

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 «Машинабудаванне і машыназастава»*), 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 верстка С. А. Беразнюк

Карэктар С. А. Беразнюк

Падпісана да друку 14.06.2019. Фармат 60 × 84 1/8. Папера ксераксная. 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 Слонім, 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 Vasilij 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

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

УДК 621.923

Л. М. Акулович, д.т.н., профессор; Л. Е. Сергеев, к.т.н., доцент; Е. В. Сенчуров; С. К. Дубновицкий
Учреждение образования «Белорусский аграрный технический университет», Министерство сельского хозяйства
и продовольствия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь,
+375 (29) 619 05 04, leo-akulovich@yandex.ru

**МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА
МАХОВИЧКОВ ВОДОПРОВОДНЫХ ВЕНТИЛЕЙ**

В статье представлены результаты экспериментальных исследований параметров качества поверхностей маховичков водопроводных вентилей из стали 20X13 после магнитно-абразивной обработки. Предложена схема магнитно-абразивной обработки маховичков. Проанализировано распределение ферроабразивного порошка в рабочей зоне в процессе обработки. Определены зависимости шероховатости поверхности и производительности магнитно-абразивной обработки маховичков от технологических режимов.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка; ферроабразивный порошок; качество поверхности; маховичок.

Рис. 5. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.

L. M. Akulovich, L. E. Sergeev, E. V. Senchurov, S. K. Dubnovitskiy
Belarusian State Agrarian Technical University, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus,
99 Nezavisimosti Av., 220023 Minsk, Belarus, +375 (29) 619 05 04, leo-akulovich@yandex.ru

**MAGNETO-ABRASIVE MACHINING OF FLYWHEELS
OF THE WATER SUPPLY VALVES**

In the article, the results of experimental research of the parameters of quality of surfaces of flywheels of the water supply valves from steel X20Cr13 after magnetically-abrasive machining are presented. The chart of magneto-abrasive machining of flywheels has been offered. The distribution of ferro-abrasive powder in the working zone in the process of machining has been analysed. The dependences of surface roughness and productivity of magneto-abrasive machining of flywheels on technological modes have been determined.

Key words: magneto-abrasive machining; ferro-abrasive powder; surface quality; flywheel.

Fig. 5. Table 3. Ref.: 10 titles.

Введение. Конкурентоспособность выпускаемой продукции не может быть достигнута без создания и внедрения новых видов обработки сложнопроводных поверхностей деталей, способных обеспечивать высокую производительность и качество обработки. В сантехническом оборудовании используются модели кранов типа одноручковых (рычаг) и двухвентильных (маховички) [1]. Последние варианты отличаются надежностью, долговечностью, низкой стоимостью, удобством захвата и вращения и имеют ряд конструктивных вариантов: крест, квадро, трио, эрика и т. д., среди которых вид квадро характеризуется наиболее лаконичным дизайном и простотой в использовании [2]. Маховички водопроводных вентилей сантехнической арматуры часто имеют особо сложные профили поверхностей. Материалами для маховичков служат бронза, латунь, нержавеющая сталь, золото, серебро, керамика, стекло, пластмасса и дорогие сорта древесины повышенной твердости [2]. Исключая элитный характер сантехнической арматуры, широкое применение на средних и крупных промышленных

предприятиях согласно СНИП 2.04.01-85 получили маховички, изготовленные из нержавеющей стали и пластмассы, поскольку латунь и бронза обладают высокой стоимостью, керамика и стекло — повышенной хрупкостью. Пластмассовые маховички имеют низкую, в сравнении со стальными, стойкость, подвержены воздействию климатических факторов, требуют обязательно плавного перекрытия потока воды из одного положения в другое и склонны к интенсивному образованию известкового налёта на поверхности, что ухудшает их внешний вид.

Основная часть. Согласно [3] параметр шероховатости видимых поверхностей маховичков без покрытия должен составлять $Ra < 2,5$ мкм, что не обеспечивается горячей объемной штамповкой и последующей токарной обработкой, и требует использования финишной обработки. Применение покрытий на основе никелирования повышает стоимость маховичков и отличается отслаиванием покрытий от основы из-за низкого показателя адгезии, а также динамических, химических и температурных колебаний. Традиционно полирование маховичков по причине сложного профиля деталей производится по технологиям в среде свободного абразива, к которым относятся виброабразивная обработка и доводка. Однако при виброабразивной обработке наблюдается неравномерный съём металла с различных участков поверхностей деталей. Плохо обрабатываются труднодоступные участки — канавки, углубления, внутренние поверхности деталей. Для получения шероховатости, соответствующей $Ra = 0,16...0,32$ мкм, необходима длительная обработка в несколько переходов со сменой наполнителя и составов смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС), что существенно увеличивает трудоемкость финишной операции. Высокий уровень шума, сопровождающий работу виброустановок, ухудшает условия труда рабочих [4]. Процесс доводки является трудоемким, малопродуктивным, содержит, как правило, большой объем ручного труда, требует частой правки притиров для восстановления их исходной формы [5]. Использование электрохимической обработки характеризуется необходимостью получения предварительного высокого параметра шероховатости на уровне 9...11 классов и экологически вредным производством [6].

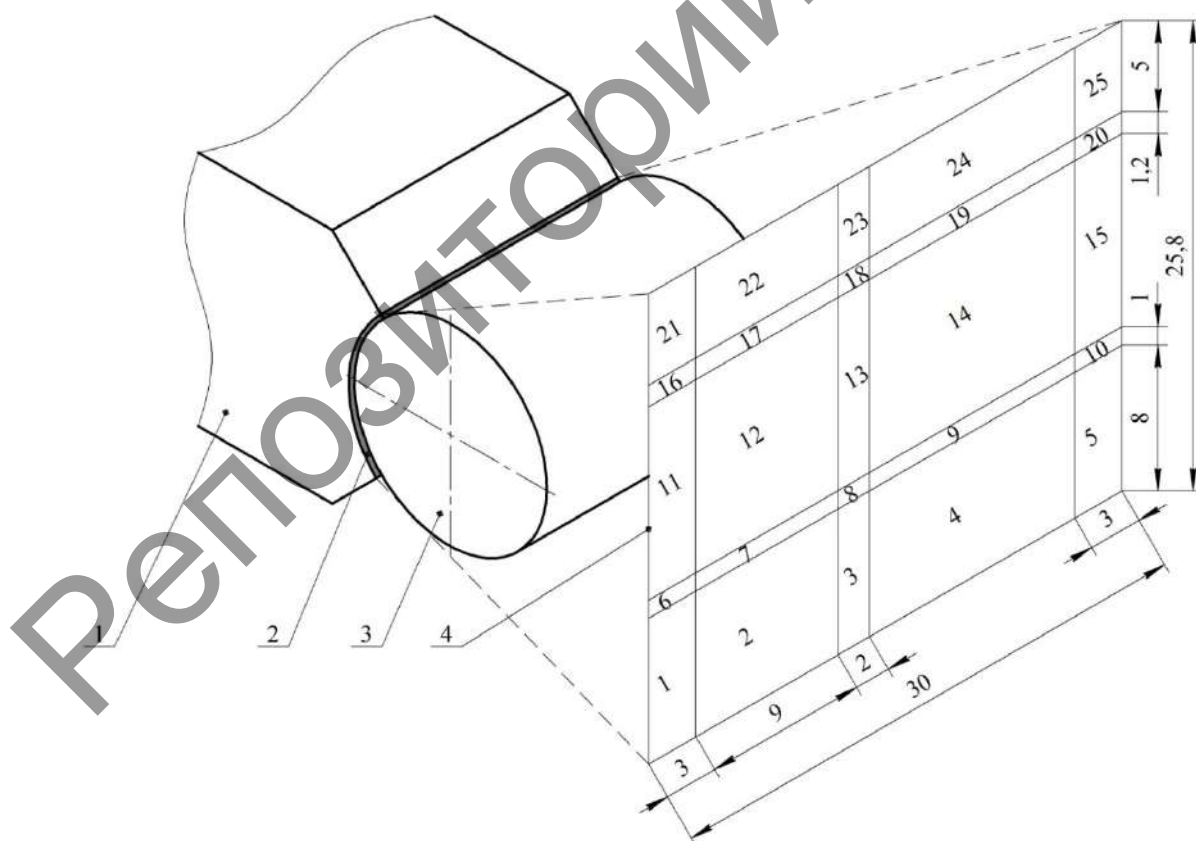
Одним из перспективных методов финишной обработки является магнитно-абразивная обработка (МАО) [7; 8]. При обработке в магнитном поле переориентация абразивных частиц порошка наиболее острой кромкой к обрабатываемой поверхности осуществляется с помощью энергии магнитного поля. Особенностью способа является ориентированное абразивное резание. В результате явления самоорганизации частицы незакрепленного абразива под действием магнитного поля устанавливаются перпендикулярно обрабатываемой поверхности и, уплотняясь, образуют ферроабразивную «щетку». Процесс микрорезания производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т. е. на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс организованного абразивного резания. Для реализации МАО не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править, что в 2...3 раза снижает затраты на инструмент.

Узким местом финишной обработки, в том числе и МАО, таких деталей и придание им требуемого товарного вида является топологически сложно развитая поверхность предлагаемых к обработке маховичков. Среди факторов, которые следует особо учитывать при обработке, находятся конусообразность профиля и форма сечения в горизонтальной плоскости, сходная с алгебраической кривой 2-го порядка типа астроиды. По данной причине технической проблемой является необходимость образования требуемой степени конформности поверхностей обрабатываемой детали и полюсных наконечников. Наличие полноты прилегания этих поверхностей обеспечивает требуемые показатели качества и производительности процесса МАО, при этом важную роль играет фактор магнитного поля. Направление движения магнитного потока и занимаемое в связи с этим его положение в зоне обработки зависят от стремления данного потока определить свое энергетически выгодное состояние, которое не всегда адекватно условиям эффективного протекания процесса МАО.

Установлено, что конструктивные элементы рабочих зазоров электромагнитной системы (ЭМС) магнитно-абразивного оборудования и условия формирования ферроабразивной «щётки» позволяют повысить производительность и качество обработанных поверхностей деталей машины [7]. В работе [9] выявлено изменение степени относительного уплотнения ферроабразивной «щётки» на различных локальных участках рабочей зоны. Установлено, что ферроабразивный порошок (ФАП) осуществляет образование уплотнительных областей не только в непосредственной близости от детали, но и на определённом от нее расстоянии [7]. В статичном положении ферроабразивной «щётки» коэффициент уплотнения имеет максимальные значения рядом с поверхностью полюсных наконечников, присутствует неравномерность распределения зёрен ФАП по объему рабочей зоны (рисунок 1 и таблица 1) [9].

Анализ полученных данных (рисунок 1 и таблица 1) показывает, что наименьшая пористость и, соответственно, наибольшая относительная плотность ФАП наблюдается по границам рабочего зазора, достигая максимальных значений на выходе из зазора и по его углам.

В связи с вышеизложенным одним из вариантов решения проблемы достижения требуемой степени конформности поверхностей обрабатываемых маховичков водопроводных вентилях и полюсных наконечников является увеличение рабочих зазоров при росте магнитной индукции в целях обеспечения необходимого давления ферроабразивной «щётки» на деталь, а также использование полюсных наконечников прямоугольного сечения и рабочей поверхностью в виде плоскости.



1 — полюсный наконечник; 2 — ФАП в рабочем зазоре, фиксированный жидкой самоотвердеющей пластмассой (образец); 3 — обрабатываемая деталь; 4 — схема нарезки развертки образца на элементы

Рисунок 1. — Схема распределения ФАП в пространстве обработки [8]

Т а б л и ц а 1. — Концентрация ФАП в областях рабочего зазора [9]

Номер элемента образца	Относительное количество порошка	Пористость ферроабразивной «щетки»	Коэффициент уплотнения ФАП
1	0,6343	40,3038	1,7188
2	0,5294	58,1767	1,2048
3	0,5144	60,4618	1,1391
4	0,5294	58,1767	1,2048
5	0,6343	40,3038	1,7168
6	0,5233	59,0128	1,1807
7	0,5152	60,1375	1,1484
8	0,4765	65,1616	1,0037
9	0,5152	60,1375	1,1484
10	0,5233	59,0128	1,1807
11	0,5886	52,1990	1,3771
12	0,5131	60,4670	1,1390
13	0,4752	65,5187	0,9934
14	0,5131	60,4670	1,1390
15	0,5686	52,1990	1,3771
16	0,5323	56,8040	1,2157
17	0,5278	58,3835	1,1990
18	0,4630	67,0040	0,9506
19	0,5278	58,3835	1,1990
20	0,5323	56,8040	1,2157
21	0,6369	39,7451	1,7360
22	0,6355	10,0143	1,7262
23	0,6690	48,7831	1,4756
24	0,6355	40,0143	1,7282
25	0,6369	39,7451	1,7360

Главная задача при МАО маховичков водопроводных вентилях заключается в установлении характера, расположении и распространении зоны уплотнения с целью ее контроля и эффективного использования для обеспечения требуемого качества поверхности деталей. Предложено регулировать степень уплотнения такими технологическими факторами процесса МАО, как скорость резания, градиент и магнитная индукция в рабочем зазоре ЭМС. Проведенные исследования показали, что формирование ферроабразивной «щётки» при наличии детали и реализации кинематического и динамического режимов обеспечивает получение других значений коэффициента уплотнения на аналогичных, как при статичном режиме, локальных участках рабочей зоны. Контроль распространения уплотнённого фронта ферроабразивной «щётки» первоначально производился на минимальной скорости резания с его последующей остановкой на различных участках рабочей зоны и визуальным наблюдением за характером изменения расположения зёрен ФАП.

Для реализации процесса МАО маховичков водопроводных вентилях, выполненных согласно ГОСТ 19681-83, из нержавеющей стали 20Х13 используется построение модели ферроабразивной «щетки». Первичной информацией для построения физической модели ферроабразивной «щетки» является то, что строение пористых материалов имеет сложную структуру, так как имеется совокупность частиц и пор различной формы и размера, которые расположены относительно друг друга либо беспорядочно, либо с малой степенью упорядоченности. Однако при наложении электромагнитного поля (ЭМП) на зону обработки

методом МАО происходит образование цепочек ферроабразивных частиц в соответствии с расположением силовых линий. Также ввиду использования технологии разлома спека при изготовлении ФАП осуществляется получение осколочной вытянутой формы частиц (рисунок 2), распределение которых в рабочей зоне характеризуется их ориентацией наибольшей осью вдоль магнитных силовых линий.

Выявлено, что обработка в рабочей зоне одной детали с ее аксиальным расположением не позволяет добиться требуемого построения первоначального состояния ферроабразивной «щётки» и не обеспечивает необходимого качества поверхности маховичка. Требуемое уплотнение порошка достигалось позиционированием трёх маховичков с планетарной схемой закрепления в шпинделе для сектора, имеющего угол 120° (рисунок 3). Анализ показывает, что такое неравномерное распределение маховичков по периферии рабочей зоны приводит к созданию отдельных квазистабильных веерообразных полуцилиндров, определяемых фронтовым возмущением. Вытеснение определенной доли ФАП за пределы рабочего зазора характеризуется формированием флоккулярной системы на торцовых поверхностях полюсных наконечников. Наличие флоккул указывает на переход от упаковки зёрен порошка в виде цепочек к более плотной и объёмной. Увеличение коэффициента уплотнения от $K_y = 1$ до значения 1,7 позволяет стабилизировать текстуру ферроабразивной «щётки», отсутствует эффект разрушения полуцилиндров при увеличении скорости резания от 1 м/с до 1,5...2 м/с. Расположение маховичков участками с большим радиусом кривизны для рассечения массива ферроабразивной «щётки» обеспечивает вытеснение зёрен ФАП на боковые участки с меньшим радиусом кривизны. Отрицательный характер кривизны боковых участков по отношению к носовому способствует интенсивности обработки, однако за кормовым участком маховичков возникает зона разрежения полуцилиндров уплотнения, что приводит к неравномерности шероховатости поверхности. Решение заключается в повороте каждого маховичка на 180° через 60 с обработки и использовании кормового участка детали в качестве носового. Для повышения интенсивности обработки используется ФАП различной грануляции (100 мкм и 250 мкм), поскольку порошки меньшей размерности обладают большей подвижностью и их наличие способствует более быстрому восстановлению полуцилиндров и, соответственно, росту коэффициента уплотнения.

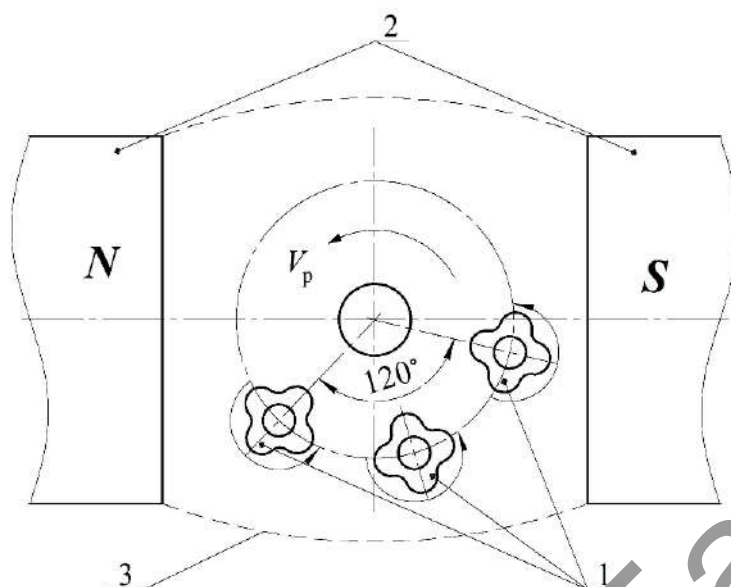


а)



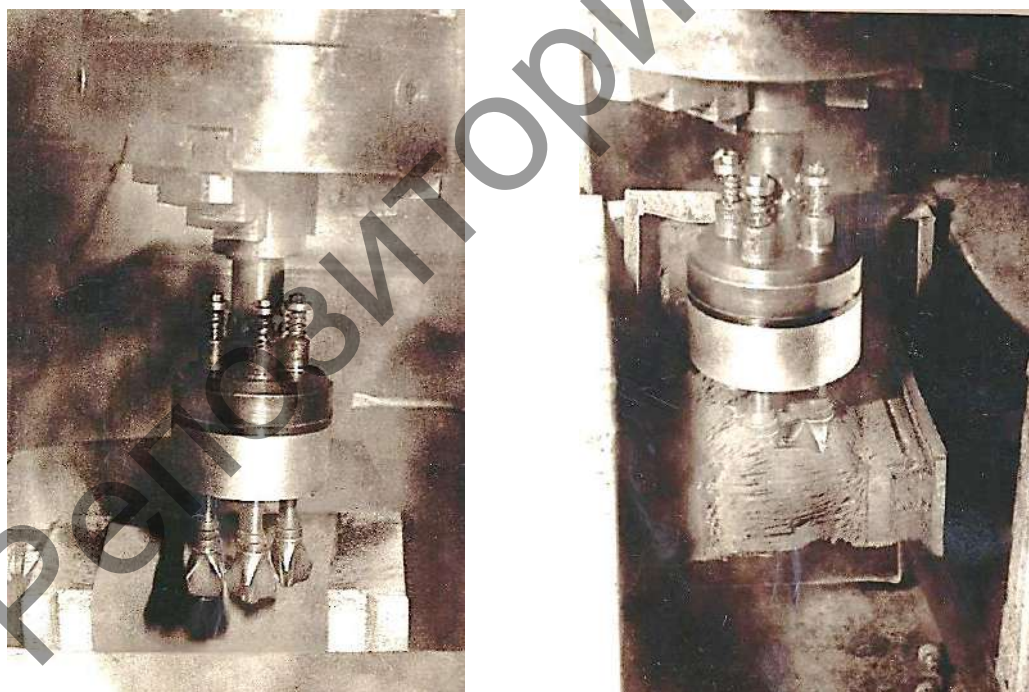
б)

Рисунок 2 — Форма частиц ФАП Ж15КТ, используемого при обработке поверхностей маховичков, при различных увеличениях (растровая электронная микроскопия).
× 150 (а); × 263 (б)



1 — обрабатываемые маховички; 2 — полюсные наконечники;
3 — условная граница ферроабразивной «щетки»

Рисунок 3. — Схема магнитно-абразивной обработки маховичков



а)

б)

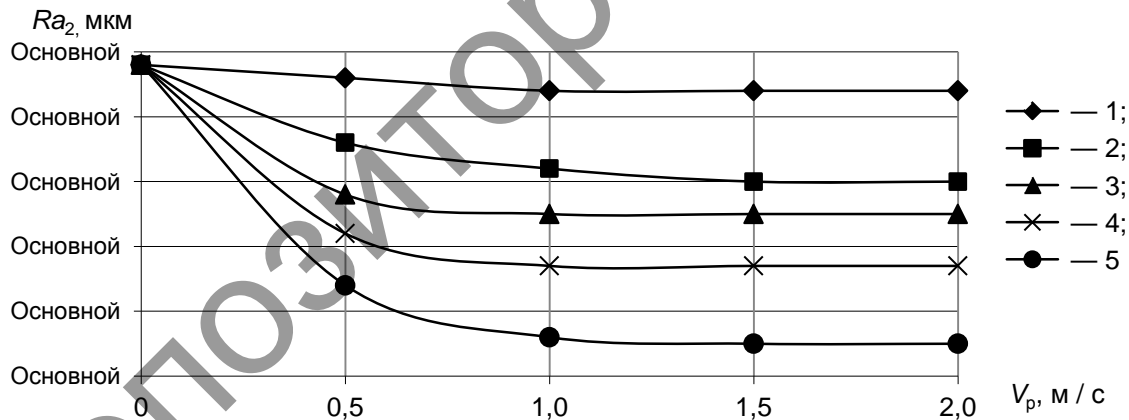
Рисунок 4. — Рабочая зона станка ЭУ-5 до введения маховичков между полюсными наконечниками (а); в процессе MAO маховичков (б)

Экспериментальные исследования MAO маховичков водопроводных вентилях проводились на станке ЭУ-5 с полюсными наконечниками, имеющими плоскую прямоугольную поверхность (рисунок 4).

Параметры и режимы обработки: величина магнитной индукции, $B = 0,6 \dots 1,0$ Т; скорость резания, $V_{рез} = 1 \dots 2$ м / с; величина рабочего зазора, $\delta = 1 \dots 2$ мм; ФАП — Ж15КТ; размерность частиц ФАП, $\Delta_1 = 100$ мкм; $\Delta_2 = 250$ мкм; СОТС — СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5%-й водный раствор; капельная подача СОТС с удельным расходом 150 мл / мин. Образцами для обработки служили маховички водопроводных вентилях ГОСТ 19681-83; материал — сталь 20Х13 ГОСТ 5632-72.

Многопозиционная обработка трех деталей уменьшила время обработки одной детали до 30 с. Результаты исследований приведены на рисунке 5 и в таблицах 2 и 3.

В результате проведенных исследований установлено, что при использовании ФАП Ж15КТ с зернистостью более 250 мкм при полном заполнении рабочего зазора ($K_3 = 1$) в процессе MAO происходит увеличение уплотнения порошка. В случае уменьшения коэффициента заполнения рабочего зазора до $K_3 = 0,8$ процесс MAO по причине снижения режущей способности ферроабразивной «щетки» прекращается. Оптимальной величиной заполнения рабочего зазора, согласно комплексу проведенных исследований, является $K_3 = 0,95$ [10]. Выявлено, что объем частиц ФАП, который был удален механическим способом, при отключении ЭМС после окончания процесса MAO маховичков с боковых поверхностей полюсных наконечников, как показатель флокуляции ферроабразивной «щетки», составил: для $K_3 = 1 \dots 7\%$ от всего объема ФАП, помещенного в рабочую зону; $K_3 = 0,95 \dots 4\%$; $K_3 = 0,9 \dots 3\%$; $K_3 = 0,85 \dots 3\%$ (при учете того, что принимался в расчет объем рабочей зоны и объем помещенных в эту зону маховичков). Это связано с тем, что наличие деталей увеличивает объем ферроабразивной «щетки», и вносит коррекцию в рост коэффициента уплотнения ФАП. В случае отсутствия маховичков в рабочей зоне объем частиц ФАП, который был удален механическим способом, составляет для $K_3 = 1 \dots 6\%$ от всего объема ФАП, помещенного в рабочую зону; $K_3 = 0,95 \dots 4\%$; $K_3 = 0,9 \dots 3\%$; $K_3 = 0,85 \dots 3\%$.



1 — $\Delta_2/\Delta_1 = 100/0$; 2 — $\Delta_2/\Delta_1 = 75/25$; 3 — $\Delta_2/\Delta_1 = 50/50$; 4 — $\Delta_2/\Delta_1 = 25/75$; 5 — $\Delta_2/\Delta_1 = 0/100$

Рисунок 5. — Зависимость шероховатости поверхности маховичков после MAO Ra_2 от скорости резания V_p при различных соотношениях весовых долей ФАП разной размерности Δ_2/Δ_1 и постоянной магнитной индукции $B = 1$ Т

Т а б л и ц а 2. — Производительность процесса MAO G (мг) в зависимости от величины магнитной индукции B при различных соотношениях весовых долей ФАП разной размерности Δ_2/Δ_1 и постоянной скорости резания $V_p = 1$ м / с

Δ_2/Δ_1	$B = 0,6$ Т	$B = 0,8$ Т	$B = 1$ Т
100/0	141	151	185
75/25	130	145	168
50/50	117	124	137
25/75	98	110	116
0/100	84	92	95

Т а б л и ц а 3. — Производительность процесса MAO G (мг) в зависимости от скорости резания V_p при различных соотношениях весовых долей ФАП разной размерности Δ_2/Δ_1 и постоянной магнитной индукции $B = 0,8$ Т

Δ_2/Δ_1	$V_p = 0,5$ м / с	$V_p = 1$ м / с	$V_p = 1$ м / с
100/0	116	151	139
75/25	110	145	126
50/50	103	124	107
25/75	96	110	103
0/100	76	92	85

Внешний вид маховичков после MAO отвечает требованиям образца-эталона, утвержденного в соответствии с ГОСТ 15.009-91: маховички имели резьбу без поврежденных ниток, препятствующих возможности свинчивания вручную, на их поверхностях отсутствовали острые кромки, параметр шероховатости $Ra_2 = 0,63$ мкм. Приемосдаточные испытания на соответствие требованиям выдерживания статического давления воды не менее 0,9 МПа и в части внешнего вида проводились для каждого изделия. Проверке на работоспособность подверглись три изделия из всей партии, каждое изделие соответствовало требованиям ГОСТ 19681-83, что позволяет результаты проверки считать достоверными и распространить на всю партию. Проверка расхода воды осуществлялась с использованием манометра класса 2,5 ГОСТ 8625-77, секундомера, ротаметра и мерной емкости объемом 2,5 л. При проверке на герметичность установлено, что отсутствуют капли и струи воды при истечении из трубопровода и потение в местах соединений, уплотнений и на поверхностях деталей. Внешний вид маховичков определяли визуально без применения увеличительных приборов с расстояния 0,5 м при естественном и искусственном освещенности 200 лк. Параметры шероховатости определялись на профилографе-профилометре модели 252 «Калибр».

Получение требуемой шероховатости поверхности маховичков водопроводных вентилях после MAO позволяет уменьшить попадание и накопление в устье микронеровностей трудноудаляемых органических образований. Поскольку остатки микрофлоры (продукты белкового и жирового распада, непредельные жирные кислоты и т. п.) являются питательной средой для термофильных и термотолерантных микроорганизмов, в число которых входит, например, кишечная палочка, то необходимость достижения заданной шероховатости носит не только эстетический, но и санитарно-гигиенический характер. Также гладкость обработанной поверхности обеспечивает безопасность кожного покрова пальцев при эксплуатации маховичков.

Заключение. Установлено, что в процессе MAO маховичков водопроводных вентилях при наличии больших рабочих зазоров и использовании полюсных наконечников прямоугольной формы формируется участок с локальным повышением уплотнения ФАП, что, в свою очередь, обеспечивает рост производительности обработки сложнопровильных поверхностей маховичков при учете таких технологических факторов, как скорость резания, величина магнитной индукции и соотношение весовых долей ФАП разной размерности. Определено, что наилучший результат по качеству обработанных поверхностей и производительности процесса MAO достигается при обработке трех маховичков, равномерно распределенных по дуге в секторе, имеющем угол 120° .

