

Учреждение образования
«Барановичский государственный университет»

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 8, июнь, 2020.

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор серии

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

Ответственный секретарь серии

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

Редактор текстов на английском языке

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

Богданович Ирина Аркадьевна (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

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

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

Белый Алексей Владимирович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

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

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

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

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

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

Сиваченко Леонид Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортных и технологических машин межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет» (Могилев, Республика Беларусь).

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

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

Адрес редакции:

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by .

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

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

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

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

Издатель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко

Технический редактор Л. Н. Щербук

Компьютерная вёрстка С. М. Глушак

Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 16.06.2020. Формат 60 × 84¹/₈. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 16,00. Уч.-изд. л. 9,35. Тираж 100 экз. Заказ

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014.

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

© БарГУ, 2020

Установа адукацыі
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

Веснік БарДУ

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 8, чэрвень, 2020.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

Заснавальнік: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ

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

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

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ СЕРЫІ

Галоўны рэдактар серыі

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

Адказны сакратар серыі

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

Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

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

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

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

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

Белы Аляксей Уладзіміравіч, член-карэспандэнт Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, галоўны навуковы супрацоўнік дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрас рэдакцыі:

вул. Войкава, 21, 225404 г. Баранавічы.

Тэлефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by.

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

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

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

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

Выдавец: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

Выходзіць на рускай, беларускай і англійскай мовах.

Часопіс распаўсюджваецца на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

Загадчык рэдакцыйна-выдавецкай групы Г. Ю. Сідарэнка

Тэхнічны рэдактар Л. М. Шчарбук

Камп'ютарная вёрстка С. М. Глушак

Карэктар Н. М. Каладко

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

Кошт свабодны.

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

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

© БарДУ, 2020

Educational institution
“Baranovichi State University”

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013.

Volume 8, June, 2020.

Engineering Series

Founder: Educational Institution “Baranovichi State University”.

EDITORIAL BOARD

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

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

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Executive Editor of the Issue

Aleksandr V. Alifanov, State-Prize Winner of the Republic of Belarus in Science and Technology, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Chair of Machine-Building Technology and Equipment, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Executive secretary of the issue

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

English Text Editor

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

Iryna A. Bogdanovich (*in charge of the heading “Machine Building and Engineering Science”*), Ph. D of Technical Science, Associate Professor, Head of the Chair of Technology and Equipment of Mechanical Engineering, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

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

Andrei K. Gavrilena, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Chair of Technical Support of Agricultural Production and Agronomy of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial address:

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

E-mail: vestnik@barsu.by.

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

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

In compliance with the order of the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus from January 21, 2015 № 16 the scientific and practical journal “BarSU Herald. Engineering Series” is included into the List of scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of theses research on engineering sciences (mechanical engineering and machines, processes and machines of agroengineering systems).

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

Publishing: Educational Institution “Baranovichi State University”.

Issued in Russian, Belarusian and English.

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

Managing editor A. Y. Sidorenko

Technical editor L. N. Scherbuk

Desktop Publishing S. M. Glushak

Proofreader N. N. Kolodko

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

Free price.

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

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

© BarSU, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

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

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

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

ЗМЕСТ

МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

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

ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

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

CONTENTS

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

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

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

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

УДК 621.9

А. Н. Жигалов, И. А. Горавский, Д. Д. Богдан

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗНОСА И РЕСУРСА МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА СПЛАВА В35, УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

С использованием разработанной математической модели и методики параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента установлено, что при обработке металлорежущими твердосплавными пластинами сплава В35, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, при прерывистом фрезеровании чугуна СЧ20 на оптимальных режимах резания со значениями $v = 146,5$ м / мин, $s_z = 0,09$ мм / зуб, $t = 3,1$ мм ресурс инструмента повышается на 209 %. Метод аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ) рекомендуется не только для повышения ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего при процессах прерывистого резания, но и для увеличения производительности обработки.

Ключевые слова: метод аэродинамического звукового упрочнения; износ; ресурс металлорежущих твердосплавных пластин В35.

Рис. 3. Табл. 5. Библиогр.: 5 назв.

A. N. Jigalov, I. A. Goravskii, D. D. Bogdan

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

OPTIMIZATION OF THE WEAR AND RESOURCE OF A METAL-CUTTING CARBIDE TOOL OF B35 ALLOY STRENGTHENED BY THE AERODYNAMIC SOUND METHOD

By the use of the developed mathematical model and the method of parametric optimization of wear and resource of a metal-cutting tool, it was found out that at operating a metal-cutting carbide inserts of B35 alloy strengthened by the aerodynamic sound method, by intermittent milling of GC20 cast iron at optimal cutting conditions equal to $v = 146.5$ m / min, $s_z = 0.09$ mm / tooth, $t = 3.1$ mm, the tool's resource is increased by 209 %. The method of aerodynamic sound hardening is recommended not only to increase the resource of metal-cutting carbide tools used in intermittent cutting processes, but also to increase the productivity of processing.

Keywords: method of aerodynamic sound hardening; wear; resource of metal-cutting carbide inserts B35.

Fig. 3. Table 5. Ref.: 5 titles.

Введение. Созданный метод АДУ [1] металлорежущего твердосплавного инструмента способен с небольшой добавленной стоимостью обеспечивать повышение ударной вязкости до 90 КДж / м² и предела прочности при изгибе до 2 230 Мпа при сохранении высокой твердости до 92 HRA и плотности до 15·10³ кг / см³. Наиболее эффективен метод АДУ инструмента, работающего при процессах прерывистого резания [1—3].

