня или абразивных материалов; 3) для разделения сырья на параллельные потоки и последующей переработки материала различной крупности по разным технологиям.

© Сиваченко Л. А., Корзун И. М., 2018

Репозиторий БарГУ

Постановка проблемы. Одной из разновидностей вибрационного грохота является пружинный грохот. По сравнению с традиционным оборудованием, пружинные грохоты позволяют существенно повысить эффективность грохочения для целого ряда технологических процессов, обеспечивая при этом должное качество продукта и требуемую производительность.

При эксплуатации пружинных грохотов О. В. Голушковой было экспериментально установлено, что за счет наложения вибрации на рабочий орган возможно увеличение производительности. Анализ выполненных по этой тематике работ показал, что в настоящее время методика расчета рабочих органов пружинного вибрационного грохота, пригодного для практического использования, отсутствует. Однако увеличение производительности не достигается при разделении по крупности влажного материала. Он налипает на стенках загрузочного устройства, что отрицательно влияет на работу пружинного грохота.

Эффективность грохотов зависит от многих факторов: крупности, формы частиц исходного материала и его нагрузки на грохот; типа грохота; размера и границ разделения пружины, её длины и угла наклона. Максимальная эффективность у барабанных грохотов составляет 60…70%, качающихся — 70…80%, вибрационных — 90…98% [2] .

Задача создания комплексной методики для расчета и проектирования рабочих органов пружинных грохотов, в целях улучшения их потребительских свойств и качества технологического процесса, разработки принципиально новых конструкций, соответствующих современному мировому уровню, является актуальной.

Основная часть. Материал, поступающий на пружинную просеивающую поверхность, называется исходным; остающийся на ней — надрешетным, «верхним» или «+» продуктом (классом); проходящий через просеивающую поверхность — подрешетным, «нижним» или «–» (рисунок 1).

Грохочению подвергают твердые полезные ископаемые, строительные материалы, абразивные материалы, твердое вторичное сырье, некоторые виды растительного сырья. По приближенной оценке, ежегодно в мире подвергают грохочению около 2 млрд т твердого сырья. Разделять по крупности сыпучие материалы, представленные частицами различного размера, необходимо для технических целей, когда требуется получить сырье определенного диапазона крупности.

Для исследования процесса грохочения была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка пружинного грохота (рисунок 2).

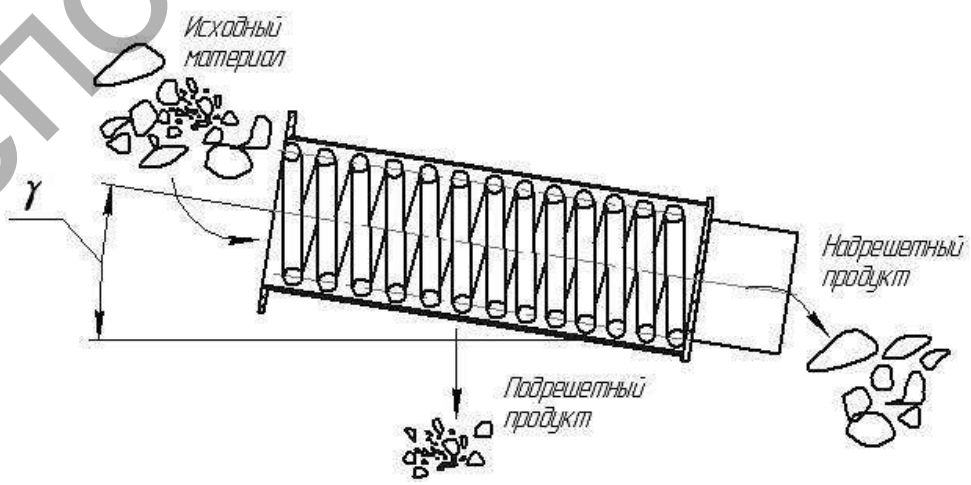


Рисунок 1. — Распределение материала в процессе грохочения

Репозиторий БарГУ

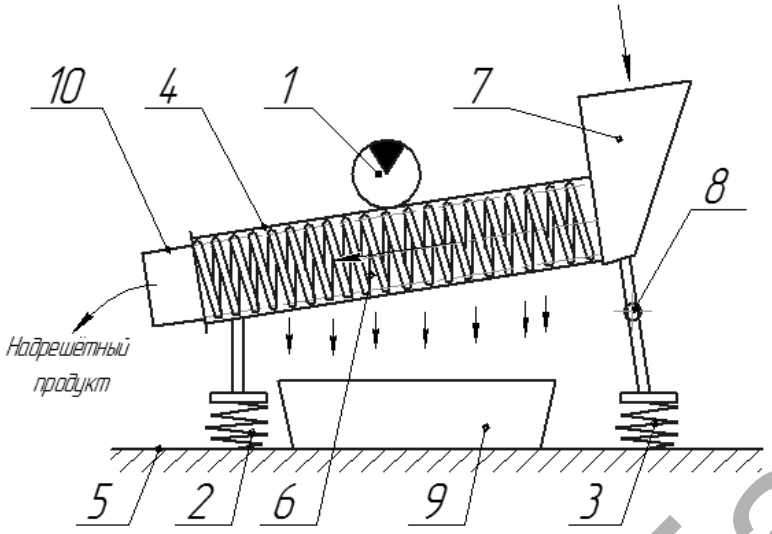


Рисунок 2. — Схема экспериментальной установки пружинного грохота

Аппарат для просеивания зернистых материалов работает следующим образом: включается вибропривод *1* и приводит в колебательное движение смонтированный посредством амортизаторов *2* и *3* короб *4* на раме *5*, в который помещена спиральная просеивающая поверхность *6* — винтовая пружина. Просеиваемая масса зернистых материалов подается в устройство для загрузки материала через загрузочный патрубок *7* и далее на спиральную просеивающую поверхность *6*. Просеивание материала осуществляется за счет того, что просеивающая поверхность *6*, смонтированная в коробе *4* с продольным пазом, установленным с определенным углом наклона к горизонту, изменяемым устройством для регулировки угла *8*, совершает вместе с материалом интенсивные колебания и имеет необходимый зазор между витками пружины, через который подрешетная фракция зернистого материала ссыпается в сборники материала *9*. Зазор между витками пружины изменяется механизмом регулировки границ разделения *10*.

При проектировании экспериментальной установки пружинного грохота нами было установлено, что угол наклона просеивающей поверхности и границы разделения (зазор) просеивающей поверхности влияют на работу спроектированного пружинного грохота. Угол наклона грохота влияет на эффективность и производительность грохочения. С уменьшением угла наклона грохота снижается скорость перемещения материала по просеивающей поверхности, в результате чего возрастает эффективность грохочения при одновременном снижении производительности. Обычно у наклонных грохотов угол наклона может изменяться от 0 до 30°, что позволяет подбирать необходимые показатели грохочения. Производительность грохочения в значительной степени зависит от угла наклона грохота. Если необходимо повысить производительность грохота при грохочении материала повышенной влажности, угол наклона грохота увеличивают. Наоборот, при уменьшении угла наклона грохота снижается производительность, но повышается эффективность грохочения (отношение массы полученного после рассева гранулированного продукта к массе продукта такого же гранулометрического состава в исходном материале).

Исходный материал поступает на установку и под действием сил вибрации продвигается к выходу по пружине. Частицы исходного материала соударяются между собой, а также сталкиваются со стенками рабочей камеры и пружиной.

Привод грохота электрический. Колебание короба пружинного грохота обеспечивается вибропривода *1*, который крепится на коробе грохота *4*. Следовательно, параметры колебания (амплитуда, частота) — одни из параметров, влияющих на работу спроектированного пружинного грохота.

Репозиторий БарГУ

Рисунок 3. — Экспериментальная установка пружинного грохота

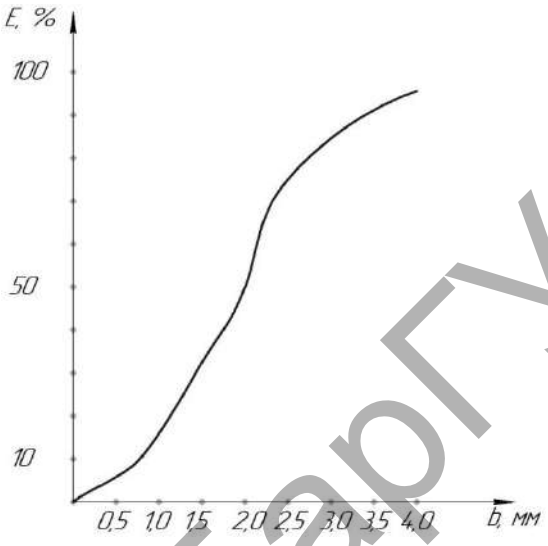


Рисунок 4. — Зависимость эффективности *E* от ширины зазора *b*

Экспериментальная установка пружинного грохота (рисунок 3) представляет собой аппарат для просеивания. Он осуществляет разделение сыпучего материала на более мелкие частицы с использованием просеивающих поверхностей с отверстиями определенного калибра.

На данной установке проведен эксперимент, в ходе которого определяли эффективность просеивания сыпучего материала в зависимости от изменения ширины зазора просеивающей поверхности.

Надрешетная фракция просеиваемого материала, не прошедшая через зазор между витками, перемещается далее по спиральной просеивающей поверхности и высыпается через выходное отверстие в торце просеивающей поверхности в лоток. Эксперимент проводился с тремя повторениями для 3 зазоров (2 мм, 3 мм, 4 мм — по технологической задаче ОАО «Гранит», г. Микашевичи Брестской области), которые контролировались с помощью калибров. Результаты эксперимента представлены графически (рисунок 4).

Результаты эксперимента показали, что с увеличением ширины зазора увеличивается эффективность просеивания сыпучего материала. Когда зазор минимальный, допустимая фракция не в полном объеме проходит между витками. При максимальном зазоре 4 мм в поставленной технологической задаче эффективность просеивания определялась по формуле

$$E = \frac{Q_{\text{под}}}{Q_{\text{исх}}} \cdot 100\%,$$

где $Q_{\text{под}}$ — подрешетная фракция, 931 г;

$Q_{\text{исх}}$ — исходный материал, 1 000 г.

$$E = \frac{931}{1\,000} \cdot 100\% = 93\%.$$

Оставшиеся 7% просеиваемого материала распределись следующим образом: часть осталась в загрузочном бункере, часть переместилась далее по спиральной просеивающей поверхности и высыпалась через выходное отверстие в торце просеивающей поверхности в лоток, включая фракции размером выше ограниченного диапазона.

Репозиторий БарГУ

Выполненные ранее работы касались преимущественно пружинных грохотов малой производительности, конструкции которых состояли из небольшого числа пружинных рабочих органов [3]. Это не давало возможности проектировать высокопроизводительные агрегаты с многоуровневым расположением пружинных сит и решать вопросы их практического использования. В данной работе рассматривается конструкция пружинного грохота для возможного разделения гранитного отсева на мелкие фракции щебня, например, 2,5…5,0 мм по технологическим задачам ОАО «Гранит», г. Микашевичи Брестской области [4].

Для просеивания большого объема материала нами разработана конструкция промышленного пружинного грохота (рисунок 5). Грохот включает в себя опорную раму *1*, на которую посредством пружинных амортизаторов *3* и *4* устанавливается короб *2* с дебалансным виброприводом *5*, два его борта *6* и *7* образуют боковые стенки бункера *8* для приема горной массы, причем по бортам *6* и *7* короба *2* с его внешних сторон расположены лотки *9, 10* и *11, 12* соответственно для отвода из рабочих зон мелкой и крупной фракций после процесса разделения материала на пружинным просеивающих поверхностях *15*. Для изменения границы разделения и компенсирования износа витков пружин предусмотрены устройства *13* и *14* для регулирования межвитковых зазоров. Фиксированная установка пружин *15* в каждом из бортов *6* и *7* обеспечивается с помощью стержней *16*, на которые они укладываются параллельными рядами и фиксируются устройствами *13* и *14*.

Перед началом работы грохота пружинные рабочие органы *15* регулируются на заданную границу разделения. Далее включается дебалансный вибропривод *5*, и за счет создаваемой им вынуждающей силы приводит в колебательные движения установленный на раме *1* посредством пружинных амортизаторов *3, 4* короб *2*. Посредством механического питателя в бункер *8* подается гранитный отсев, который через окна на бортах *6* и *7* поступает во внутренние полости вибрирующих пружин, где происходит его разделение на нужные фракции, причем мелкая фракция проходит между витками и ссыпается на лотки *9* и *10*, а крупная проходит внутренние полости пружин и с их торцов выгружается на лотки *11* и *12*. Отсортированный таким образом материал поступает на соответствующие конвейеры и далее транспортируется к местам складывания.

В представленной конструкции грохота реализована многоуровневая схема установки пружинных просеивающих элементов, что позволяет повысить производительность установки и уменьшить ее габаритные размеры. На данный момент, пока в полной мере не решен вопрос с устранением образования наслоений сырьевой массы на стенках бункера, прорабатываются различные варианты, однако окончательное решение пока не найдено.