Список цитируемых источников

1. Смесители и краны водоразборные. Типы и основные размеры: ГОСТ 25809-96. — Введ. 01.04.98. — Минск : Межгос. науч.-техн. комиссия по стандартизации и нормированию в строительстве (МНТКС) : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1998. — 31 с.
2. *Галкин, П. А.* Большая энциклопедия сантехники / П. А. Галкин, А. Е. Галкина. — М. : Эксмо, 2012. — 288 с.
3. Арматура санитарно-техническая водоразборная. Общие технические условия: ГОСТ 19681-94. — Введ. 01.07.96. — Минск : Межгос. науч.-техн. комиссия по стандартизации и нормированию в строительстве (МНТКС) : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1996. — 20 с.
4. *Макієнко, М. І.* Загальний курс слюсарної справи / М. І. Макієнко ; пер. з рос. В. К. Сидоренко. — Київ : Вища шк., 1994. — 312 с.
5. *Бабичев, А. П.* Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. — Ростов н / Д : ДГТУ, 1998. — 624 с.
6. *Житников, В. П.* Импульсная электрохимическая размерная обработка / В. П. Житников, А. Н. Зайцев. — М. : Машиностроение, 2008 — 413с.
7. *Барон, Ю. М.* Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. — Л. : Машиностроение, 1986. — 172 с.
8. *Сакулевич, Ф. Ю.* Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. — Минск : Наука и техника, 1981. — 326 с.
9. *Крымский, М. Д.* Распределение уплотнения магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре станка / М. Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытаний : сб. науч. тр. / ИПМ АН УССР. — Киев : Ин-т проблем материаловедения АН УССР. — 1980. — С. 92—97.
10. Формирование качества сложнопольных поверхностей при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2016. — 296 с.

Поступил в редакцию 14.03.2019

УДК 621.9048.7+621.78

В. Н. Алехнович, А. В. Алифанов, А. М. Милюкова, О. А. Толкачева

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

РАЗРАБОТКА НАПЛАВОЧНОГО ПЛАЗМОТРОНА, РАБОТАЮЩЕГО НА ПОСТОЯННО-ИМПУЛЬСНОМ НАПРЯЖЕНИИ

Разработан надежный в эксплуатации плазматрон, оснащенный модернизированным порошковым питателем, для осуществления плазменной наплавки износостойких материалов с использованием для питания плазматрона постоянно-импульсного напряжения.

Особенностью разработанной конструкции плазматрона является то, что питатель может осуществлять подачу порошка к плазматрону или в постоянном режиме, или в импульсном режиме определенными порциями. Постоянно-импульсный способ нанесения покрытий снижает термическую нагрузку на упрочняемую деталь, при этом увеличивается скорость диффузии наплавляемого износостойкого материала, что позволяет осуществлять наплавку тонкостенных деталей без их проплавления.

Ключевые слова: плазматрон; постоянно-импульсное напряжение; упрочняемая деталь; тепловая нагрузка.

Рис. 4. Библиогр.: 4 назв.

V. N. Alehnovich, A. V. Alifanov, A. M. Miliukova, O. A. TolkachovaPhysical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
10 Kuprevich St., 220141, Minsk, Belarus, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

DEVELOPMENT OF THE SUPPLY PLASMATRON WORKING ON CONSTANT-PULSE VOLTAGE

A reliable-in-operation plasmatron and a powder feeder have been developed for carrying out plasma surfacing of wear-resistant materials using a constant-pulsed voltage to power the plasmatron.

A specific feature of the developed plasmatron design is that the feeder can supply the powder to the plasmatron either in a constant mode or in a pulsed mode in preset portions. The constant-pulse method of coating deposition reduces the thermal stress on the article to be coated, and in this case the diffusion rate of the deposited wear-resistant material increases, which allows surfacing of thin-walled parts without their melting.

Keywords: plasmatron, constant-pulsed voltage; the article to be coated, the thermal stress.

Fig. 4. Ref.: 4 titles.

Введение. Анализ конструкций и работоспособности плазматронов, изготавливаемых в Германии, России и других странах [1—3], позволил выявить их недостатки и найти пути совершенствования. В частности, корпусная деталь с водоохлаждаемыми полостями у зарубежных плазматронов чаще всего неразборная и ремонту не подлежит. Поэтому, в случае нарушения герметичности или электрической изоляции между электродами, необходимо приобрести новый плазматрон. Предлагаемый постоянно-импульсный способ нанесения упрочняющих покрытий позволит уменьшить термическую нагрузку на упрочняемую деталь, что, соответственно, сведет к минимуму деформационные коробления, возникающие при обработке, и создаст предпосылки для увеличения скорости диффузии наплавляемого износостойкого материала.

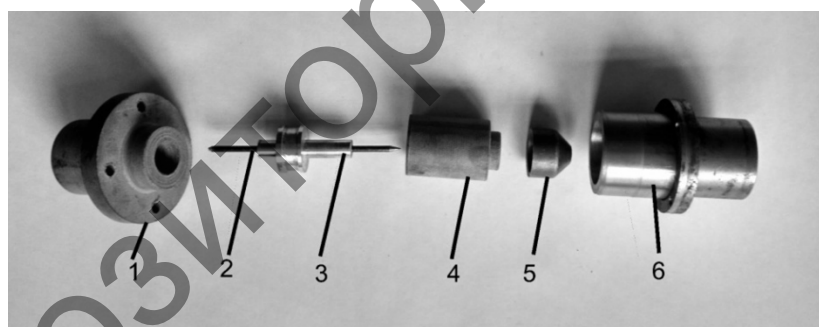
Конструкция разрабатываемого плазматрона состоит из отдельных, полностью разбираемых деталей с возможностью их замены, в том числе изношенной прокладки или изоляционной вставки. В такой конструкции вышедшие из строя, например, в результате теплового старения, резиновые герметизирующие прокладки и изолирующие вставки можно легко заменить без опасения безвозвратного выхода плазматрона из строя. В разработанной конструкции плазматрона для изготовления герметизирующих прокладок применены высоко-

температурные силиконовые резины, фторопласты. Особенностью данной конструкции является то, что питатель может осуществлять подачу порошка к плазмотрону или в постоянном режиме, или в импульсном режиме определенными порциями.

Основная часть. Разработка конструкции разборного плазмотрона. В лаборатории объемных гетерогенных систем Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси разработан и изготовлен плазмотрон на постоянно-импульсном напряжении для наплавки износостойких порошковых материалов (рисунок 1). В плазмотроне электрическая изоляция между анодом и катодом должна выдерживать импульсное напряжение 600 В, так как наличие высоковольтного поджига плазмотрона требует усиленной изоляции между анодом и катодом.

Конструкция плазмотрона состоит из отдельных деталей (см. рисунок 1), полностью разбираемых с возможностью замены любой прокладки из изоляционной вставки: корпуса плазмотрона 6; анода 5, изготовленного из меди; центрирующей изоляционной вставки 4, изготовленной из текстолита (фторопласта); катододержателя 3, изготовленного из латуни; катода 2, изготовленного из лантанированного вольфрама; задней прижимной крышки плазмотрона 1 с системой подачи плазмообразующего газа; уплотнительных прокладок из высокотемпературных силиконовых резин.

Важной деталью плазмотрона является анод (рисунок 2). В разработанной конструкции плазмотрона анод изготовлен из меди. Наружный диаметр анода равен 30 мм, длина — 25 мм, толщина стенки анода — 3 мм, диаметр анодного отверстия — 3 мм, длина анодного отверстия — 10 мм.



а)



б)

Рисунок 1. — Конструкция разработанного плазмотрона в разобранном (а) и собранном (б) виде



Рисунок 2. — Внешний вид анода плазмотрона

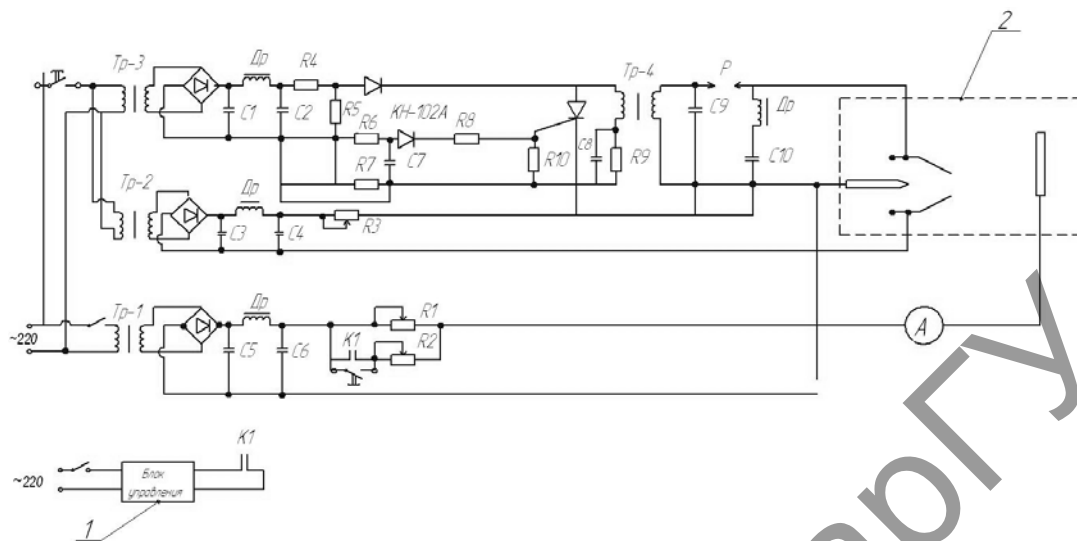
Анод и катодный узел разработанного плазмотрона имеют водяное охлаждение. В существующих плазмотронах часто для герметизации полостей с водой используют кольцевые резиновые прокладки на наружных цилиндрических поверхностях, расположенные в канавках. В разработанной конструкции для повышения надежности герметизации уплотнительные прокладки устанавливаются на торцевых поверхностях, образующих последовательные цепочки и сжимаемые при окончательной сборке плазмотрона (сжимается одновременно, обеспечивая герметичность конструкции в целом).

Для защиты изолятора от излучения дуги внутри плазмотрона (см. рисунок 1, а) между анодом 5 и катодным узлом на катод 2 надета трубка из высокотемпературного керамического материала — окиси циркония.

Анализ тепловой нагрузки отдельных деталей разработанного плазмотрона показывает, что наибольшую тепловую нагрузку несет анод и катод. Нагрев анода дугой мощностью 3 кВт без охлаждения может привести к его расплавлению. Нагрев вольфрамового катода электрической дугой приводит к сильному нагреву, но не расплавлению. Поэтому в конструкции плазмотрона надо предусмотреть интенсивное охлаждение водой анода и незначительное охлаждение корпуса катодного узла. В связи с этим второй вариант разработанного плазмотрона имеет интенсивное охлаждение анода проточной водой и незначительное охлаждение катодного узла, но не катода.

Разработка конструкции и изготовление лабораторного источника питания, позволяющего получить постоянно-импульсное напряжение питания плазмотрона. Для решения поставленной задачи плазменной наплавки износостойких материалов на рабочие поверхности стальных деталей, создания условий, способствующих интенсификации скорости диффузии легирующих наплавляемых элементов вглубь упрочняемой детали, получения тепловых волн в наплавляемом металле, необходимо разработать и изготовить источник питания плазмотрона, позволяющий получить на выходе постоянно-импульсное напряжение [4].

Разработанный источник питания плазмотрона, блок-схема которого представлена на рисунке 3, содержит независимые друг от друга источники дежурной и основной дуги, блок высоковольтного, высокочастотного поджига дежурной дуги. Напряжение питания основной дуги прикладывается между катодом и упрочняемой деталью. Напряжение питания дежурной дуги прикладывается между катодом и анодом плазмотрона. Режим работы плазмотрона с использованием дежурной дуги позволяет повысить стабильность его работы. Разработанный источник питания основной дуги позволяет обеспечить постоянный или постоянно-импульсный режим работы плазмотрона, обеспечивающий стабильную работу на минимальном токе. Кроме того, обеспечивает высокое качество наплавки, сведение к минимуму опасности проплавления тонкостенных упрочняемых поверхностей и возникновения термических поводок. Для питания плазмотрона используется, наряду с постоянной составляющей напряжения, и импульсная составляющая.



1 — блок управления в ручном или автоматическом режиме основной дуги плазмоторна; 2 — плазмоторн; Тр-1 — силовой трансформатор и блок питания основной дуги плазмоторна; Тр-2 — силовой трансформатор блока питания дежурной дуги; Тр-3 — трансформатор и схема получения высоковольтного, высокочастотного напряжения для инициирования плазменной струи

Рисунок 3. — Блок-схема разработанного источника питания плазмоторна

Значение частоты следования и длительность импульсной составляющей, питающей плазмоторн в проектируемом источнике питания, регулируются и устанавливаются оператором в ручном или автоматическом режиме. Численные значения соотношения постоянной и импульсной составляющей будут определяться при осуществлении процесса плазменной наплавки на конкретную деталь.

Блок питания основной дуги собран на базе трансформатора Тр-1, силовых диодов В-200, сглаживающего фильтра С5, С6 и дросселя Др. Для установки требуемых значений тока основной дуги на постоянном токе служит балластное сопротивление R1. Для установки величины импульсной составляющей тока основной дуги служит балластное сопротивление R2. Контактные реле К1 и кнопки К1 позволяют управлять длительностью импульсов основной дуги в автоматическом или ручном режиме. Амперметр в цепи основной дуги позволяет регистрировать ток плазмоторна.

Блок питания дежурной дуги собран на базе трансформатора Тр-2, силовых диодах В-100 и сглаживающем фильтре С3-Др-С4. Для установки требуемого значения тока дежурной дуги служит регулируемое балластное сопротивление R3. Для поджига вспомогательной дуги плазмоторна собрана схема высоковольтного, высокочастотного поджига дежурной дуги.

Блок питания высоковольтного, высокочастотного поджига собран на базе трансформатора Тр-3, силовых диодах Д243 и сглаживающем фильтре С1-Др-С2. Генерирование высоковольтной высокочастотной дуги происходит при пробое разрядного промежутка в разряднике Р.

Генератор содержит низковольтный накопитель — конденсатор С1, цепь заряда накопителя (зарядное сопротивление, диод Д), коммутатор на тиристоре КУ 202Н.

Цепь управления тиристором состоит из сопротивления R1, R3, R4, R5, конденсатора С2 и переключающего динистора КН102А, импульсного трансформатора Тр, высоковольтного накопителя на базе конденсатора С3 и высоковольтного разрядника Р.

Рабочие импульсы генерируются при разряде конденсатора С1 через импульсный трансформатор Тр. Трансформированный импульс заряжает конденсатор С3 до напряжения срабатывания разрядника Р (примерно 5...7 кВ). Накопительный конденсатор С3 разряжается на дроссель фильтра Др и конденсаторы С4 и С5. При этом в контуре, образованном конденсатором С3, обмоткой дросселя Др и конденсаторами С4 и С5, возникают высоковольтные высокочастотные колебания, возбуждающие дежурную дугу.

В результате выполненных работ для питания плазмотрона изготовлен лабораторный источник постоянно-импульсного напряжения для токов величиной от 50 до 200 ампер.

Изображение на экране осциллографа постоянно-импульсного тока, протекающего через плазмотрон, представлено на рисунке 4.

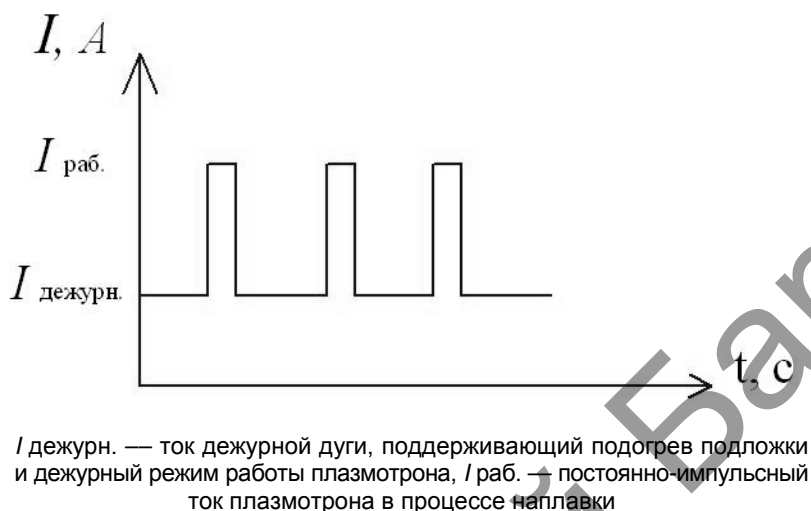


Рисунок 4. — График зависимости постоянно-импульсного тока от времени при работе постоянно-импульсного источника питания

Заключение. Конструкция разработанного плазмотрона состоит из отдельных деталей, полностью разбираемых с возможностью их замены. В такой конструкции вышедшие из строя в результате теплового старения резиновые герметизирующие прокладки и изолирующие вставки можно легко заменить, без опасения безвозвратного выхода плазмотрона из строя. Для изготовления герметизирующих прокладок применены высокотемпературные силиконовые резины, фторопласты, которые устанавливаются на торцевых поверхностях, образующих последовательные цепочки и сжимаемые при окончательной сборке плазмотрона одновременно, обеспечивая герметичность конструкции в целом.

Особенностью данной конструкции является то, что питатель может осуществлять подачу порошка к плазмотрону как в постоянном режиме, так и в импульсном режиме определенными порциями.

Список цитируемых источников

1. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. — М., 1990. — 244 с.
2. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки ; под ред. В. С. Степанина, Н. Г. Шестеркина. — М. : Машиностроение, 1985. — 240 с.
3. Плазменное напыление [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding>. — Дата доступа: 12.10.2017.
4. Плазменная наплавка износостойких порошковых материалов на рабочие поверхности стальных деталей / А. В. Алифанов [и др.] // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. — 2018. — Вып. 6. — С. 39—44.

Данная работа выполнена при поддержке БР ФФИ в рамках задания Т17-008.

Поступил в редакцию 03.05.2019

УДК 621.9048.7+621.78

В. Н. Алехнович, А. В. Алифанов, А. М. Милокова, О. А. ТолкачеваГосударственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,
ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru**РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВОГО ПИТАТЕЛЯ, ПОЗВОЛЯЮЩЕГО
ОСУЩЕСТВЛЯТЬ РАБОТУ НАПЛАВОЧНОГО ПЛАЗМОТРОНА
В ПОСТОЯННО-ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ**

Разработана конструкция порошкового питателя, с помощью которого подача к плазматрону наносимого на изделие высокопрочного порошка осуществляется в постоянном и импульсном режимах. Это обеспечивает высокое качество наплавки, а также предотвращает проплавление тонкостенных упрочняемых изделий и возникновение термических поводов.

Ключевые слова: наплавочный плазматрон; порошковый питатель; постоянно-импульсный режим.

Рис. 4. Библиогр.: 4 назв.

V. N. Alehnovich, A. V. Alifanov, A. M. Miliukova, O. A. TolkachovaPhysical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
10 Kuprevich St., 220141, Minsk, Belarus, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru**DEVELOPMENT OF POWDER FEEDER, ALLOWING THE OPERATION
OF THE SURFACE PLASMATRON IN CONSTANT-PULSE MODE**

The design of the powder supply device has been developed. It promotes, with which the supply of high-strength powder deposited on the product to the plasmatron is carried out in constant and pulsed modes. It ensures high quality of surfacing, and also prevents penetration of thin-walled hardened products and the occurrence of thermal leash.

Keywords: surface plasmatron; powder feeder; constant-pulse mode.

Fig. 4. Ref.: 4 titles.

Введение. Плазменная наплавка высокопрочных порошковых материалов широко используется для упрочняющей обработки деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивного трения. На соответствующих предприятиях обычно применяют высококачественные и достаточно дорогие плазматроны зарубежного производства. К недостаткам этих плазматронов относится невозможность замены какой-либо внутренней детали в случае выхода ее из строя, так как зарубежные плазматроны выполнены неразборными. В лаборатории объемных гетерогенных систем Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси разработан плазматрон, который не уступает зарубежным аналогам по эксплуатационными характеристикам, но допускает возможность замены вышедших из строя деталей. Это позволит значительно продлить срок службы плазматрона. Кроме того, в комплекте с плазматроном разработан оригинальный порошковый питатель, который позволяет осуществлять постоянно-импульсную подачу упрочняющего порошка к плазматрону, благодаря чему уменьшается термическая нагрузка на упрочняемую деталь. Это сводит к минимуму деформационные коробления, возникающие при упрочняющей высокотемпературной обработке, и уменьшает риск проплавления тонкостенных деталей.

В данной статье рассмотрены особенности конструкции разработанного порошкового питателя и принцип его работы в процессе наплавки.

Основная часть. Использование при плазменном нанесении покрытий порошковых материалов экономически выгоднее, чем использование проволок, так как из многих износостойких материалов, имеющих высокую твердость и хрупкость, изготовить проволоку дорого и сложно.

На практике из любого напыляемого материала можно изготовить порошок. Размер частиц упрочняющего порошка выбирается исходя из характеристик плазмотрона, теплофизических свойств напыляемого материала (температуры плавления, удельной теплоемкости, плотности). Применение мелкодисперсного порошка позволяет получать покрытие большой плотности (практически без пор). Выбирая дисперсность порошка, необходимо учитывать, что мелкодисперсный порошок имеет большую поверхность, а значит, и наличие большого количества окислов на поверхности частиц, которые при нанесении покрытия перейдут в материал покрытия. При нанесении плазменных покрытий необходимо применять порошки одного размера, так как разброс частиц по размеру приведет к нарушению однородности покрытия из-за различия степени их расплавления и скорости движения в плазменной струе. Важным моментом в разрабатываемой конструкции плазмотрона, предназначенного для наплавки износостойких порошковых материалов, является выбор места подачи упрочняющего порошка в плазменную струю.

Учитывая вышесказанное и рассмотрев схемы мест введения мелкодисперсного порошка в плазменную струю (рисунок 1, а—з), примем вариант г (подача упрочняющего порошка на наружный срез отверстия анода) [1—3].

Под действием газотермических сил и сил инерции порошок смешивается с плазмой, нагревается и ускоряется в ней. При этом необходимо выбрать и зафиксировать длину дуги и тем самым стабилизировать режим генерации плазмы.

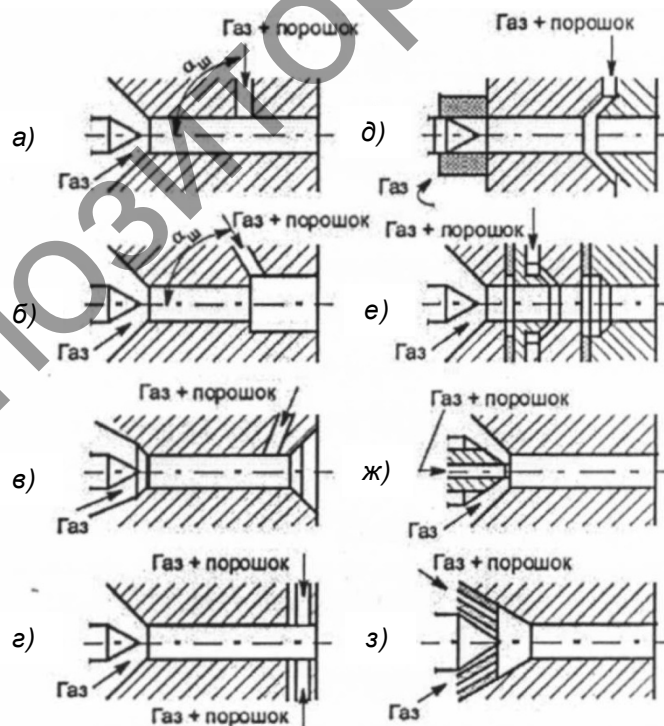


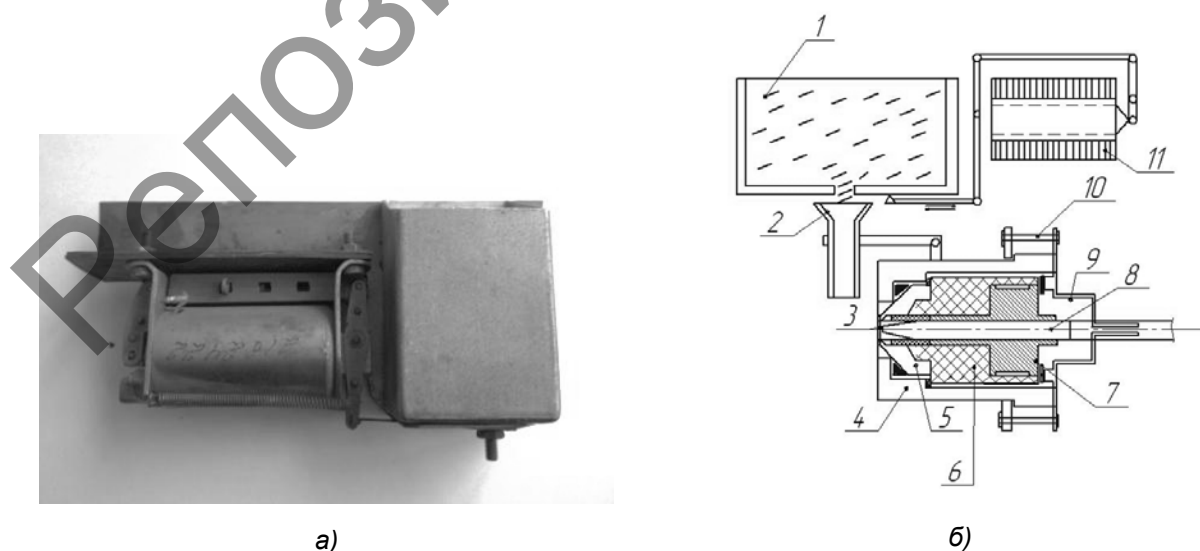
Рисунок 1. — Варианты схем ввода порошка в плазменную струю

В данной работе место подачи порошка в плазменную струю выбрано за наружным срезом анодного сопла, что позволяет упростить конструкцию предлагаемого плазмотрона и увеличить время нахождения частиц в плазме при наиболее высокой температуре. Частицы напыляемого материала в момент ввода их в плазменную струю нагреваются и перемещаются в направлении потока. Степень нагрева и скорость частиц порошка зависят от тепловых и газодинамических характеристик плазменной струи, а также от размера, формы и материала частиц порошка. Состояние частиц в плазменной струе, степень их нагрева и расплавления определяли по изменению формы частиц. С этой целью частицы распыляли на холодную металлическую поверхность и с помощью оптического микроскопа изучали изменение формы частиц. По деформации частиц при ударе о холодную поверхность металла можно судить о степени их расплавления. Использование предлагаемой конструкции позволит устанавливать необходимые режимы работы плазмотрона (ток дуги и расход плазмообразующего газа), позволяющие осуществить расплавление частиц необходимого размера с определенными теплофизическими свойствами.

Рассмотрим конструкцию порошкового питателя, позволяющего осуществлять подачу к плазмотрону наносимого на изделие порошка в постоянном и импульсном режимах (рисунок 2).

Упрощенный принцип действия плазмотрона (см. рисунок 2) следующий: наносимый упрочняющий порошок из питателя 1 по специальной трубке 2 подается к анодному соплу 3, расплавляется и поступает на упрочняемую поверхность изделия. В отличие от существующих конструкций, предлагаемый плазмотрон может быть разобран и собран благодаря съемной прижимной крышке 9, которая с помощью болтов 10 крепится к корпусу 4 плазмотрона.

В случае традиционной подачи порошка в разветвленные каналы анодного сопла плазмотрона процесс импульсно-периодической подачи осуществить невозможно. Экспериментально установлено, что температура аргонно-плазменной струи на срезе анодного отверстия достигает 10 000...11 000 °С. По мере увеличения расстояния от среза анодного сопла плазмотрона температура аргонно-плазменной струи уменьшается. Так, на расстоянии 20...30 мм от сопла температура уменьшается до 6 000...7 000 °С. Поэтому для гарантированного расплавления порошкового материала было решено подавать порошок в струю по трубке непосредственно за анодным отверстием сопла.



а — порошковый питатель; б — схема плазмотрона: 1 — порошковый питатель; 2 — трубка для подачи порошка; 3 — анодное сопло плазмотрона; 4 — корпус; 5 — анод; 6 — изолятор; 7 — катододержатель; 8 — катод; 9 — прижимная крышка; 10 — крепежный болт; 11 — вибратор

Рисунок 2. — Внешний вид (а) и схема плазмотрона в сборе с питателем (б)

На рисунке 3 схематически показан второй вариант питателя с вибратором.

Модернизированный узел представляет собой емкость 1, содержащую порошок 2, дозирующий стержень 3, связанный креплением 6 с электромагнитной катушкой 4, находящейся в постоянном магнитном поле, образованном магнитом 5. Под действием переменного напряжения, подводимого к электромагнитной катушке, дозирующий стержень 3 совершает вертикальное возвратно-поступательное движение. Амплитуда и частота колебаний устанавливаются путем изменения силы тока и частоты питающего напряжения.