Для ускоренного исследования эффективности нового наукоемкого метода АДУ разработаны математическая модель и метод параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента, упрочненного методом АДУ, позволяющие установить

оптимальные технологические режимы резания, с помощью которых обеспечивается повышенный ресурс инструмента [4].

При процессе фрезерно-карусельного резания, являющегося типичным представителем прерывистого резания, подача носит переменный характер, в результате чего наиболее эффективным параметром, характеризующим состояние инструмента, является его ресурсная стойкость, т. е. способность инструмента произвести определенное количество годной продукции. Ресурс режущего инструмента T_p зависит от стойкости T инструмента, скорости резания v и подачи s [5] и вычисляется по формуле

$$T_p = 10^{-3} Tvs. \quad (1)$$

В работе [5] установлено, что с учетом (1) зависимость, описывающая ресурс режущего инструмента T_p от параметров обработки v, s, t , равна

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

В зависимость (2) для расчета ресурсной стойкости T_p входит большое количество факторов и сопутствующих коэффициентов, в связи с чем производить расчеты аналитическим способом довольно трудоемко и непроизводительно. Для автоматизации и ускорения расчетов для определения износа по задней поверхности h_3 и ресурсной стойкости T_p режущего инструмента при фрезеровании разработана блок-схема алгоритма метода параметрической оптимизации ресурса металлорежущего инструмента.

Разработанные математическая модель и метод параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента, отличающиеся установлением связей между износом, зависящим от технологических режимов резания в виде степенных зависимостей, величинами стойкостей, описываемых от однофакторных и многофакторных параметров резания в виде квадратичных функций второй степени, и ресурсом инструмента, связанным с режимами резания и стойкостями, определяемых в пределах устанавливаемых вариаций режимов резания, позволяют устанавливать оптимальные технологические режимы резания, с помощью которых обеспечивается повышение ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ.

Кроме того, предложенная методика параметрической оптимизации износа и ресурса инструмента для функционально ориентированного технологического процесса резания, в основу которой заложены новые подходы в математическом моделировании статистических процессов, позволяет оперативно и с минимальными затратами по проведению экспериментальной и расчетной частей исследований получить результат. Данная методика, разработанная для исследования влияния метода АДУ на технологические параметры процесса резания, может также быть использована при исследовании и других статистических процессов.

Результаты исследования и их обсуждение. С использованием разработанной математической модели и применением компьютерной обработки проведены исследования по определению зависимостей износа и ресурса металлорежущего инструмента из твердого сплава В35, неупрочненного и упрочненного методом АДУ, от комплексного влияния режимов резания (скорость резания v , подача на зуб s_z , глубина резания t). Обработывали методом фрезерования заготовки из чугуна СЧ20 на режимах (n_{ϕ} — число оборотов фрезы, $s_{ст}$ — подача стола), указанных в таблице 1.

При исследованиях износа пятигранные твердосплавные пластины формы PNUA-110408 размещались в корпусе фрезы таким образом, что главный и вспомогательный углы в плане имели следующие показатели: $\phi = 64^\circ$, $\phi_1 = 8^\circ$, $\gamma_3 = 10^\circ$ соответственно, передний угол заточки $\gamma_3 = 10^\circ$, задний угол заточки $\alpha_3 = 10^\circ$. Обработка производилась на карусельно-фрезерном специальном станке модели ГФ2211 фрезами торцовыми диаметром $d = 63$ и 200 мм. Обработке подвергались специально изготовленные заготовки из чугунных отливок материала СЧ25 ГОСТ 1412-85 с твердостью $HB 156...170$. Имитация ударных нагрузок осуществлялась путем установки в пакете нескольких (от одной до пяти) заготовок с размещением между ними прокладок размером более величины подачи на зуб. Замеры износа производились по задней поверхности пластин через определенное время резания на инструментальном стереоскопическом микроскопе Stemi 2000-C фирмы Carl Zeiss с точностью измерений до 0,001 мм.

В таблице 2 приведены данные всех составляющих, полученных при реализации математической модели, с указанием алгоритмических шагов и последовательных действий, расчета ресурсной стойкости для сплава В35, упрочненного методом АДУ, а в таблице 3 — для сплава В35 неупрочненного.

Т а б л и ц а 1. — Применяемые режимы резания при фрезеровании заготовок из чугуна СЧ20 твердосплавными пластинами В35, не упрочненными и упрочненными АДУ

| Вариации режимов обработки для пластин В35 | | | | | | | | |
|--|---------------|----|-----------------|----|----------|----|-----------------------|--------------------|
| Номер опыта | v , м / мин | | s_z , мм / об | | t , мм | | n_{ϕ} , об / мин | $s_{ст}$, мм / об |
| 1 | 124,6 | 0 | 0,21 | 0 | 3,0 | 0 | 630 | 800 |
| 2 | 98,9 | -1 | 0,21 | 0 | 3,0 | 0 | 500 | 630 |
| 3 | 124,6 | 0 | 0,21 | 0 | 4,0 | +1 | 630 | 800 |
| 4 | 124,6 | 0 | 0,21 | 0 | 2,0 | -1 | 630 | 800 |
| 5 | 124,6 | 0 | 0,13 | -1 | 3,0 | 0 | 630 | 500 |
| 6 | 124,6 | 0 | 0,33 | +1 | 3,0 | 0 | 630 | 1 250 |
| 7 | 158,3 | +1 | 0,21 | 0 | 3,0 | 0 | 800 | 1 000 |