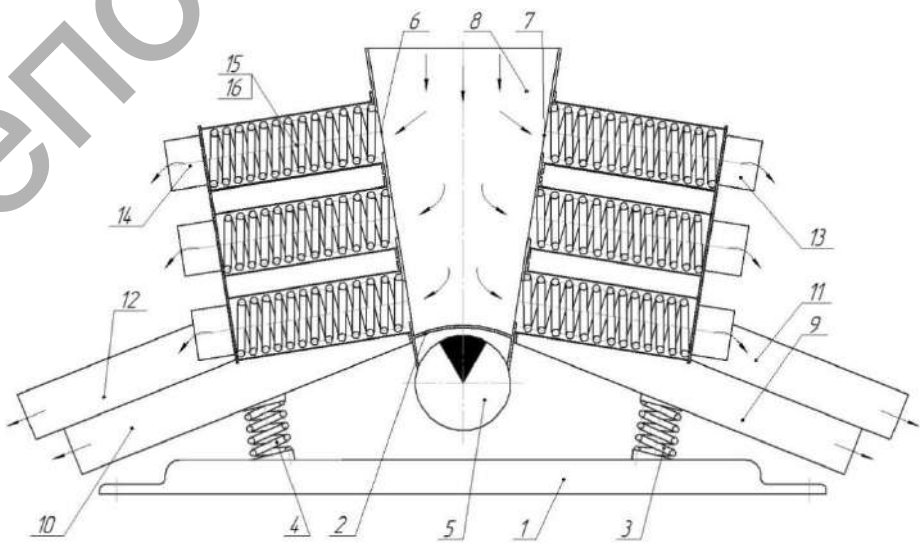


Рисунок 5. — Общий вид пружинного грохота

Репозиторий БарГУ

Основные подходы проектирования вибрационных грохотов заключаются в следующем:

– анализ исследований в области разделения зернистых материалов по крупности и определение путей их развития;

– разработка конструкции пружинного грохота с учетом повышенной эффективности процесса разделения рабочего материала;

– разработка математической модели поведения материалов на пружинной просеивающей поверхности и определение основных параметров рабочего органа;

– разработка конструкции экспериментальной установки, методики и плана проведения эксперимента;

– проведение экспериментальных исследований, обработка полученных результатов и регрессивных моделей;

– разработка методики инженерного расчета, обоснование области рационального использования и экономической эффективности применения пружинного грохота в промышленности;

– метрологический анализ изменения формы и размеров частиц фракций.

Заключение. На основе анализа конструкций существующих грохотов с целью повышения эффективности разделения влажных и трудно разделяемых материалов на границе разделения 0,5…5,0 мм нами предложен способ грохочения, который заключается в создании просеивающей поверхности в виде интенсивно вибрирующих рабочих элементов, образованных цилиндрической пружиной. Основными параметрами, влияющими на работу спроектированного пружинного грохота являются: 1) параметры колебания (амплитуда, частота); 2) угол наклона просеивающей поверхности; 3) влажность материала; 4) границы разделения (зазор). Данные параметры учитываются для исследования полученной в ходе эксперимента эффективности просеивания сыпучего материала, которая составляет 93%.

Список цитируемых источников

1. *Андреев, С. Е.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич. — М. : Недра, 1980. — 415 с.

2. *Голушкова, О. В.* Пружинный грохот повышенной эффективности для разделения мелкозернистых материалов : автореф. дис. … канд. техн. наук / О. В. Голушкова. — Белгород, 2006. — 22 с.

3. *Сиваченко, Л. А.* Вибрационные пружинные грохоты: конструкция, расчет, технологическая эффективность : препринт / Л. А. Сиваченко, О. В. Голушкова. — Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т., 2006. — 42 с.

4. *Толочинец, И. М.* Пружинный грохот для эффективного разделения влажных мелкозернистых материалов / И. М. Толочинец, Л. А. Сиваченко // Наукоемкие технологии и инновации : Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород, 2016. — С. 186—189.

Поступила в редакцию 26.03.2018

Репозиторий БарГУ

УДК 621.926

Л. Л. Сотник
Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Домейко, 17, 225406 Барановичи, Республика Беларусь,
+375 (163) 62 54 61, Sotnikdin037@gmail.com

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОТ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ ВИБРОВАЛКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

Повышение производительности при измельчении материалов является весьма актуальной задачей. С этой целью автором был изучен вопрос влияния технологических факторов процесса измельчения на производительность в измельчителе принципиально новой конструкции. Установлено, что наиболее существенное влияние на производительность процесса измельчения оказывают такие факторы, как величина зазора, относительная скорость вращения валков и величина эксцентриситета.

В исследовании использован полный факторный эксперимент. С помощью критерия Кохрена математически доказана воспроизводимость опытов на заданных уровнях варьирования. Получено уравнение регрессии, связывающее параметры процесса измельчения и производительности; адекватность полученной математической модели проверена с помощью *F*–критерия Фишера. Графически представлены поверхности отклика критерия оптимизации, показывающие влияние факторов на параметр оптимизации.

Ключевые слова: вибровалковый измельчитель; измельчение материалов; факторы; эксцентриситет; производительность; планирование эксперимента; уравнение регрессии.

Рис. 4. Библиогр.: 15 назв.

L. L. Sotnik
Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 17 Domeyko Str., 225406 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (163) 62 54 61, Sotnikdin037@gmail.com

ANALYSIS OF THE RESULTS OF RESEARCH OF DEPENDENCE OF PRODUCTIVITY ON THE MAIN FACTORS OF VIBRATING-ROLLING GRINDER

Increasing productivity in grinding materials is a very urgent task. The authors examined the influence of the technological factors of the grinding process on productivity in an installation of completely new design. It is established that the most significant effect on the grinding process productivity is due to the factors such as gap size, relative rotation speed of the rolls and eccentricity value. A full factorial experiment was used in the study. The reproducibility of experiments at specified levels of variation has been mathematically proven with the Kohren criterion. The regression equation is received; it connects the parameters of the grinding process and productivity. The adequacy of the obtained mathematical model was verified with the help of the Fisher's *F*-criterion. The response surface of the optimization criterion is represented by the graph to show the influence of factors on the optimization parameter.

Key words: vibrating-rolling grinder; grinding materials; factors; eccentricity; productivity; planning an experiment; regression equation.

Fig. 4. Ref.: 15 titles.

Введение. Природные материалы составляют основу сырьевой базы промышленности строительных материалов. Измельчение является подготовительной стадией переработки материалов к участию их в последующих физико-химических взаимодействиях с целью получения новых продуктов и изделий. Процесс измельчения — один из самых массовых и энергоемких, но при этом самый несовершенный из всех, используемых в технике [1; 2].

В последние годы во многих отраслях промышленности для дезинтеграторной переработки материалов с различными физико-механическими характеристиками широко

© Сотник Л. Л., 2018

Репозиторий БарГУ

используются пресс-валковые агрегаты (ПВА), реализуемые по различным технологическим схемам [3—6]. Разрушение исходного продукта в таких агрегатах происходит путем прохода слоя материала между цилиндрическими измельчающими поверхностями, где образуется критическая зона и развивается сжимающее усилие, превосходящее предел прочности материала [7; 8].

Постановка проблемы. Одним из перспективных направлений как у нас в стране, так и за рубежом, является разработка высокопроизводительного оборудования для измельчения материалов.

Внедрение вибротехники в горнорудной промышленности является перспективным направлением, так как существующие средства механизации оказались неконкурентоспособными в сравнении с новой вибрационной техникой [9; 10].

Однако отсутствие научно обоснованных рекомендаций по расчету энергосиловых, конструктивно-технологических и выходных параметров вибрационных агрегатов тормозит их внедрение в промышленность.

Анализ литературных источников выявил следующее: проблема влияния конструктивно-технологических параметров оборудования на процесс измельчения материалов, имеющих различную структуру и физико-механические характеристики, изучены недостаточно, а вопрос влияния режимных параметров ряда оборудования остается открытым. Все это подтверждается противоречивостью известных данных в этих областях. Так как в современных условиях возрастает важность производительности при дроблении, помоле, измельчении и переработке материалов, изучение вопросов о влиянии этих факторов является актуальным направлением.

Целью данной работы является изучение влияния параметров процесса измельчения в вибровалковом измельчителе на величину производительности.

Результат исследования и их обсуждение. В данной работе анализируется производительность лабораторной установки вибровалкового измельчителя. Он относится к группе кинематических вибрационных машин, т. е. таких, у которых ведущее звено имеет вполне определенное абсолютное или относительное движение, зависящее только от геометрических размеров ведущего механизма [11—13].

Вибрационные воздействия, реализуемые в измельчителе, обладают рядом достоинств по сравнению с постоянными воздействиями, используемыми в ПВА: во-первых, это эффект облегчения преодоления сил трения, который понимается как особое свойство вибраций уничтожать, хотя бы частично, силы трения; во-вторых, это эффект выигрыша в силе, т. е. возможность преодоления сопротивления с меньшими усилиями при разрушении (деформации) исходного продукта.

На процесс механического разрушения материала оказывают влияние как входные, так и выходные параметры (рисунок 1). Первую категорию составляют: режимные показатели процесса измельчения (окружная скорость неподвижного валка $v_в$, окружная скорость вибровалка $v_{вв}$, частота колебаний вибровалка $n_{вв}$), конструктивно-технологические параметры измельчителя (эксцентриситет e, межвалковый зазор b, длина валка l, диаметр валка D) и физико-механические параметры измельчаемого материала (прочность материала $\sigma_{сж}$, максимальный диаметр фракции d_{max}, степень разрыхленности материала μ). Вторую — качественно-энергетические показатели (производительность Q, однородность выходной фракции $d_{\%}$, энергоемкость N).

Вышеуказанные характеристики и параметры полностью реализуются в разработанной нами конструкции вибровалкового измельчителя и определяются режимами его работы.

Провести анализ и исследование одновременного влияния всех параметров на процесс измельчения либо теоретически невозможно, либо практически не приемлемо. Поэтому из всего ряда факторов были выявлены наиболее значимые и влияющие на производительность в процессе измельчения, а именно величина эксцентриситета e, величина зазора b, и отношение окружных скоростей валков $K_{фр} = v_в/v_{вв}$.

Репозиторий БарГУ

Рисунок 1. — Модель механического разрушения материалов

Для выявления основных факторов, влияющих на процесс измельчения, а также для установления параметров оптимизации были проведены эксперименты.

Для проведения физических опытов по определению влияния величины зазора b, отношения скоростей вращения валков $v_в$ и $v_{вв}$, а также величины эксцентриситета e на производительность Q была использована лабораторная установка, принцип действия которой описан в [11; 14].

Установка имеет следующие параметры:

– конструктивно-технологические — диаметр валков d = 0,24 м, ширина валков b = 0,05 м;

– режимные — частота колебаний эксцентрикового валка $n_{вв}$ = 1 440 мин$^{-1}$, окружная скорость неподвижного валка $v_в$ = 1,82 м / с.

В качестве измельчаемого материала для исследований был использован пенобетон 1 100 прочностью 6,3 МПа (ГОСТ 21520-89). Измельчаемый материал имел средневзвешенный диаметр частиц $d_{0ср}$ = 0,012 м.

По результатам исследований получена выборка данных о производительности Q.

При статистической обработке результатов проведенных экспериментов нами получено следующее уравнение регрессии в кодированном виде:

$$y = 195,75 + 45,25x_1 + 53,5x_2 - 7,5x_3 + 0,5x_1x_2 - 2x_1x_3 - 0,25x_2x_3 .$$

После определения оценок коэффициентов регрессии b_i была проверена гипотеза об их значимости. Если выполняется условие $|b_i| \geq t \cdot s_{b_i}$, то данный коэффициент является статистически значимым.

Находим дисперсию коэффициентов по формуле

$$s_{b_i}^2 = \frac{s_y^2}{\Sigma(x_{ij})^2}$$

Репозиторий БарГУ

и оцениваем значимость коэффициентов уравнения регрессии. Табличное значение критерия Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0{,}05$ и степени свободы $f = N(m - 1) = 8\ (3 - 1) = 16$ равно $t_{0{,}05;\,16} = 2{,}12$ [10].

Коэффициенты b_0, b_1, b_2, b_3, b_{13} по абсолютной величине превышают это значение, следовательно, мы должны признать их значимыми. Коэффициенты b_{12}, b_{23}, являются незначимыми.

Таким образом, было получено уравнение регрессии (модель) первого порядка:

$$y = 195{,}75 + 45{,}25x_1 + 53{,}5x_2 - 7{,}5x_3 - 2x_1x_3\,.$$

Адекватность модели проверялась с помощью *F*-критерия Фишера:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} = \frac{35{,}0}{16{,}75} = 2{,}09\,,$$

где s_{ad}^2 — дисперсия адекватности математической модели;

s_y^2 — средняя дисперсия эксперимента.

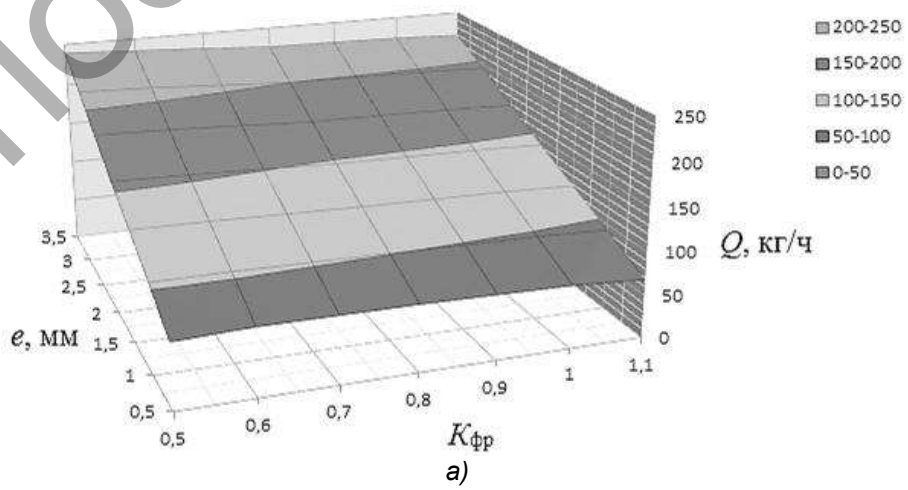
Табличное значение *F*-критерия Фишера для 5%-го уровня значимости $F_{0{,}05} = 3{,}24$ при степенях свободы $f_1 = 16$ и $f_2 = 3$ превышает величину опытного значения этого критерия. Поэтому гипотезу об адекватности представления результатов эксперимента можно принять.

Выполняем переход от кодированных значений факторов к натуральным по уравнению

$$Q = 195{,}75 + 45{,}25\left(\frac{b-2}{1}\right) + 53{,}5\left(\frac{e-2}{1}\right) - 7{,}5\left(\frac{K_{\text{фр}} - 0{,}8}{0{,}2}\right) - 2\left(\frac{b-2}{1}\right)\left(\frac{K_{\text{фр}} - 0{,}8}{0{,}2}\right) =$$
$$= 12{,}25 + 53{,}25b + 53{,}5e - 17{,}5K_{\text{фр}} - 10bK_{\text{фр}}.$$

Обработка модели показала, что достоверность аппроксимации модели полиномом второго порядка составила $R_2 = 97{,}11\%$.