Длительность и частота подачи порций порошка управляется автоматически посредством специальной схемы управления или оператором в ручном режиме.

Для предотвращения слипания напыляемого порошка в бункере питателя в обеих конструкциях питателей к корпусу бункера с порошком присоединен малогабаритный вибратор, состоящий из малогабаритного коллекторного электродвигателя постоянного тока с укрепленным на валу несбалансированным диском. В зависимости от скорости вращения вала электродвигателя соответствующее усилие прикладывается к бункеру.

На рисунке 4 показано изменение скорости высыпания порошка из бункера при изменении скорости вращения вала электродвигателя вибратора (m — количество высыпаемого порошка из бункера, г; n_1, n_2, n_3 — скорость 200, 400, 800 об./мин соответственно).

При скорости вращения вала электродвигателя вибратора от 200 об./мин до 400 об./мин порошок из бункера высыпается более интенсивно. При скорости вращения 800 об./мин амплитуда вибрации и, соответственно, количество высыпаемого порошка уменьшается.

Постоянно-импульсный режим работы плазмотрона предполагает нагрев упрочняемой поверхности детали до 0,7...0,75 % температуры плавления металла при постоянной составляющей основной дуги плазмотрона. При необходимости осуществления процесса наплавки оператор включает подачу импульсной составляющей блока питания основной дуги, а также импульсную подачу порции упрочняющего порошка питателем.

Импульсное кратковременное увеличение мощности плазмотрона и одновременная подача порции упрочняющего порошка (2...4 с) позволяет осуществить качественную наплавку, но при этом исключить процесс сквозного проплавления наплавляемой поверхности за счет отвода тепла в основную массу детали.

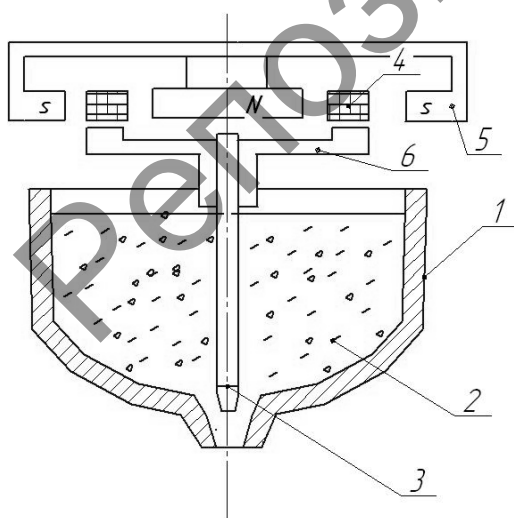


Рисунок 3. — Модернизированный узел питателя с дозирующим вибрирующим электродом

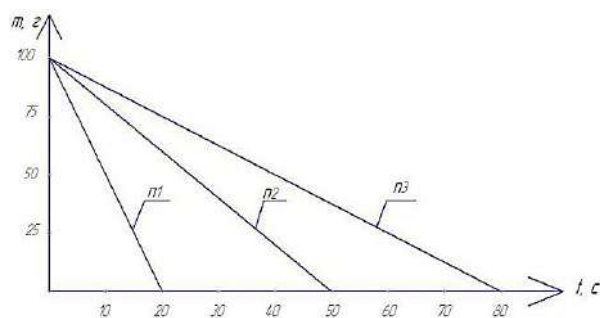


Рисунок 4. — График скорости высыпания порошка

Заключение. Экспериментально установлено, что температура аргонно-плазменной струи на срезе анодного отверстия достигает 10 000...11 000 °С. По мере увеличения расстояния от среза анодного сопла плазмотрона температура струи снижается. Например, на расстоянии 20...30 мм от сопла температура уменьшается до 6 000...7 000 °С. В связи с этим для гарантированного расплавления порошкового материала решено подавать порошок в аргонно-плазменную струю непосредственно за анодным отверстием сопла, где температура достигает значений 10 000...11 000 °С. Для повышения качества наносимых покрытий в разработанном порошковом питателе имеется дозирующий стержень, который под воздействием переменного напряжения совершает возвратно-поступательное движение, благодаря чему можно управлять количеством подаваемого порошка в зону наплавки. Таким образом, предлагаемые конструкции питателя позволяют подавать порошок в зону расплавления или в постоянном или импульсном режимах в зависимости от поставленных задач.

Список цитируемых источников

1. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. — М., 1990. — 244 с.
2. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Мorigаки ; под ред. В. С. Степанина, Н. Г. Шестеркина. — М. : Машиностроение, 1985. — 240 с.
3. Плазменное напыление [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding>. — Дата доступа: 12.10.2017.
4. Плазменная наплавка износостойких порошковых материалов на рабочие поверхности стальных деталей / А. В. Алифанов [и др.] // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. — 2018. — Вып. 6. — С. 39—44.

Данная работа выполнена при поддержке БР ФФИ в рамках задания Т17-008.

Поступил в редакцию 03.05.2019

УДК 531.16:51-74

А. В. Алифанов, И. А. Богданович, С. И. Русан, В. В. Цуран

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ВЫСОКОТОЧНОГО, ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО МЕТОДА ЗАТОЧКИ РЕЖУЩЕГО ЛЕЗВИЯ ГЕЛИКОИДАЛЬНЫХ РУБИЛЬНЫХ НОЖЕЙ

Проведен анализ разработанного по заданию 3.2.01 Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «Материалы в технике» устройства для заточки режущих лезвий геликоидальных рубильных ножей, а также методов настройки механизмов заточки по крайним точкам и по средней точке режущего лезвия. Отмечены их преимущества и недостатки. Сделан вывод о целесообразности модернизации устройства с целью повышения точности и качества заточенного лезвия и повышения производительности процесса заточки. Определены задачи модернизации.

Ключевые слова: геликоидальные рубильные ножи; устройство для заточки ножей; методы настройки механизма заточки; переменный угол заточки; точность; автоматизация; производительность.

Рис. 5. Библиогр.: 4 назв.

A. V. Alifanov, I. A. Bogdanovich, S. I. Rusan, V. V. Tsuran

Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str, 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

JUSTIFICATION OF THE DEVELOPMENT OF AN IMPROVED HIGH-PRECISION, HIGH-PERFORMANCE METHOD OF CUTTING BLADE OF HELICOIDAL CUTTING BLADES

The study was done in accordance with task 3.2.01 of the State research program “Physical Materials Science, New Materials and Technologies”, subprogram “Materials in Engineering”. The developed device for sharpening the cutting blades of helicoidal chipping knives, as well as the methods for setting the sharpening mechanisms at the extreme points and at the midpoint of the cutting blade were analyzed. Their advantages and limitations have been noted. The conclusion is made about the feasibility of upgrading the device in order to improve the accuracy and quality of the sharpened blade, and increase the productivity of the sharpening process. The tasks of modernization have been defined.

Key words: helical chipping knives; knife sharpening device; sharpening mechanism adjustment methods; variable sharpening angle; accuracy; automation; productivity.

Fig. 5. Ref.: 4 titles.

Введение. В результате проведения научно-исследовательских работ в рамках задания 3.2.01 (2016—2018 годы) разработано экспериментальное устройство, в котором закрепление рубильного ножа происходит в специальном барабане без принудительного изгиба, что исключает возникновение внутренних напряжений, разработаны основы расчета траектории шлифования режущего лезвия геликоидального ножа, позволяющего получать заданную разницу угла заточки в начале и в конце режущего лезвия; разработан метод настройки механизма шлифования геликоидальных рубильных ножей по крайним (концевым) точкам и средней точке режущего лезвия. Однако методы расчета нуждаются в уточняющей и упрощающей доработке, в том числе с целью возможности их компьютеризации, а работу шлифовального устройства необходимо перевести с ручного управления на автоматическое.

С учетом этого основными задачами данного проекта являются разработка уточненной математической модели процесса шлифования режущего лезвия геликоидальных ножей и составление компьютерной программы для расчета геометрических параметров элементов механизма шлифования. С целью повышения производительности процесса шлифования режущих лезвий геликоидальных рубильных ножей предполагается также разработать пакетный способ шлифования, позволяющий одновременно обрабатывать два и более геликоидальных ножей.

Предлагается также, с целью увеличения возможностей по выбору скорости продольного перемещения барабана с закрепленной заготовкой геликоидального ножа относительно вращающегося шлифовального круга, применить мотор-редуктор и произвести соответствующую конструктивную доработку устройства для заточки геликоидальных ножей.

Основная часть. Анализ разработанных методов настройки механизма заточки режущего лезвия геликоидальных рубильных ножей [1].

На рисунке 1 показан общий вид геликоидального рубильного ножа.

Из рисунка видно, что угол заточки изменяется вдоль лезвия ножа, причем начальный угол заточки меньше конечного ($\alpha_2 > \alpha_1$), что значительно усложняет процесс заточки.

При выполнении задания 3.2.01 в течение 2016—2018 годов было разработано два метода настройки механизма для высокоточной заточки режущего лезвия геликоидальных рубильных ножей: по крайним точкам и по средней точке режущего лезвия.

Первый метод (по концевым точкам) наиболее эффективен при заточке ножей, имеющих малые углы депланации (отклонения) $\lambda \leq 5^\circ$.

На рисунке 2 схематически показан геликоидальный рубильный нож, заточенный при настройке механизма по концевым точкам A, B .



Рисунок 1. — Геликоидальный рубильный нож

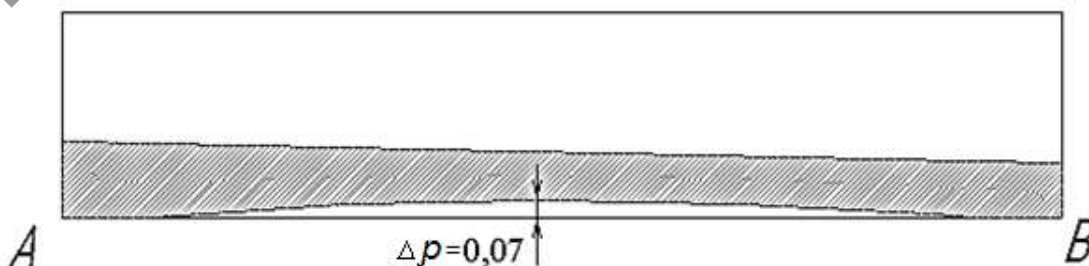


Рисунок 2. — Схема рубильного ножа, заостренного при настройке механизма по концевым точкам A, B

Незатемненная часть лезвия у кромки AB не заточена (на рисунке ее площадь значительно увеличена). Если заготовка представляет собой полуфабрикат — пластину со скошенным под углом α_2 краем, — то незатемненная на рисунке нижняя ее часть остается заостренной под этим углом.

Расчеты показали, что у данного ножа, имеющего длину 300 мм и угол депланации 5° , незаточенной осталась центральная часть лезвия с максимальной величиной отклонения $\Delta p = 0,07$ мм. Учитывая, что допускаемая погрешность составляет 0,2 мм, полученный результат можно рассматривать как достаточно точный.

Настройка описанного выше механизма для заточки рубильных ножей по крайним точкам кромки AB накладывает жесткие ограничения на выбор угла депланации.

Для расширения этих пределов с сохранением качества заточки механизм для заточки рубильных ножей можно настраивать иначе — по средней точке K (рисунок 3) ребра AB заготовки.

На рисунке 3 показан геликоидальный рубильный нож, заточенный при настройке механизма по средней точке режущей кромки лезвия. Искривление режущей кромки значительно увеличено.

Из рисунка 3 видно, что отклонение от прямолинейности заточенной режущей кромки по ее краям $\Delta p = 0,05$ мм.

Согласно ГОСТ 17432-87 [2] отклонение от прямолинейности не должно превышать 0,2 мм на всей длине ножа (в нашем случае $l = 300$ мм). Рубильные ножи выбранного типа и размеров имеют углы заострения $\alpha_1 = 29^\circ 42'$, $\alpha_2 = 34^\circ 42'$, т. е. разность углов равна 5° , а отклонение Δp составляет от 0,05 до 0,07 мм на длине 300 мм, что значительно меньше регламентированной погрешности 0,2 мм [3; 4].

Следовательно, рассмотренный механизм заточки по крайним (см. рисунок 2) и средней (см. рисунок 3) точкам режущей кромки лезвия удовлетворяет требованиям ГОСТ и может быть использован в производстве в процессах шлифования режущей кромки геликоидальных ножей.

Предлагаемые методы повышения точности, производительности и качества процесса заточки режущего лезвия геликоидальных ножей. В настоящей работе поставлена задача еще больше уменьшить отклонение от прямолинейности заточенной режущей кромки, для чего необходимо произвести уточнение математических расчетов.

В исследованиях, выполненных в 2016—2018 годах, задача определения геометрических параметров механизма шлифования сводилась к алгебраическому уравнению высокого порядка с трудно анализируемыми корнями. Также были разработаны два алгоритма последовательных приближений, сходимость которых зависит от разницы углов ($\alpha_2 - \alpha_1$). При изменении разницы углов необходимо выполнять новый расчет. Значит, возникает необходимость в составлении компьютерной программы расчетов.

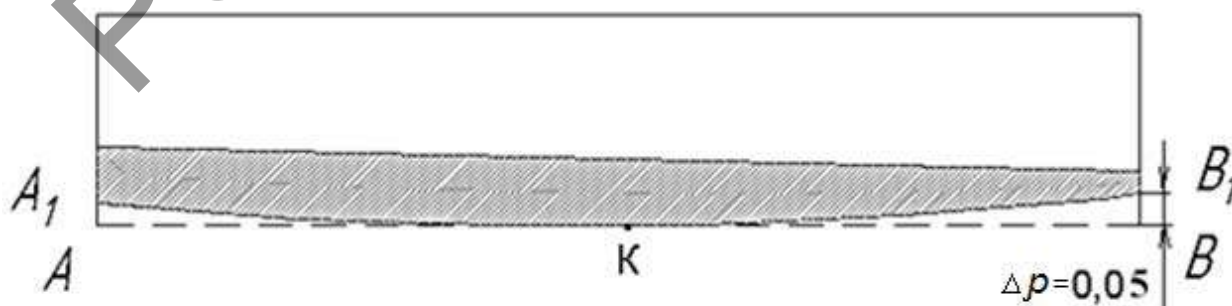


Рисунок 3. — Схема рубильного ножа, заостренного при настройке механизма по средней точке режущей кромки лезвия

Для оперативного получения информации в процессе поисков оптимального варианта геометрических параметров механизма шлифования планируется разработать приближенный (инженерный) метод расчетов с достаточной точностью при малых углах депланации. Пределы его применимости следует установить с помощью точного метода последовательных приближений.

Результаты приближенного (инженерного) метода могут рационально применяться при использовании точного метода последовательных приближений в качестве первого приближения.

Как видно из рисунков 2 и 3, при использовании методов настройки механизма шлифования по крайним точкам или по средней точке режущего лезвия остаются незаточенными участки лезвия, расположенные в центральной части (см. рисунок 2), или ближе к краям режущего лезвия (рисунок 3). При обеспечении полной заточки лезвия происходит срез излишней части металла на концах режущего лезвия (см. рисунок 2) или в его центре (см. рисунок 3).

Для устранения этих недостатков в данной работе предполагается разработать метод настройки механизма шлифования по точкам, расположенным между концами и центром режущего лезвия. В соответствии с полученными результатами расчетов будет произведена модернизация опытного устройства для заточки режущих лезвий геликоидальных рубильных ножей, разработанного ранее при выполнении задания 3.2.01 в 2016—2018 годах.

Для существенного повышения производительности разработанного метода шлифования геликоидальных ножей в данной работе запланировано изучить и реализовать задачу одновременного шлифования двух и более геликоидальных ножей (так называемый пакетный способ). Этот способ находит применение в процессах шлифования обычных ножей с прямолинейной режущей кромкой. Наличие винтообразной геликоидальной режущей кромки существенно усложняет задачу.

С целью повышения качества шлифования поверхностей и производительности процесса шлифования в данной работе предполагается модернизировать механизм управления процессом шлифования. Первоначально было разработано опытное устройство для заточки геликоидальных ножей с ручным управлением (рисунок 4).

Разработанное устройство отличается низкой производительностью. Кроме того, из-за неравномерной скорости вращения рукой маховичка поступательное перемещение барабана с установленным ножом, осуществляется также неравномерно, что приводит к получению некачественной поверхности режущего лезвия.

Для устранения этих недостатков разработанное устройство было модернизировано и вместо ручного управления установлено электроприводное.

Представим фотографию устройства, укомплектованного электродвигателем и редуктором (рисунок 5).



Рисунок 4. — Устройство для заточки геликоидальных рубильных ножей с ручным управлением



Рисунок 5. — Фотография устройства для заточки геликоидальных рубильных ножей, укомплектованного электродвигателем

К недостаткам модернизированного устройства следует отнести ограниченные возможности по выбору числа оборотов выходного вала редуктора, соединенного с электродвигателем и, соответственно, скорости поступательного движения барабана с закрепленным ножом относительно вращающегося шлифовального круга.

Для устранения этого недостатка предполагается применить мотор-редуктор и произвести соответствующее конструктивное изменение в устройстве для заточки режущих лезвий геликоидальных рубильных ножей.

Заключение. Проведен анализ разработанного в предыдущем задании 3.2.01 (2016—2018 годы) устройства для заточки режущих лезвий геликоидальных рубильных ножей, а также методов настройки механизмов заточки по крайним точкам и по средней точке режущего лезвия. Отмечены их преимущества и недостатки. Сделан вывод о целесообразности модернизации устройства с целью повышения точности и качества заточенного лезвия, и повышения производительности процесса заточки. Определены задачи модернизации. В частности, необходимо разработать приближенный метод расчетов геометрических параметров механизма шлифования, достаточно точный при малых углах депланации, а пределы его применимости следует установить с помощью точного метода последовательных приближений.

Для повышения качества и точности заточки признано необходимым разработать метод настройки механизма шлифования по точкам, находящимся между концевыми и средней точками режущего лезвия.

В целях повышения производительности процесса шлифования необходимо изучить возможность одновременного шлифования двух и более геликоидальных ножей, а также произвести автоматизацию процесса шлифования путем применения мотора-редуктора.

Список цитируемых источников

1. Алифанов, А. В. Бездефектный способ заточки геликоидального рубильного ножа / А. В. Алифанов, С. И. Русан, В. В. Цуран // LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. — 49 с.
2. Технические требования к рубильным ножам : ГОСТ 17432-87. — М. : Гос. ком по стандартам, 1987.
3. Конструкция, характеристика, размеры рубильных ножей : ОСТ 13-32-74. — М. : Гос. ком по стандартам, 1974.
4. Ножи для рубительных машин. Технические условия : ГОСТ 17342-81. — М. : Гос. ком по стандартам, 1981.

Данная работа выполнена в рамках задания 3.2.14 Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Материалы в технике» (срок выполнения: 2019—2020 гг.).

Поступил в редакцию 03.05.2019

УДК 669.056.017

В. С. Голубев¹, И. И. Вегера¹, О. Чернашеюс², В. В. Чаевский³¹Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220004, Минск, Республика Беларусь, gvs_fti@mail.ru²Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса, Саулетекио алл., 11, Вильнюс, Литовская Республика³Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Свердлова, 13а, 220006 Минск, Республика Беларусь

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ С ИЗМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

В данной работе исследованы особенности влияния энергетических параметров и технологических факторов на эффективность поверхностной обработки с использованием лазерных способов: легирования, модифицирования, наплавки. Изучено структурно-фазовое состояние, качество поверхностных и переходных слоев.

Ключевые слова: лазерное легирование; модифицирование; наплавка; поверхностный слой; микроструктура; легирующие элементы; эксплуатационные характеристики.

Рис. 6. Библиогр.: 11 назв.

V. S. Golubev¹, I. I. Vegera¹, O. Chernasheyus², V. V. Chaevsky³¹Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevicha Str., 220004 Minsk, the Republic of Belarus, gvs_fti@mail.ru²Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius³Belarusian State Technological University, 13a Sverdlova str., 220006 Minsk, the Republic of Belarus

LASER TREATMENT OF MATERIALS WITH CHANGE OF CHEMICAL COMPOSITION OF THE SURFACE LAYER

In this paper, the features of the influence of energy parameters and technological factors on the efficiency of surface treatment, using such laser methods as alloying, modifying and surfacing, have been investigated. The structure-and-phase state and the quality of the surface and transition layers have been studied.

Key words: laser alloying; modification; surfacing; surface layer; microstructure; alloying elements; performance characteristics.

Fig. 6. Ref.: 11 titles.

Введение. Преимущество применения технологических лазеров обусловлено возможностями сфокусированного лазерного излучения: бесконтактность и локальность воздействия, минимальная зона термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, отсутствие коробления, повышение дисперсности структуры и т. д. Оплавление поверхностного слоя при такой обработке обеспечивает возможность лазерной наплавки, лазерного легирования и модифицирования (как промежуточного процесса между наплавкой и легированием) поверхностного слоя элементами, наносимыми на поверхность в виде шликерной обмазки, напыленного покрытия, инъекцией порошка в ванну расплава, наведенную лазерным лучом [1—6]. Процесс лазерного легирования происходит путем конвективного массопереноса в жидкой ванне и диффузионного перераспределения легирующих элементов. В условиях лазерного легирования, в отличие от обычной химико-технической обработки (ХТО), можно обеспечить очень высокое насыщение матрицы легирующим элементом на значительную глубину (до 1 мм) за короткое время. Введение различных легирующих элементов при лазерной обработке приводит к существенному изменению эксплуатационных характеристик материала (твердость, контактная

прочность, износостойкость, жаропрочность и др.). Этот метод позволяет создавать широкий спектр легированных поверхностных слоев в зависимости от конкретных условий эксплуатации. По сравнению с ранее известными способами (например, цементация, азотирование, борирование и т. д.) модификация поверхности легированием при локальном лазерном нагреве и высоких скоростях плавления и затвердевания обладает рядом преимуществ: экономией легирующего материала, минимальным объемом последующей механической обработки, отсутствием деформации деталей и необходимостью последующей термической обработки, достаточно хорошим воспроизводством.

Применение лазерного излучения является перспективным также в технологии наплавки износостойких покрытий [1—6]. При этом обеспечивается высокая прочность сцепления покрытия с основой вследствие частичного проплавления и минимального теплового воздействия на обрабатываемое изделие. Появляется реальная возможность создания износостойких слоев на поверхностях деталей, изготовленных из недорогих и недефицитных марок сталей и сплавов. Кроме того, использование энергии лазера позволяет восстанавливать отдельные изношенные места с повышением физико-механических свойств поверхности. При этом процесс осуществляется таким образом, что основа подплавляется минимально, а свойства покрытия определяются в основном свойствами присадочного материала. В зависимости от вида детали можно проводить лазерное оплавление предварительно нанесенного покрытия или непосредственно лазерную наплавку при подаче в зону лазерного нагрева присадочного материала в виде порошка или проволоки. При этом обеспечиваются высокое качество наплавленного слоя, высокая прочность его сцепления вследствие металлургической связи с основой и минимальное тепловое воздействие на обрабатываемую деталь. В общем, при легировании идет расплавление тонкого слоя присадочного материала и металла основы и их интенсивное перемешивание для получения заданного состава поверхностного слоя. При лазерной наплавке процесс ведут с минимальным перемешиванием с основой (до 10...15 %), обеспечивая металлургическую связь, когда состав и свойства поверхностного слоя практически полностью определяются составом и структурой присадочного материала после лазерной обработки.

Следует отметить, что большие потенциальные возможности этих методов обработки зачастую сложно реализовать на практике вследствие не всегда верного выбора энергетических характеристик луча, таких как интенсивность излучения, частота импульсов облучения и т. д. Помимо этого, сложности с правильным выбором легирующих и наплавочных материалов, связующих компонентов, отсутствие достаточной информации относительно количественных показателей составов, получаемых физико-механических и эксплуатационных свойств до сих пор серьезно сдерживают развитие процессов лазерного легирования-модифицирования-наплавки как весьма перспективных способов лазерной поверхностной обработки.

Методика эксперимента. В рамках данной работы проведено изучение геометрических размеров, качества и структуры поверхностных слоев, создаваемых в результате лазерной обработки легирования-модифицирования-наплавки, на образцах на основе металлического порошка со средним размером частиц 3 мкм марки DIN 1.2083, изготовленных селективным лазерным спеканием (SLS — selective laser sintering) [7] и из стали 40X. Химический состав порошка в первом случае был следующим: С ~0,4%; Si ≤ 1%; Mn ≤ 0,8%; P ~0,03%; S ~0,03%; Cr ~1,3%; Ni ≤ 0,8%. В качестве легирующих материалов использовались порошки вольфрама и различных химических соединений: W₂B₅, Co₃B, B₄C, TiC, Cr₂₃C₆, TiN, TaSi₂. Предварительно на поверхности формировали слой, нанося на нее шликерным методом вышеуказанные порошки. Это обеспечивает экономный расход легирующих элементов и возможность получения в зоне упрочнения большой концентрации легирующего элемента, которая легко регулируется толщиной слоя обмазки. Следует отметить, что именно этим способом можно наносить самые разнообразные легирующие композиции, что нельзя

осуществить никаким другим методом. Толщина слоя составляла ~100...150 мкм. Дальнейшее увеличение толщины слоя (свыше 300 мкм) обычно приводит к большой шероховатости поверхности, появлению трещин и пор.

При лазерном модифицировании и наплавке предварительно на образцы указанных сталей шликерным методом наносили порошок износостойкого состава, содержащего карбиды вольфрама, хрома, бориды и другие тугоплавкие соединения. Для наплавки использовали порошки износостойких сплавов на кобальтовой ПГ-10К-01 и никелевой ПГ-10Н-01 основах, а также Т-Термо 650 (ПГ-10Н-01 + 50% WC). Обработку поверхности проводили с использованием CO₂-лазера непрерывного действия «Комета-2».

Режимы лазерной обработки для сталей подбирались в зависимости от плотности мощности лазерного излучения установки, линейных скоростей перемещения лазерного луча, расстояния между лазерными дорожками и диаметра лазерного пятна. Микроструктурный анализ проводили на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-2 на травленых шлифах в поперечных сечениях перпендикулярно поверхности, элементный — на электронном микроскопе SEM 515 с приставкой EDAX, дюрометрический — на микротвердомере ПМТ-3.

Результаты исследований и обсуждение. Установлено, что размеры легированной зоны зависят в основном от энергетических параметров излучения и фокусирующей системы, окружающей газовой атмосферы. Установлено, что при оптимальных режимах обработки вся зона поверхностного легирования может иметь достаточно однородный состав, зависящий в основном от толщины слоя предварительно нанесенного материала (TaSi₂) и глубины оплавления (рисунок 1). Аналогичный вид имели структуры при легировании порошком В₄С.

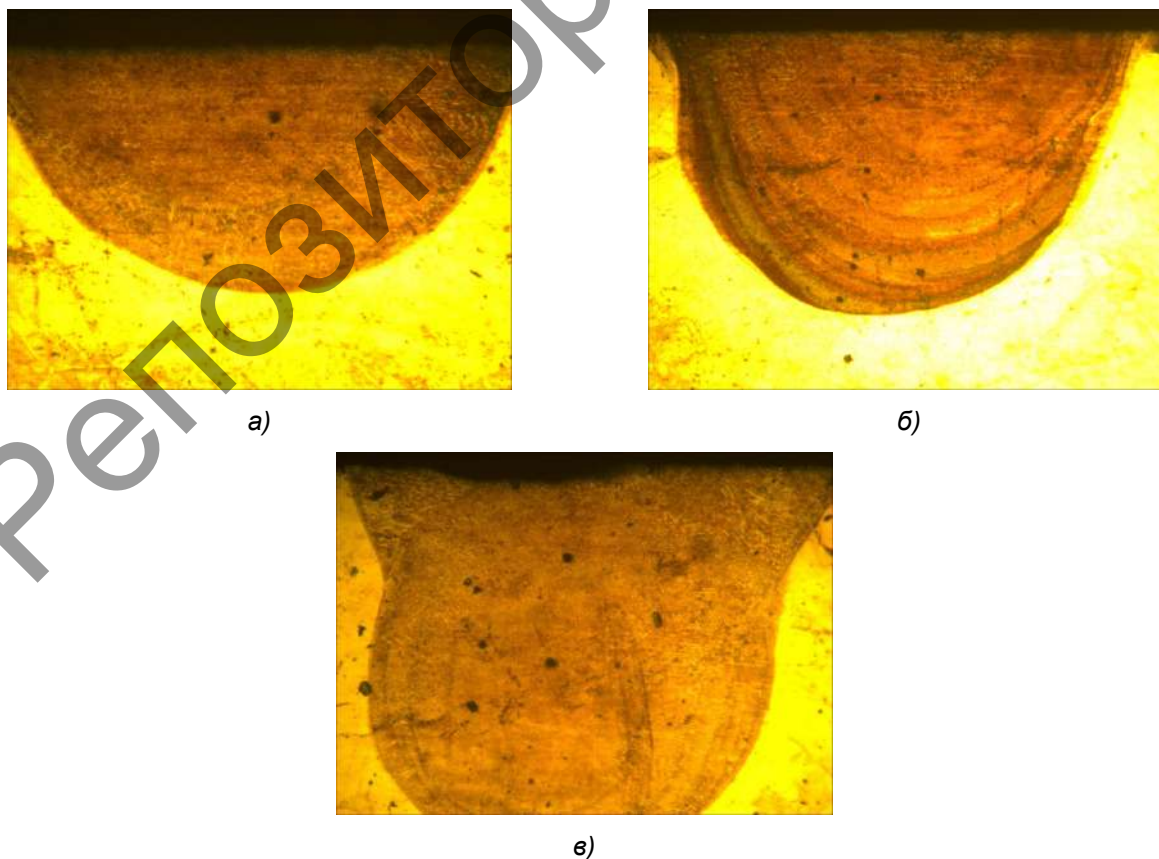


Рисунок 1. — Типичная структура зон лазерного легирования легирующим порошком TaSi₂ при различных режимах обработки. × 126 (а); × 250 (б); × 200 (в)

В то же время при использовании других порошков в зависимости от режима лазерной обработки в структуре могли наблюдаться нерастворившиеся остаточные включения (рисунок 2).

