

Учреждение образования
«Барановичский государственный университет»

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 7, июнь, 2019.

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор серии

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

Ответственный секретарь серии

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

Редактор текстов на английском языке

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by .

Подписные индексы: 00993 — для индивидуальных подписчиков; 009932 — для организаций.

Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включѳн в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам

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

Издатель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой С. А. Березнюк

Технический редактор Е. И. Березич

Компьютерная вѳрстка С. А. Березнюк

Корректор С. А. Березнюк

Подписано в печать 14.06.2019. Формат 60 × 84¹/₈. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,75.

Уч.-изд. л. 8,10. Тираж 75 экз. Заказ

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014.

Адрес: ул. Хлюпина, 16, 231800 Слоним, Гродненская обл.

© БарГУ, 2019

Установа адукацыі
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

Веснік БарДУ

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 7, чэрвень, 2019.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

Заснавальнік: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ

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

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

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ СЕРЫІ

Галоўны рэдактар серыі

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

Адказны сакратар серыі

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

Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрас рэдакцыі:

вул. Войкава, 21, 225404 г. Баранавічы.

Тэлефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by.

Папiсныя iндэксy: 00993 — для iндывiдуальных падпiсчыкаў; 009932 — для арганiзацый.

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

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

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

Выдавец: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

Выходзіць на рускай, беларускай і англійскай мовах.

Часопіс распаўсюджваецца на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

Загадчык рэдакцыйна-выдавецкай групы С. А. Беразнюк

Тэхнічны рэдактар А. І. Бярэзіч

Камп'ютарная вёрстка С. А. Беразнюк

Карэктар С. А. Беразнюк

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

Кошт свабодны.

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

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

© БарДУ, 2019

Educational institution
“Baranovichi State University”

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013.

Volume 7, June, 2019.

Engineering Series

Promoter: educational institution “Baranovichi State University”.

EDITORIAL BOARD

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

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

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Editor of the issue

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

Executive secretary of the issue

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

English Text Editor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial address:

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

E-mail: vestnik@barsu.by.

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

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

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

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

Published: educational institution “Baranovichi State University”.

Issued in Russian, Belarusian and English.

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

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

Signed print 14.06.2019. Format 60 x 84 ¹/₈. Paper xerox. Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 12.75. Acc.-pub. s. l. 8.10. Circulation of 75 copies. Order

Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary Enterprise “Slonim printing establishment”. The state registration certificate of the publisher, manufacturer and publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2 of 25.02.2014.

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

© BarSU, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

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

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

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

ЗМЕСТ

МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

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

ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

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

CONTENTS

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

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

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

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

УДК 621.9

А. Н. Жигалов

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ИЗНОСА И РЕСУРСНОЙ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА, УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

Приведены математическая модель и методика параметрической оптимизации ресурсной стойкости режущего инструмента, позволяющие оперативно, с минимальными затратами по проведению экспериментальной и расчетной частей исследований получить результат. Могут быть использованы при исследовании и других статистических процессов. Результаты исследований твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, с помощью разработанной математической модели и методики подтвердили эффективность такого метода упрочнения.

Ключевые слова: метод аэродинамического звукового упрочнения; математическая модель и методика параметрической оптимизации ресурсной стойкости режущего инструмента.

Табл. 3. Рис. 2. Библиогр.: 6 назв.

A. N. Jigalov

Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, + 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

MATHEMATICAL MODEL AND METHOD OF PARAMETRIC OPTIMIZATION OF RUN-OUT AND RESOURCE DURABILITY OF CUTTING HARDWARE TOOL HARDENED BY AERODYNAMIC SOUND METHOD

The mathematical model and the method of parametric optimization of the cutting tool's resource durability are presented. They allow to obtain the result quickly with minimal expenses on the experimental and computational parts of research. They can be used to study other statistical processes. The results of research of hardware tool that is hardened by the aerodynamic sound method using the suggested mathematical model and method confirmed the effectiveness of such a method of hardening.

Key words: method of aerodynamic sound hardening; mathematical model and method of parametric optimization of resource durability of the cutting tool.

Tab. 3. Fig. 2. Ref.: 6 titles.

Введение. Созданный метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) [1] твердосплавного инструмента, предназначенного для работы в условиях прерывистого резания со значительными ударными нагрузками, способен с небольшой добавленной стоимостью существенно улучшать стойкостные характеристики твердосплавного инструмента (до 3,7 раза), за счет повышения ударной вязкости до 90 КДж / м² и предела прочности при изгибе до 2 230 Н / мм² при сохранении высокой твердости до 92 HRA и плотности до 15 · 10³ кг / см³ [2]. Метод АДУ является новым и практически не изученным. Для ускорения реализации нового наукоемкого процесса необходимо с максимальной быстротой произвести его всестороннее изучение, оперативно выявить влияние технологических и физических параметров процесса на качество обработки и на структурные свойства инструмента, с помощью которого реализуется такой процесс. Описать взаимосвязи большого

количества факторов, влияющих на такие явления, на стадии создания является сложной задачей из-за неизученности процесса, отсутствия теоретической информации о нем. Это является главным сдерживающим фактором внедрения новых технологий в производство [3].

В данной работе предложена математическая модель и методика параметрической оптимизации ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, основанные на учете экспериментальных значений результатов износа и математически описываемых комбинированных связей исследуемых параметров, что позволяет осуществлять прогнозирование оптимальных технологических параметров, обеспечивающих достижение максимальной ресурсной стойкости режущего инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом, на стадии подготовки производства.