Представим графики поверхности отклика критерия оптимизации *Q*, показывающие влияние факторов величины эксцентриситета *e*, величины зазора *b* и относительной скорости вращения $K_{\text{фр}}$, которые наглядно отображают область оптимальных значений данных факторов (рисунок 2).

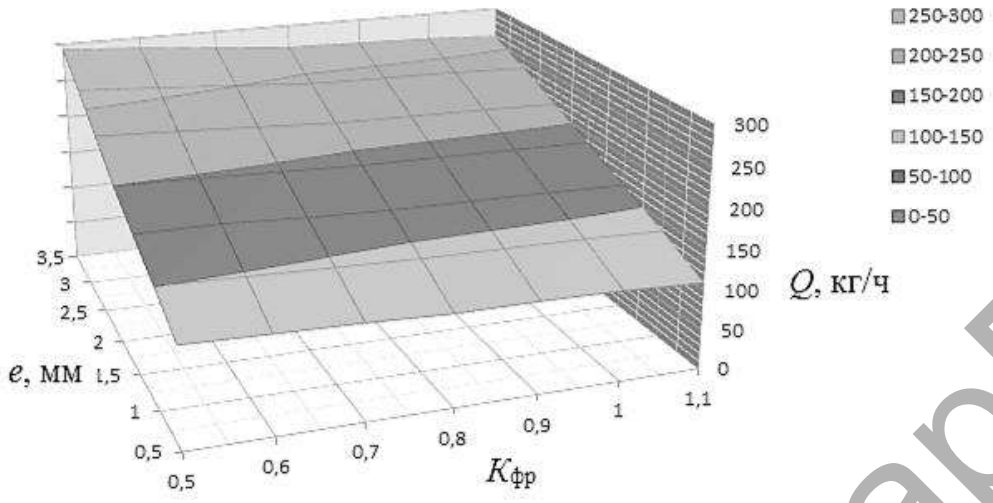


а)

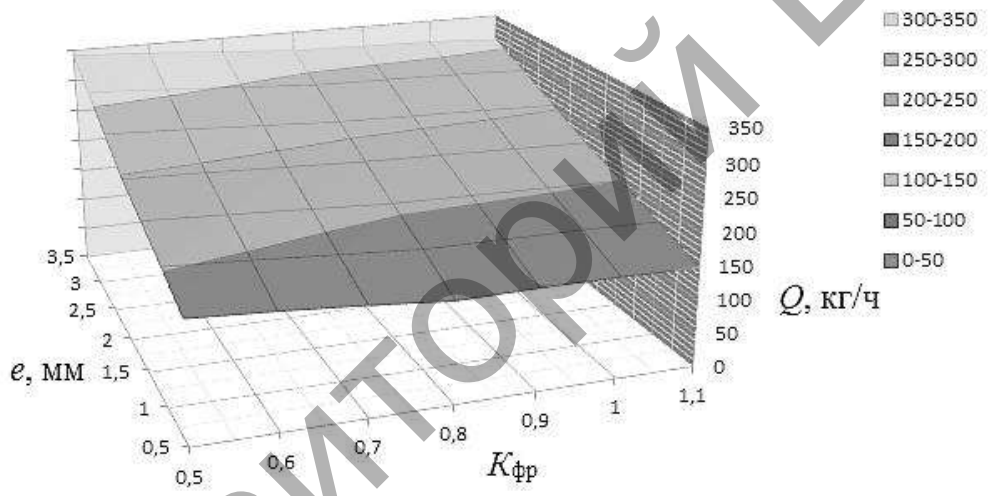
а — величина зазора *b* = 1 мм; *б* — величина зазора *b* = 2 мм;
в — величине зазора *b* = 3 мм

Рисунок 2. — График поверхности отклика критерия оптимизации *Q*

Репозиторий БарГУ



б)



в)

Рисунок 2. — Окончание

Для проверки достоверности результатов был проведен контрольный эксперимент при оптимальных значениях факторов. Относительная ошибка в сравнении с предыдущими значениями составила ~ 3,8%.

Анализ модели показывает, что увеличение значений факторов *b* и *e* ведет к увеличению значения критерия оптимизации *Q*, а увеличение фактора $K_{фр}$ — к уменьшению. Совместное влияние факторов *b* и $K_{фр}$ также приводит к уменьшению *Q*. Характер влияния факторов на критерий оптимальности *Q* достаточно полно описывается представленной моделью.

Заключение. Разработанная лабораторная установка вибровалкового измельчителя обеспечивает повышение производительности по сравнению с ПВА.

Анализ полученных результатов позволил обосновать рациональные параметры процесса измельчения на установке принципиально новой конструкции. Оптимальные значения технологических параметров процесса измельчения пенобетона определяются требуемыми размерами выходной фракции.

Репозиторий БарГУ

Результаты проведенных экспериментов по полученным оптимальным значениям факторов согласуются с результатами расчета по предложенной модели, а сама модель достоверно описывает процесс измельчения рассмотренных образцов. Полученные результаты могут служить основой для проектирования вибровалковых измельчителей промышленного назначения.

Список использованных источников

1. *Лесовик, В. С.* Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород / В. С. Лесовик. — М. : Ассоциация строит. вузов, 2006. — 526 с.

2. Селективное измельчение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.]. — М. : Недра, 1988. — 286 с.

3. *Романович, А. А.* Основы расчета и проектирования пресс-валковых агрегатов для измельчения анизотропных материалов : монография / А. А. Романович, А. В. Колесников. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2011. — 165 с.

4. More Than 250 Roller Mills from Polysius in Use Worldwide // World Cement. — 2003. — Vol. 34. — № 4.— P. 15.

5. *Poliad, M.* A look at internel grinding shop / M. Poliad, P. Coonet // World Cement. — 1990. — № 9. — P. 395—399.

6. The world's largest roller mills // Internetional cement review. — 2000. — № 1. — P. 43—44.

7. *Bogdanov, V. S.* The Power Consumption Calculation of a Ball Drum Mill / N. E. Bogdanov, S. I. Antsiferov // Middle-East Journal of Scientific Research. — 2013. — Т. 18. — № 10. — С. 1448—1454.

8. *Богданов, В. С.* Уравнение кинетики процесса измельчения в горизонтальной валковой мельнице / В. С. Богданов, В. С. Романенко // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2013. — № 1. — С. 53—57.

9. *Гончаревич, И. Ф.* Вибротехника в горном производстве / И. Ф. Гончаревич. — М. : Недра, 1992. — 319 с.

10. *Богданов, В. С.* Процессы в производстве строительных материалов / В. С. Богданов, А. С. Ильин, И. А. Семикопенко. — Белгород : Вевелита, 2007. — 512 с.

11. *Сиваченко, Л. А.* Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибровалкового измельчителя / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник// Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. — 2017 — Вып. 5. — С. 87—92.

12. *Сотник, Л. Л.* Кинематический анализ эксцентрикового вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, С. И. Русан, Л. А. Сиваченко // Ударно-вибрационные системы и машины для строительной и горной отраслей : материалы VI Междунар. науч. симп., Орел, 26—27 апр. 2017 г. — Орел, 2017. — С. 233—241.

13. *Сиваченко, Л. А.* Оценка эффективности дробления вибровалкового измельчителя / Л. А. Сиваченко. А. Н. Хустенко, Л. Л. Сотник // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2017. — С. 89—97.

14. *Сиваченко, Л. А.* Основы проектирования вибровалкового агрегата для дезинтеграторной обработки минеральных материалов / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник, И. А. Богданович // Наукоемкие технологии и инновации : сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф. : 4 ч. — Белгород : БГТУ, 2016. — Ч. 4. — С. 179—185.

15. *Адлер, Ю. П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — М. : Наука, 1976. — 280 с.

Поступила в редакцию 06.04.2018

Репозиторий БарГУ

УДК 631.3

В. А. Бурдейко[1], И. В. Дубень[2]

[1, 2]Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, тел. +375 (163) 64 06 73, V_A_Victor@mail.ru[1], +375 (163) 45 87 99, duben_i_v@mail.ru[2]

МАШИНА И РАБОЧИЕ ОРГАНЫ ДЛЯ СБОРА КОЛОРАДСКОГО ЖУКА

Рассматриваются основные методы, средства и рабочие органы машин для сбора колорадского жука при выращивании экологически чистого картофеля. Предложена оригинальная конструкция двухрядной машины для сбора колорадских жуков и личинок с пассивными рабочими органами, в результате чего существенно снижается металлоемкость и энергопотребление. Высокая эффективность работы достигается за счет того, что ботва рядка разделяется на две части, и рабочие органы имеют максимальное соприкосновение с обрабатываемой ботвой картофеля.

Ключевые слова: картофель; колорадский жук; машина для сбора колорадского жука; пассивные рабочие органы.

Рис. 1. Табл. 2. Библиогр.: 11 назв.

V. A. Burdeyko[1], I. V. Duben[2]

[1, 2]Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 163 64 06 73, V_A_Victor@mail.ru[1], +375 163 45 87 99, duben_i_v@mail.ru[2]

MACHINE AND OPERATING TOOLS FOR COLLECTING OF COLORADO POTATO BEETLE

The main methods, means and operating tools of the machines for collecting of Colorado potato beetles during cultivation of ecologically clean potato are considered. An original design of two-raw machine for collecting of Colorado potato beetles and maggots with passive operating tools is offered, as a result the metal and energy consumption is essentially declined. High efficiency is achieved due to the fact that the potato tops in the raw are divided into two parts and the operating tools have the maximum contact with the processed potato tops.

Keywords: potato; Colorado potato beetle; machine for collecting of Colorado potato beetle; passive operating tools.

Fig. 1. Table. 2. Ref.: 11 titles.

Введение. Органическое производство успешно существует более чем в 140 странах мира, причём производители — в основном относительно небольшие фермы. На мировом рынке органическая продукция занимает примерно 10% от общего объема продукции сельскохозяйственного производства. В настоящее время в Республике Беларусь разработана концепция проекта закона «О производстве и обращении органической продукции» [1], согласно которому при производстве органической агропродукции исключается использование и применение химически синтезированных веществ, консервантов, синтезированных красителей, гормонов, антибиотиков, ароматизаторов, стабилизаторов, усилителей вкуса, генетически модифицированных организмов, производных таких организмов и продуктов, изготовленных из указанных организмов.

© Бурдейко В. А., Дубень И. В., 2018

Репозиторий БарГУ

Решением Генеральной Ассамблеи ООН 2008 год был объявлен годом картофеля. Данная культура занимает по масштабам производства четвертое место среди главных пищевых сельскохозяйственных культур после пшеницы, риса и кукурузы. В мире ежегодного производят 350 млн т картофеля, 52% этого объема приходится на развивающиеся страны, где он является важным источником пищи, рабочих мест и доходов. За последние 15 лет производство его в этих странах увеличилось более чем в 2 раза. Более 40% мирового объема картофеля сосредоточено в Китае, Российской Федерации и Индии.

В Беларуси картофель считается национальным богатством, его заслуженно называют вторым хлебом. Картофель является ресурсоэффективным товаром растениеводства, при этом Республика Беларусь занимает восьмое место по производству картофеля. Так, в 2016 году в нашей стране выращено 6 млн т картофеля с урожайностью 205 ц / га, а в 2017 году — уже 6,5 млн т картофеля с урожайностью 232 ц / га [2]. Одна из задач дальнейшего повышения урожайности картофеля — это более эффективная борьба с вредителями и болезнями, в том числе с колорадским жуком.

На сегодня в нашей стране для технического обеспечения инновационных технологий производства картофеля имеются современные машины, установки и оборудование производства Республики Беларусь. По-прежнему при выращивании картофеля стоит проблема уничтожения колорадского жука, особенно в тех случаях, когда необходим экологически чистый картофель.

Колорадский жук — опасный вредитель всех пасленовых культур: картофеля, томатов, баклажанов и перца. В настоящее время в мире разработаны и применяются различные методы и средства для сбора и уничтожения колорадского жука. При выращивании экологически чистого картофеля для сбора колорадского жука возможно применение агротехнических, биологических, технических, физических и химических методов и средств.

Агротехнический метод борьбы с колорадским жуком основан на применении разных агроприемов, которые улучшают рост и развитие защищаемых растений, способствует повышению их устойчивости к повреждениям, и тем самым затрудняют и ухудшают условия жизни и численность вредителей. Жуки больше повреждают слабые растения, поэтому надо применять такие агроприемы, которые способствуют улучшению роста и развития растений, укреплению их жизнеспособности. Основными средствами агротехнических мероприятий, позволяющих значительно снизить численность колорадского жука, являются технологическое использование сельскохозяйственной техники и орудий, соблюдение правильного севооборота, правильная подготовка посадочного материала и уход за посадками, а также полный сбор урожая. Достоинства этого метода в том, что он весьма экономичен и способствует получению экологически чистого картофеля, но при этом значительно уступает по эффективности химическому способу защиты растений от вредителей [3].

Биологический метод защиты растений от колорадского жука предполагает использование паразитирующих насекомых, хищных птиц, микроорганизмов и энтомофагов. К последним относятся некоторые паразитирующие насекомые — клопы периллюс (*Perrillus bioculatus* Fab.) и подизус (*Podisus maculiventris* Say), трихограмма, жужелица *Lebia grandis* Hentz (Carabidae) и др. Применение энтомофагов позволяет биологическим методом существенно сократить численность вредителей. Колорадским жуком могут питаться почти 640 видов энтомофагов [4; 5].

К биологическим средствам защиты растений от вредителей относится также использование фитонцидов растений — естественных ароматизаторов, которые отпугивают вредителей [3]. Например, бархатцы отпугивают колорадского жука, а чеснок — клещей. Отпугивающее действие на колорадского жука оказывают бобы и чеснок, благодаря содержанию в них фитогемагглютининов. Этот метод очень эффективен и популярен среди населения при выращивании пасленовых культур на своих сельскохозяйственных участках.

Репозиторий БарГУ

В целом применение биологических препаратов промышленного производства позволяет значительно ослабить физиологическое состояние популяции колорадских жуков, снизить его вредоносность. Однако объемы применения биологического метода в борьбе с колорадским жуком пока недостаточны, что связано со стоимостью производства препаратов в больших объемах и относительно невысокой эффективностью при большой численности колорадского жука [4].