На рисунке 3 приведены распределения микротвердости по глубине лазерного легирования с использованием порошка W_2B_5 , при этом микротвердость включений составляла на уровне 1600...2500 кг/мм². Изменение содержания легирующих компонентов при переходе от области лазерного расплавления к материалу основы происходит в достаточно узкой зоне, зачастую почти скачкообразно. Главной причиной выравнивания концентрации компонентов при лазерном легировании поверхности является перемешивание металла в жидком виде. Большую роль играют также термические и диффузионные процессы.

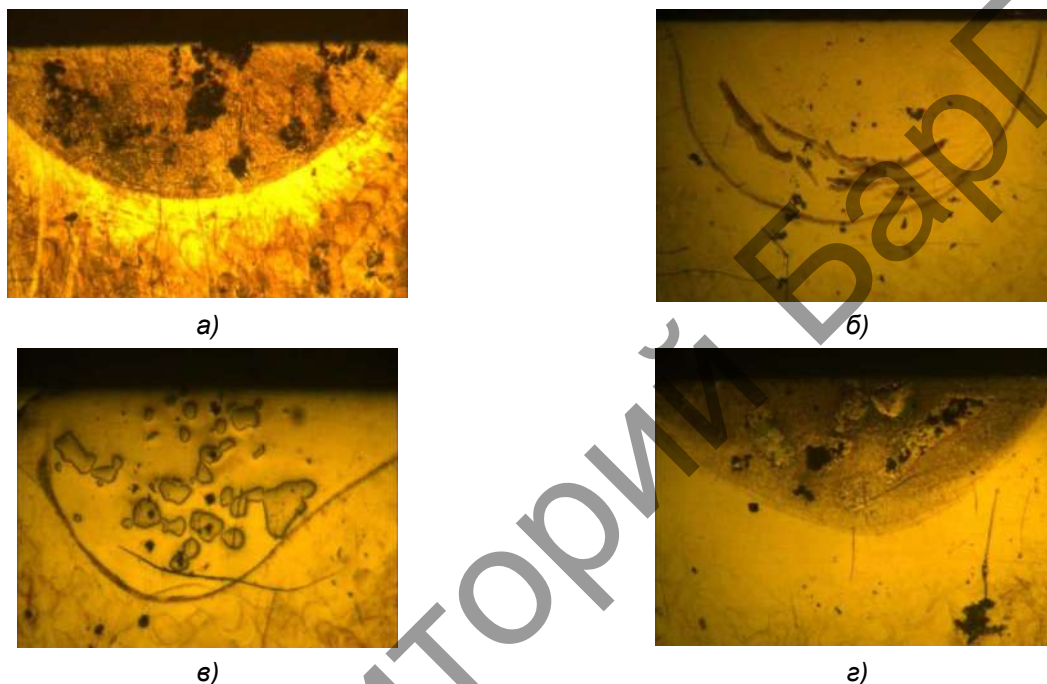
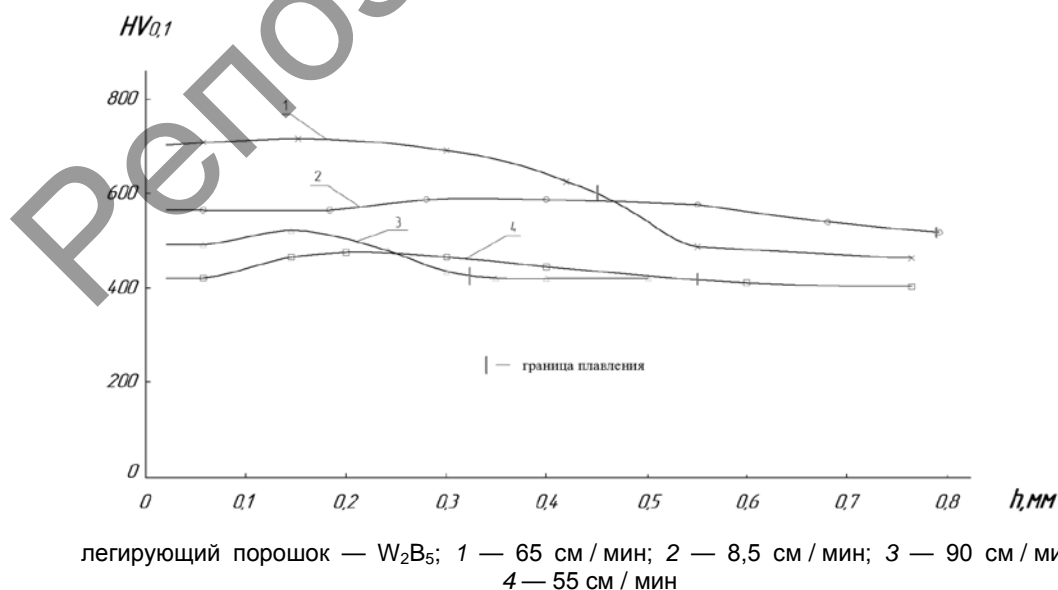


Рисунок 2. — Характерные структуры зон поверхностного легирования при использовании различных легирующих материалов: легирующий порошок TiN (а); $Cr_{23}C_6$ (б); W (в); Co_3B (г)



легирующий порошок — W_2B_5 ; 1 — 65 см/мин; 2 — 8,5 см/мин; 3 — 90 см/мин; 4 — 55 см/мин

Рисунок 3. — Распределение микротвердости в основе по глубине лазерного легирования для различных скоростей сканирования лучом

Приведенные оценки свидетельствуют, что действие этих факторов может оказывать влияние на структурно-фазовое состояние материала лишь в микроскопических объемах из-за весьма малого времени воздействия на поверхность лазерного луча. Термодиффузия элементов из области расплава в зону термического влияния распространяется на глубину порядка 10 мкм. Правда, в ряде случаев экспериментальными исследованиями было обнаружено перераспределение некоторых легирующих компонентов в твердой фазе в зоне термического влияния на глубинах до 200...300 мкм. Этот факт может быть связан с образованием тонких каналов-прослоек жидкой фазы по границам зеренной и блочной структуры и массопереносом по ним в твердой основе металла. Причинами такого массопереноса в твердом состоянии могут являться резкие локальные деформации и дислокационные перемещения соответствующих атомов [8].

Следует отметить, что основное отличие строения зон лазерного легирования при оптимальных режимах от вида диффузионных покрытий состоит в отсутствии стабильной слоистости. Из-за конвективного перемешивания расплава в зоне легирования при удалении от поверхности, постепенного перехода от выделившихся фаз с большей концентрацией легирующего компонента к соответствующим фазам с меньшим содержанием не происходит. Как правило, по глубине все имеющиеся фазы в зоне легирования при оптимальных режимах обработки перемешиваются достаточно равномерно. Строение зоны лазерного легирования выглядит аналогично строению соответствующей области при лазерной закалке с поверхностным оплавлением. Главное отличие состоит в том, что в ванну расплавленного металла вводятся легирующие компоненты. Было отмечено, что в зоне расплава образующаяся мартенситно-аустенитная структура с возрастанием скорости обработки становится более дисперсной. Установлено, что в микроструктуре основными ее элементами являются твердые растворы на основе α - и γ -железа и дисперсные включения упрочняющих фаз в виде боридов и карбидов железа и хрома. Наряду с этим твердые растворы на основе α - и γ -железа могут быть значительно пересыщены, к примеру, такими элементами внедрения, как углерод и бор [9].

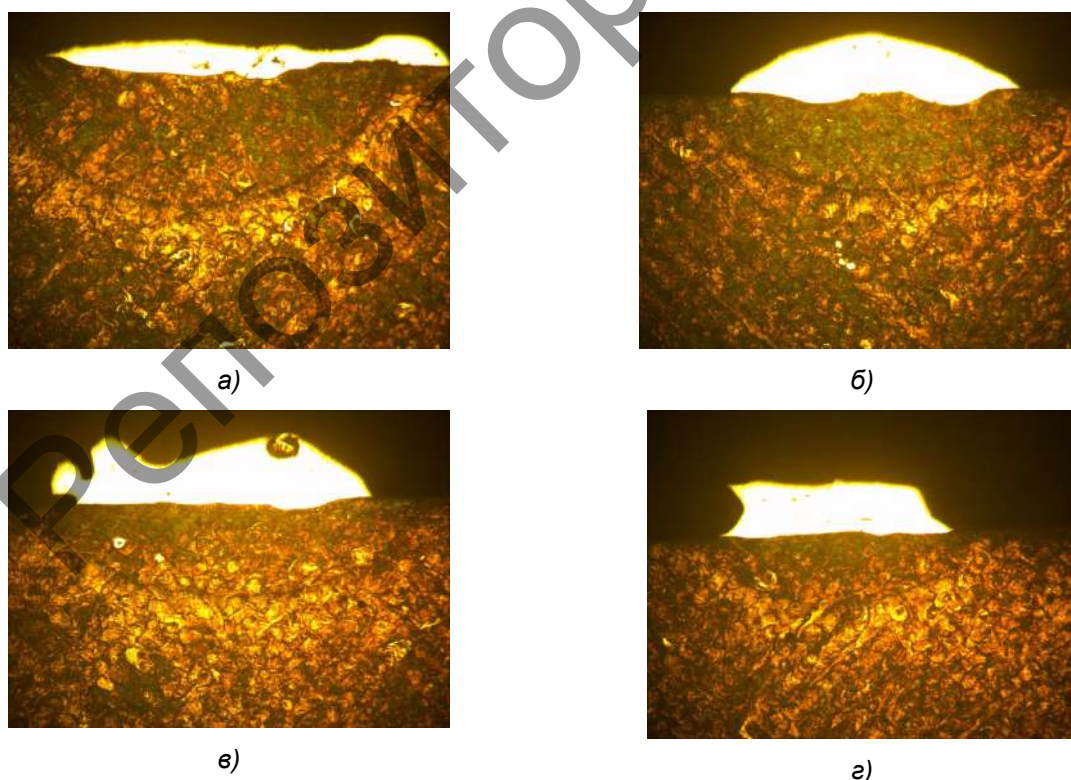
Отметим также, что при лазерном легировании упрочняющие фазы могут иметь свои морфологические особенности. После лазерного воздействия в структуре легированных зон, так же, как и наплавленных слоев [5], могут присутствовать глобулярные, линейчатые или звездчатые фрагменты. Например, линейчатые фрагменты характерны для карбидов хрома, а звездчатые дендриты — для боридов железа, тогда как глобулярные характерны и для боридов, и для карбидов железа и хрома. Микротвердость в зоне легирования могла достигать 13 000...18 000 МПа, при этом в зоне легирования могли быть полностью исключены такие дефекты, как поры и трещины. Причем такая картина была более выраженной при обработке в инертной атмосфере. Таким образом, методы лазерного легирования дают возможность получения высококачественных деталей и изделий, которые работают в тяжелых условиях, в том числе при интенсификации режимов их эксплуатации и более высоких скоростей и нагрузок. Экономический эффект от применения способов лазерного легирования заключается в значительном снижении расхода дефицитных и достаточно дорогостоящих материалов, повышении ресурса работы различных деталей, изделий и инструмента, машин и механизмов, различного оборудования [10].

Особый интерес представляет протекание процесса модифицирования поверхностного слоя. По сути, этот процесс происходит при режимах на грани процессов легирования-наплавки. Размеры заглупления в металл основы при этом процессе приблизительно равны толщине наращенного слоя. Общая толщина получаемого слоя составляет порядка 0,2...0,3 мм. При этом толщина предварительно наносимой шликерной обмазки такого же порядка ~0,2 мм. Предварительно нанесенный слой шликерной обмазки из порошкового сплава ПГ-10К-01 на кобальтовой основе оплавлялся излучением CO_2 — лазера при различных скоростях сканирования лазерного луча. Обработка проводилась в воздушной атмосфере. Химический состав используемого порошка следующий: С — 1,5%, Cr — 23 %, Ni — 30 %, Со — осн.,

Si — 1,0 %, W — 4,0 %, В — 1,5 %. На рисунке 4 приведены характерные валики, образующиеся при таком оплавлении. Видно, что с увеличением скорости сканирования заглупление в металл основы снижается, а наплавочный материал стягивается с краев под действием сил поверхностного натяжения и постепенно формируется наплавочный валик. При этом постепенно снижаются размеры зон термического влияния (ЗТВ) в материале основы.

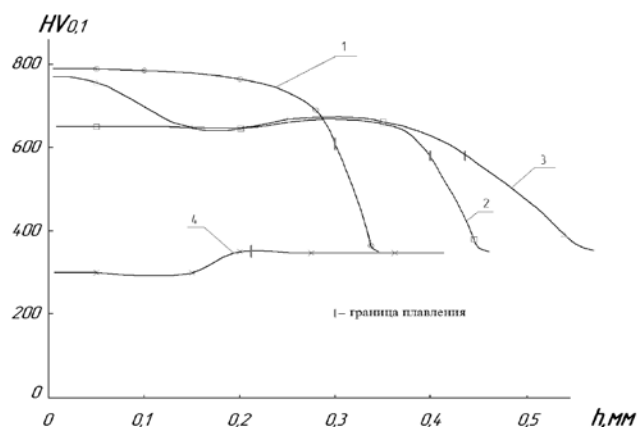
Так, ширина ЗТВ уменьшается с 2,2 мм до 1,25, а глубина — с 1,0 мм до 0,5 мм. Наблюдается также, что под действием давления от «паров отдачи» (см. рисунок 4, а, справа) расплав может смещаться за пределы ЗТВ. Максимальная интенсивность лазерного факела при лазерной обработке наблюдалась именно при минимальных скоростях сканирования луча, т. е. при максимальных энергозатратах. На рисунке 5 приведены зависимости микротвердости поверхностного слоя по глубине при лазерном оплавлении покрытия из порошкового сплава ПГ-10К-01 при различных скоростях сканирования луча. Такое распределение микротвердости по глубине можно связать с процессами интенсивного выплескивания капель расплава, испарения и выгорания компонентов из расплава порошкового слоя и с их перемешиванием с материалом основы.

Аналогичный эксперимент был проведен с использованием порошков на никелевой основе ПГ-10Н-01 и Т-Термо 650 (ПГ-10Н-01 + 50% WC). Обработка проводилась как на воздухе, так и в инертной атмосфере — при подаче в зону наплавки аргона. Твердость основы наплавленных валиков из порошков на Ni-основе с увеличением содержания бора и углерода возрастает от 5 200...5 700 до 7 900...9 300 МПа. С использованием электронного микроскопа SEM 515 с приставкой EDAX для элементного анализа было проведено изучение распределения различных элементов по глубине валиков при лазерной наплавке в воздушной атмосфере (рисунок 6, а) и в инертной среде — в аргоне (см. рисунок 6, б).



$V = 10$ (а), 20 (б), 30 (в), 40 (г) см / мин

Рисунок 4. — Фотографии валиков при лазерном оплавлении покрытия из порошкового сплава ПГ-10К-01 при различных скоростях сканирования луча. $\times 50$



1 — $V = 40$ см / мин; 2 — $V = 20$ см / мин; 3 — $V = 30$ см / мин;
4 — $V = 10$ см / мин

Рисунок 5. — Зависимости микротвердости образующегося поверхностного слоя по глубине при лазерном оплавлении покрытия из порошкового сплава ПГ-10К-01 при различных скоростях сканирования луча

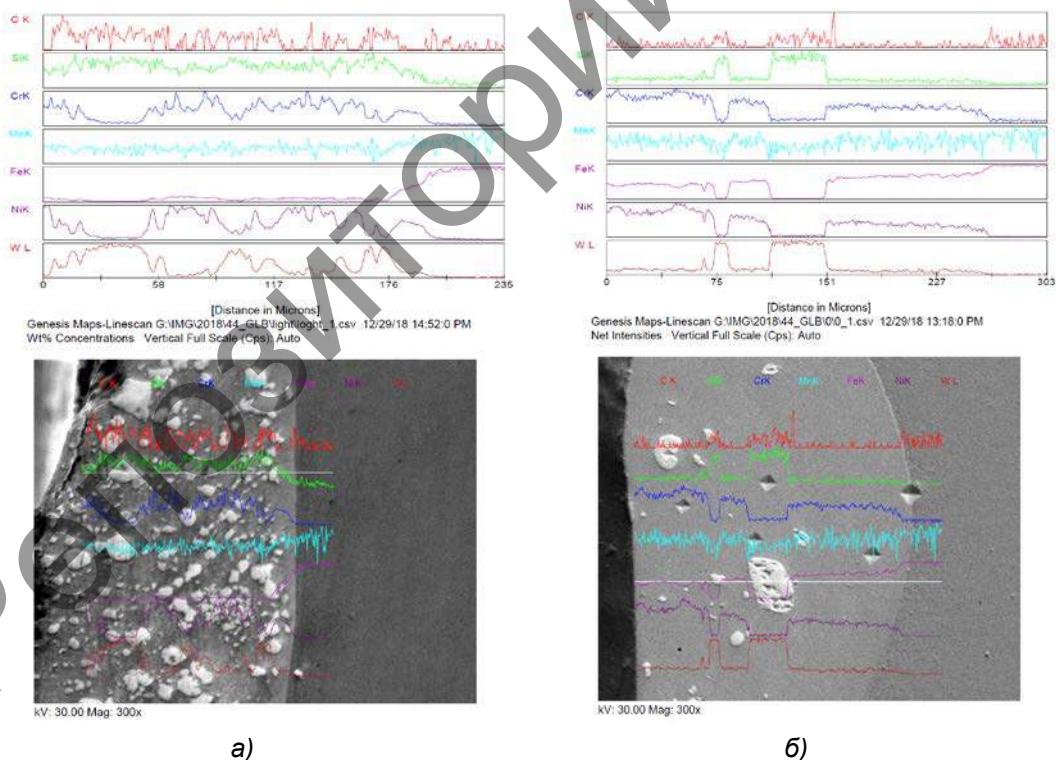


Рисунок 6. — Распределение концентрации различных элементов по глубине при лазерной наплавке порошка Т-Термо 650 на воздухе (а), в аргоне (б)

Видно, что при обработке на воздухе наблюдается более неоднородная структура. При этом наиболее крупные включения идентифицируются в первую очередь с вольфрамом, а далее — с кремнием и углеродом. Особенно отчетливо это выражено при осуществлении наплавки в атмосфере аргона. Можно предположить, что в порошке Т-Термо 650, представ-

ляющем собой механическую смесь самофлюсующегося порошка на никелевой основе ПГ-10Н-01 и карбида вольфрама WC , помимо непосредственно карбида присутствуют довольно крупные частицы вольфрама. При оплавлении обычного самофлюсующегося порошка с присутствующими в нем добавками бора и кремния происходит их окисление окружающим воздухом. При этом легкие оксиды последних всплывают в виде шлака и в конечном итоге защищают расплав от дальнейшего окисления. В то же время при наплавке в инертной атмосфере — аргоне — окисления этих добавок бора и кремния не происходит, и они могут активно взаимодействовать с имеющимися в расплаве частицами вольфрама с образованием соответствующих силицидов или боридов.

Как известно [11], среди тугоплавких металлов вольфрам имеет самые высокие значения температуры плавления, модуля упругости и коэффициента теплопроводности. При нагревании вольфрама с бором, углеродом или кремнием свыше $1\ 000...1\ 200\ ^\circ C$ образуются бориды, карбиды и силициды вольфрама. Силициды вольфрама (WSi_2 , W_5Si_3) обычно получают нагреванием смеси порошков вольфрама и кремния в инертной или восстановительной среде. Силициды вольфрама характерны своей твердостью и высокой температурой плавления. Из силицидов более широко применяют дисилициды вольфрама, молибдена и титана, благодаря их исключительной окислительной стойкости, вследствие чего их используют в качестве материалов для нагревателей, работающих в воздушной среде в интервале $1\ 300...1\ 700\ ^\circ C$. В этой связи можно предположить, что образующиеся при лазерной наплавке в инертной атмосфере слои на основе самофлюсующегося порошка Т-Термо 650 могут обладать комплексом высоких физико-механических свойств, таких как износостойкость, термостойкость и т. д. Следует также отметить появление железа в зоне наплавки, что связано с подплавлением основы и с перемешиванием с наплавляемым материалом. В то же время концентрация хрома и никеля в наплавленном слое постепенно снижается при приближении к границе наплавки.

Заключение. Проведены исследования влияния газовой среды (воздух, аргон) на особенности протекания процессов лазерной обработки: легирования-модифицирования-наплавки. Изучены геометрические размеры, структура и качество поверхностных слоев, создаваемых в результате лазерного воздействия. Отмечено, что лазерная обработка типа легирование-модифицирование-наплавка из образцов увеличивает разнообразие возможных структур получаемых поверхностных слоев по сравнению с традиционными способами химико-термической обработки. При этом технологии лазерной обработки из шликерных образцов позволяют весьма экономно использовать присадочные материалы, практически до 100%. Химическим составом слоя, его микротвердостью и однородностью можно управлять путем регулирования следующих основных параметров обработки: типа и толщины присадочной обмазки, фракционного состава используемого порошка, рода окружающей газовой среды, геометрии фокусировки лазерного излучения, мощности и скорости сканирования луча.

По аналогии с лазерным поверхностным упрочнением сталей в этом случае также наблюдается волнообразный характер изменения микротвердости по сформированным слоям: сформированный слой с измененным химическим составом, закалки в твердой фазе, отпуска и основного металла подложки. В зависимости от поглощенной энергии лазерного излучения меняются глубины слоев и степень упрочнения мартенситно-аустенитной структуры при перекристаллизации. Микротвердость в зоне легирования могла достигать $13\ 000...18\ 000\ MPa$, при этом в зоне легирования могли быть полностью исключены такие дефекты, как поры и трещины. Причем такая картина была более выраженной при обработке в инертной атмосфере (аргон). Глубина зоны упрочнения уменьшается по мере увеличения линейной скорости перемещения луча, суммарная протяженность зоны термического влияния также уменьшается по мере увеличения скорости обработки.

Установлено влияние рода защитного газа на топологию и твердость поверхности сформированной композиции. Лазерная наплавка композиционного порошка на никелевой

основе в аргоновой среде по сравнению с воздушной обеспечивает более однородный по высоте и регулярный рельеф поверхности. Более высокая твердость имеет место при воздушной защите зоны наплавки. Такая тенденция может быть связана как с формированием твердых нитридных и оксидных фаз в процессах взаимодействия ванны расплава с азотом и кислородом при воздушной защите, так и с образованием силицидов вольфрама при обработке в аргоне порошка Т-Термо 650. При этом твердость матрицы в наплавленном слое возрастает по мере растворения упрочняющих фаз и насыщения твердого раствора основного металла и может достигать 18 000 МПа и выше.

Следует считать перспективным применение методов лазерного легирования-модифицирования-наплавки для упрочнения быстроизнашивающихся поверхностей деталей широкой номенклатуры, в частности, для лазерной модификации поверхности спеченных с помощью SLS-технологии дисперсных порошков на основе железа. Глубина упрочненных слоев при модифицировании может составить до 0,2...0,3 мм, при легировании — до 0,7...1,0 мм, при наплавке — до 1,0...1,5 мм. Достижимые твердости при этом могут быть от 50 до 70 HRC. Методы предварительного нанесения присадочного порошка — шликерный, газотермическое напыление, химсостав присадочного порошка — зависят от марки спекаемого материала.

Список цитируемых источников

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
2. Астапчик С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. — Минск : Беларус. наука, 2008. — 252 с.
3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.]. — М. : Машиностроение, 1985.
4. Технологические лазеры : справочник : в 2 т. / Г. А. Абильсиитов [и др.] ; под общ. ред. Г. А. Абильсиитова. — М. : Машиностроение, 1991.
5. Особенности структуры наплавленных слоев при лазерной обработке / Т. В. Тарасова [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — М. : Машиностроение, 2010.
6. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило, [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2010. — 320 с.
7. Лазерная модификация спеченных дисперсных порошков на основе железа / В. Маркович [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16—18 сент. 2015 г. : в 2 кн. — Минск, 2015. — Кн. 2. — С. 330—335.
8. Лахтин, Ю. М. Поверхностное насыщение стали бором при воздействии излучения лазера / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, А. В. Бурякин // МиТОМ. — 1985. — № 11.
9. Брежнев, А. А. Формирование модифицированных упрочненных слоев на сталях методами комплексного поверхностного легирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Брежнев. — М., 2012.
10. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. — 6-е изд. — М. : Металлургия. — 1986. — 544 с.
11. Защита вольфрама от окисления при высоких температурах / В. Е. Иванов [и др.]. — М. : Атомиздат, 1968. — 159 с.

Поступил в редакцию 21.05.2019

УДК 621.98.044.7

А. И. Горчанин, А. М. Милокова, А. А. Лях

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 369 85 52, annart@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НОЖЕЙ СО СЛОЖНЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕЗВИЯ

Исследовано влияние магнитно-импульсной обработки на качество упрочнения поверхности ножей с использованием различных индукторов. В целях повышения эффективности магнитно-импульсного упрочнения разработан индуктор с концентратором. Использование концентратора повышает плотность воздействия концентрированного потока энергии на упрочняемые поверхности инструмента со сложным профилем лезвия.

Ключевые слова: упрочнение; магнитно-импульсная обработка; сложнопрофильный нож; индуктор; концентратор энергии.

Рис. 8. Библиогр.: 9 назв.

A. I. Harchanin, A. M. Miliukova, A. A. Lyah

Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevich Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, annart@mail.ru

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE HARDENING MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF BLADES WITH A COMPLEX BLADE PROFILE

The impact of magnetic-pulse processing on the quality of hardening of the surface of knives using different inductors has been studied. In order to improve the efficiency of magnetic-pulse hardening, a set of technological equipment with a concentrator was developed. The use of concentrator increases the density of the impact of the concentrated energy flow on the hardened surface of the tool with a complex blade profile.

Key words: hardening; magnetic-pulse processing; complex profile knife; inductor; energy hub.

Fig. 8. Ref.: 9 titles.

Введение. Воздействие внешнего импульсного магнитного поля на поверхность стального изделия влияет на термодинамику, механизм и кинетику фазовых переходов структуры стали и приводит, в частности, к получению мелкодисперсной структуры на поверхности образца. При этом устойчивые изменения структуры приводят к улучшению эксплуатационных свойств изделий, в частности, повышению износостойкости [1; 2].

При магнитно-импульсной обработке (далее — МИО) внешней поверхности стального изделия, используется специальный индуктор [3]. Токопроводящее изделие помещается внутрь цилиндрического индуктора, и в нем возникает индукционный ток, пропорциональный скорости изменения магнитного потока через площадь его сечения в плоскости, перпендикулярной оси системы «индуктор—изделие», при возбуждении импульса электрического тока в индукторе. Магнитное поле индукционного тока направлено таким образом, чтобы уменьшить изменение магнитного потока, создаваемого током индуктора. В результате возникает разность плотностей энергии магнитного поля внутри изделия и вблизи поверхности [4; 5].