Т а б л и ц а 2. — Расчет ресурса металлорежущих твердосплавных пластин В35, упрочненных АДУ, от режимов резания при обработке чугуна СЧ20

| Экспериментальные результаты | | | | | | Теоретические результаты | | | | | |
|---|---------------------|-----|--------------|-------|---------------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Представление зависимости износа h_3 от времени обработки t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. Определение коэффициентов a и n от режимов резания v , s_z , t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. 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 $n_v = a_{nv}v^2 + b_{nv}v + c_{nv}$ | | | | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации заданных параметров | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | Параметры обработки | | | | Износ по задней поверхности, мм | Расчетные коэффициенты | | | | | |
| | постоянные | | изменяющиеся | | | | | | | | |
| | s_z | t | v_1 | v_2 | v_3 | h_{3v1} | h_{3v2} | h_{3v3} | a_v | b_v | c_v |
| 2 | 0,21 | 3,0 | 98,9 | | | 0,022 | | | 0,0000185 | -0,004022 | 0,238641 |

Продолжение таблицы 2

| Номер опыта | s_z | t | v_1 | v_2 | v_3 | h_{3v1} | h_{3v2} | h_{3v3} | a_v | b_v | c_v |
|---|-------|------|---|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | 0,21 | 3,0 | | 124,6 | | | 0,025 | | 0,0000185 | -0,004022 | 0,238641 |
| 3 | 0,21 | 3,0 | | | 158,3 | | | 0,066 | 0,0000185 | -0,004022 | 0,238641 |
| Результат | | | $a_v = 0,0000185v^2 - 0,004022v + 0,238641$ | | | | | | | | |
| Определение n_v при С | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | s_z | t | v_1 | v_2 | v_3 | h_{3v1} | h_{3v2} | h_{3v3} | a_v | b_v | c_v |
| 2 | 0,21 | 3,0 | 98,9 | | | 0,521 | | | 0,0000239 | -0,00795 | 1,07343 |
| 1 | 0,21 | 3,0 | | 124,6 | | | 0,454 | | 0,0000915 | -0,28368 | 2,409614 |
| 3 | 0,21 | 3,0 | | | 158,3 | | | 0,414 | 0,0000915 | -0,28368 | 2,409614 |
| Результат | | | $n_v = 0,0000239v^2 - 0,00795v + 1,07343$ | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_z , мм / зуб | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | t | s_1 | s_2 | s_3 | h_{3n1} | h_{3n2} | h_{3n3} | a_n | b_n | c_v |
| 4 | 124,6 | 3,0 | 0,13 | | | 0,015 | | | -1,125 | 0,5075 | -0,03196 |
| 1 | 124,6 | 3,0 | | 0,21 | | | 0,025 | | -1,125 | 0,5075 | -0,03196 |
| 5 | 124,6 | 3,0 | | | 0,33 | | | 0,013 | -1,125 | 0,5075 | -0,03196 |
| Результат | | | $a_s = -1,125s^2 + 0,5075s - 0,03196$ | | | | | | | | |
| Определение n_v при С | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | t | s_1 | s_2 | s_3 | h_{3n1} | h_{3n2} | h_{3n3} | a_n | b_n | c_v |
| 4 | 124,6 | 3,0 | 0,13 | | | 0,455 | | | 1,5625 | -0,54375 | 0,49928 |
| 1 | 124,6 | 3,0 | | 0,21 | | | 0,454 | | 1,5625 | -0,54375 | 0,49928 |
| 5 | 124,6 | 3,0 | | | 0,33 | | | 0,490 | 1,5625 | -0,54375 | 0,49928 |
| Результат | | | $n_s = 1,5625s^2 - 0,54375s + 0,49928$ | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | s | t_1 | t_2 | t_3 | h_{3t1} | h_{3t2} | h_{3t3} | a_t | b_t | c_t |
| 6 | 124,6 | 0,21 | 2,0 | | | 0,006 | | | -0,0195 | 0,1165 | -0,149 |
| 1 | 124,6 | 0,21 | | 3,0 | | | 0,025 | | -0,0195 | 0,1165 | -0,149 |
| 7 | 124,6 | 0,21 | | | 4,0 | | | 0,005 | -0,0195 | 0,1165 | -0,149 |
| Результат | | | $a_t = -0,0195t^2 + 0,1165t - 0,149$ | | | | | | | | |
| Определение n_v при С | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | s | t_1 | t_2 | t_3 | h_{3t1} | h_{3t2} | h_{3t3} | a_t | b_t | c_t |
| 6 | 124,6 | 0,21 | 2,0 | | | 0,677 | | | 0,2195 | -1,3205 | 2,44 |
| 1 | 124,6 | 0,21 | | 3,0 | | | 0,454 | | 0,2195 | -1,3205 | 2,44 |
| 7 | 124,6 | 0,21 | | | 4,0 | | | 0,670 | 0,214 | -0,431 | 0,428 |
| Результат | | | $n_t = 0,2195t^2 - 1,3205t + 2,44$ | | | | | | | | |
| 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 $C_1 = 0,025 - 0,0000185 \cdot 124,6^2 + 0,004 \cdot 124,6 + 1,125 \cdot 0,21^2 - 0,5075 \cdot 0,21 + 0,0195 \cdot 3,0^2 - 0,1165 \cdot 3,0 = 0,008$ $C_2 = 0,454 - 0,000024 \cdot 124,6^2 + 0,008 \cdot 124,6 - 1,5625 \cdot 0,21^2 + 0,54375 \cdot 0,21 - 0,2195 \cdot 3,0^2 + 1,321 \cdot 3,0 = 3,105$ | | | | | | | | | | | |
| 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 | | | | | | | | | | | |
| Определение зависимости стойкости от режимов резания v , s_z , t как $T = f(v, s_z, t)$ при заданном h_3 | | | | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации скорости резания v , м / мин | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | s | t | T_{v1} | T_{v2} | T_{v3} | T_{v1} | T_{v2} | T_{v3} | av | bv | cv |
| 2 | 0,21 | 3,0 | 98,9 | | | 2 | 155,31 | T_{v1} | -3,86634 | 976,707 | -56 623,572 |