Народные методы борьбы с колорадским жуком предполагают использование растений, водных настоев и отваров, отпугивающих и губительно действующих на вредителя. Например, древесная зола является настоящим врагом колорадского жука и в то же время отличным удобрением для картофельных кустов. При посадке картофеля в каждую лунку вносится по горсти древесной золы, а опыление золой картофельных кустов (желательно после дождя или утренней росы) приводит к гибели не только взрослых особей, но и их личинок [3].

Физические методы основаны на использовании высоких и низких температур, ультразвуковых колебаний, токов высокой частоты, радиационных излучений, с помощью которых ухудшается жизнь вредителя и даже наступает его гибель. Однако этот метод еще мало распространен и не доступен для массового применения по причине его сложности и дороговизны [3].

Из всех существующих методов борьбы с колорадским жуком химический метод, основанный на использовании синтетических химических препаратов, наиболее эффективен и экономичен. Химический метод привлекает своей надежностью, быстротой действия, малой зависимостью от метеорологических факторов и состояния популяции вредителя. Основой комплекса истребительных приемов борьбы с колорадским жуком является опрыскивание растений инсектицидами. Уже через несколько часов, реже через 1—3 суток, можно обеспечить высокую степень уничтожения жуков и личинок всех возрастов и предотвратить потери листовой поверхности растений. В борьбе с вредными насекомыми, в частности с колорадским жуком, используются в основном химические инсектициды группы пиретроидов: Актеллик, Волиам Флекси, Карате, Эфория (фирма Syngenta AG, Швейцария), Децис, Биская, Конфидор (кампания Bayer, Германия), Би-58 и Регент 800 (концерн BASF Societas Europaea). Успех применения ядохимикатов зависит от многих факторов — правильного выбора инсектицидов, норм расхода, сроков применения, кратности обработок, технических возможностей средств механизации и др. Однако химический метод имеет существенные недостатки: с применением химических средств уничтожения вредителей происходит загрязнение окружающей среды, снижение популяции полезных насекомых, увеличивается резистентность колорадских жуков к пестицидам.

Механический метод предполагает сбор и уничтожение колорадского жука различными способами стряхивания, сбора, а также уничтожение жуков, личинок и яиц с помощью агрегатов, оборудованных вибрационными стряхивателями, пневматической системой или другими рабочими органами механического воздействия. Этот способ защиты растений от вредителей весьма трудоемок и поэтому применяется на небольших площадях и участках, где другие способы защиты растений от вредителей использовать не представляется возможным. Например, сооружение ловушек для вредных насекомых, применение ловчих поясов, а также уничтожение вредителей вручную сбор и сжигание колорадского жука возможны только на небольших приусадебных участках.

Перспективным методом сбора и уничтожения колорадского жука при выращивании экологически чистого картофеля на небольших участках является механический с использованием специальных машин, установок и приспособлений, комбинированный с одновременным рыхлением междурядий картофеля, механическим уничтожением сорных растений, окучиванием, распределением водных растворов для борьбы с колорадским жуком, а также внесением минеральных удобрений [6]. Приведем сводную характеристику известных средств и методов (таблица 1).

Репозиторий ВарГУ

Т а б л и ц а 1. — Краткая характеристика методов и средств сбора и уничтожения колорадского жука [6]

Метод	Средства	Достоинства, недостатки	Уровень эффективности	Применяемость на практике
Агротехнический	Сельскохозяйственные машины, орудия, агроприемы	Экологически чистый картофель; высокие требования к организации	Высокая	Средняя
Биологический	Птицы, микроорганизмы, насекомые, энтомофаги	Экологически чистый картофель; высокая стоимость препаратов	Средняя	Низкая
Механический	Машины, установки, приспособления	Экологически чистый картофель; высокие энергозатраты; возможно повреждение ботвы	Средняя	Низкая
Народный	Растения, водные растворы, отвары	Экологически чистый картофель; большие затраты труда; затруднительно применение в промышленных масштабах	Средняя	Низкая
Физический	Приборы ультразвуковых колебаний, радиационные установки	Экологически чистый картофель; высокая стоимость машин и оборудования	Средняя	Низкая
Химический	Пестициды	Невысокая стоимость препаратов; технологичность применения; вреден для окружающей среды и человека	Высокая	Высокая

Многообразие предлагаемых «народных» механических методов и средств в настоящее время сочетается с необоснованно малым числом реально применяемых машин как заводского производства, так и индивидуального изготовления. Причины недостаточного использования механических методов видятся в относительной дешевизне инсектицидов, простоте их применения, а также в том, что нет полной ясности в рациональной конструкции машины для сбора и уничтожения колорадского жука, которая могла бы стать классической или перспективной.

На наш взгляд, наибольшей эффективности можно достичь, применяя комбинированный (комплексный) способ борьбы с колорадским жуком, сочетающий в себе несколько из рассмотренных выше методов. В настоящее время нами ведётся разработка устройства, обеспечивающего механический сбор и уничтожение колорадского жука с последующей обработкой картофеля экологически чистыми препаратами, которые препятствуют повторному появлению вредителей. Применение данного устройства позволит ограничиться всего одной обработкой в течение вегетационного периода, а также исключить неблагоприятное воздействие на растения и почву, которое возникает при традиционной химической обработке высокотоксичными веществами.

Репозиторий БарГУ

Основная часть. На машинах для сбора и уничтожения колорадского жука устанавливаются как основные, так и дополнительные рабочие органы различной конструкции [7—9]. Основные рабочие органы предназначены для сбора и уничтожения колорадского жука, а дополнительные выполняют вспомогательные операции (подъём ботвы картофеля или удаление измельчённой массы колорадского жука на поверхность междурядья и др.). Применяются активные основные рабочие органы, т. е. для работы им необходим привод от вала отбора мощности или от колес машины.

Основные рабочие органы по принципу действия подразделяются на механические, пневматические и пневмомеханические. По способу снятия колорадского жука основные механические органы классифицируются на ударно-стряхивающие, счёсывающе-сгребающие, стряхивающе-очёсывающие, комбинированные. По конструктивной форме — зубья, пальцы, бичи, гребёнки, метёлки, щётки, рассекатели, стряхиватели ударного типа, эластичные битеры, качающиеся ролики, вращающиеся диски с гребёнками, державки с эластичными пластинами, пластины с прорезями, эластичные стержни, активаторы вибрационные, роторы с упруго-эластичными лопастями, гибкие лепестки в виде ромашки, эластичные копирующие щётки и комбинированные рабочие органы [5].

Среди комбинированных наиболее перспективными являются счёсывающе-вибрационные. В качестве счёсывателей в основном применяются зубья длиной от 200 до 750 мм, изготавливаемые из гибкого материала. Короткие зубья длиной 200…400 мм изготавливают из полимерного материала диаметром 6…10 мм. Длинные зубья изготавливают из стальной пружинной проволоки диаметром 2…4 мм, которая покрывается полимерным эластичным материалом или резиной. Пальцы длиной 50…200 мм изготавливают из полимерного материала или резины круглого сечения диаметром 2…7 мм. Иногда счёсывающие пальцы изготавливают из стальной пружинной проволоки различной длины и диаметра, однако их существенный недостаток состоит в том, что при работе происходит повышенное травмирование ботвы. Стряхиватели чаще всего изготавливают из верёвки (бечёвки) круглого сечения длиной от 250 до 700 мм диаметром 8…15 мм [5].

В учреждении образования «Гродненский государственный аграрный университет» разработана действующая модель машины для сбора колорадского жука, в которой рабочими органами являются сплошные прямоугольные упруго-эластичные лопасти, закрепленные вдоль оси роторов с вертикальной осью вращения [8]. Диаметр ротора рекомендуется принять примерно в два раза больше его рабочей высоты, которая, в свою очередь, выбирается несколько большей половины средней высоты ботвы картофеля. Ширина лопастей равна половине диаметра ротора. Этими же авторами сконструирован комбинированный агрегат, в состав которого входит культиватор-окучник и машина для сбора колорадского жука с активными рабочими органами [9].

Среди пассивных рабочих органов для сбора колорадского жука наиболее эффективными являются сложные рассекатели в виде колокола, состоящие из центрального корпуса и частей усечённых конусов с различным диаметром. Такие рассекатели претерпели изменения, имея ту же общую форму колокола. Но центральная часть конуса овальная, остальные части — усечённые конусы с различными диаметрами. Конусы выполнены полыми с вырезными окнами в верхней части [10].

Рабочий орган может быть выполнен в виде закрытой с боков камеры, внутри которой размещён барабан с бичами, установленными на длине дуг, равной расстоянию между культурными растениями в рядке, и карманы в нижней части камеры из непроницаемого для насекомых и их личинок материала. Кромки карманов изготовлены из эластичного материала, плотно охватывающего нижние части растений [11].

Рассмотрим подробную характеристику основных рабочих органов, их эффективность и применяемость (таблица 2).

Репозиторий БарГУ

Т а б л и ц а 2. — Достоинства и недостатки основных рабочих органов для сбора колорадского жука

Принцип действия основного рабочего органа	Степень полноты сбора	Уровень травмирования ботвы	Уровень сложности и металлоёмкости основного рабочего органа	Энерго-потребление	Применяемость
Ударно-стряхивающие	Средняя	Высокий	Высокий	Среднее	Низкая
Счёсывающе-сгребающие	Средняя	Средний	Высокий	Среднее	Средняя
Стряхивающе-счёсывающие	Средняя	Средний	Высокий	Среднее	Средняя
Комбинированные счёсывающе-ударные	Высокая	Средний	Средний	Низкое	Средняя
Комбинированные счёсывающе-вибрационные	Высокая	Низкий	Средний	Низкое	Высокая

Представленная классификация современных методов и средств для сбора и уничтожения вредителей картофеля характеризует основные пути развития методов и средств для сбора и уничтожения колорадского жука как альтернативу химическому методу и его соответствующим средствам, особенно при выращивании экологически чистого картофеля. Наиболее перспективными методами сбора и уничтожения колорадского жука с точки зрения выращивания экологически чистого картофеля являются биологический, физический и комплексный методы. Развитие конструкций машин направлено на повышение полноты сбора вредителей, снижение травмирования ботвы, уменьшение сложности и металлоёмкости основных рабочих органов и энергопотребления. Наиболее перспективными рабочими органами являются комбинированные, например, счесывающе-вибрационные, на которых установлены эластичные щётки, регулируемые как по месту расположения относительно ботвы картофеля, так и по амплитуде колебаний.

В целом анализ известных конструкций машин для сбора колорадского жука и их рабочих органов позволяет сделать вывод, что данные машины малопроизводительны, имеют высокую металлоемкость и энергопотребление, а также низкое качество работы — 30…60% особей колорадского жука остается на картофельном поле. Приблизительно половина вредителей остается на картофельной ботве, а остальная часть ссыпается на поверхность гребня вокруг стеблей картофеля. Чтобы устранить вышеуказанные недостатки, нами разработана конструкция машины для сбора колорадского жука с рабочими органами нового типа.

На наш взгляд, наиболее перспективными рабочими органами являются комбинированные счёсывающе-вибрационные или счёсывающе-ударные с применением эластичных материалов для снижения травмирования ботвы. Для повышения полноты сбора целесообразно применять щётки — горизонтальные, вертикальные и комбинированные с регулировкой углов наклона в различных направлениях в зависимости от сорта картофеля и периода его роста [6].

Рабочими органами в предлагаемой нами машине для сбора колорадского жука (рисунок 1) служат конические щетки, гофрированные боковины и рифленые пруты-ударники.

Каждая конусообразная щетка *2* выполнена в форме перевернутого усеченного конуса и закреплена на вертикальной оси с возможностью свободного вращения. Диаметр большего основания конуса — в пределах от 350 до 600 мм, меньшего — 50…150 мм. Непосредственное воздействие на листву картофеля оказывают эластичные прутки, изготовленные из капроновой нити диаметром 1...2 мм.

Материалом для изготовления боковин *3* служит гофрированный полимерный лист. Гофры-волны имеют синусоидальную в сечении форму и направлены под углом 45° к горизонтали таким образом, что в передней части машины они находятся выше, чем в задней по ходу ее движения. Более высокий результат работы гофрированных боковин следует ожидать при резонансном ударном воздействии на ботву, за счет чего в щадящем режиме с ботвы стряхивается большое количество вредителей. Как показали наблюдения, больший эффект работы достигается при высокой шероховатости поверхности боковин.