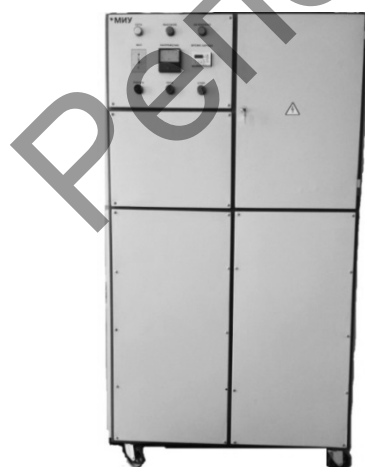
В лаборатории объемных гетерогенных систем Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси разработали технологию упрочнения магнитно-импульсной обработкой (МИО) сложнопрофильных ножей для резки сахарной свеклы (СТ СЭВ 4399) в целях повышения их эксплуатационных характеристик. Немецкие ножи фирмы Putsch, применяемые на отечественных комбинатах сахарной отрасли, имеют сложную конструкцию с зигзагообразной режущей кромкой лезвия (рисунок 1).



Рисунок 1. — Нож для резки сахарной свеклы

Их изготавливают путем фрезерования или штамповки заготовок из углеродистых и инструментальных сталей. На качество получаемой свекольной стружки в основном влияет острота режущей кромки лезвия ножей, характеризуемая радиусом их округления. С увеличением радиуса округления режущих кромок, т. е. их износа, возрастают отрицательные значения переднего и заднего углов, увеличивается сила резания, особенно радиальная ее составляющая, и ухудшается качество свекольной стружки, что снижает количество получаемого из нее сахара. В процессе эксплуатации затупленные ножи регулярно (1 раз в смену) меняются на переточенные. Некоторые ножи восстанавливаются до 5 раз на правильных и заточных станках, что продлевает временной ресурс их эксплуатации [6].

Основная часть. Разработка комплекта технологической оснастки для магнитно-импульсной обработки. С целью повышения эффективности упрочнения сложнопрофильных стальных ножей для резки сахарной свеклы на экспериментальной магнитно-импульсной установке МИУ-3 (рисунок 2, а) МИО проводили с последовательным использованием цилиндрического и плоского индукторов (см. рисунок 2, б) при различных технологических режимах (энергии 8 кДж и длительности магнитно-импульсного воздействия до 200 мкс за несколько импульсов) [7; 8].



а)



б)

Рисунок 2. — Магнитно-импульсная установка МИУ-3 (а) и технологическая оснастка (б), состоящая из цилиндрического и плоского индукторов

Последовательная комбинированная обработка на двух индукторах (цилиндрическом и плоском) позволила упрочнить не только режущие кромки лезвий ножей, но и поверхности, на которых формируются эти лезвия, что увеличило период стойкости ножа во время испытаний в производственных условиях. Это объясняется тем, что в процессе резания свеклы происходит самозатачивание лезвия: упрочненный слой стачивается медленнее, чем неупрочненный.

Металлографические исследования образцов после комбинированной МИО показали, что поверхностный слой исследуемых ножей имеет однородную мелкозернистую структуру троосто-сорбита с упрочненным поверхностным слоем глубиной 40...60 мкм (рисунок 3) [7].

Как видно из рисунка 3, создана градиентная структура с упрочнением лишь поверхности рабочих режущих кромок, а внутренняя сердцевина ножа сохранила свои свойства с бейнитно-трооститной структурой. Такая структура обеспечивает одновременно высокую твердость и пластичность, необходимые для ножей, работающих в условиях циклических ударных нагрузок.

В результате комбинированной обработки период стойкости ножей увеличился в 1,8 раза, что позволяет рекомендовать применение упрочняющей МИО в операциях восстановления инструмента на предприятиях сахарной отрасли пищевой промышленности [8].

Однако данный комбинированный метод имеет такой недостаток, как низкая производительность: поскольку нож не помещается в индукторы полностью, его необходимо обрабатывать за несколько проходов и с двух сторон. Замена индукторов в МИУ-3 и повторная обработка занимает много времени. Кроме этого, при большом зазоре между обрабатываемой поверхностью ножа и спиралью индуктора снижается эффективность упрочнения. Известно, что при МИО стальных изделий наиболее эффективно обрабатывается поверхность изделий, которая находится на минимальном расстоянии (до 1...5 мм) от спирали индуктора [4].

На основе литературных данных [9] выявлены технологии, использующие для высокоэнергетической обработки профильных изделий промежуточные элементы в виде твердотельных концентраторов, усиливающих воздействие МИО, что привело к созданию практически новых технологий и оборудования, в основном в области изготовления различных машиностроительных изделий (методами обжима, раздачи, листовой штамповки, сварки и т. д.).

При осуществлении МИО индуктор должен обеспечивать следующие характеристики: высокий коэффициент преобразования энергии емкостного накопителя в работу по упрочнению изделия; высокую механическую стойкость к воздействию динамических усилий, возникающих в процессе МИО; оптимальную частоту разрядного тока; требуемое распределение или концентрацию магнитного поля на заданном участке обрабатываемого изделия; стойкость к электрическим перенапряжениям; надежное присоединение к выводам МИУ.

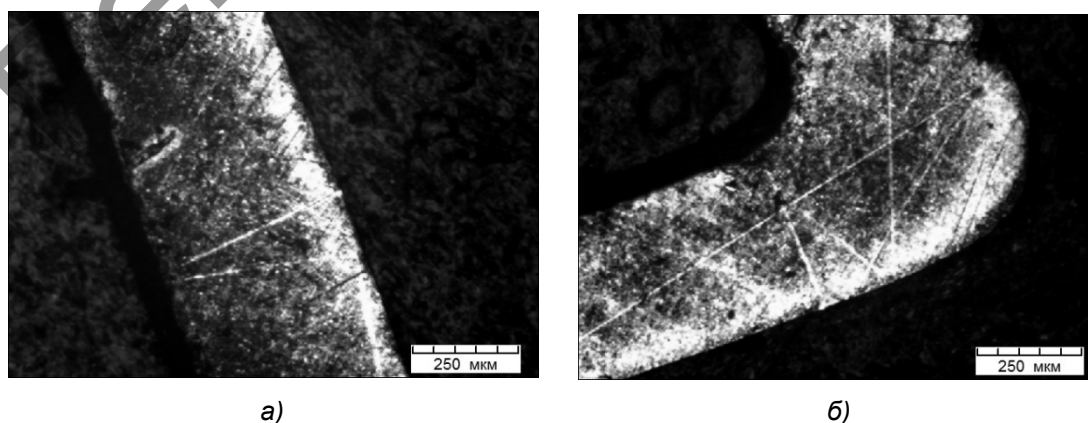


Рисунок 3. — Микроструктура ножа после МИО: поверхность режущей кромки лезвия ножа (а); вершина угла режущей кромки ножа (б)

В данной работе было принято решение использовать индуктор с концентратором энергии в целях повышения эффективности упрочняющего воздействия МИО на сложно-профильные ножи.

Теоретический анализ позволил установить, что использование концентратора значительно уменьшает энергию воздействия магнитного поля, но при этом растет плотность воздействия концентрированного потока энергии на упрочняемые поверхности профильного инструмента. Поэтому при разработке конструкции концентратора необходимо определить главные размеры индуктора D_n , d_n , число витков в пазу ω_n , сечение обмоточного провода, рабочее напряжение и энергию, используемые для упрочнения, наилучшее положение инструмента и его упрочняемых поверхностей относительно концентрированного потока энергии [9]. При этом форма прорези на верхней плоскости концентратора точно копирует зигзагообразную форму режущей кромки ножа.

Представим один из вариантов предлагаемой конструкции (рисунок 4). Индуктор состоит из рабочей части в виде медного концентратора с отверстием сложной зигзагообразной формы по диаметру, равному ширине ножа. Концентратор вставляется внутрь спирали индуктора. Для защиты и фиксации рабочей части индуктора используется изолятор, повторяющий диаметрально форму спирали индуктора. Корпус индуктора, выполненный из стали, обеспечивает фиксацию всех частей индуктора в процессе эксплуатации.

Устройство работает следующим образом. Медная спираль индуктора подключается к электрическим выводам магнитно-импульсной установки, на панели управления которой задается режим и время обработки. Режущая кромка ножа устанавливается в паз медного концентратора на необходимую глубину (15...20 мм). При упрочняющей обработке импульс энергии от спирали индуктора передается на концентратор, который в соответствии с формой передает плотный поток энергии на заданную поверхность ножа.

Однако разработка и изготовление такой конструкции оказалось довольно сложной и дорогостоящей задачей, поэтому для проведения экспериментов с использованием концентратора было принято решение разработать и изготовить упрощенный опытный образец концентратора для обработки цилиндрических стальных образцов. При проектировании концентратора разработана 3D-модель концентратора (рисунок 5) для имеющегося цилиндрического индуктора с внутренним рабочим диаметром 63 мм.

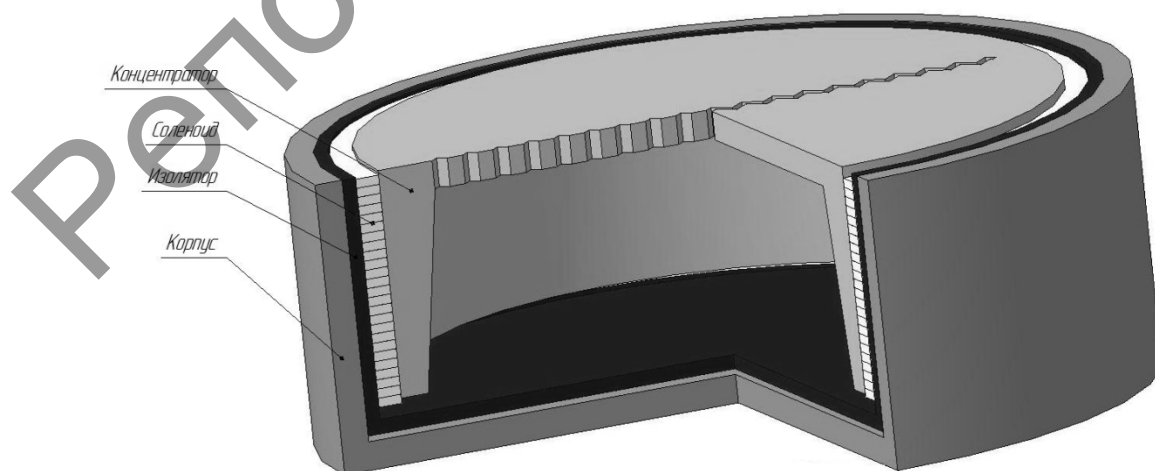


Рисунок 4. — Эскиз экспериментального индуктора с концентратором

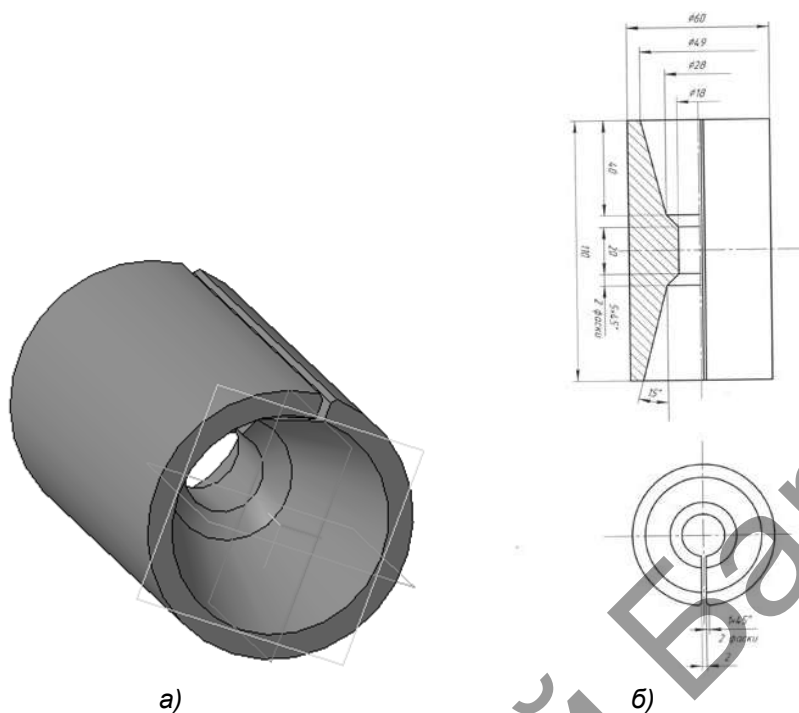


Рисунок 5. — Конструкция цилиндрического концентратора: 3D-модель (а); эскиз (б)



Рисунок 6. — Медный концентратор энергии

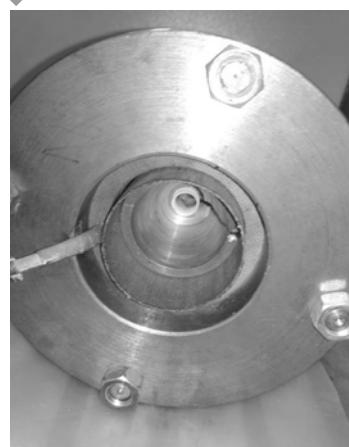


Рисунок 7. — Система «концентратор—индуктор—образец»

Экспериментальный концентратор (рисунок 6) изготовили из медного прутка диаметром 60 мм, длиной 110 мм. В соответствии с чертежом, в середине просверлили отверстие диаметром 18 мм, после чего с помощью токарной обработки проделали конические отверстия с углом при вершине 30° на глубину 40 мм с двух сторон, а также сняли фаски под углом в 45° ; сквозной паз предусмотрен для того, чтобы концентратор не был коротко замкнутым (см. рисунок 6).

Концентратор через изоляцию устанавливается в цилиндрический индуктор. Обрабатываемые стальные образцы при обработке также необходимо изолировать (рисунок 7).

Таким образом, разработана технологическая оснастка для повышения производительности и эффективности магнитно-импульсного упрочнения инструмента со сложным профилем режущей кромки для сахарной отрасли промышленности.

Заключение. Предложен усовершенствованный способ упрочнения инструмента со сложным профилем режущей кромки, например ножей для резки сахарной свеклы, включающий применение в процессе МИО специальных концентраторов, причем форма рабочей части концентратора должна полностью соответствовать форме упрочняемых поверхностей.

Список цитируемых источников

1. *Бернштейн, М. Л.* Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М. Л. Бернштейн, В. Н. Пустовойт. — М. : Машиностроение, 1987. — 255 с.
2. *Малыгин, Б. В.* Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
3. Индуктор для магнитно-импульсной обработки : пат. на полезную модель № 10603 U РБ от 30.04.2015 МПК (2006.01) С 21D 10/00, В 23Р 15/00 / А. В. Алифанов, А. А. Лях, А. М. Милюкова, В. Н. Шишмолин, А. А. Демянчик, Ж. А. Попова ; заявитель «Физико-технический институт НАН Беларуси». Заявка № 420140290 от 07.08.2014 г. // Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. Афіц. бюл. — 2015. — № 2. — С. 125.
4. *Алифанов, А. В.* Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. — Витебск : ВГТУ, 2017. — Гл. 13. — С. 31—52.
5. *Алифанов, А. В.* Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова, Н. М. Ционенко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
6. Повышение износостойкости ножей для резки сахарной свеклы методами высокоэнергетической обработки / А. В. Алифанов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14—16 сент. 2016 г. : в 3 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. — Кн. 2. — С. 4—10.
7. *Горчанин, А. И.* Влияние магнитно-импульсной обработки на структуру и свойства сложнопрофильного режущего инструмента / А. И. Горчанин, А. М. Милюкова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13—15 сент. 2017 г. : в 3 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2017. — Кн. 2. — С. 48—53.
8. *Милюкова, А. М.* Магнитно-импульсная обработка поверхности металлических изделий / А. М. Милюкова, А. И. Горчанин // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : материалы 32-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 5 апр. 2017 г. — Минск : БНТУ, 2017. — С. 163—165.
9. *Белый, И. В.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хищенко. — Харьков : Вища шк., 1977. — 168 с.

Данная работа была выполнена в соответствии с Грантом Национальной академии наук Беларуси для аспирантов в рамках договора № 2018-26-029.

Поступил в редакцию 30.05.2019

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 $90 \text{ КДж} / \text{м}^2$ и предела прочности при изгибе до $2230 \text{ Н} / \text{мм}^2$ при сохранении высокой твердости до 92 HRA и плотности до $15 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{см}^3$ [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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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_{c_v}

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

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

$$c_T = T_{v_2} - \frac{(T_{v_3} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_2} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} v_2^2 - \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - T_v(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} v_2 -$$

$$\frac{(T_{s_3} - T_{s_1})(s_2 - s_1) - (T_{s_2} - T_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} s_2^2 - \frac{(T_{s_2} - T_{s_1}) - T_s(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} s_2 -$$

$$- \frac{(T_{t_3} - T_{t_1})(t_2 - t_1) - (T_{t_2} - T_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} t_2^2 - \frac{(T_{t_2} - T_{t_1}) - T_t(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} t_2. \quad (38)$$

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_v
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	
$a = -0,0000005v^2 - 0,00031v - 1,51282s^2 + 0,71308s + 0,0000001t^2 + 0,3t + 0,138$;	
$n = -0,000041v^2 - 0,00966v + 4,564103s^2 - 1,595385s + 0,0004t^2 + 0,044t + 1,067$;	
$T_{p,н} = 10^{-3} vs (-0,003v^2 + 0,74v - 176,2s^2 + 14,7s + 0,1t^2 - 3,6t - 16,2)$	

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.

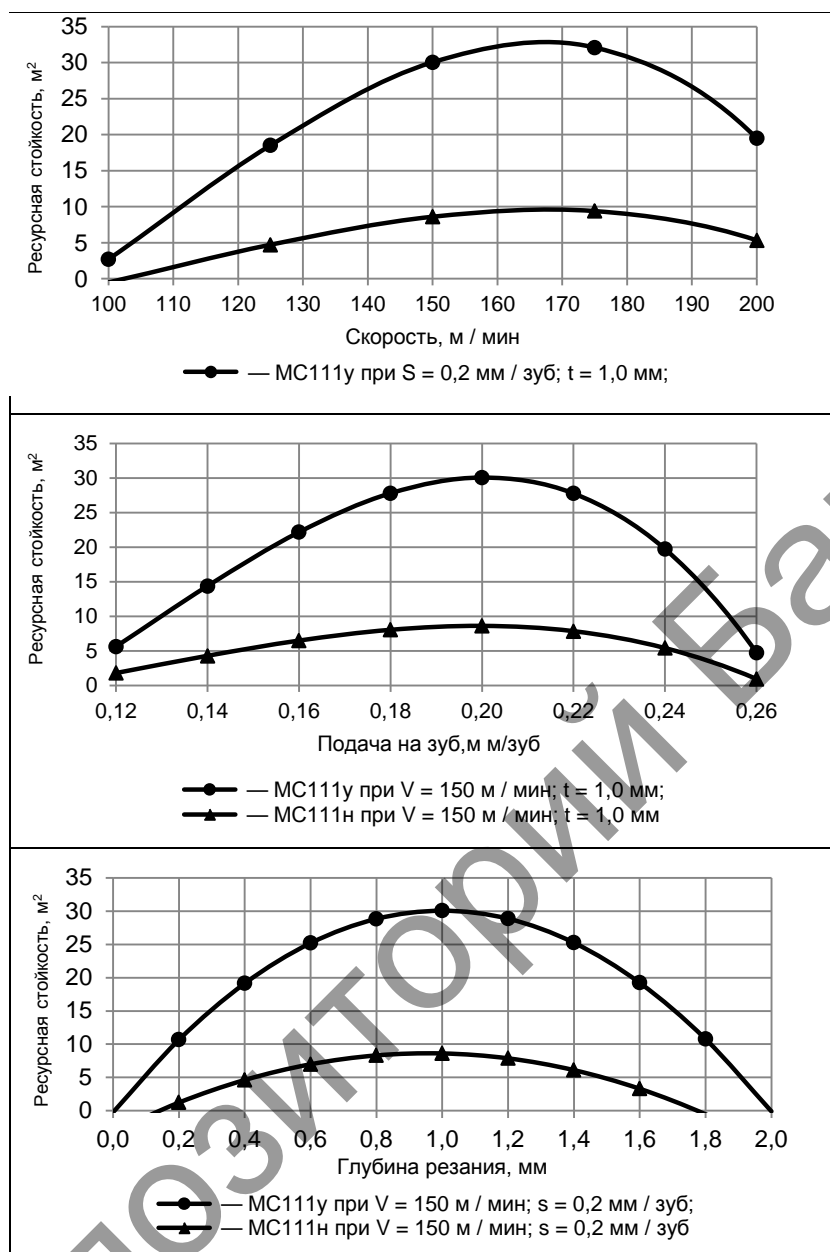


Рисунок 1 — Зависимости ресурсной стойкости для пластин PNUA-110408 сплава MC111 при фрезеровании стали 45

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.

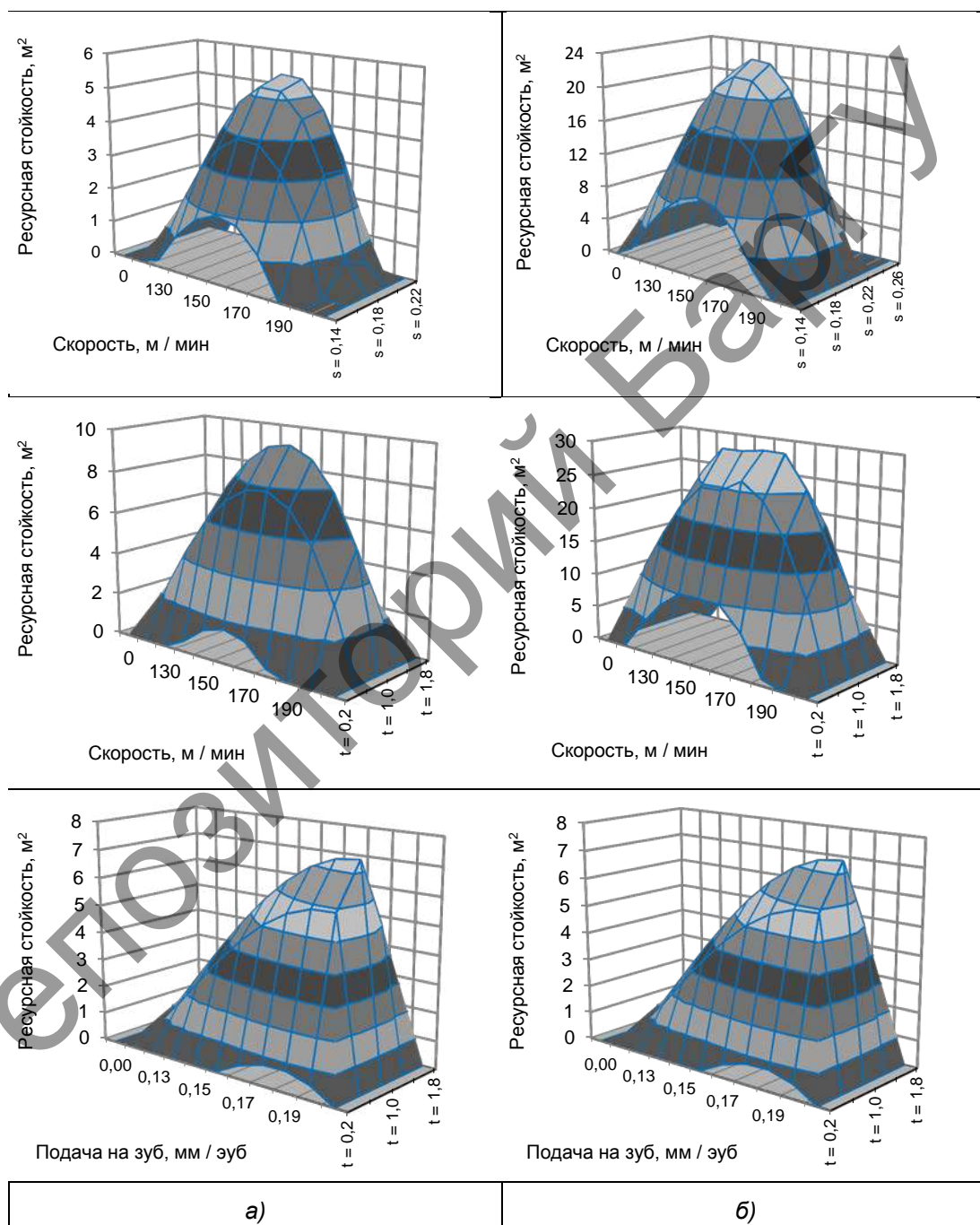


Рисунок 2. — Зависимости ресурсной стойкости при фрезеровании стали 45 пластинами PNUA-110408 сплава MC111, неупрочненными (а) и упрочненными АДУ (б), от комплексного влияния параметров обработки v , s , t

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

УДК 674.055, 539.23, 621

А. К. Кулешов, В. В. Углов, Д. П. РусальскийБелорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь,
+ 375 (17) 226 58 34, kuleshak@bsu.by**ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ СЛОИСТЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КАРБИДОВ МОЛИБДЕНА, ВОЛЬФРАМА И КОБАЛЬТА НА ТВЕРДОСПЛАВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ**

Ионно-плазменным методом при использовании молибденового катодно-дугового источника и метана как плазмообразующего газа сформированы покрытия из Mo_2C с подслоем из $\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}$, толщина которого регулируется временем ионной бомбардировки. Твердость слоистого покрытия увеличивается по отношению к твердому сплаву от 18 до 45...55 ГПа в зависимости от толщины слоистого покрытия, объемный износ уменьшается до 20 раз.

Ключевые слова: катодно-дуговой источник молибдена; ионно-плазменные карбидные покрытия; фазовый, элементный состав; твердость; износостойкость.

Табл. 1 Рис. 5. Библиогр.: 6 назв.

A. K. Kuleshov, V. V. Uglov, D. P. RusalskyBelarusian State University, 4 Nezavisimosti Av., 220030 Minsk, the Republic of Belarus,
+375 (17) 226 58 34, kuleshak@bsu**FORMATION OF WEAR RESISTANT LAYERED COATINGS OF MOLYBDENUM CARBIDES, TUNGSTEN AND COBALT ON A HARD ALLOY TOOL**

Using the ion-plasma method with molybdenum cathode arc source and methane as a plasma-forming gas, Mo_2C coatings with a $\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}$ sublayer are formed, the thickness of which is regulated by the ion bombardment time. The hardness of the layered coating increases with respect to the hard alloy from 18 to 45...55 GPa, depending on the thickness of the layered coating, and the volume wear decreases to 20 times.

Keywords: cathode arc source of molybdenum; ion-plasma carbide coatings; phase, elemental composition; hardness; wear resistance.

Table 1. Fig. 5. Ref.: 6 titles.

Введение. Из литературы известно, что современные подходы для увеличения износостойкости твердосплавного дереворежущего инструмента на основе карбида вольфрама состоят в применении слоистой архитектуры плазменных покрытий химически стойких нитрида хрома или титана. Для обеспечения хорошей адгезии покрытия к инструменту формируется подслоем из металлического хрома или титана. В качестве верхнего слоя исследуются возможности применения оксида хрома, алмазоподобного углерода или других типов антифрикционных слоев, обеспечивающих низкий коэффициент сухого трения [1—4]. Также исследуются другие виды более твердых керамических покрытий на основе боридов вольфрама, карбида бора [1], или аморфные слои углерода в WC и иные с хорошими фрикционными свойствами при сухом трении [3]. Создание таких композиционных или слоистых покрытий требует последовательного или одновременного применения нескольких типов вакуумно-плазменных технологий, в сочетании с несколькими типами катодов или многоэлементных катодов, что значительно увеличивает стоимость применяемого оборудования и, соответственно, создаваемого инструмента с формируемыми покрытиями. В работе [5] для увеличения адгезионной стойкости и износостойкости TiN были созданы слоистые покрытия с подслоями в виде азотированного слоя и слоя Ti в несколько мкм, что позволило уменьшить объемный износ покрытия TiN на стали до 7 раз.

Перспективными покрытиями для увеличения износостойкости твердосплавного деревообрабатывающего инструмента могут быть слоистые высокотвердые карбидные тугоплавкие покрытия, формируемые в одном технологическом цикле ионного воздействия и плазменного осаждения. Так, авторами работы [6] было показано, что при ионном воздействии и плазменном осаждении Nb в среде метана на поверхности твердосплавного инструмента формируются покрытия NbC, имеющие твердость не менее 50 ГПа, а максимальное значение достигает 70 ГПа. Молибден, как и ниобий, обладает высоким химическим сродством к углероду, его карбиды образуют твердые растворы с карбидом вольфрама, поэтому предполагается, что при использовании катодно-дугового источника Mo в режиме ионной бомбардировки и последующего плазменного синтеза в среде метана на поверхности твердого сплава будут образовываться слоистые высокотвердые карбидные покрытия молибдена и вольфрама.

Целью данной работы было исследование фазового состава, твердости покрытий на твердом сплаве, полученных при использовании катодно-дугового источника Mo в зависимости от длительности ионной бомбардировки (1 и 2 минуты) и последующего плазменного синтеза в среде метана. Также исследовались изменения элементного состава и микроструктуры по глубине твердого сплава с формируемыми покрытиями.