Окончание таблицы 2

| Номер опыта | s | t | T_{v_1} | T_{v_2} | T_{v_3} | T_{v_1} | T_{v_2} | T_{v_3} | av | bv | cv |
|--|-------|------|---|----------------|----------------|----------------|-----------|-----------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,21 | 3,0 | | 124,6 | | 5 048,641 | | T_{v_2} | | | |
| 3 | 0,21 | 3,0 | | | 158,3 | 1 103,068 | | T_{v_3} | | | |
| Результат | | | $a_v = -3,86634v^2 + 976,707v - 56 623,572$ | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_3 , мм / зуб | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | t | s ₁ | s ₂ | s ₃ | T_{s_1} | T_{s_2} | T_{s_3} | a _n | b _n | c _v |
| 2 | 124,6 | 3,0 | 0,13 | | | 15 227,035 | | T_{s_1} | 852 839,1724 | -417 195,2419 | 55 049,4348 |
| 1 | 124,6 | 3,0 | | 0,21 | | 5 048,641 | | T_{s_2} | | | |
| 3 | 124,6 | 3,0 | | | 0,33 | 10 249,191 | | T_{s_3} | | | |
| Результат | | | $a_s = 852 839,1724s^2 - 417 195,2419s + 55 049,4348$ | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации глубины резания t, мм | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | s | t ₁ | t ₂ | t ₃ | T_{t_1} | T_{t_2} | T_{t_3} | a _t | b _t | c _t |
| 2 | 124,6 | 0,21 | 2,0 | | | 2 505,317 | | T_{t_1} | -2 011,281 | 12 600,5857 | -14 650,0465 |
| 1 | 124,6 | 0,21 | | 3,0 | | 5 048,641 | | T_{t_2} | | | |
| 7 | 124,6 | 0,21 | | | 4,0 | 3 569,062 | | T_{t_3} | | | |
| Результат | | | $a_t = -2 011,281s^2 + 12 600,5857s - 14 650,0465$ | | | | | | | | |
| При среднем опыте | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | s | t | t ₁ | t ₂ | t ₃ | h_{3t1} | h_{3t3} | a _t | b _t | c _t |
| | 124,6 | 0,21 | 3,0 | | | | 5 048,641 | | | | -26 321,4664 |
| Стойкость пластин В35, упрочненных АДУ | | | | | | | | | | | |
| $T_{py} = 10^{-3}vs(-3,87v^2 + 976,7v + 852 839,17s^2 - 417 195,24s - 2 011,45t^2 + 12 600,6t - 26 321,5)$ | | | | | | | | | | | |

Т а б л и ц а 3. — Расчет ресурса металлорежущих твердосплавных пластин В35 неупрочненных от режимов резания при обработке чугуна СЧ20

| Экспериментальные результаты | | | | | | Теоретические результаты | | | | | |
|--|---------------------|-----|---|-------|-------|---------------------------------|------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| Представление зависимости износа h_3 от времени обработки t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. Определение коэффициентов a и n от режимов резания v, s_z, t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. 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 $n_v = a_{nv}v^2 + b_{nv}v + c_{nv}$ | | | | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации заданных параметров | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | Параметры обработки | | | | | Износ по задней поверхности, мм | Расчетные коэффициенты | | | | |
| | постоянные | | изменяющиеся | | | | | | | | |
| | s_z | t | v_1 | v_2 | v_3 | h_{3v1} | h_{3v2} | h_{3v3} | a_v | b_v | c_v |
| Определение коэффициентов при вариации скорости резания v, м / мин | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0,21 | 1,0 | 98,9 | | | 0,031 | | | 0,00003141 | -0,0072527 | -0,4411025 |
| 1 | 0,21 | 3,0 | | 124,6 | | | 0,025 | | 0,00003141 | -0,0072527 | -0,4411025 |
| 7 | 0,21 | 3,0 | | | 158,3 | | | 0,080 | 0,00003141 | -0,0072527 | -0,4411025 |
| Результат | | | $a_v = 0,00003141v^2 - 0,00725268v - 0,4411025$ | | | | | | | | |
| Определение n_v при С | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | s_z | t | v_1 | v_2 | v_3 | h_{3v1} | h_{3v2} | h_{3v3} | a_v | b_v | c_v |
| 2 | 0,21 | 3,0 | 98,9 | | | 0,518 | | | 0,0000067 | -0,003168 | 0,765874 |