Репозиторий БарГУ

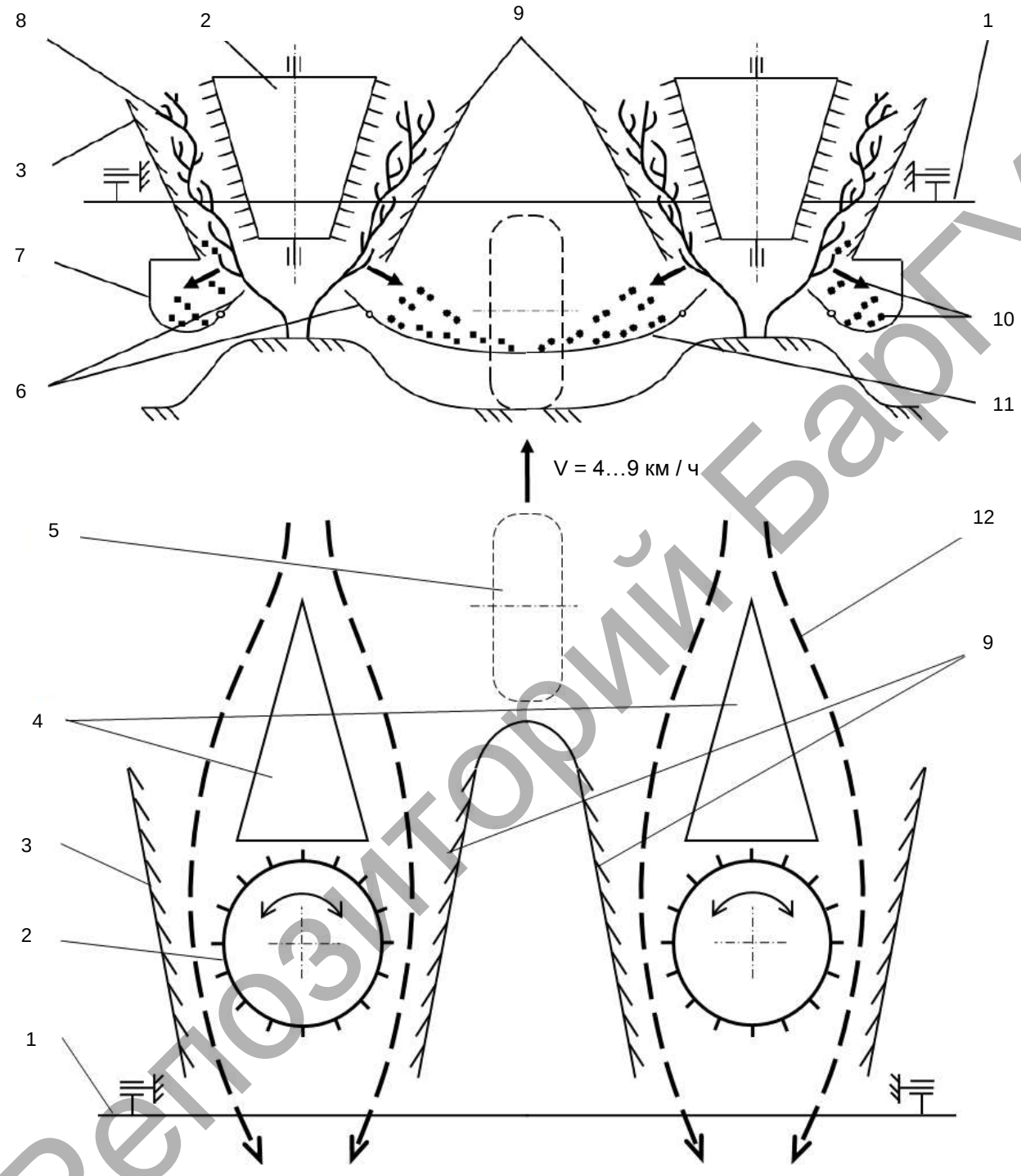


Рисунок 1. — Схема предлагаемой конструкции машины для сбора колорадского жука

Гофрированные боковины в задней части машины соединены прутом-ударником *1*, который изготовлен из стального прута и имеет возможность регулировки по высоте. Прут-ударник оказывает дополнительное воздействие на ботву картофеля, стряхивая вредителей в желоба-накопители *7* и *11*.

К средним боковинам прикреплены продольные щетки длиной 800 мм с закрепленными на них эластичными капроновыми прутками длиной 50…80 мм и диаметром 1…2 мм.

По бокам машины под боковинами продольно размещены боковые желоба-накопители *7*, а в средней части машины — центральный желоб-накопитель *11* для сбора колорадского жука

Репозиторий БарГУ

и личинок. К бортам желобов-накопителей шарнирно прикреплены продольные эластичные копиры-ловители *6*, которые под воздействием нажимных пружин прижимаются к стеблям ботвы *8* в ее нижней части, предотвращая тем самым просыпание вредителей на почву.

На машине установлены торпедные делители ботвы *4*, изготовленные из стальных прутков диаметром 5…8 мм. Для снижения потерь вредителей верхняя часть делителей прикрыта полуцилиндрическим кожухом из полимерной трубы диаметром 40…50 мм. Передняя часть машины опирается на опорно-копирующее колесо *5*.

Гофрированные боковины в передней части машины соединены между собой дугами из стального прута диаметром 10 мм. Достаточная жесткость несущей части машины достигается также за счет продольных и центральных желобов-накопителей. Рабочие органы (за исключением роторов) являются несущей частью машины, благодаря чему металлоемкость и энергопотребление значительно снижаются по сравнению с другими известными конструкциями.

Работает предлагаемая конструкция двухрядной машины для сбора колорадского жука (*см.* рисунок 1) следующим образом. Машина присоединяется к мини-трактору или мотоблоку спереди. Возможно также передвижение машины за счет мускульной силы работника, для чего предусмотрена установка поручня. При движении машины со скоростью 4…9 км / ч опорно-копирующее колесо *5* перекатывается по борозде. Торпедные делители *4* разделяют ботву *8* рядка, при этом левый делитель прижимает часть ботвы к левой рифленой боковине, а правый делитель — к неподвижной щетке. В зоне задней части делителя за счет сил инерции вредители начинают ссыпаться в желоба-накопители *7* и *11*. Когда картофельная ботва *12* оказывается между основными рабочими органами — коническими щетками *2* и боковинами *3*, а также между коническими и неподвижными щетками *9*, — происходит наиболее интенсивное отделение жуков и личинок *10*, которые попадают в желоба-накопители *7* и *11*. Одновременное прижатие обоих частей ботвы рядка происходит за счет схождения боковин по направлению к задней части машины. Окончательное удаление вредителей осуществляет рифленый прут-ударник *1*, который воздействует на ботву в момент ее схода со щеток. Небольшое количество оставшихся вредителей удаляется с ботвы одновременно во все желоба-накопители.

Основной новизной конструкции данной машины является то, что все рабочие органы — пассивного типа и не требуют привода, в результате существенно снижается металлоемкость и энергопотребление. Высокая эффективность работы достигается за счет того, что ботва рядка разделяется на две части, и рабочие органы имеют максимальное соприкосновение с обрабатываемой ботвой картофеля.

Удачная компоновка рабочих органов позволяет одновременно увеличить производительность и качество работы за счет увеличенной площади рабочих органов, которая во время работы воздействует на вредителей, находящихся на картофельной ботве.

Заключение. Разработанная нами оригинальная машина для сбора колорадского жука с перспективными рабочими органами позволяет обеспечить необходимую производительность и качество сбора колорадского жука с картофельной ботвы, которая будет повреждаться в минимальной степени. Вместе с тем конструкция машины достаточно проста, имеет небольшую металлоемкость, не требует привода для рабочих органов. Простота конструкции способствует ее надежности в сравнении с другими машинами для сбора колорадского жука и личинок.

Список цитируемых источников

1. Закон об органическом земледелии в Республике Беларусь может быть принят в I полугодии [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2018/february/27801/. — Дата доступа: 10.03.2018.

2. Валовой сбор и урожайность картофеля [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь : офиц. сайт. — Режим доступа: http://www.belstat.gov.by. — Дата доступа: 12.03.2018.

Репозиторий БарГУ

3. *Бурдейко, В. А.* Перспективные методы и средства для сбора и уничтожения колорадского жука / В. А. Бурдейко, Ю. И. Шадид // Технологии, экономика и право: актуальные проблемы и инновации : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 20 нояб. 2014 г., Барановичи, Респ. Беларусь / редкол.: А. В. Никишова (гл. ред.), А. К. Гавриленя (отв. ред.) [и др.]. — Барановичи : РИО БарГУ, 2014. — С. 139—142.

4. *Зискинд, Л. А.* Хищный клоп *Podisus maculiventris* Say и его совместное использование с пестицидами против колорадского жука : дис. … канд. биол. наук : 06.01.11 / Л. А. Зискинд. — М., 1984. — 188 с.

5. *Коваль, А. Г.* Жужелицы (Coleoptera, Carabidae) полей овощных паслёновых культур: видовой состав, экология, биология, энтомофаги колорадского жука : дис. … канд. биол. наук : 03.00.09 / А. Г. Коваль. — СПб., 141 с.

6. *Бурдейко, В. А.* Перспективные рабочие органы машин для сбора колорадского жука / В. А. Бурдейко // Техника и технологии. Инновации и качество : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. 18 дек. 2015 г. Барановичи, Респ. Беларусь / редкол. А. В. Никишова (гл. ред.), Ю. Е. Горбач (отв. ред.) (и др.). — Барановичи : РИО БарГУ, 2015. — С. 7—8.

7. *Заяц, В. А.* Анализ методов борьбы с колорадским жуком при возделывании экологически чистого картофеля / В. А. Заяц // Агропанорама. — 2008. — № 6. — С. 35—38.

8. Тележка для сбора колорадского жука [Электронный ресурс] : пат. U20070400 Респ. Беларусь, МПК A01M5/00 / В. К. Пестис, Э. В. Заяц, С. Н. Ладутько, П. П. Казакевич, П. В. Заяц ; заявитель и патентообладатель Гродн. гос. аграр. ун-т // База патентов Беларуси. — Режим доступа: http://bypatents.com/. — Дата доступа: 10.09.2015.

9. *Заяц, П. В.* Комбинированный агрегат для получения экологически чистого картофеля / П. В. Заяц, Э. В. Заяц // Сельское хозяйство — проблемы и перспективы : сб. науч. тр. : в 4 т. / М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь ; Гродн. гос. аграр. ун-т / под ред. В. К. Пестиса. — Т. 1. Сельскохозяйственные науки (агрономия). — С. 185—191.

10. Устройство механического сбора вредных насекомых, их личинок или семян [Электронный ресурс] : пат. РФ 2390127 МПК A01M5/04 / В. А. Парамошко // Нац. цифровой ресурс Руконт. — Режим доступа: http://rucont.ru/. — Дата доступа: 10.09.2015.

11. Устройство для сбора колорадского жука [Электронный ресурс] : пат. РФ № 2202883, МПК 7 A01M 5/04 / Н. В. Бышов, И. Б. Тришкин, В. Д. Липин, В. В. Важинский, В. П. Топилин, Т. В. Липина / заявитель и патентообладатель Рязан. гос. агротехнол. ун-т им. П. А. Костычева // Информ. портал рос. изобретателей. — Режим доступа: http://bankpatentov.ru/. — Дата доступа: 10.09.2015.

Поступила в редакцию 12.03.2018

Репозиторий БарГУ

УДК 631.363.5

П. Ю. Крупенин
Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, +375 (2233) 7 96 41, pavel@krupenin.com

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ КОРМОВОЙ СУСПЕНЗИИ В КАНАЛАХ РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА

Статья посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям применения роторных импульсных аппаратов для приготовления жидких кормов методом диспергирования. На основе нестационарного уравнения Бернулли предложена математическая модель движения кормовой суспензии в каналах роторного импульсного аппарата, учитывающая влияние частиц корма на гидравлическое сопротивление перехода между каналами ротора и статора. Предложен алгоритм приближенного расчета значений коэффициента, учитывающего степень блокировки проходного сечения между каналами частицами обрабатываемого материала. Обоснован метод численного решения нестационарного уравнения Бернулли с применением систем компьютерной алгебры, позволяющий определять гидродинамические параметры потока кормовой суспензии и подачу роторного импульсного аппарата. Проведены экспериментальные исследования подачи роторного импульсного аппарата при обработке кормовой суспензии. Выполнена статистическая оценка соответствия результатов теоретических исследований данным, полученным экспериментальным путем.

Ключевые слова: роторный импульсный аппарат; кавитация; приготовление кормов; диспергирование; суспензия.

Рис. 5. Библиогр.: 6 назв.

P. Y. Krupenin
Belarusian State Agricultural Academy in the name of order of the October Revolution and Labor Red Banner, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus, 5 Michurina Str., 213407 Gorki, the Republic of Belarus, +375 (2233) 7 96 41, pavel@krupenin.com

THE MATHEMATICAL MODEL OF FEED SUSPENSION MOVEMENT IN THE CHANNELS OF ROTARY IMPULSE DEVICE

The article is devoted to theoretical and experimental studies of the use of rotary impulse devices for the preparation of liquid feeds by the dispersion method. On the basis of the non-stationary Bernoulli equation, a mathematical model of the motion of the feed suspension in the channels of the rotary impulse apparatus is proposed; it takes into account the effect of the feed particles on the hydraulic resistance of the transition between the channels of the rotor and the stator. An algorithm is proposed for approximate calculation of coefficient values, which takes into account the degree of blocking of the cross-section between the channels of particles of the material being processed. The method of numerical solution of the non-stationary Bernoulli equation with the use of computer algebra systems is substantiated. This method makes it possible to determine the hydrodynamic parameters of the feed suspension and the delivery of a rotary impulse apparatus. Experimental research of productivity of the rotary impulse device during the processing of the feed suspension is carried out. A statistical evaluation indicates the correspondence between the theoretical and experimentally obtained results.

Keywords: rotary impulse device; cavitation; preparation of feed; dispersing; suspension.

Fig. 5. Ref.: 6 titles.

Введение. Снижение материальных затрат на производство продукции животноводства за счет более полного использования биологического потенциала животных является важной задачей, требующей комплексного подхода к ее решению. В структуре себестоимости животноводческой продукции затраты на корма составляют до 70%, а значит, даже незначительное уменьшение конверсии корма может существенно улучшить экономические показатели

© Крупенин П. Ю., 2018

Репозиторий БарГУ

предприятия. Внешним фактором, влияющим на степень усваивания организмом животного питательных веществ, является качество корма, определяемое не только свойствами исходного кормового сырья, но и применяемой технологией для его подготовки к скармливанию.

Перспективным способом подготовки концентрированных кормов к скармливанию является гидроимпульсная обработка, заключающаяся во многократной обработке сырья в водной среде при помощи роторных импульсных аппаратов. В процессе движения кормовой суспензии по каналам рабочих элементов аппарата — ротора и статора — корм подвергается комплексной обработке. Конечным продуктом гидроимпульсной обработки зерна является жидкая кормовая добавка с содержанием сухого вещества до 30%, которая может быть использована в рационах кормления свиней и крупного рогатого скота.

Принцип работы роторного импульсного аппарата (рисунок 1) заключается в следующем. Обрабатываемая кормовая суспензия подается во входной патрубок *1* и заполняет полость *3* ротора *2*. Лопасти *7*, расположенные в полости ротора, раскручивают суспензию и центробежная сила создает избыточное давление на входе в каналы *9* ротора. Вращение ротора приводит к периодическому соединению и разъединению его каналов *9* с каналами *8* статора *4*, обеспечивая при этом прерывистое движение суспензии в рабочую камеру статора *5*, сопровождаемое пульсациями скорости и расхода.

Режуще-истирающее действие рабочих элементов аппарата на твердые частицы корма и импульсное движение суспензии в каналах ротора и статора, в свою очередь приводящее к образованию кавитационных пузырьков, обеспечивают комплексную обработку корма, включающую факторы механического (измельчение частиц зерна), гидроимпульсного (получение однородной суспензии) и кавитационного (улучшение биохимического состава корма) воздействий.