Основная часть. Аппроксимация частных зависимостей износа инструмента от режимов резания может быть выполнена на основе различных методов математической обработки и выражена различными по виду и структуре математическими уравнениями [4]. Количественной оценкой износа режущего лезвия от времени может служить линейная или массовая мера износа. Кривые линейного износа режущего лезвия по задней поверхности h_3 от времени резания τ возможно аппроксимировать степенными функциями вида [5; 6]

$$h_3 = a \cdot \tau^{n_0}, \quad (1)$$

где a — постоянная величина, характеризующая интенсивность износа от времени (показатель абсолютной величины износа);

n_0 — постоянная величина, представляющая собой в логарифмических координатах тангенс угла наклона кривой, описывающей зависимость износа от времени, — показатель интенсивности величины износа.

Показатели a и n_0 связывают между собой величину износа h_3 от времени τ . После логарифмирования уравнения (1), имеем

$$\lg h_3 = \lg a + n_0 \lg \tau. \quad (2)$$

В зависимости (2) показатель относительной стойкости n_0 равен тангенсу угла α наклона прямой линии полученной из кривой износа, построенной в логарифмической системе

$$n_0 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_{3_i} - h_{3_1}}{\tau_i - \tau_1}. \quad (3)$$

где h_{3_i} и h_{3_1} — значения износа в логарифмической системе координат в i -й и первой точках соответственно;

τ_i и τ_1 — значения времени в логарифмической системе координат в i -й и первой точках соответственно.

Коэффициент a из (1) определяется как

$$a = \frac{h_{3_i}}{2\tau_i^{n_0}} + \frac{h_{3_1}}{2\tau_1^{n_0}}. \quad (4)$$

Показатели a и n_0 в формулах (3—4) в зависимости от режимов обработки представим в виде квадратичных функций. На кривую износа от времени наиболее хорошо ложится линия тренда, описываемая полиномом 2-й степени. Исходя из чего, для уровней варьирования скоростей резания (нижний — v_1 , основной — v_2 (центр плана) и верхний — v_3 при интервале варьирования: $v_1—v_3$) из диапазона скоростей, принятых в исследованиях, система уравнений, описывающих показатели износа по задней поверхности $a_{v_1}, a_{v_2}, a_{v_3}$, при v_1, v_2 и v_3 соответственно, от скоростей, будет равна

$$a_{v_1} = a_{a_v} v_1^2 + b_{a_v} v_1 + c_{a_v}; \quad (5)$$

$$a_{v_2} = a_{a_v} v_2^2 + b_{a_v} v_2 + c_{a_v}; \quad (6)$$

$$a_{v_3} = a_{a_v} v_3^2 + b_{a_v} v_3 + c_{a_v}, \quad (7)$$

где a_{a_v} — коэффициент, описывающий влияние v^2 ;

b_{a_v} — коэффициент, описывающий влияние v ;

c_{a_v} — коэффициент, описывающий взаимное влияние факторов v^2 и v .

Для скоростей резания v_1, v_2, v_3 и принятого диапазона вариации скоростей система уравнений, описывающих показатель n_v от скоростей, будет равна

$$n_{v_1} = a_{n_v} v_1^2 + b_{n_v} v_1 + c_{n_v}; \quad (8)$$

$$n_{v_2} = a_{n_v} v_2^2 + b_{n_v} v_2 + c_{n_v}; \quad (9)$$

$$n_{v_3} = a_{n_v} v_3^2 + b_{n_v} v_3 + c_{n_v}, \quad (10)$$

где $n_{v_1}, n_{v_2}, n_{v_3}$ — показатель n_v при v_1, v_2 и v_3 соответственно;

a_{n_v} — коэффициент, описывающий влияние v^2 ;

b_{n_v} — коэффициент, описывающий влияние v ;

c_{n_v} — коэффициент, описывающий взаимное влияние факторов v^2 и v .

Из уравнения (5) находим коэффициент c_{a_v}

$$c_{a_v} = a_{v_1} - a_{a_v} v_1^2 - b_{a_v} v_1. \quad (11)$$

Из уравнений (6) и (11) находим коэффициент b_{a_v}

$$b_{a_v} = \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_{a_v} (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1}. \quad (12)$$

Из уравнений (7), (11) и (12) находим коэффициент a_{a_v}

$$a_{a_v} = \frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)}. \quad (13)$$

Тогда с учетом уравнений (11—13) показатель a_v равен

$$a_v = \frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 + \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v + c_{a_v}. \quad (14)$$

Из уравнения (8) находим коэффициент c_{n_v}

$$c_{n_v} = n_{v_1} - a_{n_v} v_1^2 - b_{n_v} v_1. \quad (15)$$

Из уравнений (9) и (15) находим коэффициент b_{n_v}

$$b_{n_v} = \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - a_{n_v}(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1}. \quad (16)$$

Из уравнений (10), (15) и (16) находим коэффициент a_{n_v}

$$a_{n_v} = \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)}. \quad (17)$$

Тогда с учетом уравнений (15—17) показатель износа n_v равен

$$n_v = \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 + \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - n_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v + c_{n_v}.$$