Методика эксперимента. Твердый сплав, на который наносились покрытия, представлял собой промышленные образцы ножей для фрезерного деревообрабатывающего инструмента. Фазовый состав сплава состоял из карбида WC и связующего Co (3 ат. %), сплав имел среднее значение твердости 17 ГПа.

Формирование покрытий проводилось с помощью катодно-дугового источника Mo как в режиме ионной бомбардировки в течение 1 и 2 минут, при токе горения дуги источника 180 А, так и в режиме осаждения покрытий при давлении метана 10^{-1} Па в течение 5 минут и потенциале смещения 150 В на образце. Исследованные образцы покрытий далее обозначаются в зависимости от времени ионной бомбардировки молибденом: 1 минута — Mo_1_мин; 2 минуты — Mo_2_мин; параметры плазменного синтеза для образцов одинаковы.

Фазовый состав образцов с покрытиями исследовался методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра Ultima IV в CuK_α излучении при скользящем падении рентгеновских лучей в 5 градусов. Определение концентрации металлов в покрытии проводилось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием прибора LEO 1455 VP. Микротвердость поверхностных слоев измерялась методом Кнуппа и Виккерса на приборе Wilson Instruments 402MVD при нагрузке 0,5...1,5 Н.

Для определения удельного объемного износа твердосплавного инструмента применялась следующая методика. На установке «скрэтч-тестер» алмазный индентор с закруглением 0,5 мм под нагрузкой 20 Н совершал возвратно-поступательное движение по поверхности инструмента длиной 7 мм со скоростью 20 мм / мин в течение 30 минут. Сформированный трек износа на поверхности инструмента измерялся профилометром, и затем по 10 профилограммам из разных мест трека рассчитывался усредненный удельный объемный износ.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рисунке 1 представлены дифрактограммы покрытий, осажденных вакуумно-дуговым методом на твердый сплав при использовании катода из молибдена с временем ионной бомбардировки 1 (Mo_1_мин) и 2 минуты (Mo_2_мин), с режимами осаждения, описанными в методике эксперимента. Из полученных данных следует, что в обоих случаях формируются покрытия, содержащие Mo_2C . Сравнение дифрактограмм образцов Mo_1_мин (см. рисунок 1, а) и Mo_2_мин (см. рисунок 1, б) показывает отличие структурного состояния Mo_2C в обоих этих образцах. Для образца Mo_2_мин наблюдается увеличение уширения дифракционных пиков Mo_2C и уменьшение их интенсивности, что означает увеличение разупорядочения кристаллитов этого карбида. В фазовом составе образца Mo_2_мин присутствует карбид (Mo,W)C, так как соответствующий этому карбиду дифракционный пик находится между положениями

карбидов MoC и WC, имеющих одинаковую структуру. Также в образце Mo_2_мин наблюдается формирование сложного карбида Co_3W_6C .

Представим РЭМ-изображения микроструктуры, а также распределения по глубине содержания элементов поперечного шлифа покрытий Mo_1_мин (рисунок 2) и Mo_2_мин (рисунок 3).

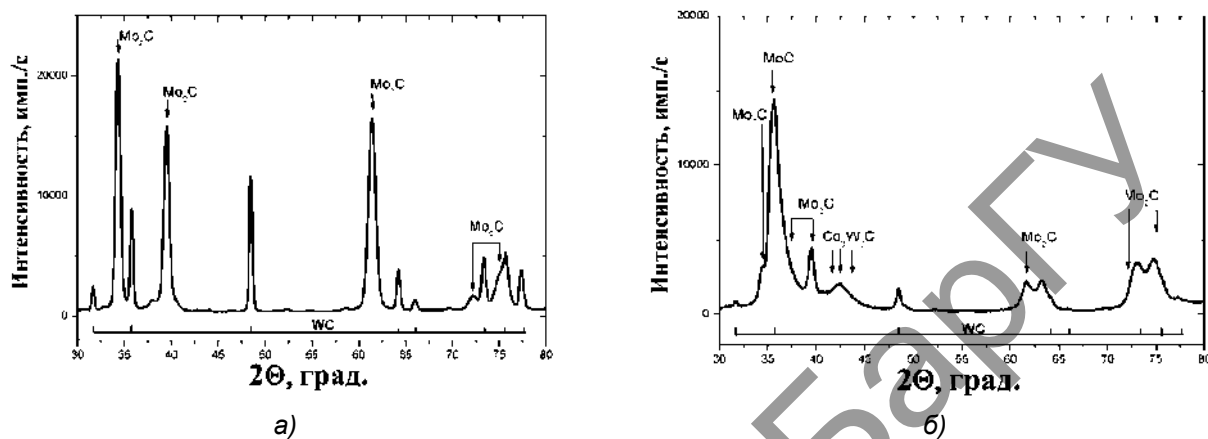


Рисунок 1. — Дифрактограммы образцов твердого сплава с покрытиями Mo_1_мин (а) и Mo_2_мин (б)

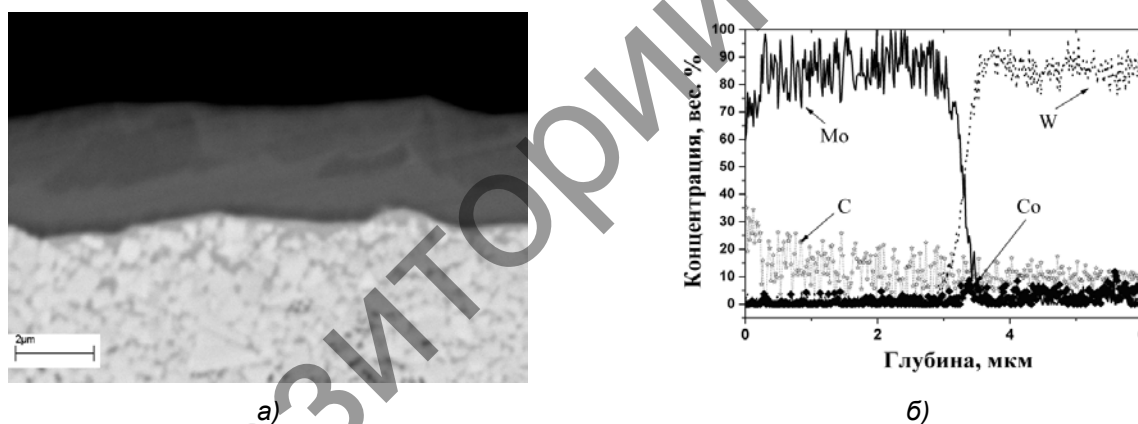


Рисунок 2. — РЭМ-изображение микроструктуры (а) поперечного шлифа покрытия Mo_1_мин и распределение по глубине содержания элементов (б)

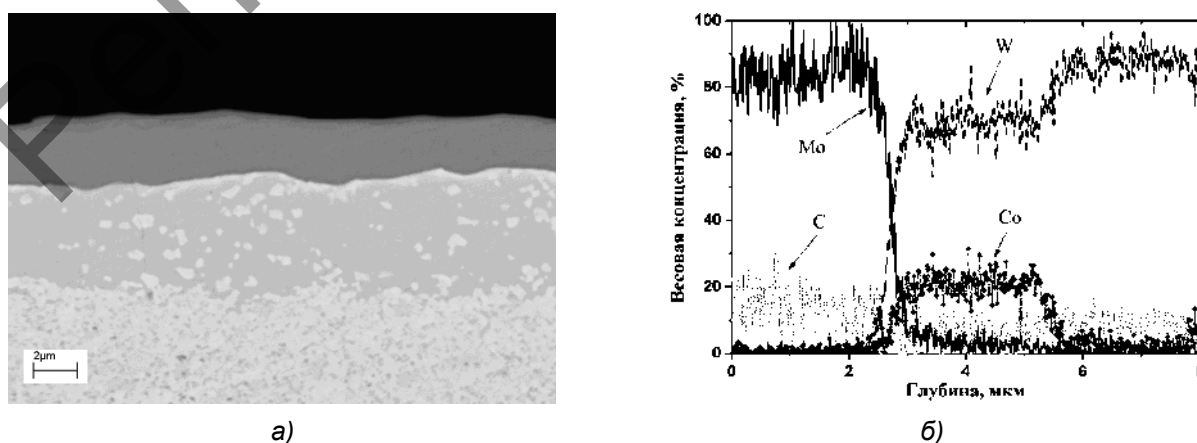


Рисунок 3. — РЭМ-изображение микроструктуры (а) поперечного шлифа покрытия Mo_2_мин и распределение по глубине содержания элементов (б)

Из сравнения данных, представленных на рисунках 1—3, следует, что ионная бомбардировка Мо в течение 1 и 2 минут и последующее плазменное осаждение молибдена в атмосфере метана в течение 5 минут создает систему слоистых покрытий. Верхний слой толщиной порядка 3 мкм представляет собой карбид молибдена Mo_2C , под ним расположен слой сложного карбида $\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}$, толщина которого очень мала (0,1...0,2 мкм) в случае ионной бомбардировки в течение 1 минуты. При увеличении времени бомбардировки до 2 минут толщина подслоя $\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}$ достигает 3,0...3,5 мкм.

Ионная бомбардировка с использованием дугового источника позволяет нагревать поверхность образцов до температур 1 000...1 300°C. Предполагается, что именно высокая температура нагрева при ионной бомбардировке является основной причиной формирования карбида $\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}$.

Представим результаты изменения твердости образцов твердосплавного инструмента с нанесенными покрытиями в зависимости от режима нанесения, величины нагрузки, метода измерений (таблица 1).

Т а б л и ц а 1. — Твердость покрытий на основе карбида молибдена на твердом сплаве в зависимости от вида покрытия, величины нагрузки, метода измерений (Виккерс, Кнупп)

Образец	Нагрузка, г			
	100 (Виккерс)	100 (Кнупп)	150 (Виккерс)	200 (Виккерс)
	Твердость, ГПа			
Исходный сплав	19 ± 3	19 ± 2	17 ± 2	17 ± 2
Ионная обработка Мо (2 минуты)	34 ± 4	32 ± 2	32 ± 4	27 ± 3
Покрытие Мо_1_мин	54 ± 3	51 ± 3	43 ± 3	41 ± 3
Покрытие Мо_2_мин	58 ± 3	52 ± 3	47 ± 3	46 ± 3

Из полученных результатов по измерению твердости следует, что формирование слоистых покрытий из карбидов молибдена с подслоем из $\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}$ позволяет увеличить твердость всего покрытия по отношению к твердому сплаву от 18 до 45...55 ГПа в зависимости от толщины слоистого покрытия.

Рассмотрим профилограммы треков износа и соответствующие им значения удельного объемного износа покрытий (рисунки 4 и 5). Из этих данных следует, что формирование слоистых покрытий из карбидов молибдена с подслоем из $\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}$ позволяет уменьшить объемный износ до 20 раз по сравнению с исходным твердым сплавом и до 15 раз по сравнению с известным покрытием TiN. Значительного влияния времени воздействия ионами молибдена на значение удельного объемного износа покрытий $\text{Mo}_2\text{C}/\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}$ не наблюдается. Это связано с тем, что глубина треков износа для этих образцов не превышает 2 мкм, т. е. в этих экспериментах в большей степени измеряется износ покрытия Mo_2C , а не всего слоистого покрытия, например, в случае образца Мо_2_мин толщина слоистого покрытия составляет порядка 4...5 мкм.

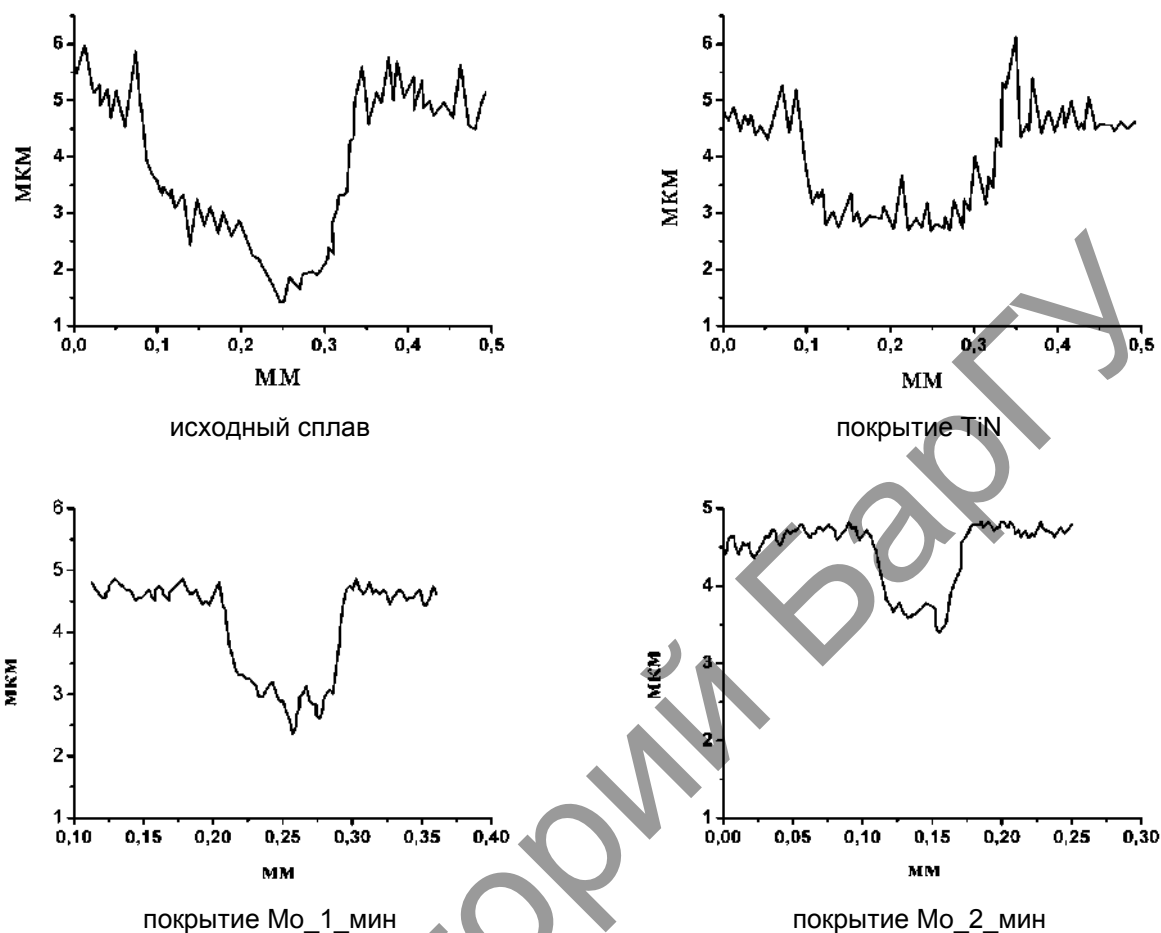


Рисунок 4. — Профилограммы треков износа твердого сплава и покрытий TiN, Mo_1_мин и Mo_2_мин, сформированных на твердосплавном инструменте

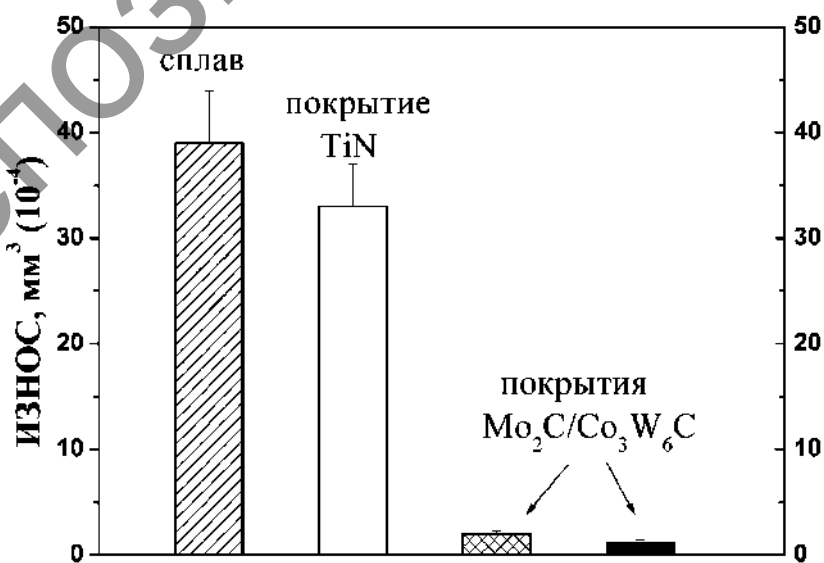


Рисунок 5. — Объемный износ твердого сплава и покрытий TiN, Mo₂C/Co₃W₆C (Mo_1_мин, Mo_2_мин), сформированных на твердосплавном инструменте, соответствующий их трекам износа

Заключение. Вакуумно-дуговое осаждение при использовании катода из молибдена с временем ионной бомбардировки 1 или 2 минуты в среде метана позволяет формировать на твердом сплаве слоистые покрытия из Mo_2C и $\text{Co}_3\text{W}_6\text{C}$. Формирование этих слоистых покрытий позволяет увеличить твердость по отношению к исходному сплаву с 18 до 45...55 ГПа в зависимости от толщины слоистого покрытия, а также уменьшить объемный износ при лабораторных испытаниях до 20 раз по сравнению с сплавом и до 15 раз по сравнению с известным покрытием TiN.

Список цитируемых источников

1. *Tkadletz, M.* Advanced characterization methods for wear resistant hard coatings: A review on recent progress / M. Tkadletz, N. Schalk, R. Daniel, J. Keckes, C. Czettl, C. Mitterer // *Surface and Coatings Technology*. — 2016. — V. 285. — P. 31—46.
2. *Gilewicz, A.* CrCN/CrN, Ta-C multilayer coating for applications in wood processing / A. Gilewicz, B. Warcholinski, W. Szymanski, W. Grimm // *Tribology International*. — 2013. — V. 57. — P. 1—7.
3. *Erdemir M., Urgan F., Cakir K.* Hard and low friction nitride and methods for forming the same : Patent № US 7,211,323 B2. — Date of Patent: May 1, 2007.
4. *Eriksson, A. O.* Arc deposition of Ti-Si-C-N thin films from binary and ternary cathodes / A. O. Eriksson, N. Ghafoor, J. Jensen, L.-A. Näslund, M. P. Johansson, J. Sjölen, M. Odén, L. Hultman, J. Rosen // *Surface and Coatings Technology*. — 2011. — V. 213. — P. 145—154.
5. Наноструктурные покрытия и наноматериалы. Основы получения. Свойства. Области применения. Особенности современного наноструктурного направления в нанотехнологии / Н. А. Азаренков [и др.]. — М. : Либроком, 2013. — 368 с.
6. Структура, состав, твердость ионно-плазменных покрытий на основе NbC на твердом сплаве / А. К. Кулешов [и др.] // *Изв. высш. учеб. заведений. Физика*. — 2018. — Т. 61. — № 8/2. — С. 183—187.

Поступил в редакцию 03.05.2019

УДК 621.3.082:373

В. В. Малеронок, А. В. Алифанов, И. А. Богданович,

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования
Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь,
+375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Разработаны способ и схема измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделий из токопроводящих материалов как показателя качества (однородности, мелкодисперсности, бездефектности) после проведения магнитно-импульсной, ионно-плазменной и других видов высокоэнергетических обработок, заключающийся в измерении потенциала (падение напряжения) на упрочненном слое с последующим расчетом полного электрического сопротивления (прямопропорциональной величины) по заданной величине силы электрического тока, отличающийся от аналогов тем, что в процессе измерения применяется зондирующий сигнал переменного тока высокой частоты, а для процесса измерения используется параллельная схема подключения исследуемого изделия в измерительную цепь.

Ключевые слова: металлическое изделие; полное электрическое сопротивление; переменный ток высокой частоты; упрочненный слой; скин-эффект; измерительная электрическая цепь.

Рис. 1. Библиогр.: 7 назв.

V. V. Maleronok, A. V. Alifanov, I. A. Bogdanovich

Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str.,
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375(29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

RESEARCH METHOD OF THE METAL SAMPLES STRENGTHENED LAYER USING HIGH-FREQUENCY CURRENTS

The author has developed a method and scheme for measuring the total electrical resistance of a hardened layer of products made of conductive materials as an indicator of quality (homogeneity, fine dispersion, defect-free) after conducting magnetic-pulse, ion-plasma and other types of high-energy treatments. The method consists in measuring the potential (voltage drop) on the hardened layer with the subsequent calculation of the total electrical resistance (a directly proportional magnitude) from a given value of the electric current strength. The method differs from analogues in the fact that a probing signal of an alternating current of high frequency is used in the process of measurement, and, as for the process of measurement, a parallel circuit is used to connect the testing product to the measuring circuit.

Keywords: metal product; electrical impedance; high frequency alternating current; hardened layer; skin effect; measuring electrical circuit.

Fig. 1. Ref.: 7 titles.

Введение. Известен мостовой способ измерения электрического сопротивления [1], основанный на включении измеряемого сопротивления в мостовую схему с последующей балансировкой этой схемы и определении неизвестного сопротивления по условию баланса мостовой схемы.

С помощью этого способа можно достаточно точно определять величину сопротивления в широком диапазоне, кроме того, он может быть использован как на постоянном токе, так и на переменном. Недостатками этого способа является то, что при измерении очень малых сопротивлений ($10^{-2} \dots 10^{-4}$ Ом), для обеспечения необходимой чувствительности моста, требуется через измеряемое сопротивление пропускать очень большие токи ($10 \dots 10^2$ А), а при измерении больших сопротивлений (более 1 МОм) — повышать напряжение на исследуемом изделии до величины $10^2 \dots 10^3$ В, что ограничивает область его применения.

Существует способ измерения электрического сопротивления [2], заключающийся в том, что через измеряемое сопротивление пропускают электрический ток, после чего выполняют первое измерение величины тока и падения напряжения на измеряемом сопротивлении, далее по их значениям определяют первое значение сопротивления; после первого измерения изменяют величину проходящего тока через измеряемое сопротивление путем включения последовательно с измеряемым сопротивлением дополнительного сопротивления; затем выполняют второе измерение величины тока и падения напряжения на измеряемом сопротивлении и по их значениям определяют второе значение сопротивления, а измеряемое сопротивление определяют по приведенной формуле с учетом значений внутреннего сопротивления устройства измерения сопротивления без дополнительного сопротивления. Технический результат заключается в расширении функциональных возможностей известного способа.

Достоинствами данного способа являются: простота, хорошая точность измерения и малые затраты на реализацию. Недостаток — невозможность определения электрического сопротивления упрочненного поверхностного слоя материала, который является показателем качества высокоэнергетической обработки изделий из металлов.

Известен способ определения удельного электрического сопротивления поверхностного слоя материала [3], включающий измерение электрического сопротивления контакта поверхностного слоя материала с металлической плитой методом амперметра-вольтметра, отличающийся тем, что дополнительно измеряют силу прижима поверхностного слоя материала к металлической плите в контакте, параметр шероховатости и твердость поверхностного слоя материала и определяют удельное сопротивление поверхностного слоя материала по выведенной формуле.

Достоинство данного способа — возможность определения качества поверхности после механической обработки с высокой точностью. Основным его недостатком является то, что электрическое сопротивление зависит от состояния поверхности (шероховатости), что не позволяет говорить о качестве упрочненного слоя и величине полного электрического сопротивления по всей длине изделия.

В [4] представлен способ, содержащий в своей основе метод амперметра-вольтметра и реализующийся с помощью корпуса, изготовленного из диэлектрического материала, в котором установлены два токопроводящих и два измерительных электрода; крышки из диэлектрического материала, прикрепленной к корпусу винтами; клемм, пружин возврата и трубочин, прикрепленных к корпусу при помощи винтов. Техническим результатом изобретения является повышение точности измерения толщины поверхностного токопроводящего слоя изделия. Подключение устройства, реализованного по данному способу, осуществляется от источника постоянного тока, например, источника постоянного питания Б5-47, через реостат R , милливольтметр, в качестве которого может быть использован прибор М 1202, пакет переключателей Π_1 , а также эталонный реостат R_3 к токоподводящим электродам. С измерительных электродов через пакетный переключатель Π_2 напряжение подается на потенциометр постоянного тока.

Достоинствами рассмотренного способа являются: 1) простота измерения толщины токопроводящего слоя; 2) высокая контактная жесткость соединения измерительных электродов с исследуемой поверхностью. Недостатки способа: 1) невозможность измерения электрического сопротивления упрочненного слоя произвольной толщины, так как измерение производится на постоянном токе; 2) требуется изготовление специальных установок-держателей со строгим диэлектрическим изолированием четырех контактов; 3) ограничения в определении потенциала (падения напряжения) на глубине до десятых долей миллиметра, хотя упрочненный слой изделий после высокоэнергетической обработки начинается с единиц микрометров.

Анализ приведенных способов измерения показал, что они достаточно сложны в использовании и обладают недостатками, которые ограничивают их применение на практике. Целью настоящей работы является упрощение способа измерения и расширение его возможностей с обеспечением необходимой точности.

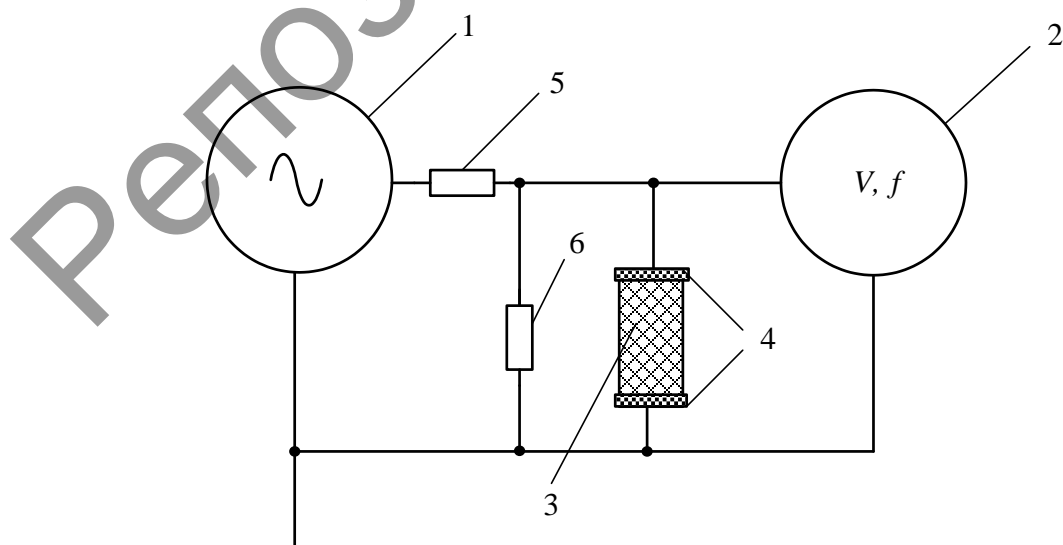
Основная часть. В данной работе предлагается оригинальный способ для контроля качества упрочненной поверхности изделий после термической, ионно-плазменной, магнитно-импульсной и других высокоэнергетических обработок. Он предназначен для измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделий, который является показателем качества (однородности, мелкодисперсности, отсутствия или уменьшения количества структурных дефектов) после проведения обработки.

Способ также может быть использован в области измерительной техники при создании приборов по измерению электрического сопротивления слоя материала произвольной толщины, что актуально для выполняемого задания.

Для реализации предложенного способа измерения необходимо применение генератора сигналов высокой частоты. В случае приложения к электропроводящему изделию высокочастотного напряжения области, расположенные внутри проводника, будут обладать большим индуктивным сопротивлением. Это явление известно как скин-эффект. В результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое [5]. Учитывая тот факт, что при высокоэнергетических методах обработки (магнитно-импульсная, ионно-плазменная и др.) происходит воздействие именно на близкие к поверхности слои изделия, то изменение сопротивления поверхностного слоя изделия будет свидетельствовать об изменении структуры материала вблизи поверхности. Изменение структуры (увеличение однородности, образование мелкодисперсной структуры, устранение дефектов) приводит не только к изменению электрического сопротивления приповерхностных слоев, но и к их упрочнению. Таким образом, можно определить корреляцию между изменением сопротивления и изменением структуры приповерхностных слоев [6].

Для реализации предложенного способа измерения электрического сопротивления упрочненного слоя изделий из металлов с применением токов высокой частоты в данной работе предлагается использовать параллельную схему включения исследуемого изделия в измерительную цепь (рисунок 1).

Параллельная схема включения изделия в измерительную цепь содержит один генератор сигналов высокой частоты, два кольцевых контакта, один осциллограф с полосой пропускания, удовлетворяющей отношению 3 : 1 частоты зондирующего сигнала, стабилизирующий резистор (50 Ом), шунтирующий резистор (5...10 Ом).