Несмотря на то, что обоснование параметров роторного импульсного аппарата для интенсификации вышеуказанных воздействий на обрабатываемый корм выполняется по независимым методикам, для успешного их применения необходимо знать закономерности движения жидкого корма в каналах ротора и статора [1].

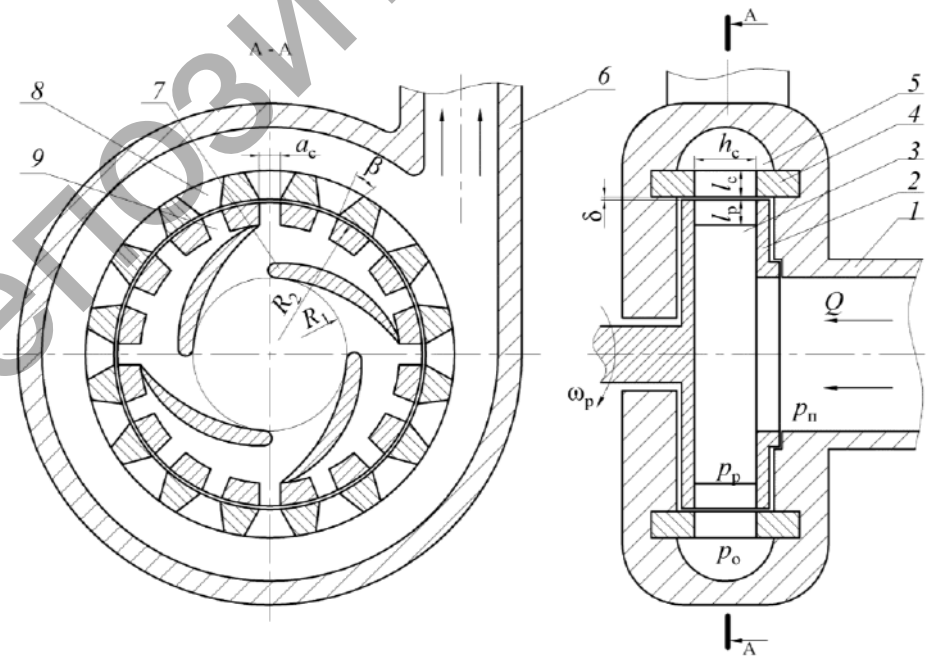


Рисунок 1. — Конструктивно-технологическая схема роторного импульсного аппарата

Репозиторий ВГУ

Основная часть. В настоящее время наиболее исследованными и экспериментально подтвержденными математическими моделями движения жидкости в каналах ротора и статора являются модели, полученные в результате модификации нестационарного уравнения Бернулли. На основе таких уравнений можно определить скорость, ускорение, расход и давление жидкости в канале статора [2].

С допущением, что потери энергии потока жидкости на трение между сечениями I—I и II—II (рисунок 2) крайне малы, нестационарное уравнение Бернулли запишется в виде [3]

$$\frac{p_{\text{р}} + p_{\omega}}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_{\text{о}}}{\rho} + \frac{u^2}{2}\left[1 + \zeta_{\text{м}}(t)\right] + \left(l_{\text{р}} + l_{\text{с}} + \delta\right)\frac{\text{d}u}{\text{d}t}, \quad (1)$$

где $p_{\text{р}}$ — статическое давление в полости ротора, Па;
$p_{\text{о}}$ — статическое давление в рабочей камере статора, Па;
p_{ω} — прирост статического давления за счет действия на жидкость центробежной силы в канале ротора, Па;
ρ — плотность жидкости, кг / м^3;
u_1, u — скорость жидкости на входе и выходе из каналов, м / с;
$\zeta_{\text{м}}(t)$ — обобщенный коэффициент местных сопротивлений;
$l_{\text{р}}$, $l_{\text{с}}$ — длина каналов ротора и статора соответственно, м;
δ — радиальный зазор между ротором и статором, м.

Величина p_{ω} может быть определена из уравнения Эйлера [4] для рабочего колеса центробежного насоса с прямыми лопастями

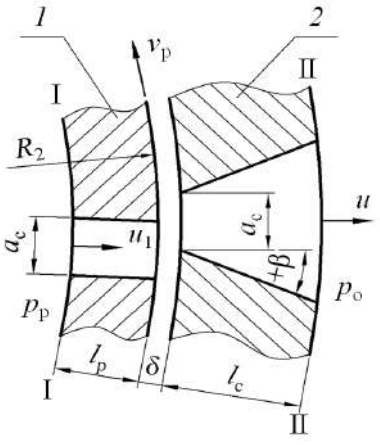
$$p_{\omega} = \frac{\rho l_{\text{р}} v_{\text{р}}^2 \left(2R_2 - l_{\text{р}}\right)}{2R_2^2},$$

где $v_{\text{р}}$ — окружная скорость выходного отверстия канала ротора, м / с;
R_2 — радиус внешней окружности ротора, м.

Скорость жидкости на входе в канал ротора получим из условия неразрывности струи [5]:

$$u_1 = u\left(1 + \frac{2l_{\text{с}}\text{tg}\beta}{a_{\text{с}}}\right),$$

где β — угол наклона стенок канала статора, рад;
$a_{\text{с}}$ — ширина входного отверстия канала статора, м.



1 — ротор; *2* — статор

Рисунок 2. — Схема взаимного расположения каналов ротора и статора

Репозиторий БарГУ

В уравнении (1), описывающем движение жидкости в каналах аппарата, присутствует параметр $\zeta_м(t)$ — коэффициент гидравлического сопротивления системы «канал ротора — радиальный зазор — канал статора». В работе [6] предложено определять величину $\zeta_м(t)$ для расширяющегося канала статора по зависимости

$$\zeta_м(t) = 1{,}5 + \frac{4l_c^2 \operatorname{tg}^2\beta}{a_c^2}\sin 2\beta + \zeta_{пер} \cdot e^{-9{,}6\left(1-\frac{|a_c - v_p t|}{a_c}\right)}, \quad (2)$$

где $\zeta_{пер}$ — коэффициент гидравлического сопротивления полностью перекрытых каналов аппарата [3].

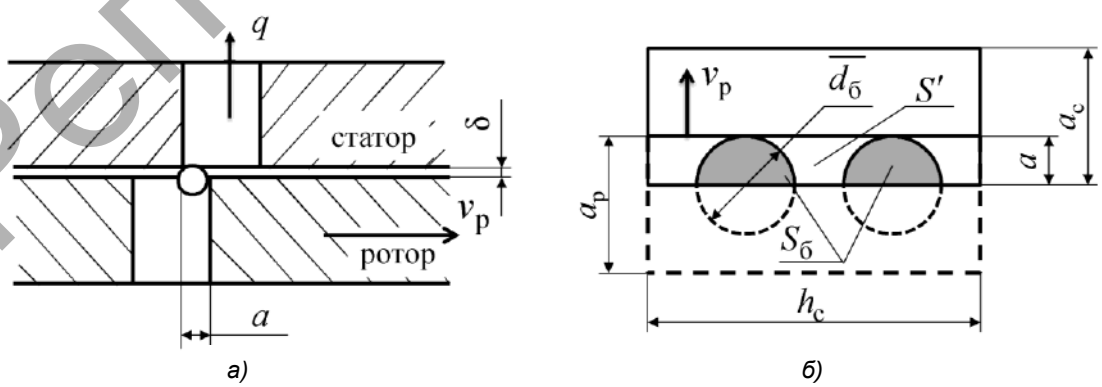
Первые два слагаемых выражения (2) отражают влияние геометрических параметров канала статора на его гидравлическое сопротивление, третье — влияние взаимного расположения каналов ротора и статора.

Зависимость (2), полученная при допущении, что частицы обрабатываемого материала не препятствуют движению жидкости в каналах ротора и статора, может быть использована для расчета значений коэффициента $\zeta_м$ при обработке в аппарате жидкостей или суспензий, дисперсность которых сопоставима с величиной радиального зазора δ между его рабочими элементами. Однако при обработке кормовой суспензии, размер частиц зерна в которой значительно превышает зазор δ, погрешность модели (2) увеличивается. Увеличение погрешности связано с тем, что в начале фазы открытия канала статора и в завершении фазы его перекрытия крупные частицы блокируют часть площади проходного сечения между каналами ротора и статора, увеличивая при этом их гидравлическое сопротивление (рисунок 3, *а*).

Степень влияния частиц зерна на гидравлическое сопротивление каналов роторного импульсного аппарата предлагается учесть коэффициентом k_S, равным отношению свободной площади S' проходного сечения между каналами ротора и статора к общей площади S данного сечения (*см.* рисунок 3, *б*):

$$k_S(t) = \frac{S'(t)}{S(t)} = 1 - \frac{S_б(t)}{S(t)}, \quad (3)$$

где $S_б(t)$ — площадь проходного сечения между каналами, заблокированная частицами кормовой суспензии, м^2.



а) *б)*

а — положение частицы корма в каналах аппарата; *б* — схема к расчету коэффициента k_S

Рисунок 3. — Блокировка проходного сечения между каналами ротора и статора частицами кормовой суспензии

Репозиторий БарГУ

В общем виде полная площадь S проходного сечения между сообщающимися каналами ротора и статора определяется по зависимости

$$S(t) = h_{\text{с}} a(t) = h_{\text{с}} \sqrt{\left(a_{\text{с}} - \left|a_{\text{с}} - v_{\text{р}} t\right|\right)^2 + \delta^2}\ ,\ t \in \left[0; \frac{2a_{\text{с}}}{v_{\text{р}}}\right], \tag{4}$$

где $a(t)$ — ширина проходного сечения между каналами ротора и статора, м;

$h_{\text{с}}$ — длина входного отверстия канала статора, м.

Для сферической формы частиц заблокированная площадь $S_{\text{б}}$ равна суммарной площади их поперечных сечений:

$$S_{\text{б}}(t) = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{\text{б}}(t)}{\overline{d_{\text{б}}}(t)}, \tag{5}$$

где $\overline{d_{\text{б}}}(t)$ — средний диаметр частиц, способных заблокировать проходное сечение шириной a между каналами, м;

$V_{\text{б}}(t)$ — общий объем частиц, блокирующих проходное сечение, м^3.

Средний диаметр $\overline{d_{\text{б}}}$ определяется в зависимости от ширины a проходного сечения и максимального размера частиц в суспензии по формуле

$$\overline{d_{\text{б}}}(t) = \frac{a(t) + d_{\max}}{2}, \tag{6}$$

где $d_{\max}$ — максимальный диаметр частиц в кормовой суспензии, м.

При определении объема $V_{\text{б}}$ частиц кормовой суспензии, способных заблокировать проходное сечение, следует учитывать только те из них, которые удовлетворяют следующим условиям: во-первых, диаметр частиц должен превышать величину радиального зазора δ между ротором и статором, так как в противном случае они перейдут в него. Во-вторых, частицы должны иметь размер более текущей ширины a проходного сечения между каналами (*см.* рисунок 3, *б*).

Поскольку процесс совмещения и разъединения каналов ротора с каналами статора является цикличным, то частицы, заблокировавшие проходное сечение в конце фазы закрытия канала статора, будут также блокировать его и в начале фазы открытия следующего цикла. Принимая во внимание эту особенность, объем $V_{\text{б}}$ частиц зерна, способных заблокировать проходное сечение между каналами, может быть определен по зависимости

$$V_{\text{б}}(t) = \begin{cases} \left[V_{\text{б}}^{\text{закр}} + C_{\text{з}} \int\limits_0^t q(t)\,\mathrm{d}t\right] \cdot \left[1 - F_{\text{з}}(a(t))\right], 0 \le t \le \dfrac{a_{\text{с}}}{v_{\text{р}}}; \\ C_{\text{з}} \left[1 - F_{\text{з}}(a(t))\right] \cdot \int\limits_{t_{\text{з}}}^t q(t)\,\mathrm{d}t, t_{\text{з}} \le t \le \dfrac{2a_{\text{с}}}{v_{\text{р}}}; \\ 0, \dfrac{a_{\text{с}}}{v_{\text{р}}} < t < t_{\text{з}}, \end{cases} \tag{7}$$

где $V_{\text{б}}^{\text{закр}}$ — объем частиц, скопившихся на входе в канал статора во время фазы его перекрытия, м^3;

$C_{\text{з}}$ — объемная концентрация частиц зерна в суспензии;

$q(t)$ — функция расхода кормовой суспензии через один канал статора, м^3 / с;

Репозиторий БарГУ

$F_з$ — значение интегральной функции распределения размеров частиц зерна;

$t_з$ — момент времени, по достижению которого возможна блокировка частицами проходного сечения в фазе перекрытия канала статора, с.

Значение времени $t_з$ и объема $V_б^{закр}$ определяются исходя из максимального размера частиц в суспензии по формулам

$$t_з = \frac{2a_с - d_{max}}{v_р}; \tag{8}$$

$$V_б^{закр} = C_з \cdot \int_{t_з}^{t} q(t)\,dt, \text{ при } t = \frac{2a_с}{v_р}. \tag{9}$$

Расход кормовой суспензии через один канал статора равен

$$q(t) = h_с(a_с + 2l_с \operatorname{tg}\beta)u(t), \tag{10}$$

где $u(t)$ — скорость кормовой смеси в выходном сечении канала статора (*см.* рисунок 2), м / с.

Функция скорости $u(t)$ может быть получена путем аппроксимации результатов решения дифференциального уравнения (1) методом Рунге—Кутты 4-го порядка. После получения функции скорости $u(t)$ становится возможным определить по формулам (4—9) составляющие выражения (3) и рассчитать значения коэффициента k_S в первом приближении.