Аналогично тому, как определяли показатели a_v и n_v при вариации скоростей, определяем показатели a_s , n_s и их коэффициенты при вариации подачи

$$c_{a_s} = a_{s_1} - a_{a_s} s_1^2 - b_{a_s} s_1; \quad b_{a_s} = \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_{a_s}(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1};$$

$$a_{a_s} = \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)};$$

$$a_s = \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 + \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s + c_{a_s}; \quad (18)$$

$$c_{n_s} = n_{s_1} - a_{n_s} s_1^2 - b_{n_s} s_1; \quad b_{n_s} = \frac{(n_{s_2} - n_{s_1}) - a_{n_s}(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1};$$

$$a_{n_s} = \frac{(n_{s_3} - n_{s_1})(s_2 - s_1) - (n_{s_2} - n_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)};$$

$$n_s = \frac{(n_{s_3} - n_{s_1})(s_2 - s_1) - (n_{s_2} - n_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 + \frac{(n_{s_2} - n_{s_1}) - n_s (s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s + c_{n_s}.$$

Показатели a_t , n_t и их коэффициенты при вариации глубины резания

$$c_{a_t} = a_{t_1} - a_{a_t} t_1^2 - b_{a_t} t_1; b_{a_t} = \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_{a_t} (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1};$$

$$a_{a_t} = \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)};$$

$$a_t = \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 + \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t + c_{a_t}; \quad (19)$$

$$c_{n_t} = n_{t_1} - a_{n_t} t_1^2 - b_{n_t} t_1; b_{n_t} = \frac{(n_{t_2} - n_{t_1}) - a_{n_t} (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1};$$

$$a_{n_t} = \frac{(n_{t_3} - n_{t_1})(t_2 - t_1) - (n_{t_2} - n_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)};$$

$$n_t = \frac{(n_{t_3} - n_{t_1})(t_2 - t_1) - (n_{t_2} - n_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 + \frac{(n_{t_2} - n_{t_1}) - n_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t + c_{n_t}.$$

Суммируя a_v , a_s , a_t , определяем величину износа a_c от v , s , t

$$a_c = a_v + a_s + a_t + c_1, \quad (20)$$

где c_1 — коэффициент, описывающий взаимное влияние факторов v^2 , v , s^2 , s , t^2 , t .

Показатель износа a_c , зависящий от трех факторов v , s , t , также можно описать квадратичной функцией от этих факторов.

С учетом найденных значений a_v , a_s , a_t , согласно (20), (14), (18), (19) и пренебрегая коэффициентами c_{a_v} , c_{a_s} , c_{a_t} в связи с тем, что их влияние нивелируется коэффициентом c_1 , величина износа a_c при нулевом уровне будет равна

$$\begin{aligned}
a_c = & \frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 + \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v + \\
& + \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 + \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s + \\
& + \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 + \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t + c_1.
\end{aligned} \quad (21)$$

Коэффициент c_1 найдем из условия (21) для центра плана

$$\begin{aligned}
c_1 = & a_{c_2} - \frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 - \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2 - \\
& - \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s_2^2 - \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 - \\
& - \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t_2^2 - \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2.
\end{aligned} \quad (22)$$

Аналогично (21) и (22) для трехфакторных расчетов определяем n_c и c_2 .

$$\begin{aligned}
n_c = & \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 + \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - n_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v + \\
& + \frac{(n_{s_3} - n_{s_1})(s_2 - s_1) - (n_{s_2} - n_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 + \frac{(n_{s_2} - n_{s_1}) - n_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s + \\
& + \frac{(n_{t_3} - n_{t_1})(t_2 - t_1) - (n_{t_2} - n_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 + \frac{(n_{t_2} - n_{t_1}) - n_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t + c_2;
\end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
c_2 = & n_{c_2} - \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 - \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - n_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2 - \\
& - \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s_2^2 - \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 - \\
& - \frac{(n_{t_3} - n_{t_1})(t_2 - t_1) - (n_{t_2} - n_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t_2^2 - \frac{(n_{t_2} - n_{t_1}) - n_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2.
\end{aligned} \quad (24)$$

Определим стойкость T как функцию $T = f(v, s, t)$ при h_3 , равном величине допустимого износа $h_{3\text{доп}} = a\tau^n$. Тогда стойкость, величина равная времени от начала резания до отказа, т. е. при $\tau = T$, будет равна

$$T = \left(\frac{h_{3\text{доп}}}{a_c} \right)^{\frac{1}{n_c}}. \quad (25)$$

С учетом (21—25) определяем значения стойкости от скорости T_v , подачи T_s и глубины резания T_t при принятых при моделировании уровнях варьирования: скоростей резания — v_1, v_2, v_3 ; подач — s_1, s_2, s_3 ; глубин резания — t_1, t_2, t_3 .