1 — генератор высокой частоты; 2 — осциллограф; 3 — исследуемое изделие; 4 — кольцевые контакты-хомуты; 5 — стабилизирующий резистор; 6 — шунтирующий резистор

Рисунок 1. — Параллельная схема

Сигнальный выход генератора соединен с первым выводом стабилизирующего резистора, который вторым своим выводом соединен с первым выводом шунтирующего резистора, первым кольцевым контактом и сигнальным входом осциллографа; последний, в свою очередь, своим общим проводом соединен со вторым кольцевым контактом, вторым выводом шунтирующего резистора и общим проводом генератора. Изделие своими концами подключается между первым и вторым кольцевыми контактами.

Алгоритм измерения электрического сопротивления при параллельной схеме включения изделия в измерительную цепь. Для получения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделия необходимо произвести измерение падения напряжения на изделии при прохождении тока высокой частоты. Выбранная частота должна обеспечивать глубину проникновения сигнала, соответствующую толщине упрочненного слоя[7]:

$$f = \frac{503^2 \cdot \rho}{\Delta^2 \cdot \mu_r}, \quad (1)$$

где f — частота сигнала;

ρ — удельное сопротивление материала заготовки;

Δ — толщина токопроводящего слоя (скин-слоя);

μ_r — относительная магнитная проницаемость.

При параллельном соединении, перед проведением измерения на упрочненном изделии, необходимо получить контрольную осциллограмму напряжения сигнала высокой частоты без установки изделия в измерительную цепь и зафиксировать амплитудное значение напряжения полного сопротивления шунтирующего резистора ($U_{ш.полн}$). По полученному значению ($U_{ш.полн}$) с помощью заданной величины силы тока (I_3) зондирующего сигнала необходимо произвести расчет полного сопротивления шунтирующего резистора:

$$R_{ш.полн} = \frac{U_{ш.полн}}{I_3}, \quad (2)$$

Затем необходимо установить изделие в измерительную цепь и произвести повторное измерение с фиксацией амплитудного значения падения напряжения ($U_{и}$) на параллельно соединенных шунтирующем сопротивлении и исследуемом изделии. Так как соединение параллельное, то $U_{и}$ выражается формулой:

$$U_{и} = I_3 \left(\frac{1}{R_{ш.полн}} + \frac{1}{R_{полн}} \right), \quad (3)$$

где $R_{полн}$ — полное электрическое сопротивление упрочненного слоя изделия.

Затем по заданному значению тока (I_3) и выражая $R_{полн}$ из (3) производят расчет полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделия:

$$R_{полн} = \frac{I_3 \cdot R_{ш.полн}}{U_{и} \cdot R_{ш.полн} - I_3^2}. \quad (4)$$

Или с учетом (2):

$$R_{полн} = \frac{I_3 \cdot U_{ш.полн}}{U_{и} \cdot U_{ш.полн} - I_3^2}. \quad (5)$$

Если по данному алгоритму произвести измерение полного электрического сопротивления до проведения обработки изделия и после него, то полученная информация говорит о качестве появившегося упрочненного слоя (однородность, мелкодисперсность, отсутствие искривления кристаллической решетки), которое напрямую влияет на величину полного электрического сопротивления.

Принцип работы при параллельной схеме включения изделия в измерительную цепь (см. рисунок 1). Перед началом измерения сопротивления упрочненного слоя изделия производят контрольное снятие осциллограммы напряжения сигнала высокой частоты (без установки изделия). Зондирующий сигнал выбирают с частотой, обеспечивающей проникновение на глубину, равную толщине упрочненного слоя изделия (1). Сигнальный выход генератора 1 подключают через стабилизирующий резистор 5 (50 Ом), который обеспечивает стабильность частоты генерации (при такой схеме измерительной цепи), к первому выводу шунтирующего резистора 6 (5...10 Ом), к которому подключают параллельно осциллограф 2. Производится измерение амплитудного значения падения напряжения на полном сопротивлении шунтирующего резистора ($U_{ш. полн}$).

Затем устанавливают обработанное изделие 3 в кольцевые контакты 4. Сигнал с генератора 1 через стабилизирующий резистор 5 подается на параллельное соединение шунтирующего резистора 6 и исследуемого изделия 3, подключенного через кольцевые контакты 4. Сигнал проходит через параллельное соединение элементов 3 и 6 на общий провод. Подключенный параллельно 3 и 6 осциллограф 2 позволяет измерить амплитудное значение падения напряжения на соединенных параллельно шунтирующем резисторе 5 и исследуемом изделии 3 ($U_{и}$). Так как сигнал является высокочастотным и частота рассчитана с учетом толщины упрочненного слоя, то сигнал протекает только по требуемой глубине (проявляется скин-эффект). Располагая заданным значением силы тока сигнала (I_3) генератора 1, производят расчет полного сопротивления по формуле (5).

Применение переменного тока высокой частоты в предложенном способе измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделий после проведения магнитно-импульсной, ионно-плазменной и других видов высокоэнергетических обработок позволяет производить настройку соответствующих измерительных устройств под любую толщину упрочненного слоя.

Заключение. Разработанный метод обладает достаточной простотой при анализе результатов упрочнения металлических изделий посредством высокоэнергетических методов обработки, и в сочетании с другими методами анализа (измерение твердости изделия и проведение микроскопии структуры поверхности) дает наиболее полную картину результатов упрочнения. Методика проведения представляет собой экспресс-оценку качества упрочненной поверхности по анализу падения напряжения (электрического сопротивления) на упрочненном слое.

Список цитируемых источников

1. Основы метрологии и электрические измерения : учеб. для вузов / Б. Я. Авдеев [и др.] ; под общ. ред. Е. М. Душина. — 6-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.
2. Способ измерения электрического сопротивления : пат. 2137144 РФ, МПК G01R27/00 / В. В. Долгих, Е. В. Кириевский, С. В. Василевская ; заявитель Новочеркас. гос. техн. ун-т. — № 1998123405/22 ; заявл. 28.04.1998 ; опубл. 10.09.1999 // Официальный бюл. / Рос. агентство по патентам и товар. знакам. — 1999.
3. Способ определения удельного электрического сопротивления поверхностного слоя материала : пат. 2426137 РФ, МПК G01R27/16 / В. В. Фадин, М. И. Алеутдинова ; заявитель Учреждение Российской академии наук «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (ИФПМ СО РАН)». — № 2010114405/28 ; заявл. 12.04.2010 ; опубл. 10.08.2011 // Официальный бюл. / Федер. служба по интеллектуал. собственности, патентам и товар. знакам. — 2011.

4. Устройство для измерения толщины поверхностного токопроводящего слоя изделия : пат. 2167392 РФ, МПК G01R27/16, G01B7/06 / В. И. Бутенко, А. В. Пушкарный ; заявитель Таганрог. гос. радиотехн. ун-т. — № 1999100307/22; заявл. 05.01.1999 ; опубл. 20.05.2001 // Официальный бюл. / Рос. агентство по патентам и товар. знакам. — 2001.

5. Анализ существующих инженерных математических моделей учета поверхностного эффекта в токопроводящих жилах силовых кабелей / А. А. Алферов [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2015. — № 2. — С. 62—69.

6. Алифанов, А. В. Исследование упрочненных магнитно-импульсной обработкой поверхностных слоев металлических изделий с помощью токов высокой частоты / А. В. Алифанов, В. В. Малеронок, Д. А. Ционенко // Актуальные проблемы прочности : монография : в 2 т. / под общ. ред. В. В. Рубаника. — Витебск, 2018. — Т. 2. — Гл. 6. — С. 111—124.

7. Шпиганович, А. Н. Анализ влияния высших гармонических составляющих на безотказность электроизоляционных покрытий [Электронный ресурс] / А. Н. Шпиганович, С. В. Довженко // Журн. науч. публ. аспирантов и докторантов. — 2008. — Режим доступа: <http://www.jurnal.org/articles/2008/elect7.html>. — Дата доступа: 17.04.2019.

Данная работа выполнялась в рамках задания 4.1.25 Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Плазменные и пучковые технологии».

Поступил в редакцию 11.03.2019

Репозиторий БГУ

УДК 621.7/9.048.7

М. И. Михайлов, В. В. Мельников

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Министерство образования Республики Беларусь, пр. Октября 48, 246746 Гомель,
Республика Беларусь, +375 (032) 24 77 54, Mihailov@gstu.by

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЫТЯЖНЫХ КОНУСОВ СТАНА ТОНКОГО ВОЛОЧЕНИЯ

Исследовано напряженно-деформированное состояние вытяжных конусов стана тонкого волочения. Выполнен анализ влияния износостойкого покрытия рабочих поверхностей на напряжения и перемещения конусов. Установлена долговечность работы конусов.

Ключевые слова: стан тонкого волочения; вытяжные конуса; работоспособность.

Рис. 8. Библиогр.: 12 назв.

M. I. Mikhailov, V. V. Melnikov

Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Ministry of Education of the Republic of Belarus,
48 October Ave., 246746 Gomel, the Republic of Belarus, +375 (232) 24 77 54, Mihailov@gstu.by

IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF EXHAUST CONES OF A FINE-DRAWING MILL

The tense-deformed state of exhaust cones of the fine-drawing mill has been investigated. The analysis of the effect of wear-resistant coating work surfaces on the tension and movement of the cones has been done. The durability of the work of a cone has been established.

Key words: fine-drawing mill; exhaust cones; efficiency.

Fig. 8. Ref.: 12 titles.

Введение. Стан тонкого волочения предназначен для изготовления стальной высоко и среднеуглеродистой проволоки круглого сечения, с наличием на поверхности проволоки металлического покрытия (латунь, медь, цинк и др.), методом многократного волочения через волоки с противонапряжением проволоки за счет проскальзывания на промежуточных шкивах, с исходным диаметром 0,85...2,0 мм до диаметра готовой продукции 0,15...0,4 мм.

Основным элементом является конус вытяжной, который представляет собой металлический конус, изготовленный из специальной хромистой стали, разделенной на дорожки (ступени волочения), с полированной рабочей поверхностью [1].

Теоретические исследования процесса изнашивания показали, что за счет изменения параметров состояния поверхностного слоя деталей можно в значительной мере управлять их износостойкостью [2—9]. Полученные соответствующие зависимости на основе теории равновесного состояния поверхностей в режиме установившегося трения указывают, что для сокращения длительности процесса приработки необходимо при разработке конструкции деталей машин назначать параметры состояния поверхностного слоя близкими к «равновесным», которые зависят от конкретных условий эксплуатации [10].

Наряду с теоретическими, получен целый ряд статистических моделей формирования характеристик трения и изнашивания в зависимости от параметров состояния поверхностного слоя [9].

Аналогичные исследования проведены по контактной жёсткости соединений и ряду других эксплуатационных показателей. Контактная жёсткость является одним из важнейших эксплуатационных свойств деталей, определяющим надёжность и точность оборудования и оснастки. Так, контактные деформации в суппортах токарных станков составляют 80...90 %

общих перемещений, в одностоечных координатно-расточных и вертикально-фрезерных станках — до 70 %, в двухстоечных карусельных станках — до 40 %. Оценка влияния параметров качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей машин широко представлена в работе [11].

Следует особо отметить, что при решении задач конструктора действующие эксплуатационные факторы (нагрузка, скорость и др.) учитываются величинами, усредненными по поверхностям контактирования. В связи с этим параметры качества регламентируются жёстко, т. е. как постоянные для всей поверхности.

В последнее время поведение таких систем рассматривают с позиций синергетики — науки о самоорганизующихся системах, где изменение причины трактуется как бифуркация, т. е. катастрофа [12]. Сам этот термин не характеризует явление как обязательно отрицательное, вредное. По отношению к поверхностному слою технологический процесс следует рассматривать как бифуркацию. Процесс самоорганизации возникает в постбифуркационный период. Опираясь на принципы синергетики, можно утверждать, что сложные системы в постбифуркационный период «теряют свою память» (например, исключение вредной технологической наследственности). С таких позиций логично рассматривать и процессы приработки соединений с сопутствующими им явлениями: вибрации, схватывание, безызносность и др.

В связи с бурным развитием микроэлектроники и ЭВМ, проникновением их практически во все области инженерной деятельности остро стал вопрос о компьютеризации технологических исследований, которая обеспечит качественный и количественный скачок в этой области. Примером здесь может служить программный метод испытания металлорежущих станков, разработанный А. С. Прониковым и развитый В. П. Фёдоровым применительно к технологическим системам обработки и к исследованиям эксплуатационных свойств [11].

Параметры качества поверхностного слоя и ЭС в настоящее время имеют достаточно полное и надёжное метрологическое обеспечение на базе использования компьютеризованных измерительных систем [9].

Целью данной работы является повышение работоспособности конусов, установленных на волочильных станах.

Основная часть. Методика исследования. Основные исходные данные: временное сопротивление разрыву заготовки, $\sigma_{b\text{заг}} = 1\,310 \text{ Н/мм}^2$; скорость на выходе стана — 15 м/с; КПД привода — 0,75; усилие размотки — 80 Н; коэффициент трения по шкиву — 0,085.

Усилие волочения определялось по формуле [1]:

$$F = 0,5 \sqrt{\frac{b_3}{100}} d_{\text{пр}}^2 \sigma_{b\text{заг}},$$

где $b_3 = 1 - \left(\frac{d_{\text{пр.з}}}{d_{\text{заг}}} \right)^2 \cdot 100$.

$$F_{\text{н.з}} = 0,5 \sqrt{\frac{14,1}{100}} 1,82^2 \cdot 1335 = 829,9 \text{ Н.}$$

Силовой расчет проводился в программном комплексе САПР — *SolidWorks*, а именно в системе анализа конструкций — *SolidWorks Simulation (COSMOSWorks)*.

Исследуемый узел представляет собой сборную конструкцию, состоящую из отдельных сборочных единиц: вала, конуса, подшипников (рисунок 1). Конус крепится на вал с помощью шпоночного соединения и фиксируется болтом с шайбой. Узел привода конуса закреплен консольно в корпусе ванны волочения стана. Для проектирования 3D-модели узла привода конуса отдельно создавались детали, входящие в этот узел. Представим 3D-модель конуса, спроектированного в *SolidWorks* (рисунок 2).

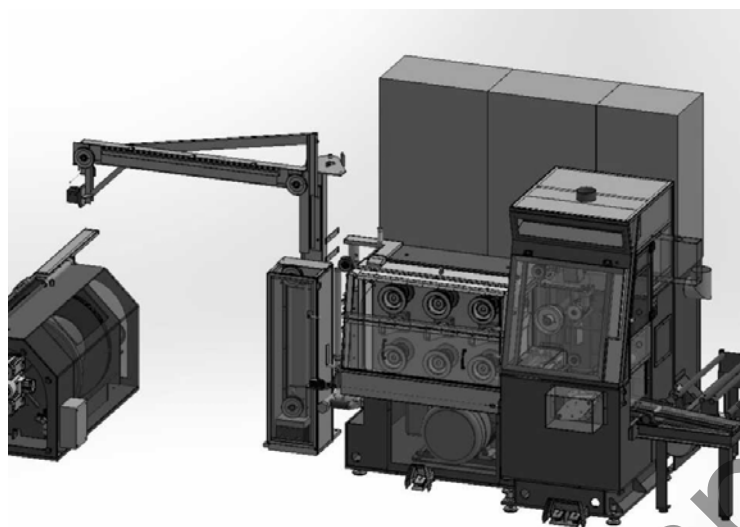
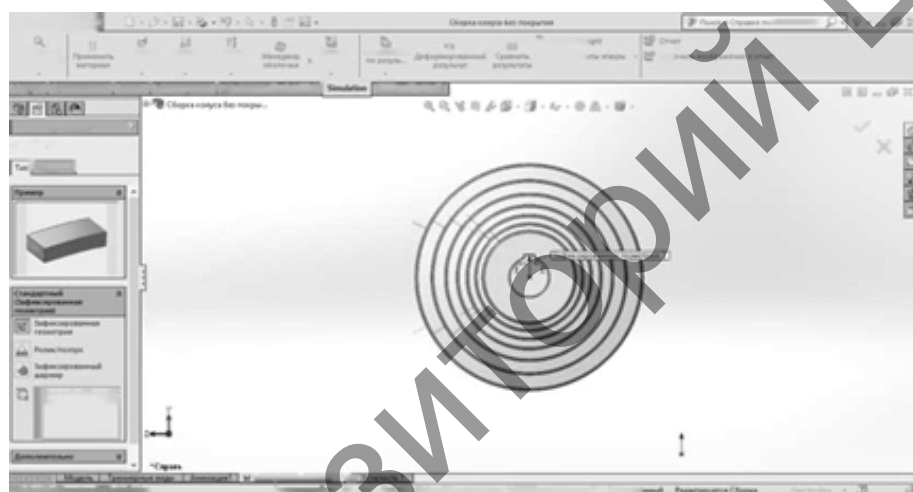
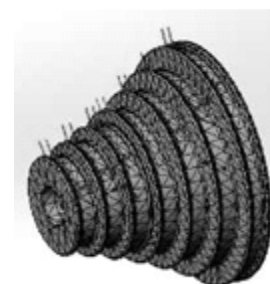


Рисунок 1. — Стан тонкого волочения (3D-модель)



а)



б)

Рисунок 2. — Схема приложения нагрузок, действующих от волочения (а), и сетка конечных элементов исследуемой модели конуса (б)

Анализ результатов моделирования. Результаты эквивалентных напряжений, возникающих от сил волочения, представлены на рисунке 3. Анализ результатов позволил установить, что максимальное напряжение было на минимальном диаметре и составило $1,78 \cdot 10^6$ Па.

На рисунке 3, б, в, г, представлены напряжения по осям X , Y , Z . Анализ результатов позволил установить, что максимальное напряжение по оси X было на 3-й и 4-й канавке конуса и составило $1,15 \cdot 10^6$ Па.

На рисунке 3, в, г, видно, что максимальное напряжение по оси Y было на минимальном диаметре и составило $8,3 \cdot 10^5$ Па, а по оси Z составило $5,9 \cdot 10^5$ Па.

Представлены результаты расчетов эквивалентных перемещений, возникающих от сил волочения (рисунок 4). Анализ результатов позволил установить, что максимальное эквивалентное перемещение было на максимальном диаметре и составило $7,08 \cdot 10^{-4}$ мм.

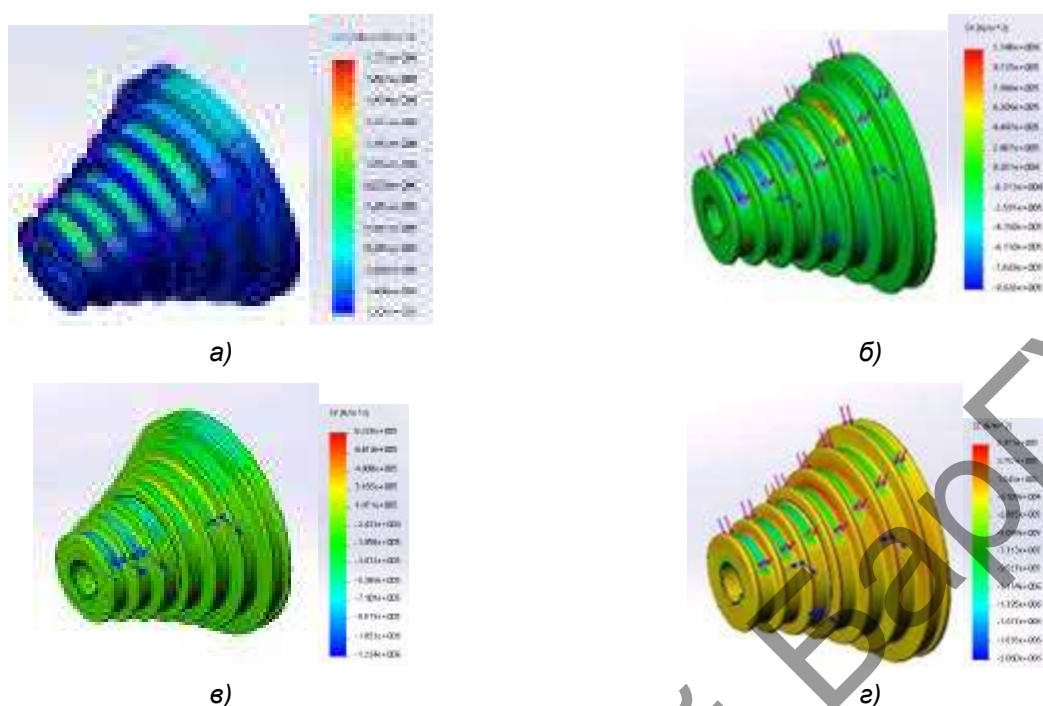


Рисунок 3. — Картины распределения эквивалентных напряжений (а) по оси X (б), оси Y (в), оси Z (г)

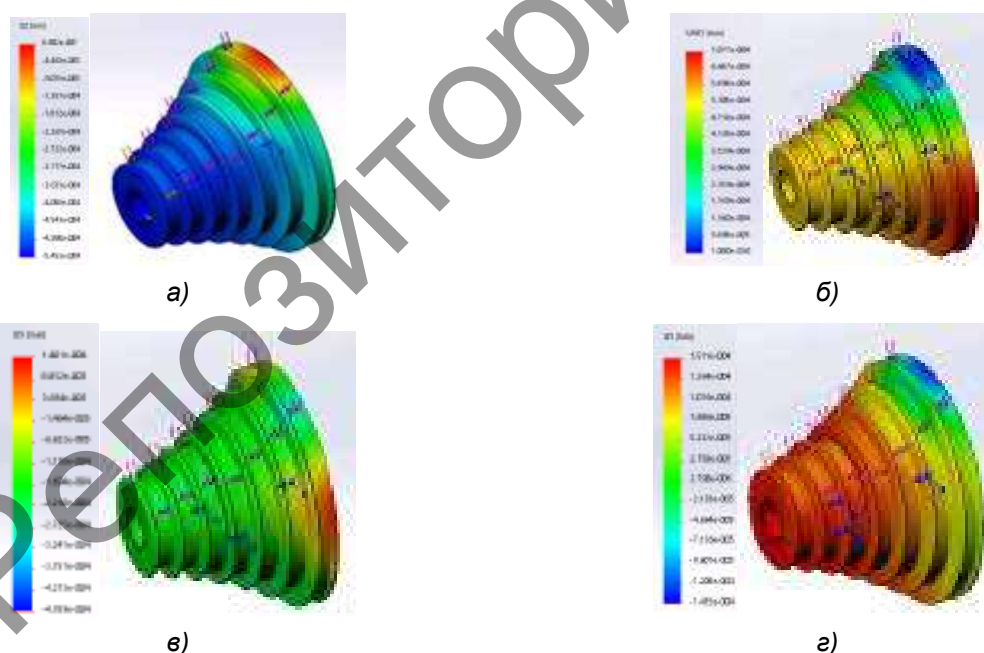


Рисунок 4. — Картины распределения эквивалентных перемещений (а) по оси X (б), оси Y (в), оси Z (г)

На рисунке 4, б, в, г, представлены перемещения по осям X, Y, Z. Анализ результатов позволил установить, что максимальное перемещение по оси X было на максимальном диаметре и составило $1,4 \cdot 10^{-4}$ мм, а максимальное перемещение по оси Y составило $1,51 \cdot 10^{-4}$ мм, по оси Z — $8,9 \cdot 10^{-7}$ мм.

Для повышения работоспособности канавки конуса вытяжного стана использовалось защитное покрытие на основе карбида титана толщиной 1 мм.

Результаты расчета напряжений, возникающих от сил волочения, представлены на рисунке 5. Анализ результатов позволил установить, что максимальное напряжение было на минимальном диаметре и составило $4,8 \cdot 10^7$ Па.

Представлены напряжения по осям X , Y , Z (см. рисунок 5, б, в, г). Анализ результатов позволил установить, что максимальное напряжение по оси X было в защитном слое на минимальном диаметре конуса и составило $5,4 \cdot 10^7$ Па, а максимальное напряжение по оси Y — $2,5 \cdot 10^7$ Па, по оси Z — $3,3 \cdot 10^7$ Па.

Результат расчета перемещений представлен на рисунке 6. Анализ результатов позволил установить, что максимальное эквивалентное перемещение было на минимальном диаметре и составило $1,2 \cdot 10^{-2}$ мм.

На рисунке 6, б, в, г, представлены перемещения по осям X , Y , Z . Анализ результатов позволил установить, что максимальное перемещение по оси X было на максимальном диаметре и составило $2,2 \cdot 10^{-3}$ мм, максимальное перемещение по оси Y составило $3,6 \cdot 10^{-3}$ мм, по оси Z — $2,7 \cdot 10^{-4}$ мм.

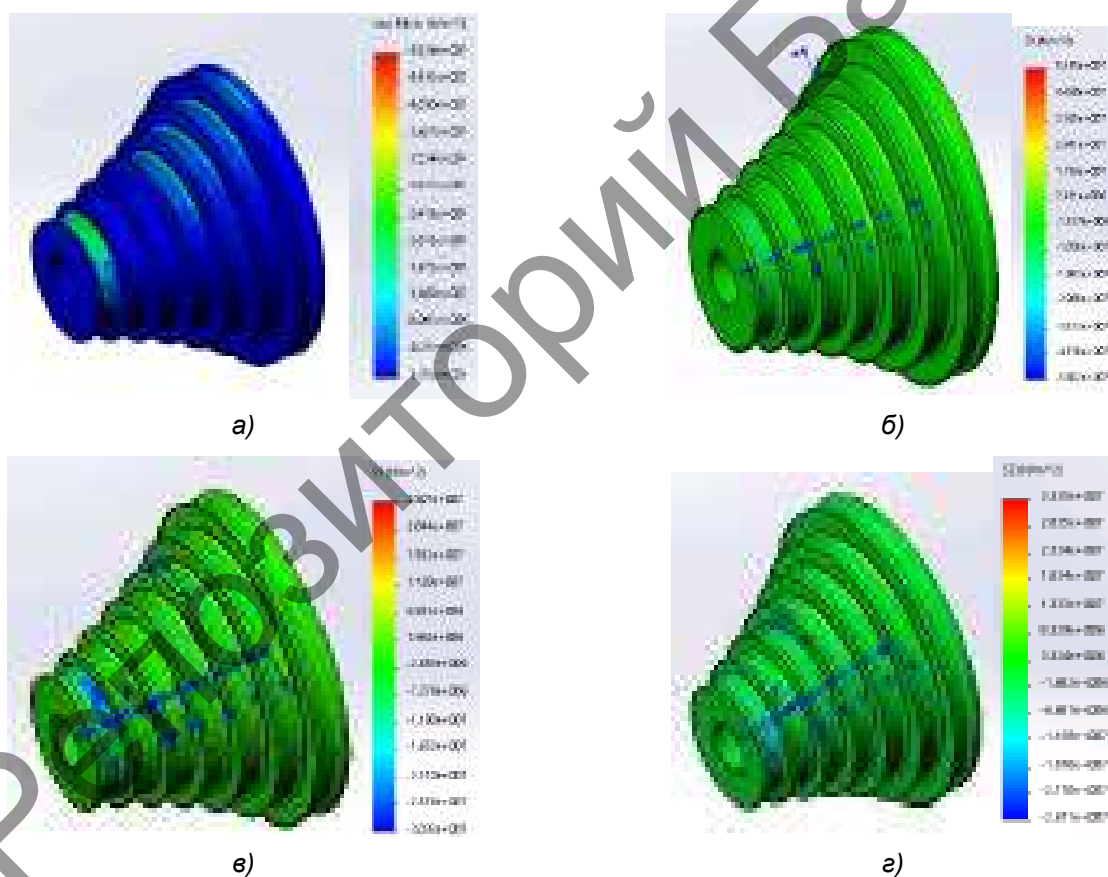


Рисунок 5. — Картины распределения эквивалентных напряжений (а) по оси X (б), оси Y (в), оси Z (г)

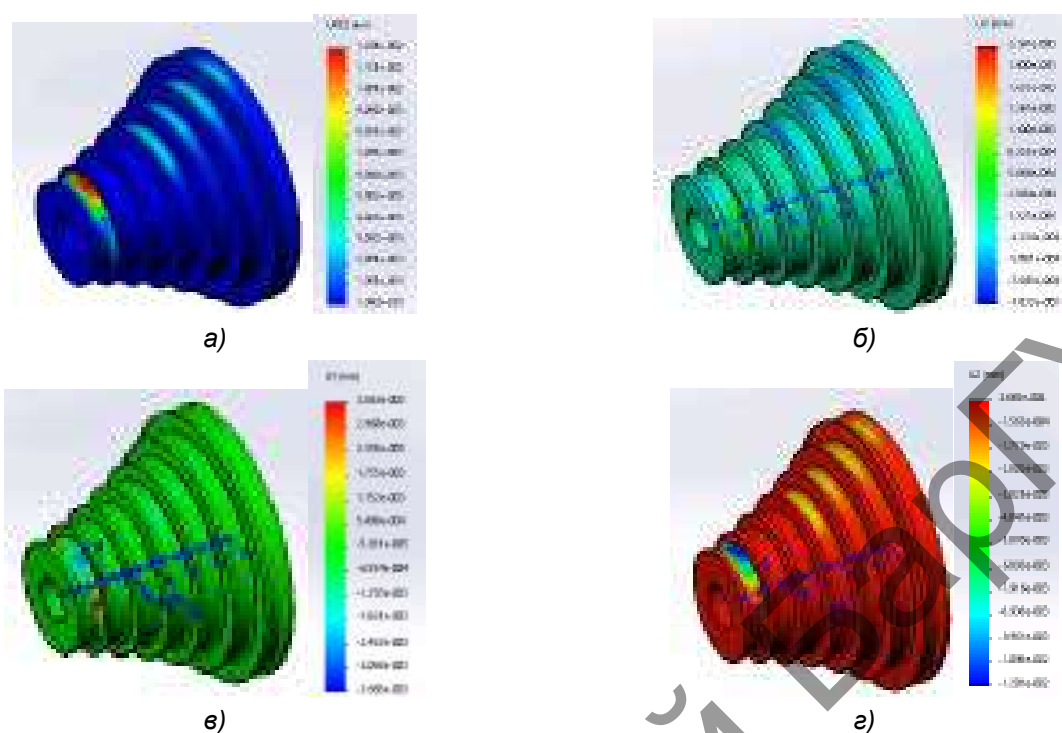


Рисунок 6. — Картина распределения эквивалентных перемещений (а) по оси X (б), оси Y (в), оси Z (г)

Результаты расчетов повреждения конуса без покрытия и с покрытием, возникающих от сил волочения, представлены на рисунке 7. Анализ результатов позволил установить, что первые разрушения конуса без покрытия начнутся после 11 684 циклов, а с покрытием — после 40 360 циклов.