Вышеуказанный алгоритм расчета значений скорости u и коэффициента k_S реализован при помощи пакета компьютерной алгебры Mathcad. Графические зависимости скорости u и коэффициента k_S от времени t, полученные при значениях параметров роторного импульсного аппарата $p_р = 2{,}6 \cdot 10^5$ Па, $p_о = 2{,}0 \cdot 10^5$ Па, $l_с = 17 \cdot 10^{-3}$ м, $l_р = 18 \cdot 10^{-3}$ м, $a_с = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $h_с = 28 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho = 1070$ кг / м^3, $\delta = 0{,}12 \cdot 10^{-3}$ м, $R_2 = 0{,}08$ м и допущении о нормальном распределении размеров частиц зерна в кормовой суспензии с математическим ожиданием $\bar{d} = 3 \cdot 10^{-3}$ м и среднеквадратическим отклонением $\sigma = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ м, приведены на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, в начале и в конце цикла значение коэффициента k_S стремится к нулю, т. е. в этих временных рамках частицы кормовой суспензии в значительной степени блокируют проходное сечение между каналами.

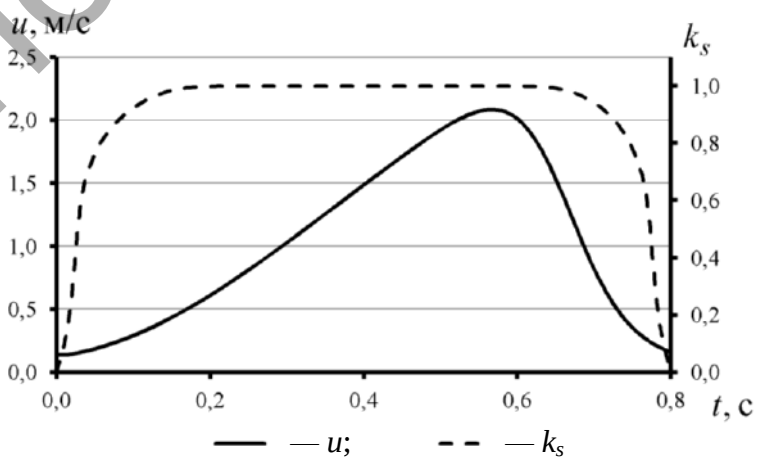


Рисунок 4. — Зависимость скорости u и коэффициента k_S от времени t

Репозиторий БарГУ

Для учета эффекта блокировки проходного сечения частицами обрабатываемого материала предлагается дополнить зависимость (2), определяющую гидравлическое сопротивление $\zeta_м$ каналов ротора и статора, уточняющим коэффициентом k_S. В указанной зависимости (2) выражение в степени экспоненты $1-\left|a_с - v_р t\right|/a_с$ учитывает полноту совмещения каналов ротора и статора, которая увязана с изменением площади проходного сечения между ними. Поскольку коэффициент k_S также учитывает уменьшение площади проходного сечения, доступной для движения жидкости в данный момент времени, то зависимость $\zeta_м(t)$ может быть уточнена в следующем виде:

$$\zeta'_м(t) = 1{,}5 + \frac{4l_с^2 \mathrm{tg}^2\beta}{a_с^2}\sin 2\beta + \zeta_{пер} \cdot \mathrm{e}^{-9{,}6k_S\left(1-\frac{\left|a_с - v_р t\right|}{a_с}\right)}. \qquad (11)$$

Численное решение дифференциального уравнения (1) методом Рунге—Кутты 4-го порядка, выполненное с учетом скорректированных значений коэффициента $\zeta'_м(t)$, позволило определить объем $V'_ц$ кормовой суспензии, проходящий за один цикл по каналу статора, и рассчитать теоретическую подачу $Q'_т$ диспергатора по зависимости [3]

$$Q'_т = V'_ц \frac{z_р z_с v_р}{2\pi R_2},$$

где $z_р$, $z_с$ — число каналов ротора и статора соответственно.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований выполнено путем построения напорных характеристик роторного импульсного аппарата (рисунок 5).

Из рисунка 5 видно, что теоретическая и экспериментальная напорные характеристики аппарата практически идентичны. Учет в математической модели фактора блокировки проходного сечения между каналами ротора и статора частицами обрабатываемой суспензии позволил уменьшить расхождение между теоретической и экспериментально определенной подачей аппарата с 6…11% при расчете коэффициента гидравлического сопротивления $\zeta_м$ по формуле (2) до 4…8%, при использовании предложенной уточненной зависимости (11) для определения значений $\zeta'_м$.

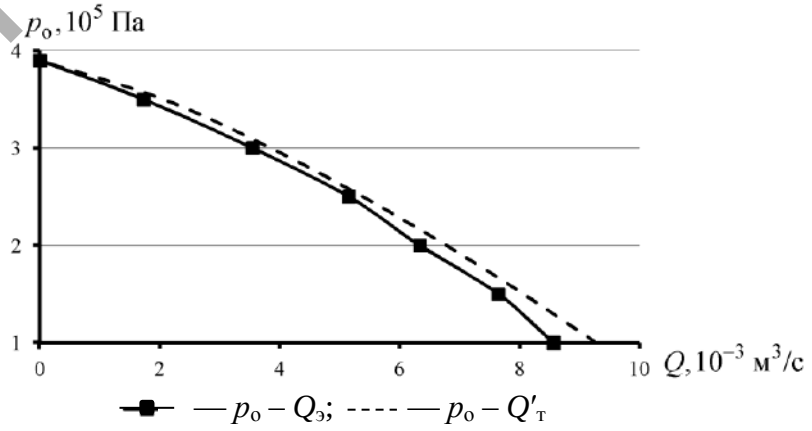


Рисунок 5. — Теоретическая ($p_о$—$Q'_т$) и экспериментальная ($p_о$—$Q_э$) напорные характеристики роторного импульсного аппарата

Репозиторий БарГУ

Заключение. Предложена математическая модель, описывающая импульсный характер движения кормовой суспензии по каналам роторного аппарата с учетом блокировки частицами корма проходного сечения между каналами ротора и статора и позволяющая определять подачу роторного импульсного аппарата с относительной погрешностью 4…8%.

Список цитируемых источников

1. *Червяков, А. В.* Оптимизация параметров роторно-импульсного кавитационного аппарата для интенсификации диспергирования кормовых смесей / А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2014. — № 2. — С. 194—198.

2. *Промтов, М. А.* Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата : монография / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин. — Тамбов : ТГТУ, 2015. — 148 с.

3. *Червяков, А. В.* Влияние конструктивно-технологических параметров на подачу роторно-импульсного кавитационного диспергатора кормов / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2016. — № 1. — С. 102—106.

4. *Черкасский, В. М.* Насосы, вентиляторы, компрессоры / В. М. Черкасский. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 416 с.

5. *Чугаев, Р. Р.* Гидравлика / Р. Р. Чугаев. — Л. : Энергия, 1975. — 600 с.

6. *Крупенин, П. Ю.* Гидроимпульсная подготовка консервированного плющеного зерна кукурузы на корм свиньям кавитационным диспергатором : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / П. Ю. Крупенин. — Горки, 2017. — 24 с.

Поступила в редакцию 12.02.2018

Репозиторий БарГУ

УДК 658.562.4

О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева»,
Российская Федерация, 127550 Москва, ул. Тимирязевская, д. 49, +7 (499) 976 44 74, metr@rgau-msha.ru

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ ПРИ РЕМОНТЕ ДИЗЕЛЕЙ

В работе рассмотрено, что погрешность измерения, имеющая определенное рассеяние, накладывается на зону рассеяния контролируемых размеров в результате формируется вероятность ошибок при принятии решения о годности изделия. Под влияние наложения рассеяний попадают контролируемые размеры изделия, которые ближе к границам полей допусков. Особенно данный фактор важен при разбиении деталей на группы селекции, где контроль осуществляется не по краям зоны рассеяния размеров изделия, а по ее секторам, и ошибки первого и второго рода здесь достаточно велики. Доказано, что при выборе средства измерений для контроля качества гильз цилиндров в условиях единичного, мелкосерийного и ремонтного производства, из предлагаемой номенклатуры универсальных средств измерений линейных размеров следует использовать самое точное. Для двигателей ММЗ используется нутромер индикаторный с ценой деления отсчетного устройства 0,001 мм для условий настройки по установочным кольцам, при этом погрешность измерений будет наименьшая. Уменьшение погрешности средств измерений приводит к значительному снижению количества неправильно принятых в группу и неправильно вышедших из группы или забракованных деталей, что, в свою очередь, отражается не только на качестве последующей сборки соединения, но и на экономике предприятия.

Ключевые слова: точность; допуск; погрешность средства измерений; селективная сборка; гильза цилиндров; неправильно забракованные и неправильно принятые изделия.
Табл. 2. Рис. 2. Библиогр.: 14 назв.

O. A. Leonov, N. Zh. Shkaruba, Y. G. Vergasova, W. Y. Antonova
Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academ, Russia, 127550 Moscow,
49 Timiryazevskaya Str. ,+7 (499) 976 44 74, metr@rgau-msha.ru

METROLOGICAL ASSURANCE OF CONTROL OF CYLINDER LINERS IN THE REPAIR OF DIESEL ENGINES

The paper considers that the measurement error with a certain scattering is superimposed on the scattering zone of controlled dimensions and the probability of errors is formed when deciding on the suitability of the product. Controlled dimensions of the part that are closer to the limits of tolerance fields fall under the influence of scattering superposition. This factor is especially important when splitting parts into selection groups, where the control is carried out not at the edges of the area of dispersion of the product dimensions, and its sectors, and the errors of the first and second kind are large enough. It is proved that when choosing a measuring instrument for quality control of cylinder liners processing in the conditions of single, small-scale and repair production, the most accurate of the offered nomenclature of universal measuring instruments of linear dimensions should be used. In this example this is — caliper indicator with a scale division of the device reading 0.001 mm for the conditions of the settings on the installation the rings, the measurement error will be smallest. Reducing the error of measuring instruments leads to a significant reduction in the number of incorrectly accepted into the group and incorrectly left the group or rejected parts, which, in turn, affects not only the quality of the subsequent Assembly of the compound, but also on the economy of the enterprise.

Key word: accuracy; tolerance; measurement error; selective Assembly; cylinder liner; incorrectly rejected and incorrectly accepted products.
Table 2. Fig. 2. Ref.: 14 titles.

Введение. Вопросы обеспечения качества единичного и мелкосерийного машиностроительного производства, в том числе ремонта машин, в настоящее время являются актуальными в силу ряда объективных и субъективных факторов, которые связаны

© Леонов О. А., Шкаруба Н. Ж., Вергазова Ю. Г., Антонова У. Ю., 2018

Репозиторий БарГУ

с культурой проектирования и производства машин. Уровень качества, обеспечиваемый массовым и крупносерийным производством, гораздо выше уровня качества единичного и мелкосерийного производства и ремонта машин [1]. Это объясняется целым рядом объективных факторов [2], главные из которых — экономические показатели рентабельности: на полученную прибыль малые предприятия не могут обновить станочный парк, а на оборотные средства — приобретать оригинальные материалы и запчасти, иметь высококвалифицированных рабочих [3]. Требуемая точность размеров в узлах и агрегатах машин, которая в технической документации отражается квалитетами и допусками [4], плохо формируется старым и изношенным технологическим оборудованием, применяемым при изготовлении и ремонте техники в условиях мелкосерийного производства [5].

Метрологическое обеспечение контроля в машиностроении — один из главнейших барьеров, который реально не позволяет пропустить брак на сборку. Оно включает в себя два важнейших элемента — единство измерений и обеспечение требуемой точности контроля. Повышение точности контроля приводит к уменьшению составляющих затрат на качество [6], а именно затрат от внутреннего и внешнего брака [7]. Номенклатура универсальных средств измерений, нашедших широкое применение в мелкосерийном производстве и при ремонте машин, включает в себя чаще всего несколько приборов, которые могут удовлетворить требованиям выбора средств измерений. В настоящей работе рассматривается целесообразность выбора того или иного средства контроля, включая ответственный процесс сортирования в группы селекции гильз цилиндров, как поступивших в виде запасных частей, так и обработанных под ремонтный размер. Подчеркнем, что это важно именно при селекции, где контроль осуществляется не по краям зоны рассеяния размеров изделия, а по ее секторам, и ошибки первого и второго рода здесь достаточно велики.

Основная часть. Цель исследований состоит в изучении степени влияния погрешности измерений на зону рассеяния размеров гильз цилиндров в процессе обработки и контроля при групповой взаимозаменяемости, формирования при этом количества неправильно принятых и неправильно забракованных деталей, а также определения вероятностной величины выхода за каждую границу поля допуска у неправильно принятых размеров гильз.

Существующие методики. В настоящее время выбор средств измерений линейных размеров при допусковом контроле рассматривается технологами как простая задача, при проведении которой необходимо руководствоваться требованиями ГОСТ 8.051-81 и РД 50-98-86 [8].

Средства измерений выбирают с учетом точностных и метрологических характеристик объекта контроля [9]. Программа производства также оказывает влияние на выбор средств измерений [10]. При массовом производстве обычно используют оригинальные высокопроизводительные средства измерений или калибры с элементами роботизации и автоматизации, а при мелкосерийном и единичном — универсальные средства измерений.

Погрешность измерения, имея определенное рассеяние, накладывается на зону рассеяния контролируемых размеров, в результате формируется вероятность ошибки при принятии решения о годности изделия. Под влияние наложения рассеяний попадают контролируемые размеры изделия, которые ближе к границам полей допусков. Рассмотрим схему такого наложения (рисунок 1), где показан допуск *T*, параметры, характеризующие

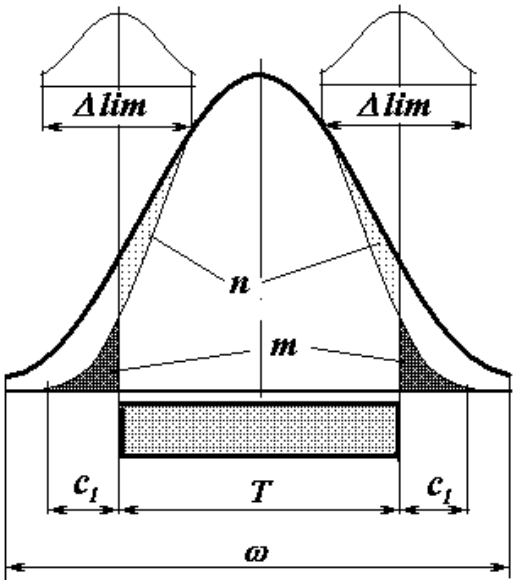


Рисунок 1. — Схема контроля

Репозиторий БарГУ

рассеяние контролируемых размеров изделия, — зона рассеяния $\omega_{тех}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_{тех}$, а также рассеяние погрешности измерения Δ, при условии распределения этих рассеяний по закону нормального распределения.