Значение $h_{3\text{доп}}$ принимаем равным 0,6 мм — это рекомендованный допустимый износ для твердых сплавов при обработке сталей, т. е. $h_{3\text{доп}} = 0,6$ мм. Для обработки чугунов $h_{3\text{доп}} = 0,8$ мм. Для твердых сплавов, упроченных методом АДУ, допустимая износостойкость увеличивается на 40...50 %. В связи с чем T_{v_1} равна

$$T_{v_1} = \left(\frac{0,6}{a_{c_{v_1}}} \right)^{\frac{1}{n_{c_{v_1}}}}. \quad (26)$$

В (26) значения $a_{c_{v_1}}$ и $n_{c_{v_1}}$ определяются, соответственно, по формулам (21) и (23) при скорости резания, соответствующей нижнему уровню варьирования скоростей, т. е. при v_1 , подачи и глубины резания, соответствующих основным уровням варьирования, т. е. при s_2 и t_2 . Тогда для (26) имеем

$$T_{v_1} = \left(0,6 / \left(\begin{aligned} & \left(\frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 + \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_1 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s_2^2 + \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s (s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_1 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t_2^2 + \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_1 + c_{1_{v_1}} \right) \right)^{\frac{1}{n_{c_{v_1}}}} \quad (27) \end{aligned} \right)$$

где $n_{c_{v_1}}$, c_1 и $c_{1_{v_1}}$ равны

$$\begin{aligned} n_{c_{v_1}} &= \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_1^2 + \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - n_v (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_1 + \\ &+ n_{c_2} - \frac{(n_{v_3} - n_{v_1})(v_2 - v_1) - (n_{v_2} - n_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 - \frac{(n_{v_2} - n_{v_1}) - n_v (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2. \end{aligned}$$

$$c_1 = a_{c_2} - \frac{(a_{v_3} - a_{v_1})(v_2 - v_1) - (a_{v_2} - a_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 - \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2 -$$

$$- \frac{(a_{s_3} - a_{s_1})(s_2 - s_1) - (a_{s_2} - a_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s_2^2 - \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s (s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 -$$

$$- \frac{(a_{t_3} - a_{t_1})(t_2 - t_1) - (a_{t_2} - a_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t_2^2 - \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2.$$

$$c_{1v_1} = a_{c_2} - \frac{(a_{v_3} - a_{v_1}) - \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} (v_3 - v_1)}{v_3^2 - v_1^2} v_1^2 - \frac{(a_{v_2} - a_{v_1}) - a_v (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_1 -$$

$$- \frac{(a_{s_3} - a_{s_1}) - \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s (s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} (s_3 - s_1)}{s_3^2 - s_1^2} s_2^2 - \frac{(a_{s_2} - a_{s_1}) - a_s (s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 -$$

$$- \frac{(a_{t_3} - a_{t_1}) - \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} (t_3 - t_1)}{t_3^2 - t_1^2} t_2^2 - \frac{(a_{t_2} - a_{t_1}) - a_t (t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2.$$

Аналогично, как определяли T_{v_1} , определяем T_{v_2} и T_{v_3} . Из-за громоздкости расчетов результаты T_{v_2} и T_{v_3} не приводим. Принимаем, что стойкость связана с режимами обработки квадратичной функцией. Тогда, для уровней варьирования скоростей резания (нижний — v_1 , основной — v_2 (центр плана) и верхний — v_3) система уравнений, описывающих влияние стойкости T_v от скоростей резания, будет равна

$$T_{v_1} = a_{T_v} v_1^2 + b_{T_v} v_1 + c_{T_v}; \quad (28)$$

$$T_{v_2} = a_{T_v} v_2^2 + b_{T_v} v_2 + c_{T_v}; \quad (29)$$

$$T_{v_3} = a_{T_v} v_3^2 + b_{T_v} v_3 + c_{T_v}, \quad (30)$$

где $T_{v_1}, T_{v_2}, T_{v_3}$ — стойкость соответственно при v_1, v_2 и v_3 .

Из уравнения (28) находим коэффициент c_{T_v}

$$c_{T_v} = T_{v_1} - a_{T_v} v_1^2 - b_{T_v} v_1. \quad (31)$$

Из уравнений (29) и (31) находим коэффициент b_{T_v}

$$b_{T_v} = \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - a_{T_v} (v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1}. \quad (32)$$

Из уравнений (30), (31) и (32) находим коэффициент a_{c_v}

$$a_{c_v} = \frac{(T_{v_2} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_3} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)}. \quad (33)$$

Тогда с учетом (31), (32), (33) стойкость T_v равна

$$T_v = \frac{(T_{v_3} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_2} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 + \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - a_{T_v}(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v + c_{T_v}. \quad (34)$$

Аналогично определяем T_s и T_t

$$T_s = \frac{(T_{s_3} - T_{s_1})(s_2 - s_1) - (T_{s_2} - T_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 + \frac{(T_{s_2} - T_{s_1}) - a_{T_s}(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s + c_{T_s}. \quad (35)$$

$$T_t = \frac{(T_{t_3} - T_{t_1})(t_2 - t_1) - (T_{t_2} - T_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 + \frac{(T_{t_2} - T_{t_1}) - a_{T_t}(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t + c_{T_t}. \quad (36)$$

Суммируя T_v, T_s, T_t , определяем величину износа T от v, s, t

$$T_c = T_v + T_s + T_t + c_T, \quad (37)$$

где c_T — коэффициент, описывающий взаимное влияние факторов v^2, v, s^2, s, t^2, t .