Продолжение таблицы 3

| Номер опыта | s_z | t | v_1 | v_2 | v_3 | h_{3v1} | h_{3v2} | h_{3v3} | a_v | b_v | c_v |
|--|-------|------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|--------------|
| 1 | 0,21 | 3,0 | | 124,6 | | | 0,475 | | 0,0000067 | -0,003168 | 0,765874 |
| 7 | 0,21 | 3,0 | | | 158,3 | | | 0,432 | 0,0000067 | -0,003168 | 0,765874 |
| Результат | | | $n_v = 0,0000067v^2 - 0,003168v + 0,765874$ | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_z , мм / зуб | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | t | s_1 | s_2 | s_3 | h_{3n1} | h_{3n2} | h_{3n3} | a_n | b_n | c_v |
| 4 | 124,6 | 3,0 | 0,13 | | | 0,019 | | | -0,8333333 | 0,3583333 | -0,0135 |
| 1 | 124,6 | 3,0 | | 0,21 | | | 0,025 | | -0,8333333 | 0,3583333 | -0,0135 |
| 5 | 124,6 | 3,0 | | | 0,33 | | | 0,014 | -0,8333333 | 0,3583333 | -0,0135 |
| Результат | | | $a_s = -0,8333333s^2 + 0,3583333s - 0,0135$ | | | | | | | | |
| Определение n_v при С | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | t | s_1 | s_2 | s_3 | h_{3n1} | h_{3n2} | h_{3n3} | a_n | b_n | c_v |
| 4 | 124,6 | 3,0 | 0,13 | | | 0,479 | | | 2,6666667 | -0,9566667 | 0,5583 |
| 1 | 124,6 | 3,0 | | 0,21 | | | 0,475 | | 2,6666667 | -0,9566667 | 0,5583 |
| 5 | 124,6 | 3,0 | | | 0,33 | | | 0,533 | 2,6666667 | -0,9566667 | 0,5583 |
| Результат | | | $n_s = 2,6666667s^2 - 0,9566667s + 0,5583$ | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | s | t_1 | t_2 | t_3 | h_{3t1} | h_{3t2} | h_{3t3} | a_t | b_t | c_t |
| 6 | 124,6 | 0,21 | 2,0 | | | 0,015 | | | -0,0135 | 0,0775 | -0,086 |
| 1 | 124,6 | 0,21 | | 3,0 | | | 0,025 | | -0,0135 | 0,0775 | -0,086 |
| 7 | 124,6 | 0,21 | | | 4,0 | | | 0,008 | -0,0135 | 0,0775 | -0,086 |
| Результат | | | $a_t = -0,0135t^2 + 0,0775t - 0,086$ | | | | | | | | |
| Определение n_v при С | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | s | t_1 | t_2 | t_3 | h_{3t1} | h_{3t2} | h_{3t3} | a_t | b_t | c_t |
| 6 | 124,6 | 0,21 | 2,0 | | | 0,587 | | | 0,143 | -0,827 | 1,669 |
| 1 | 124,6 | 0,21 | | 3,0 | | | 0,475 | | 0,143 | -0,827 | 1,669 |
| 7 | 124,6 | 0,21 | | | 4,0 | | | 0,649 | 0,143 | -0,827 | 1,669 |
| Результат | | | $n_t = 0,143t^2 - 0,827t + 1,669$ | | | | | | | | |
| 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 | | | | | | | | | | | |
| $C_1 = 0,025 - 0,00003 \cdot 124,6^2 + 0,00725 \cdot 124,6 + 0,833 \cdot 0,21^2 - 0,3583 \cdot 0,21 + 0,0135 \cdot 3,0^2 - 0,078 \cdot 3,0 = 0,292$ | | | | | | | | | | | |
| $C_2 = 0,475 - 0,000007 \cdot 124,6^2 + 0,00317 \cdot 124,6 - 2,667 \cdot 0,21^2 + 0,9567 \cdot 0,21 - 0,143 \cdot 3,0^2 + 0,827 \cdot 3,0 = 2,043$ | | | | | | | | | | | |
| 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 | | | | | | | | | | | |
| Определение зависимости стойкости от режимов резания v , s_z , t как $T = f(v, s_z, t)$, при заданном h_3 | | | | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации скорости резания v , м / мин | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | s | t | T_{v_1} | T_{v_2} | T_{v_3} | T_{v_1} | T_{v_2} | T_{v_3} | a_v | b_v | c_v |
| 2 | 0,21 | 3,0 | 98,9 | | | 1 162,221 | | T_{v_1} | -2,973489 | 754,09992 | -44 333,9497 |
| 1 | 0,21 | 3,0 | | 124,6 | | | 3 463,022 | T_{v_2} | | | |
| 3 | 0,21 | 3,0 | | | 158,3 | | 527,756 | T_{v_3} | | | |
| Результат | | | $a_v = -2,973489v^2 + 754,09992v - 44 333,9497$ | | | | | | | | |