Конкретное средство измерений при допусковом контроле выбирают так, чтобы предельная погрешность измерения Δlim была не более допускаемой нормируемой погрешности измерения Δ [11], т. е. $\Delta lim \le \Delta$.

Влияние рассеяния погрешности измерения на формирование результатов разбраковки оценивают следующими параметрами (*см.* рисунок 1) [12]:

m (m_1) — число неправильно принятых изделий в процентах от общего числа измеренных (числа принятых);

n (n_1) — число неправильно забракованных изделий в процентах от общего числа измеренных (числа годных);

c (c_1) — вероятностная величина выхода измеряемого параметра за каждую границу допуска у неправильно принятых изделий (от числа принятых деталей).

Наиболее рационально при определении вышеперечисленных параметров использовать относительную величину [12]:

$$A_{мет}(\sigma) = (\sigma_{мет}/T) \cdot 100\%,$$

где $A_{мет}(\sigma)$ — относительная погрешность измерения (коэффициент точности измерений);

$\sigma_{мет}$ — среднеквадратическое отклонение погрешности измерения $\sigma_{мет} = \Delta lim / 2$;

T — допуск на контролируемый размер.

Объект, средства и методы исследований. В качестве объекта исследований были выбраны гильзы цилиндров дизелей ММЗ. В технических требованиях на текущий и капитальный ремонт при контроле диаметров гильз цилиндров рекомендовано применять нутромер индикаторный с ценой деления отсчетного устройства 0,01 мм. При настройке по установочным кольцам погрешность такого прибора Δlim равна ±10 мкм, а по концевым мерам — $\Delta lim = \pm 15$ мкм. Применение данного прибора неприемлемо, так как при таких значениях погрешностей количество неправильно принятых деталей и неправильно вышедших из группы или забракованных возрастет минимум в два раза. Следовательно, не выдерживается главный метрологический принцип, что средство измерений должно быть в три и более раз точнее, чем допуск измеряемого параметра.

Для нашего случая групповой допуск $T_{гр}$ равен 20 мкм, и контролировать его можно только средствами измерений, имеющими погрешность $\Delta lim \le 6{,}5$ мкм.

Для анализа формирования рассеяния диаметров гильз в процессе контроля с целью обеспечения групповой взаимозаменяемости гильз с поршнями были выбраны следующие средства измерений:

– нутромер индикаторный с ценой деления отсчетного устройства 0,001 мм при настройке по концевым мерам 1 класса $\Delta lim_1 = \pm 6{,}5$ мкм (обозначим — НИ1);

– нутромер индикаторный с ценой деления отсчетного устройства 0,001 мм при настройке по установочным кольцам $\Delta lim_2 = \pm 4$ мкм (обозначим — НИ2).

Диаметры гильз цилиндров контролировались в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и в двух сечениях — в верхнем и нижнем. Определялся средний размер, который можно принять как действительный диаметр.

Определение количества неправильно забракованных деталей от количества годных, количества неправильно принятых деталей от количества принятых, предельной величины выхода размера за границу поля допуска производились по методике, описанной в [13].

Репозиторий БарГУ

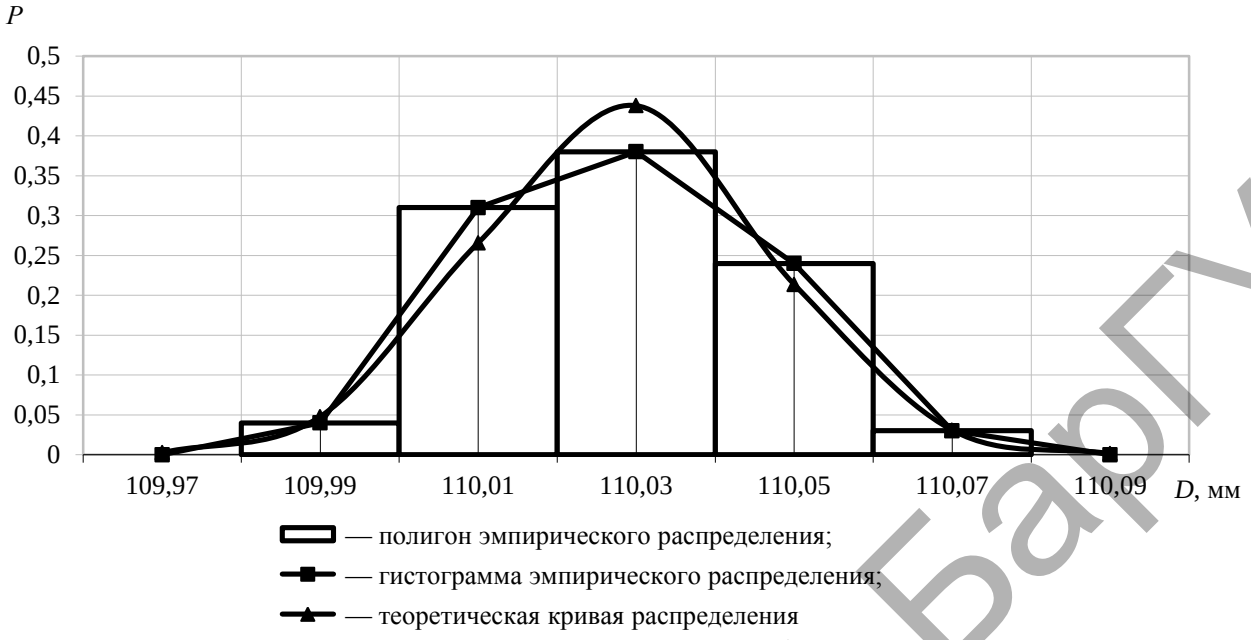


Рисунок 2. — Рассеяние диаметров отверстий гильз цилиндров двигателя ЯМЗ

Результаты и обсуждение. Для оценки рассеяния был произведен контроль партии гильз цилиндров в количестве 50 штук. Результаты контроля отражены в виде гистограммы, полигона и теоретической кривой распределения (рисунок 2).

Начальный анализ качества гильз цилиндров проведем с помощью коэффициента точности и настроенности технологического процесса [14].

Коэффициент точности обработки определяется по формуле

$$K_T = \frac{T}{6 \cdot S},$$

где S — среднеквадратическое отклонение рассеяния размеров.

При K_T = 0,7…0,9 процесс имеет низкую точность и не удовлетворяет требованиям.

Коэффициент настроенности процесса определяется по формуле

$$K_C = \frac{D_{\text{ср}} - \overline{X}}{2 \cdot T},$$

где $D_{\text{ср}}$ — средний размер;

$\overline{X}$ — среднее арифметическое значение по выборке.

При $|K_{\text{с}}| \le 0{,}05$ процесс по настроенности считается хорошим.

Данные по анализу рассеяния сведены в таблицу 1, откуда видно, что технологический процесс обработки гильзы можно считать неудовлетворительным, так как коэффициент точности $K_{\text{Т}}$ = 0,76 и имеет место как исправимый брак в виде 4%, и неисправимый брак в виде 2%. Зона рассеяния размеров имеет смещение в сторону исправимого брака $K_{\text{с}}$ = –0,027, что свидетельствует о приемлемой квалификации рабочих, которые выполняют данную операцию.

Репозиторий БарГУ

Т а б л и ц а 1. — Распределение гильз цилиндров по группам селекции

Группа селекции	Размер, мм	Количество деталей	Теоретическая вероятность
Исправимый брак	Менее 110,00	2	0,046
Группа М	$110^{+0,02}$	16	0,278
Группа С	$110^{+0,04}_{+0,02}$	19	0,445
Группа Б	$110^{+0,06}_{+0,04}$	12	0,201
Неисправимый брак	Более 110,06	1	0,027

Определяем количество неправильно забракованных деталей (n, %) от количества годных, количество неправильно принятых деталей (m, %) от количества принятых и предельные величины выхода размера за границу поля допуска (c, мкм) по методике [14] (таблица 2).

Т а б л и ц а 2. — Параметры разбраковки гильз цилиндров при использовании нутромера индикаторного с различной погрешностью измерений

Расстояние от середины поля допуска до границы соответствующей группы 2t, мм	Количество неправильно забракованных деталей, n, %		Количество неправильно принятых деталей, m, %		Величина выхода измеряемого параметра за границу допуска, c, мкм	
	НИ1	НИ2	НИ1	НИ2	НИ1	НИ2
0,0152	7,6	5,2	7,7	4,9	2,28	1,75
0,0248	4,7	2,8	4,1	2,9	2,85	1,49
0,0552	1,9	1,2	1,3	0,4	2,07	1,93
0,0648	0,4	0,4	0,2	0,2	1,56	1,36
Сумма	14,6	9,6	13,2	8,4	—	—

Таким образом, при использовании более грубого нутромера с погрешностью $\Delta lim_1 = \pm 6{,}5$ мкм количество неправильно вышедших из группы или забракованных деталей на 5% больше, количество неправильно принятых деталей на 4,8% больше, чем при использовании более точного нутромера с погрешностью $\Delta lim_2 = \pm 4$ мкм.

Заключение. При выборе средства измерений для контроля качества обработки гильз цилиндров в условиях единичного, мелкосерийного и ремонтного производства из предлагаемой номенклатуры универсальных средств измерений линейных размеров следует использовать самое точное. В рассматриваемом примере это нутромер индикаторный (НИ) с ценой деления отсчетного устройства 0,001 мм при настройке по установочным кольцам, при этом погрешность измерений будет наименьшая: $\Delta lim_2 = \pm 4$ мкм. Если будет возможность заменить это средство измерений на более точное из разряда универсальных, то это необходимо сделать. Уменьшение погрешности средств измерений приводит к значительному снижению количества неправильно принятых в группу и неправильно вышедших из группы или забракованных деталей, что, в свою очередь, отражается не только на качестве последующей сборки соединения, но и на экономике предприятия.

Репозиторий БарГУ

Список цитируемых источников

1. Качество сельскохозяйственной техники и контроль при ее производстве и ремонте / О. А. Леонов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. — 2016. — № 3. — С. 30—32.

2. *Ерохин, М. Н.* Особенности обеспечения качества ремонта сельскохозяйственной техники на современном этапе / М. Н. Ерохин, О. А. Леонов // Вестн. ФГОУ ВПО МГАУ. — 2005. — № 1. — С. 9—12.

3. Составляющие качества ремонта / Г. И. Бондарева [и др.] // Сельский механизатор. — 2016. — № 7. — С. 2—4.

4. Изменения в стандарте единой системы допусков и посадок / Г. И. Бондарева [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. — 2016. — № 12. — С. 39—42.

5. *Леонов, О. А.* Технико-экономический анализ состояния технологического оборудования на предприятиях технического сервиса в агропромышленном комплексе / О. А. Леонов, Н. И. Селезнева // Вестн. ФГОУ ВПО МГАУ. — 2012. — № 5. — С. 64—67.

6. Эффективность внедрения системы качества на предприятиях технического сервиса АПК / Г. И. Бондарева [и др.] // Сельский механизатор. — 2016. — № 4. — С. 34—35.

7. *Леонов, О. А.* Расчет затрат на контроль технологических процессов ремонтного производства / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба // Вестн. ФГОУ ВПО МГАУ. — 2004. — № 5. — С. 75—77.

8. *Леонов, О. А.* Исследование затрат и потерь при контроле шеек коленчатого вала в условиях ремонтного производства / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба // Вестн. ФГОУ ВПО МГАУ. — 2013. — № 2. — С. 71—74.

9. *Шкаруба, Н. Ж.* Технико-экономические критерии выбора универсальных средств измерений при ремонте сельскохозяйственной техники : монография / Н. Ж. Шкаруба. — М. : ФГОУ ВПО МГАУ, 2009. — 118 с.

10. *Шкаруба, Н. Ж.* Разработка комплексной методики выбора средств измерений линейных размеров при ремонте сельскохозяйственной техники : дис. … канд. техн. наук / Н. Ж. Шкаруба. — М., 2006.

11. *Леонов, О. А.* Алгоритм выбора средств измерений для контроля качества по технико-экономическим критериям / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба // Вестн. ФГОУ ВПО МГАУ. — 2012. — № 2. — С. 89—91.

12. Метрология, стандартизация и сертификация / О. А. Леонов [и др.]. — М. : КолосС, 2009. — 568 с.

13. *Леонов, О. А.* Курсовое проектирование по метрологии, стандартизации и сертификации / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Г. Н. Темасова. — М. : МГАУ, 2011. — 120 с.

14. *Леонов, О. А.* Статистические методы контроля и управления качеством / О. А. Леонов, Г. Н. Темасова. — М., 2014. — 140 с.

Поступила в печать 18.05.2018

Репозиторий БарГУ

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Научная концепция журнала предполагает публикацию современных достижений в области технических наук; представление результатов фундаментальных и прикладных исследований, а также результатов, полученных в производственных условиях областей, включая результаты национальных и международных исследований. Статьи аспирантов, докторантов и соискателей последнего года обучения публикуются вне очереди при условии их полного соответствия требованиям, предъявляемым к научным публикациям.

Публикация статей в журнале бесплатная на основании заключённого договора о передаче исключительных прав на объект авторского права (URL: http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php).

Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках посредством заполненной формы по Интернету (URL: http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php).

Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ по URL: http://www.barsu.by /publishing/vestnik.php .

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The scientific strategy of the journal suggests publishing modern achievements in the fields of Engineering sciences; presentation of the results of fundamental and applied research, as well as the results obtained under production conditions, both at the domestic and international level. Articles by postgraduate and doctoral students in their final year of traineeship are published out of turn if they are written in strict conformity with the specified requirements.

Publication of articles is free of charge in accordance with the existing contract on transfer of authority to the subject matter of copyright (URL: http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php).

Articles can be written in the Russian, Belarusian or English languages and should be sent by the Internet (see the form to fill in: URL: http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php).

More detailed instructions for authors can be found on the official website of BarSU: http://www.barsu.by/publishing /vestnik.php .

Репозиторий БарГУ