Из (21) для центра плана определим коэффициент c_T как

$$c_T = T_v \frac{(T_{v_3} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_2} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v^2 - \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - T_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2 - \\ - \frac{(T_{s_3} - T_{s_1})(s_2 - s_1) - (T_{s_2} - T_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s^2 - \frac{(T_{s_2} - T_{s_1}) - T_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 - \\ - \frac{(T_{t_3} - T_{t_1})(t_2 - t_1) - (T_{t_2} - T_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t^2 - \frac{(T_{t_2} - T_{t_1}) - T_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2. \quad (38)$$

Следует отметить, что при фрезерно-карусельном резании, когда подача s_z носит переменный характер, наиболее эффективным параметром, характеризующим состояние инструмента, является его ресурсная стойкость, т. е. способность инструмента произвести определенное количество годной продукции. При этом ресурсную стойкость T_p можно определить через стойкость T в виде [4]

$$T_p = 10^{-3} T_{v_s}. \quad (39)$$

Тогда с учетом (34—39) зависимость, описывающая ресурсную стойкость режущего инструмента T_p от параметров обработки v, s, t , равна

$$T_p = 10^{-3} v s \left[\frac{(T_{v_3} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_2} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} (v^2 + v_2^2) + \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - a_{T_v}(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} (v + v_2) + \right. \\ \left. + \frac{(T_{s_3} - T_{s_1})(s_2 - s_1) - (T_{s_2} - T_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} (s^2 + s_2^2) + \frac{(T_{s_2} - T_{s_1}) - a_{T_s}(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} (s + s_2) + \right. \\ \left. + \frac{(T_{t_3} - T_{t_1})(t_2 - t_1) - (T_{t_2} - T_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} (t^2 + t_2^2) + \frac{(T_{t_2} - T_{t_1}) - a_{T_t}(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} (t + t_2) - T_{v_2} \right] \quad (40)$$

Исходя из большого количества входящих в зависимости (39) и (40) факторов и сопутствующих коэффициентов, производить расчеты ресурсной стойкости T_p и износа по задней поверхности h_3 аналитическим образом довольно трудоемко и непроизводительно. Для автоматизации и ускорения расчетов на базе приведенных выше математических выкладок для определения износа h_3 и ресурсной стойкости T_p режущего инструмента при фрезеровании разработана блок-схема алгоритма, для которого создана компьютерная программа определения зависимостей износа и стойкости от параметров обработки для процесса резания.

На основе разработанной математической модели создана методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, с помощью которых проведены исследования по определению зависимостей износа и ресурсной стойкости для твердого сплава MC111, неупрочненного и упрочненного методом АДУ, от комплексного влияния режимом резания. Сплавами MC111 обрабатывали заготовки из стали 45 на определенных режимах (таблица 1). Замеры износа по задней поверхности h_3 осуществляли на инструментальном стереоскопическом микроскопе Stemi 2000-C фирмы Carl Zeiss с точностью измерений до 0,001 мм. В таблице 1 приведены результаты для сплава MC111, упрочненного методом АДУ, расчетов всех составляющих, входящих в математическую модель, с указанием алгоритмических действий в соответствии с методикой параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента.

Т а б л и ц а 1. — Методика расчета ресурсной стойкости твердосплавных пластин MC111 упрочненных методом АДУ от режимов обработки (скорости резания v , подачи на зуб s_z , глубины резания t) при обработке стали 45

Экспериментальные результаты				Теоретические результаты							
Представление зависимости износа h_3 от времени обработки t в виде степенной функции $h_3 = at^n$ и определение коэффициентов a, n											
Определение коэффициентов a и n от режимов резания v, s, t в виде степенной функции $h_3 = at^n$ и определение коэффициентов a, n											
Представление зависимости износа и интенсивности износа от скорости резания (м / мин) в виде квадратичных функций $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$ и $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$, определение коэффициентов $a_{av}, b_{av}, c_{av}, a_{nv}, b_{nv}, c_{nv}$											
Определение коэффициентов при вариации заданных параметров											
№	Параметры обработки		Износ h_3 , мм			Расчетные коэффициенты					
	Постоянные	Изменяющиеся									
Определение коэффициентов при вариации скорости резания v , м / мин											
	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
2	0,13	1,0	124,6			0,118			-0,00002567	0,00850895	-0,54365016