Окончание таблицы 3

| Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_3 , мм / зуб | | | | | | | | | | | |
|--|-------|------|--|-------|-------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|---------------|
| Номер опыта | v | t | s_1 | s_2 | s_3 | T_{s_1} | T_{s_2} | T_{s_3} | a_n | b_n | c_v |
| 2 | 0,21 | 3,0 | 0,13 | | | 5 737,485 | | T_{s_1} | 174 274,2541 | -87 684,041 | -14 191,17588 |
| 1 | 0,21 | 3,0 | | 0,21 | | 3 463,022 | | T_{s_2} | | | |
| 3 | 0,21 | 3,0 | | | 0,33 | 4 233,909 | | T_{s_3} | | | |
| Результат | | | $a_s = 174 274,25412s^2 - 8 7684,04093s + 14 191,175877$ | | | | | | | | |
| Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм | | | | | | | | | | | |
| Номер опыта | v | s | t_1 | t_2 | t_3 | T_{t_1} | T_{t_2} | T_{t_3} | a_t | b_t | c_t |
| 2 | 124,6 | 0,21 | 2,0 | | | 1 746,069 | | T_{t_1} | 1 462,890931 | 9 031,407927 | -10 465,18351 |
| 1 | 124,6 | 0,21 | | 3,0 | | 3 463,022 | | T_{t_2} | | | |
| 7 | 124,6 | 0,21 | | | 4,0 | 2 254,193 | | T_{t_3} | | | |
| Результат | | | $a_t = 1 462,890931s^2 + 9 031,407927s - 10 465,183513$ | | | | | | | | |
| При среднем опыте | | | | | | | | | | | |
| | v | s | t | t_1 | t_2 | t_3 | $h_{3т1}$ | $h_{3т3}$ | a_t | b_t | c_t |
| | 124,6 | 0,21 | 3,0 | | | | 3 463,022 | | | | -47 534,00106 |
| Стойкость пластин В35 неупрочненных | | | | | | | | | | | |
| $T_{рн} = 10^{-3}vs(-2,97v^2 + 754,1v + 17 4274,25s^2 - 87 684,04s - 1 462,9t^2 + 9 031,41t - 47 534,0)$ | | | | | | | | | | | |

После компьютерной обработки результатов таблиц 2 и 3 получены зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурса T_p металлорежущего инструмента из сплава В35, не упрочненного (В35н) и упрочненного методом АДУ (В35у). Значения зависимостей приведены в таблице 4.

Анализ зависимостей (см. таблицу 4) показывает, что наибольшее влияние на износ h_3 и ресурс инструмента T_p оказывает подача на зуб s_2 , затем скорость резания v , наименьшее влияние оказывает глубина резания t . Оптимальные значения параметров резания определялись путем компьютерного моделирования полученных зависимостей из таблицы 4. Оптимизация путем дифференцирования этих зависимостей по одному из исследуемых параметров в данных исследованиях не приемлема в связи с достаточно высокой степенью взаимного влияния исследуемых параметров.

Т а б л и ц а 4. — Зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурса T_p металлорежущего инструмента для сплава В35, не упрочненного и упрочненного методом АДУ

| Сплав | Зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурса инструмента T_p |
|-------|---|
| В35у | $h_3 = a \cdot t^{n_0}$, где $at = 0,000018517v^2 - 0,004021727v - 1,125s^2 + 0,5075s - 0,0195t^2 + 0,1165t + 0,008$; $n_0 = 0,000023907v^2 - 0,00795016v + 1,5625s^2 - 0,54375s + 0,2195t^2 - 1,3205t + 3,105$ |
| | $T_{py} = 10^{-3}vs(-3,87v^2 + 976,7v + 852 839,17s^2 - 417 195,24s - 2 011,45t^2 + 12 600,6t - 26 321,5)$ |
| В35н | $h_3 = a t^{n_0}$, где $a = 0,00003141v^2 - 0,00725268v - 0,8333s^2 + 0,3583s - 0,0135t^2 + 0,0775t + 0,292$; $n_0 = 0,0000066867v^2 - 0,003167619v + 2,66667s^2 - 0,95667s + 0,143t^2 - 0,827t + 2,043$ |
| | $T_{рн} = 10^{-3} v s (-2,97v^2 + 754,1v + 174 274,25s^2 - 87 684,04s - 1 462,9t^2 + 9 031,41t - 47 534,0)$ |

На рисунке 2 приведены графические интерпретации зависимостей (из таблицы 4) ресурса металлорежущих твердосплавных пластин PNUA-110408 ГОСТ 19064-80 сплава В35, неупрочненных и упрочненных АДУ, при обработке чугуна СЧ20 от одного из технологических параметров v , s_z , t .