Продолжение таблицы 1

	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v	
1	0,13	1,0		158,3			0,160		-0,00002567	0,00850895	-0,54365016	
7	0,13	1,0			197,8			0,135	-0,00002567	0,00850895	-0,54365016	
Результат		$a_v = -0,00002567v^2 + 0,00850895v - 0,54365016$										
Определение n_v при С												
	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v	
2	0,13	1,0	124,6			0,295			0,0000915	-0,28368	2,409614	
1	0,13	1,0		158,3			0,211		0,0000915	-0,28368	2,409614	
7	0,13	1,0			197,8			0,377	0,0000915	-0,28368	2,409614	
Результат		$n_v = 0,0000915v^2 - 0,283685v + 2,409614$										
Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_z , мм / зуб												
	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v	
5	158,3	1,0	0,11			0,115			-16,4871795	6,206923	-0,368267	
1	158,3	1,0		0,13			0,160		-16,4871795	6,206923	-0,368267	
6	158,3	1,0			0,26			0,131	-16,4871795	6,206923	-0,368267	
Результат		$a_s = -16,4871795s^2 + 6,206923s - 0,368267$										
Определение n_v при С												
	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v	
5	158,3	1,0	0,11			0,370			58,1794872	-21,913077	2,07647	
1	158,3	1,0		0,13			0,211		58,1794872	-21,913077	2,07647	
6	158,3	1,0			0,26			0,312	58,1794872	-21,913077	2,07647	
Результат		$n_s = 58,179487s^2 - 21,913077s + 2,07647$										
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм												
	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t	
4	158,3	0,13	0,5			0,135			-0,096	0,194	0,062	
1	158,3	0,13		1,0			0,160		-0,096	0,194	0,062	
3	158,3	0,13			1,5			0,137	-0,096	0,194	0,062	
Результат		$a_t = -0,096t^2 + 0,194t + 0,062$										
Определение n_v при С												
	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t	
4	158,3	0,13	0,5			0,266			0,214	-0,431	0,428	
1	158,3	0,13		1,0			0,211		0,214	-0,431	0,428	
3	158,3	0,13			1,5			0,263	0,214	-0,431	0,428	
Результат		$n_t = 0,214t^2 - 0,431t + 0,428$										
Представление зависимости износа от многофакторных показателей — скорости резания v , подачи на зуб s_z , глубины резания t , в виде квадратичной функции $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + a_{av}s^2 + b_{av}s + a_{av}t^2 + b_{av}t + c_1$ и определение коэффициента c_1 для центра плана												
$C_1 = 0,160 - 0,00003 \cdot 158,3^2 + 0,00851 \cdot 158,3 - 16,48718 \cdot 0,13^2 + 6,20692 \cdot 0,13 - 0,096 \cdot 1,0^2 + 0,194 \cdot 1,0 = -1,17$												
$C_2 = 0,211 - 0,00009 \cdot 158,3^2 + 0,28368 \cdot 158,3 + 58,17949 \cdot 0,13^2 - 21,9131 \cdot 0,13 + 0,214 \cdot 1,0^2 - 0,431 \cdot 1,0 = -4,49$												
Представление зависимости износа от скорости резания в виде квадратичной функции $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$ и определение коэффициентов при вариации скорости v , м / мин												
Определяем зависимость стойкости от v , s , t , как $T = f(v, s, t)$ при заданном значении h_3												
Определение коэффициентов при вариации скорости резания v , м / мин												
	s	t	τ_{v1}	τ_{v2}	τ_{v3}	τ_{v1}	τ_{v2}	τ_{v3}	a_v	b_v	c_v	
2	0,13	1,0	124,6						247,818			
									τ_{v1}	-0,27619	86,37197	-6226,25577

Окончание таблицы 1

	s	t	T_{V1}	T_{V2}	T_{V3}	T_{V1}	T_{V2}	T_{V3}	a_v	b_v	
1	0,13	1,0		158,3		525,445	T_{V2}				
7	0,13	1,0			197,8	52,282	T_{V3}				
Результат		$a_v = -0,27619v^2 + 86,37197v - 6226,25577$									
Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_3 , мм / зуб											
	v	t	s_1	s_2	s_3	T_{s1}	T_{s2}	T_{s3}	a_n	b_n	c_n
5	158,3	1,0	0,11			86,909		T_{s1}	-166392,2891	61860,96854	-4704,45114
1	158,3	1,0		0,13		525,445		T_{s2}			
6	158,3	1,0			0,26	131,282		T_{s3}			
Результат		$a_s = -166392,2891s^2 + 61860,968539s - 4704,45114$									
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм											
	v	s	t_1	t_2	t_3	T_{t1}	T_{t2}	T_{t3}	a_t	b_t	c_t
4	158,3	0,13	0,5			272,524		T_{t1}	-1007,28099	2016,76452	-484,03844
1	158,3	0,13		1,0		525,445		T_{t2}			
3	158,3	0,13			1,5	274,726		T_{t3}			
Результат		$a_t = -1007,28099s^2 + 2016,76452s - 484,03844$									
При среднем опыте											
	v	s	t	t_1	t_2	t_3	$h_{з1}$	$h_{з3}$	a_t	b_t	c_t
	158,3	0,13	1,0				525,445				-12465,6355
Стойкость упрочненной АДУ пластины МС111											
$T_y = -0,277 \cdot v^2 + 86,37 \cdot v - 166392,29 \cdot s^2 + 61860,97 \cdot s - 1007,28 \cdot t^2 + 2016,76 \cdot t - 12465,64$											

Аналогично расчетам таблицы 1 определены зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурсной стойкости T_p для сплава МС111 неупрочненного (таблица 2).

Т а б л и ц а 2. — Зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурсной стойкости T_p для сплавов МС111, МС131, В35, неупрочненных и упрочненных методом АДУ

Зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурсной стойкости T_p	
сплав МС111н	
$h_{3,н} = a \cdot t^n$, где	
$a = -0,0000005v^2 - 0,00031v - 1,51282s^2 + 0,71308s + 0,00000001t^2 + 0,3t + 0,138$;	
$n = -0,000041v^2 - 0,00966v + 4,564103s^2 - 1,595385s + 0,0004t^2 + 0,044t + 1,067$;	
$T_{p,н} = 10^{-3} vs (-0,003v^2 + 0,74v - 176,2s^2 + 14,7s + 0,1t^2 - 3,6t - 16,2)$	

Анализ зависимостей (таблицы 1 и 2) показывает, что наибольшее влияние на износ h_3 и стойкости (T и T_p) оказывает подача, затем скорость резания v , наименьшее влияние оказывает глубина резания t .