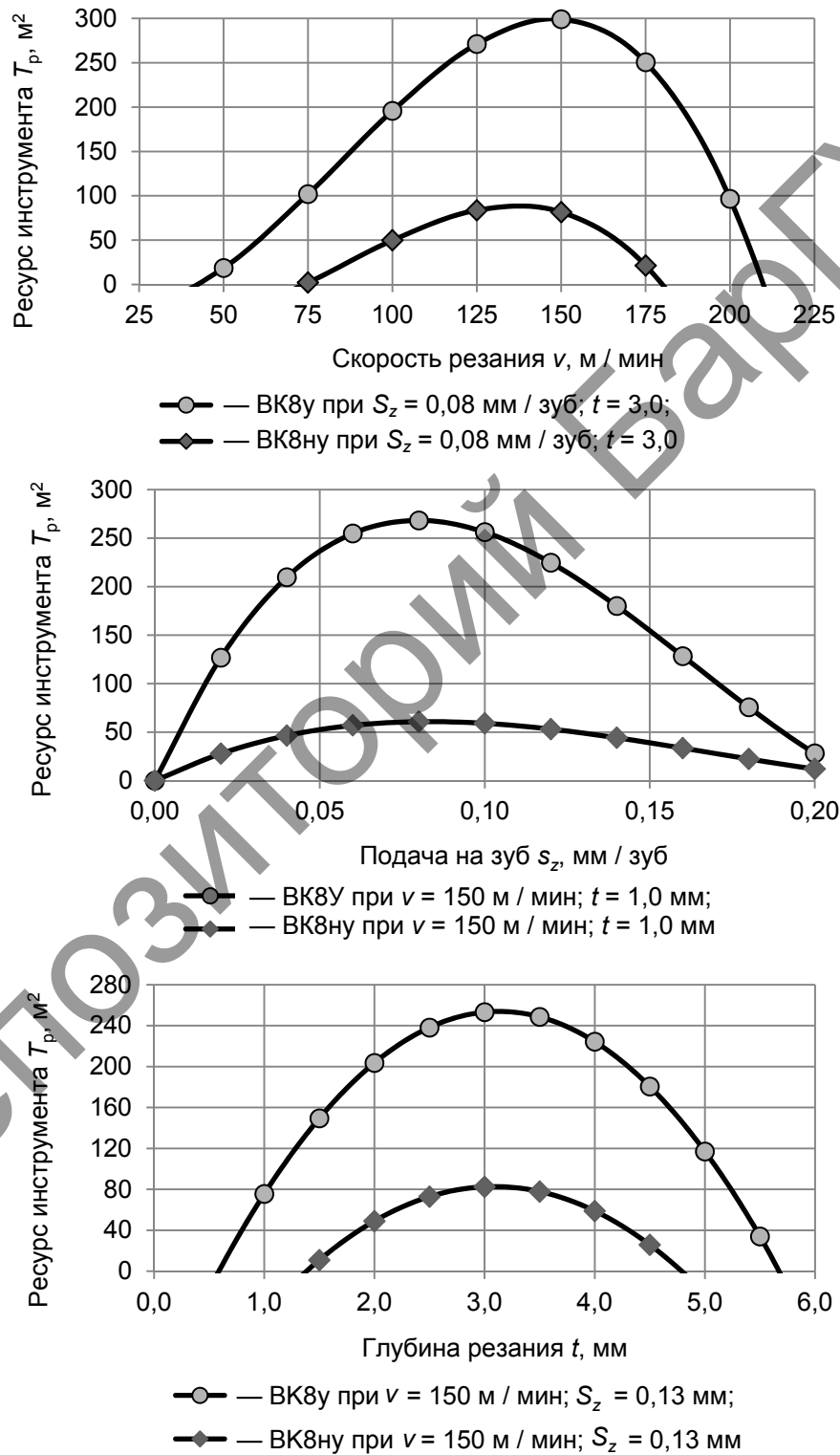


Рисунок 2. — Зависимости ресурса T_p металлорежущих твердосплавных пластин PNUA-110408 сплава В35, неупрочненных (VK8ну) и упрочненных АДУ (VK8у), при фрезеровании чугуна СЧ20 от влияния режимов резания v , s_z , t

На рисунке 3 приведены графические интерпретации зависимостей ресурса металло-режущих твердосплавных пластин PNUA-110408 ГОСТ 19064-80 сплава ВК8, неупрочненных и упрочненных АДУ, при фрезеровании чугуна СЧ20 от двух технологических режимов резания при постоянном значении третьего.

Проведя компьютерное моделирование зависимостей T_{py} и T_{pn} для сплава В35 (из таблицы 4) найдены оптимальные значения v , s_z , t , при которых обеспечивается максимальная ресурсная стойкость (таблица 5).