Оптимальные значения параметров резания определялись путем компьютерного моделирования на базе полученных зависимостей (см. таблицы 1 и 2). Оптимизация путем дифференцирования этих зависимостей по одному из исследуемых параметров в данных исследованиях неприемлема в связи с достаточно высокой степенью взаимного влияния исследуемых параметров. На рисунке 1 приведена графическая интерпретация зависимостей ресурсной стойкости (из таблицы 1 и 2) для твердосплавных пластин РНУА-110408 ГОСТ 19064-80 сплава МС111, неупрочненных и упрочненных АДУ, при обработке стали 45.

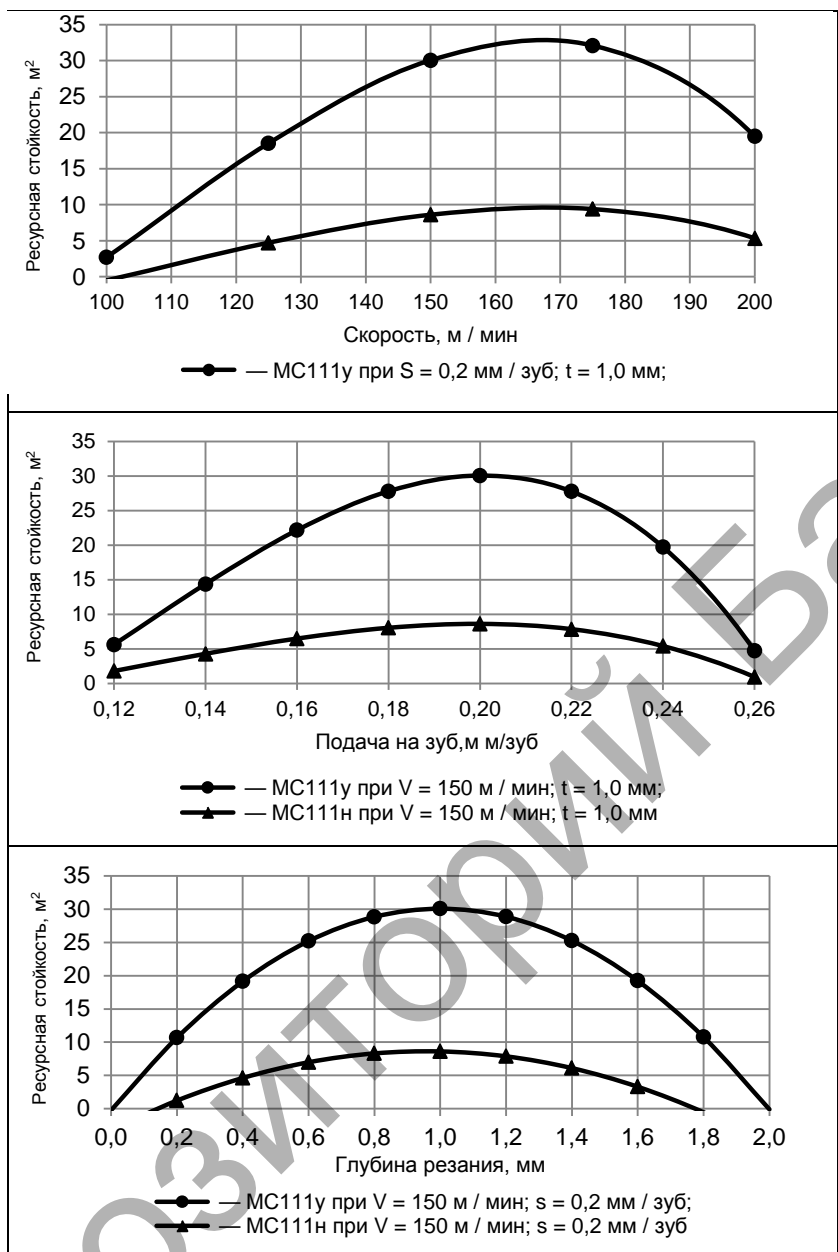


Рисунок 1 — Зависимости ресурсной стойкости для пластин PNUA-110408 сплава MC111 при фрезеровании стали 45

После компьютерного моделирования зависимостей ресурсной стойкости найдены оптимальные значения подачи s , скорости v и глубины резания t , при которых обеспечивается максимальная ресурсная стойкость (таблица 3).

Т а б л и ц а 3. — Оптимальные значения параметров процесса фрезерования стали 45 пластинами MC111, неупрочненными и упрочненными методом АДУ, для достижения максимальной ресурсной стойкости T_p .

Параметры	Неупрочненного	Упрочненного АДУ	Рост, %
$V_{\text{опт}}$, м / мин	155	160	+ 3,2 %
$s_{\text{опт}}$, мм / зуб	0,18	0,19	+ 5,6 %
$t_{\text{опт}}$, мм	1,0	1,0	0
T_p , м ²	8,47	31,61	+ 273 %

На рисунке 2 приведены графические интерпретации полученных зависимостей ресурсной стойкости T_p для твердосплавных пластин PNUA-110408, неупрочненных и упрочненных АДУ, при обработке стали 45 от двух технологических параметров при постоянном значении третьего.