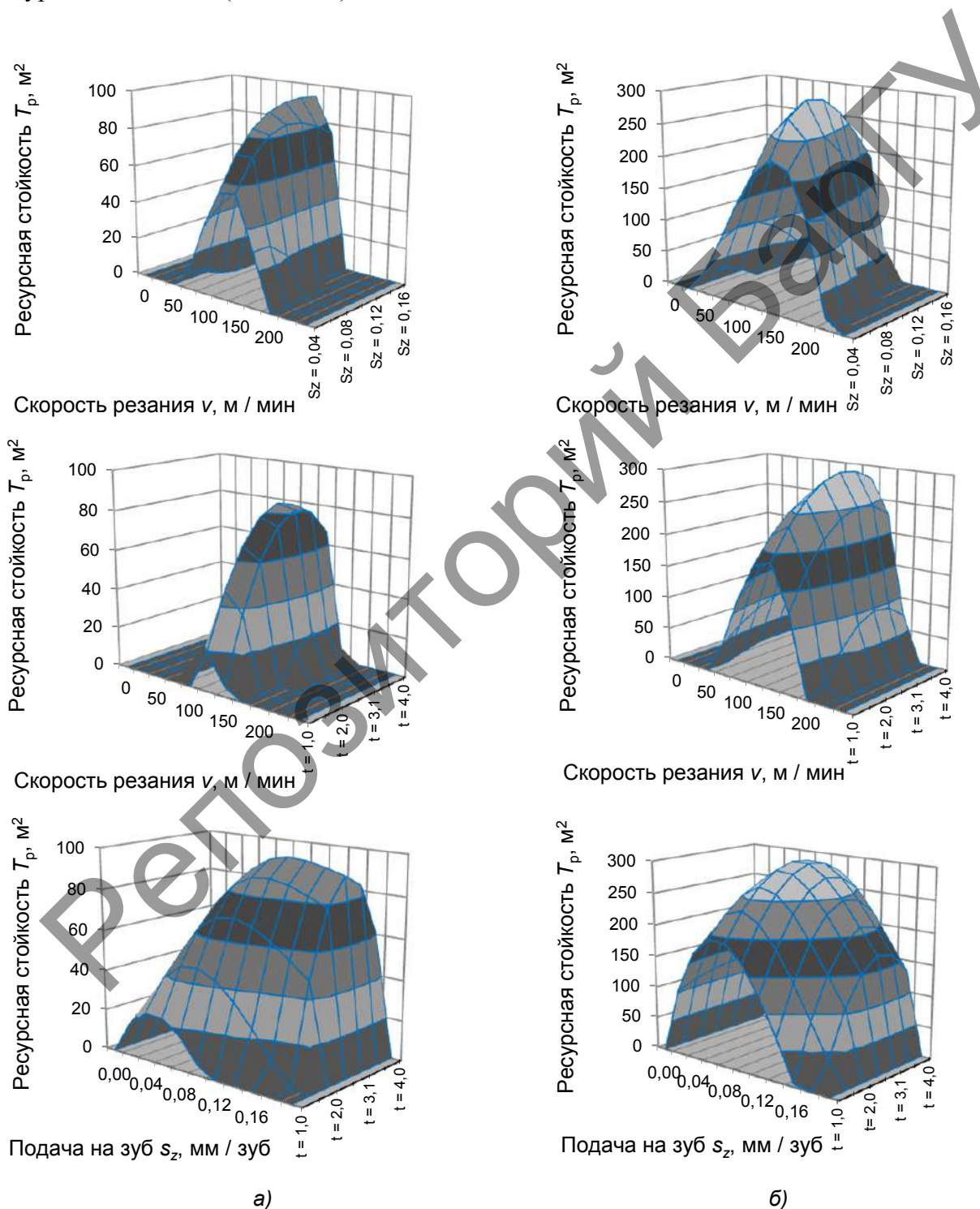


Рисунок 3. — Зависимости ресурса T_p пластин твердосплавных PNUA-110408 сплава В35, не упрочненных (а) и упрочненных АДУ (б), при фрезеровании чугуна СЧ20 от комплексного влияния режимов резания v , s_z , t

Т а б л и ц а 5. — Оптимальные значения режимов резания при фрезеровании чугуна СЧ20 пластинами В35, не упрочненными и упрочненными методом АДУ

| Режим | Неупрочненная | Упрочненная АДУ | Рост, % |
|------------------------------|---------------|-----------------|---------|
| $V_{\text{опт}}$, м / мин | 133,90 | 146,50 | +9,4 |
| $s_{z\text{опт}}$, мм / зуб | 0,13 | 0,09 | -30,8 |
| $t_{\text{опт}}$, мм | 3,10 | 3,10 | 0 |
| T_p , м ² | 97,71 | 301,65 | +209,0 |

При упрочнении методом АДУ снижение оптимальной подачи на зуб на 30,8 % компенсируется повышением на 209 % ресурса металлорежущих твердосплавных пластин В35.

При повышении производительности обработки для пластин ВК8, упрочненных АДУ, по сравнению с неупрочненными, за счет увеличения режимов резания, например, на 26 %, что возможно осуществить за счет повышения минутной подачи на 26 % (при $v = 146,5$ м / мин и $s_z = 0,15$ мм / зуб), ресурсная стойкость увеличивается в 2,28 раза и составляет 222,6 м².

Заключение. С использованием экспериментально-расчетных исследований и компьютерного моделирования на основе разработанной математической модели и метода параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента, учитывающих влияние режимов резания и их взаимосвязи на износ инструмента, получены степенные зависимости ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента из сплава В35, не упрочненных и упрочненных методом АДУ, от времени резания, которые позволяют назначать оптимальные режимы резания для достижения наибольшей ресурсной стойкости инструмента. Показано, что для металлорежущих твердосплавных пластин, упрочненных методом АДУ, существенным является то, чтобы пластины работали на оптимальных режимах резания, имеющих при фрезеровании чугуна СЧ20 сплавом В35 следующие показатели: $v = 146,5$ м / мин, $s_z = 0,09$ мм / зуб, $t = 3,1$ мм.

Установлено, что комбинация режимов резания оказывает существенное влияние на ресурс твердосплавных пластин В35, упрочненных методом АДУ: при $h_{\text{здоп}} = 0,6$ мм на режимах резания $v = 158,3$ м / мин; $s_z = 0,21$ мм / зуб; $t = 3,0$ мм, $T_{\text{py}} = 1369,7$ м², а на режимах резания $v = 98,8$ м / мин; $s_z = 0,21$ мм / зуб; $t = 3,0$ мм, $T_{\text{py}} = 571,8$ м² ресурс повышается в 2,4 раза.

Метод АДУ рекомендуется не только для повышения ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего при процессах прерывистого резания, но и для повышения производительности обработки. При фрезеровании на оптимальных режимах чугуна СЧ20 упрочненным АДУ сплавом В35 повышение производительности обработки на 26 % сопровождается увеличением стойкости в 2,28 раза.

Список цитируемых источников

1. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головкин ; дата публ. 30.06.2017.
2. Жигалов, А. Н. Исследование влияния аэродинамического упрочнения на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 31 / под ред. В. К. Шелега. — Минск : БНТУ, 2018. — С. 37—48.
3. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. — Могилев : МГУП, 2019. — 213 с.
4. Жигалов, А. Н. Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2019. — Вып. 7. — С. 49—63.
5. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. — М. : Высш. шк., 1985. — 304 с.

Поступила в редакцию 30.03.2020