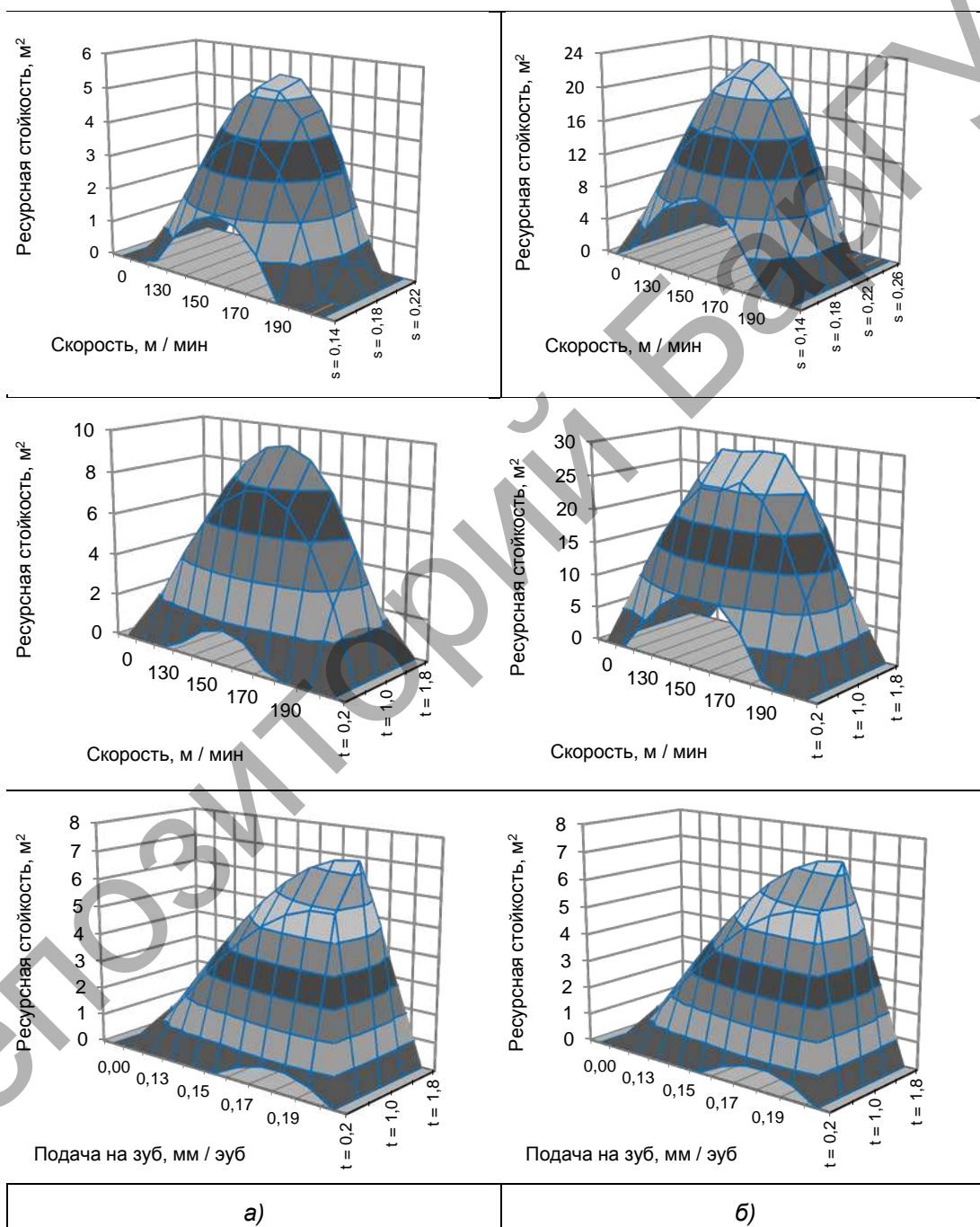


Рисунок 2. — Зависимости ресурсной стойкости при фрезеровании стали 45 пластинами PNUA-110408 сплава MC111, неупрочненными (а) и упрочненными АДУ (б), от комплексного влияния параметров обработки v , s , t

Заключение. Разработанная математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента для функционально-ориентированного технологического процесса резания, в основу которой заложены новые подходы в математическом моделировании статистических процессов, позволяют оперативно с минимальными затратами по проведению экспериментальной и расчетной частей исследований получить результаты, которые также могут быть использованы при исследовании и других статистических процессов. Применение указанной математической модели и методики параметрической оптимизации показало, что при обработке твердым сплавом MC111, упрочненным АДУ, наблюдается повышение ресурсной стойкости в 2,7 раза и производительности обработки на 5,6 % по сравнению с обработкой неупрочненным сплавом.

Список цитируемых источников

1. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков. — № а 20131132; заявл. 30.09.2013 ; опубл. 30.06.2017 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2017. — № 3. — С. 98.
2. Жигалов, А. Н. Исследование влияния аэродинамического упрочнения на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании / А. Н. Жигалов, В. К. Шелега // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 31 / под ред. В. К. Шелега. — Минск : БНТУ, 2018. — С. 37—48.
3. Жигалов, А. Н. Моделирование процесса резания твердосплавным инструментом, упрочненным аэродинамическим воздействием, в программном продукте DEFORM / А. Н. Жигалов // Современные проблемы машиностроения (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22—23 нояб. 2018 г. / ГГТУ им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. — Гомель, 2018. — С. 94—96.
4. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. — М. : Высш. шк., 1985. — 304 с.
5. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. — Минск : Высш. шк., 1990. — 512 с.
6. Шатуров, Д. Г. Методика исследования технологических параметров через полином второй степени / Д. Г. Шатуров, А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27—28 мая 2019 г. — Брест : БрГТУ, 2019. — С. 117—120.

Поступил в редакцию 17.05.2019