Сравнивая исследования напряженно-деформированного состояния конусов, можно сделать вывод, что перемещения у конуса с покрытием в 2 раза меньше.

Нанесение защитного слоя на основе карбида титана толщиной 1 мм увеличивает работоспособность конуса в 3,5 раза.

Дорожка волочильного конуса подвергается интенсивному износу в процессе эксплуатации: во-первых, в результате осевого скольжения проволоки, во-вторых, по причине изгиба проволоки при набегании на конус, а следовательно, сжатия и скольжения внутренней поверхности проволоки.

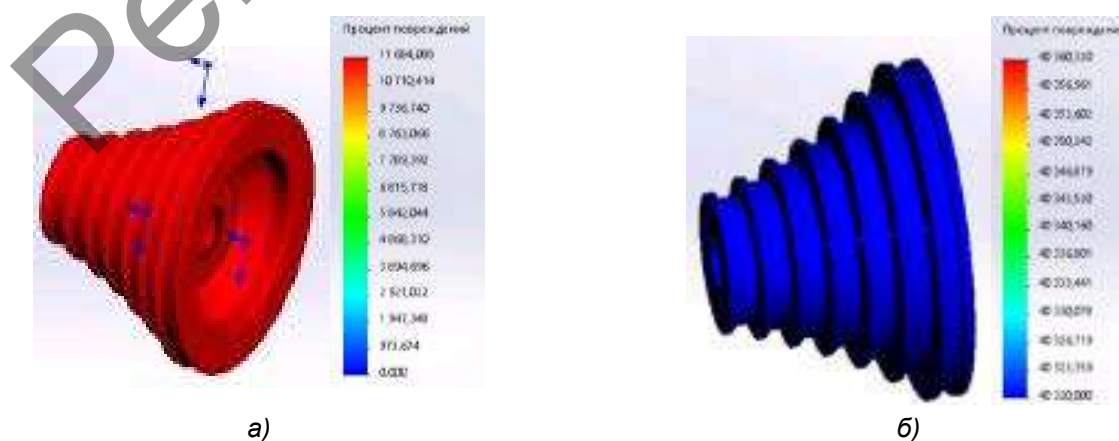


Рисунок 7. — Картины распределения повреждений конусов: без покрытия (а), с покрытием (б)

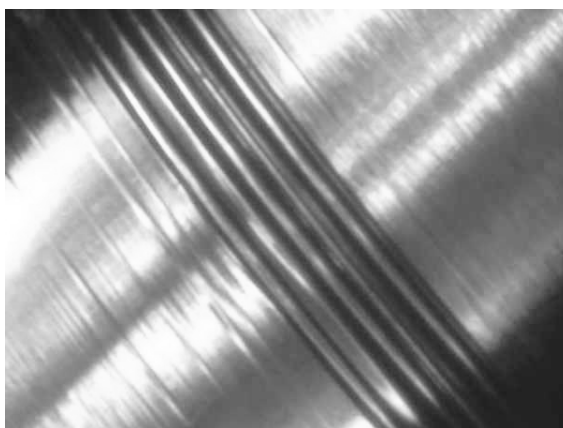


Рисунок 8. — Вид рабочей поверхности конуса

В результате работы конуса в производственных условиях произошел износ канавки (рисунок 8), характер которого согласуется с результатами теоретических исследований.

Заключение. В результате исследований было установлено, что первые повреждения у конуса без покрытия начнутся после 11 684 циклов, а у конуса с покрытием — после 40 360 циклов. Нанесение защитного слоя на основе карбида титана толщиной 1 мм уменьшает износ канавки конуса в 3,5 раза.

Исследования напряженно-деформированного состояния конусов показывают, что эквивалентные перемещения у конуса с покрытием в 2 раза меньше. Это приводит к уменьшению технологического уклона канавки, что позволяет повысить работоспособность конуса.

Список цитируемых источников

1. Горловский, М. Б. Справочник волочильщика проволоки / М. Б. Горловский, В. Н. Меркачев. — М. : Металлургия, 1993. — 336 с.
2. Рыжов, Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Фёдоров. — М. : Машиностроение, 1979. — 174 с.
3. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. — М. : Машиностроение, 1988. — 240 с.
4. Комбалов, В. С. Влияние шероховатости твёрдых тел на трение и износ / В. С. Комбалов. — М. : Наука, 1974. — 112 с.
5. Дунин-Барковский, И. В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. — М. : Машиностроение, 1978. — 232 с.
6. Моргаленко, А. П. Технологическое обеспечение износостойкости поверхностей трения скольжения комбинированной обработкой на основе применения твёрдых нитридсодержащих покрытий : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / А. П. Моргаленко. — М., 1989. — 241 л.
7. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. — М. : Машиностроение, 2002. — 684 с.
8. Рыжов, Э. В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э. В. Рыжов, С. А. Клименко, О. Г. Гуцаленко. — Киев : Наук. думка, 1994. — 184 с.
9. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко. — М. : Машиностроение, 2006. — 448 с.
10. Дальский, А. М. Поверхностный слой деталей машин в условиях самоорганизации технологических систем / А. М. Дальский // Инженер. журн. Справочник. — 2003. — № 9. — Приложение № 9. Инженерия поверхности. — С. 13—15.
11. Проников, А. С. Программный метод испытания технологического оборудования по параметрам качества и надёжности / А. С. Проников // Вестн. машиностроения. — 1984. — № 3. — С. 51—56.
12. Заковоротный, В. Л. Синергетический принцип при управлении движением трибосистем / В. Л. Заковоротный. — М. : Станкин, 2000. — 195 с.

Поступил в редакцию 23.05.2019

УДК 631.344:631.348

А. В. Ключков, С. С. Шкуратов

Учреждение образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»
Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, ул. Мичурина, 5, 213407 Горки,
Республика Беларусь, +375 (29) 358 57 75, olena_k@tut.by

СКОРОСТЬ ПАДЕНИЯ ЗЕРЕН В ВОСХОДЯЩЕМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Исследованы параметры движения зерен пшеницы и овса в восходящем воздушном потоке. Использована лабораторная установка с вертикальным каналом квадратного сечения 50×50 мм с изменением расхода воздуха. Процесс падения зерен фиксировался путем видеосъемки и наблюдения за перемещением выделенных окрашенных зерен. Путем обработки видеogramм определено время прохождения зернами контрольного участка. Полученные данные позволили определить скорость падения зерен при различной скорости восходящего воздушного потока. Установлена обратно пропорциональная зависимость между скоростью падения зерен пшеницы и овса с увеличением скорости вертикального воздушного потока в диапазоне до критической (скорости витания). Скорость свободного падения зерен без действия воздушного потока составляла 1,145...1,313 м/с. Снижение скорости падения семян пшеницы и овса при различной скорости восходящего воздушного потока может достигать 4,42...4,51 раза в сравнении со скоростью свободного падения семян и должно учитываться при выборе параметров соответствующего технологического оборудования.

Ключевые слова: воздушный поток; скорость падения зерна; системы воздушной очистки зерна; движение зерен в воздушном потоке.

Табл. 1. Рис. 3. Библиогр.: 8 назв.

A. V. Klochkov, S. S. Shkuratov

Belarusian State Agricultural Academy, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus, 5 Michurin Str.,
213407 Gorki, the Republic of Belarus, +375 (29) 358 57 75, olena_k@tut.by

SPEED OF GRAIN FALL IN A RISING AIR FLOW

Parameters of the movement of wheat and oats seeds in the ascending air stream have been investigated. Laboratory installation with the vertical channel 50×50 mm square section which is able to fix air consumption has been used. Process of grain fall was videotaped that helped to observe the movement of purposefully painted grains. By processing the video recordings, the time span which grains need to pass the control site has been defined. The obtained data have allowed to determine the speed of grain fall at various speed of the ascending air stream. The inversely proportional dependence between the speed of falling of wheat and oats seeds with increase in speed of a vertical air stream in the range to critical is established (wool-gathering speed). Speed of the free fall of grains without action of the air stream was 1.145...1.313 m/s. The reduction in the rate of falling of wheat and oats seeds at various speed of the ascending air stream can reach 4.42...4.51 times in comparison with the speed of free fall of seeds and has to be considered when choosing the parameters of the corresponding processing equipment.

Keywords: air stream; speed of grain fall; system of air purification of grain; movement of grains in the air stream.

Table 1. Fig. 3. Ref.: 8 titles.

Введение. Работа многих зерноочистительных, сортировальных машин, протравливателей семян камерного типа связана с взаимодействием падающих зерен с восходящим движением воздушного потока. При этом характеристики взаимодействия в каналах аспирации учитывают обычно условия очистки или сортирования зерна, но важными являются

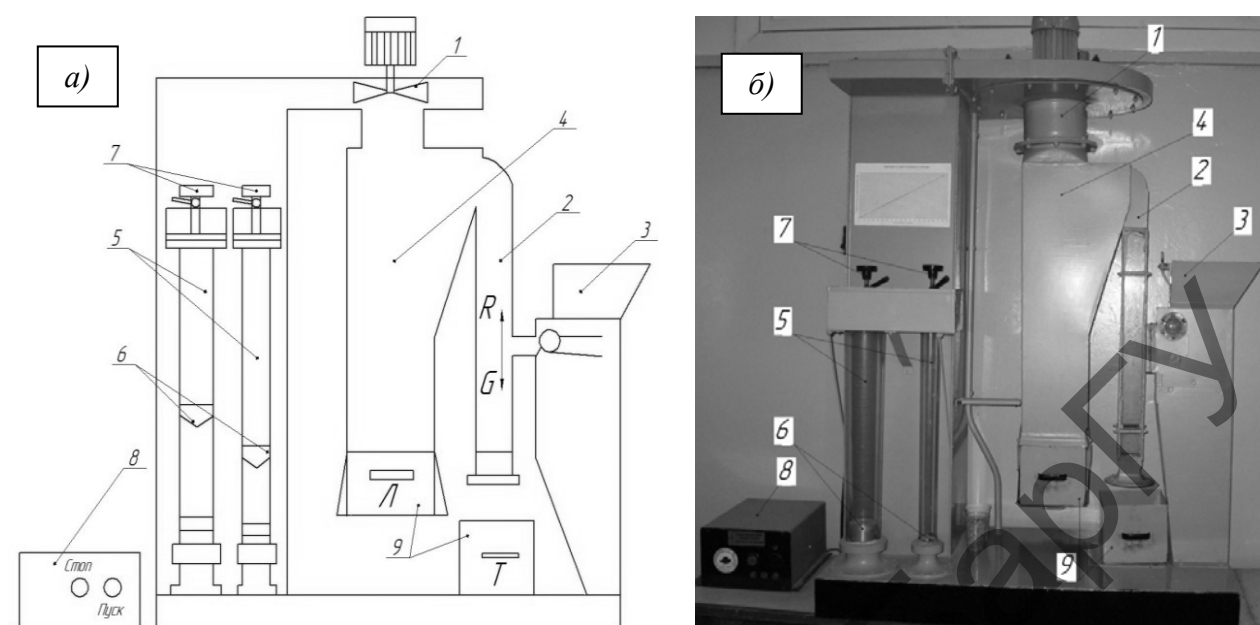
и параметры движения зерен, в частности изменение скорости их падения. Это может влиять на производительность машин и другие технологические показатели процесса.

Изучению параметров воздействия воздушного потока на зерно посвящены исследования Б. Г. Турбина, М. Н. Летошнева, Г. А. Хайлиса и других исследователей [1—5]. В настоящее время перспективы использования данного технологического процесса расширяются. Проводятся исследования по созданию инкрустаторов семян, в частности, непосредственно при посеве пневматическими сеялками [6]. При исследовании движения семян и препаратов в воздушном потоке в настоящее время наиболее широко используются законы гидромеханики с учетом свойств дисперсности материалов. С повышением скорости движения и концентрации частиц радиальные перемещения и вероятность соударения частицы уменьшаются [7]. В работе И. П. Масло [8] выведены зависимости количества соударений и их влияние на количество препарата, нанесенного на семена за единицу времени, что является одним из основных показателей, характеризующих процесс инкрустации. Как показали теоретические исследования и экспериментальные данные [8], данный параметр при нанесении препарата в вертикальном воздушном потоке в значительной мере зависит от скорости движения семян.

Аэродинамические свойства зерен определяют их поведение в воздушном потоке [5]. При этом на зерна в воздушном потоке действует сила тяжести G и подъемная сила R от воздушного потока (рисунок 1, *a*). При вертикальном воздушном потоке частицы (зерно, примеси) могут либо падать, либо уноситься воздухом вверх, либо находиться во взвешенном состоянии, т. е. витать. Скорость витания (критическая) – это скорость потока воздуха, при которой сила тяжести частицы уравнивается силой сопротивления воздуха. Величина скорости витания различна для зерна и семян разных культур и зависит от их формы и крупности. К примеру, для пшеницы она составляет 9...11 м/с, для проса — 6...8 м/с, для гороха — 15...17 м/с [4]. Большое значение имеет скорость витания семян сорных растений, что используется при выборе режимов работы зерноочистительных машин. Воздействие воздушного потока на зерно зависит от положения, в котором зерно там находится. В случае, если большая ось зерна параллельна потоку воздуха, то оно поднимается с воздухом вверх. В случае если ось зерна перпендикулярна направлению воздушного потока, то зерно падает вниз. Определение скорости витания зерна и изучение его аэродинамических свойств имеет решающее значение для обоснования режимов очистки зерновой массы от примесей.

Однако в известных исследованиях в основном определялась критическая скорость зерен, а изменение их скорости движения под воздействием воздушного потока не рассматривалось, хотя этот параметр может быть важным и оказывающим влияние на параметры технологического процесса.

Основная часть. Для исследований были выбраны зерна пшеницы, так как они имеют самую большую плотность, и овса, зерна которого легче других зерновых культур. Действительная плотность исследованных семян определялась пуркой литровой с падающим грузом и составляла для семян пшеницы 760 кг/м^3 и 610 кг/м^3 — для семян овса. При проведении опытов использовалась установка для исследования аэродинамических свойств зерна (рисунок 1, *b*).



а — схема установки; б — общий вид оборудования

Рисунок 1. — Схема и общий вид лабораторной установки для определения аэродинамических свойств зерна

Установка имеет вентилятор *1*, который всасывает воздух через аспирационный канал *2*. Зерновой материал в аспирационный канал *2* подается из бункера *3* с вибродном. На пути воздушного потока расположена камера циклона *4*, в котором осаживаются унесенные воздухом зерна. Воздушный поток выходит через расходомер *5* с указателями *6* и устанавливается регуляторами *7*. Блоком управления *8* установка включается в работу. Приемники семян *9* служат для сбора фракций.

При исследованиях навеску зерна массой 200 г засыпали в бункер *3*, затем включали в работу вентилятор *1* и после стабилизации режима его работы регуляторами *7* устанавливали определённый расход воздуха. Плавным поворотом регулятора в бункер *3* вводили зерновую смесь со случайно распределёнными в его массе окрашенными зёрнами в вертикальный воздушный канал. На частицы действует сила действия воздушного потока, которая замедляет их падение. В навеске было 10 окрашенных зёрен, и их движение снимали на фотокамеру марки Samsung WB2000 со скоростью съёмки 240 кадров в секунду. Затем заслонками увеличивали расход воздуха и повторяли опыт. Каждый раз увеличивали расход воздуха и добивались полного выхода зерна в циклон *4* для сбора уносимых воздухом зёрен. Данный опыт проводили отдельно для зёрен пшеницы и овса. Далее при обработке на компьютере видеogramм (рисунок 2) определяли время прохождения выделенными окрашенными зёрнами учетного участка канала длиной 170 мм. Для воспроизведения видеogramм использовался видеоплеер SMPlayer, позволяющий фиксировать и анализировать покaдровое воспроизведение видео. По графику зависимости скорости воздуха от расхода (при известном сечении канала 50 × 50 мм) определена скорость воздушного потока.



Рисунок 2. — Пример видеосъемки процесса движения зерен овса в восходящем воздушном потоке

Подсчитывали среднее значение времени прохождения зернами контрольного участка и статистические характеристики данного процесса (таблица 1).

Т а б л и ц а 1. — Результаты определения времени падения зерен в воздушном канале высотой 170 мм

Расход воздуха, м ³ /ч	Скорость воздушного потока, м/с	Время движения зерен на учетном участке		
		Среднее значение, с	Среднее квадратическое отклонение, с	Коэффициент вариации, %
<i>Пшеница, плотность $\gamma = 760 \text{ кг/м}^3$</i>				
0	0	0,129	0,00093	0,71
50	5,6	0,206	0,00431	2,09
60	6,7	0,267	0,02841	10,63
65	7,2	0,320	0,01639	5,12
70	8,5	0,585	0,13792	23,57
<i>Овес, плотность $\gamma = 610 \text{ кг/м}^3$</i>				
0	0	0,148	0,00022	0,15
40	4,5	0,151	0,00104	0,69
45	5,0	0,161	0,00967	5,99
50	5,6	0,239	0,01362	5,69
55	6,3	0,278	0,05343	19,23
60	6,7	0,504	0,38411	76,18
65	7,2	0,656	0,39203	59,72

Без воздействия воздушного потока время движения зерен составляло 0,129...0,148 с при незначительных колебаниях по вариантам наблюдений (коэффициент вариации 0,15...0,71 %). В обоих случаях с увеличением скорости восходящего воздушного потока время движения зерен на участке замера увеличивалось.

Следует отметить повышение коэффициента вариации времени движения отдельных зерен с увеличением скорости воздушного потока, т. е. характер движения зерен становится более хаотичным.

В целом скорость падения семян пшеницы выше, чем семян овса из-за меньшей плотности и большей парусности. Из построенных графиков (рисунок 3) видно, что с увеличением воздушного потока скорость падения семян пропорционально уменьшается. При отсутствии воздушного потока скорость падения семян максимальная.

Отмечаются близкие к обратно пропорциональным зависимости снижения скорости падения семян с возрастанием скорости восходящего воздушного потока. При этом для зерен пшеницы при увеличении скорости восходящего воздушного потока в пределах 0...8,5 м/с скорость падения снижается в 4,51 раза. Для зерен овса при изменении скорости восходящего воздушного потока от 0 до 7,2 м/с снижение скорости падения происходит в 4,42 раза. Эти снижения скорости падения весьма существенны и могут оказывать влияние на рабочий процесс машин, использующих воздушные потоки для технологического воздействия на зерна сельскохозяйственных культур.

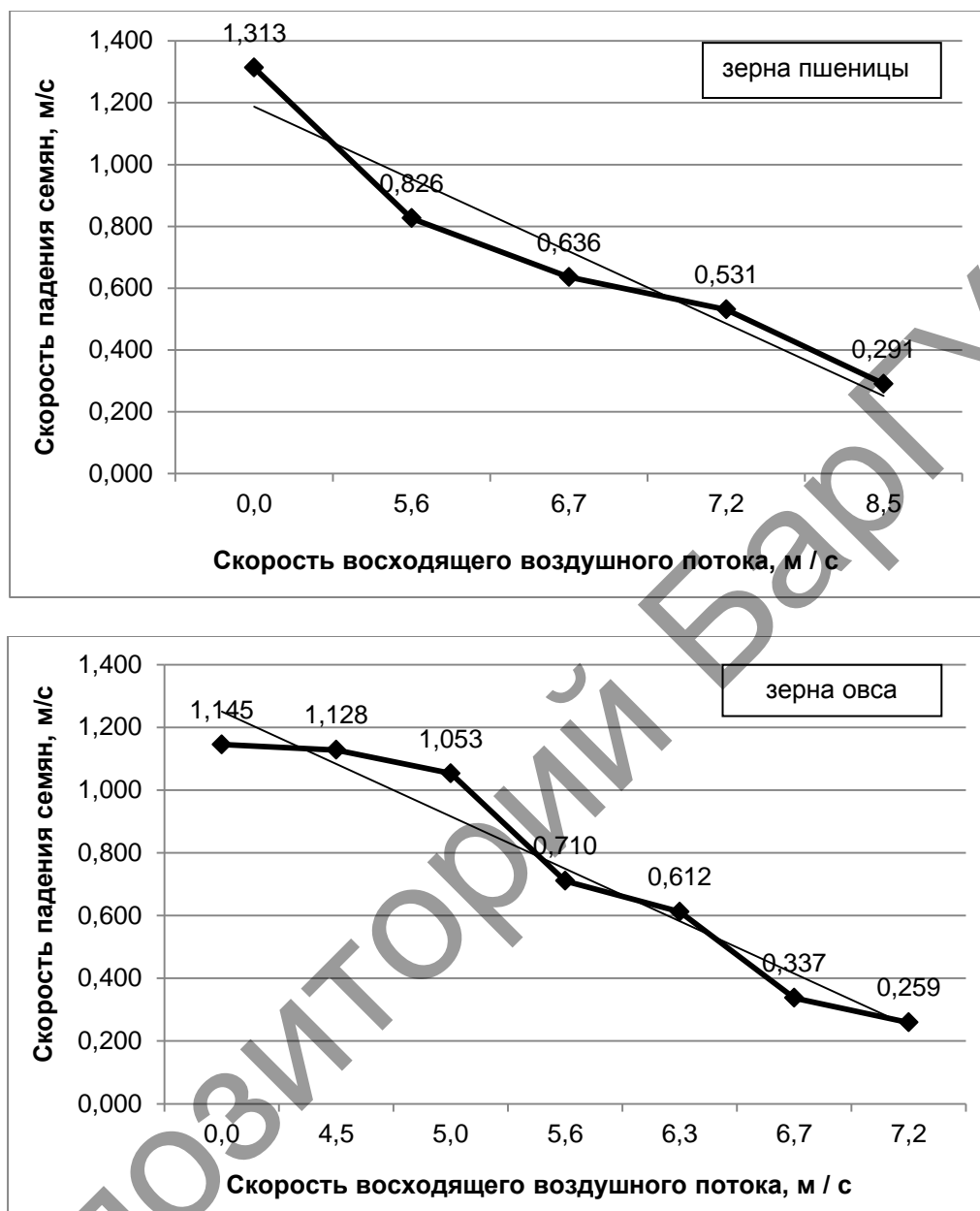


Рисунок 3. — Скорость падения зерен пшеницы и овса в зависимости от скорости восходящего воздушного потока

Заключение. Разработанная методика исследования движения зерен в восходящем воздушном потоке позволяет определить изменения скорости их падения.

Установлена обратно пропорциональная зависимость между скоростью падения зерен пшеницы и овса с увеличением скорости вертикального воздушного потока в диапазоне до критической (скорости витания). Снижение скорости падения семян пшеницы и овса может достигать 4,42...4,51 раза в сравнении со скоростью свободного падения семян и должно учитываться при выборе параметров соответствующего технологического оборудования.

Список цитируемых источников

1. Турбин, Б. Г. Вентиляторы сельскохозяйственных машин. Теория и технологический расчет / Б. Г. Турбин. — Л. : Машиностроение, 1968. — 160 с.
2. Летошнев, М. Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет проектирование и испытание / М. Н. Летошнев. — М.— Л. : Гос. изд-во с/х лит., 1955. — 764 с.
3. Механико-технологические свойства сельскохозяйственных материалов / Г. А. Хайлис [и др.]. — Луцк : ЛГТУ, 1998. — 268 с.
4. Ковалев, Н. Г. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства) / Н. Г. Ковалев, Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев. — М. : Родник : Аграр. наука, 1998. — 208 с., ил.
5. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины : Элементы теории рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы / Н. И. Кленин, В. А. Сакун. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Колос, 1980. — 671 с.
6. Камалетдинов, Р. Р. Модельное представление и машинный анализ процесса инкрустации семян в воздушном потоке / Р. Р. Камалетдинов, Д. Ю. Широков // Роль науки в инновационном развитии АПК : материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию со дня рождения А. П. Иофинова. — Уфа : БашГАУ, 2012. — С. 23—27.
7. Смелик, В. А. Предпосевная обработка семян нанесением искусственных оболочек / В. А. Смелик, Е. И. Кубеев, В. М. Дринча. — СПбГАУ, 2011. — 272 с.
8. Масло, И. П. Исследование процесса обработки семян защитными препаратами в вертикальном замкнутом воздушном потоке : дис. ... канд. техн. наук / И. П. Масло. — Киев, 1971. — 131 л.

Поступил в редакцию 29.10.2018

Репозиторий БашГАУ

УДК 621.7/9.048.7

К. М. Михайлов, М. И. Михайлов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Министерство образования Республики Беларусь, пр. Октября, 48, 246746 Гомель, +375 (032) 24 77 54, Mihailov@gstu.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРЫ ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕГО БАРАБАНА КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Исследовано напряженно-деформированное состояние опор измельчающего барабана кормоуборочного комбайна. Выполнен анализ влияния нагрузки на напряжения, деформации и перемещения опор качения и модельной конструкции. Установлена эквивалентная конструкция, позволяющая сократить объем расчетов на ЭВМ.

Ключевые слова: кормоуборочный комбайн; измельчающий барабан; опоры; моделирование.

Рис. 6. Библиогр.: 13 назв.

K. M. Mikhailov, M. I. Mikhailov

Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 48 October Ave., 246746 Gomel, the Republic of Belarus, +375 (232) 24 77 54, Mihailov@gstu.by

MODELING OF THE TENSE-DEFORMED STATE OF THE SUPPORT OF THE CHOPPING DRUM OF FORAGE HARVESTER

The tense-deformed state of the supports of the chopping drum of the forage harvester has been investigated. The analysis of the load effect on the tense, deformation and displacement of rolling bearings and the model construction has been done. An equivalent model has been installed to reduce calculations on the computer.

Keywords: forage harvester; chopping drum; supports; modeling.

Fig. 6. Ref.: 13 titles.

Введение. Одной из главных проблем отечественных предприятий обрабатывающей промышленности является обеспечение качества выпускаемых изделий. Особенно остро во всех отраслях машиностроения стоит вопрос обеспечения надежности технологического оборудования и продукции.

Как показывает практика, большинство отказов механизмов и машин приходится на узлы трения [1; 2]. Так, основной причиной потери работоспособности подшипника качения при нормальных условиях эксплуатации является усталостное выкрашивание поверхностей качения. Указанный вид износа является следствием циклически изменяющихся контактных нагрузок, передаваемых через относительно небольшие площадки контакта. Причиной такого разрушения является возникновение контактных напряжений, которые могут превышать пределы прочности материалов взаимодействующих деталей.

В практике используется множество методов повышения долговечности узлов качения, наибольшее распространение среди которых нашло применение смазочных материалов и новых подшипниковых материалов [3—8].

В настоящее время вопрос взаимодействия деталей подшипника под нагрузкой освещен явно недостаточно. Изучение надежности технологического оборудования требует разработки моделей сложных элементов техники (рисунок 1). Использование численных методов анализа сложных узлов требует разбивки их на конечные элементы, при этом размер сетки элементов зависит от размеров деталей машины.

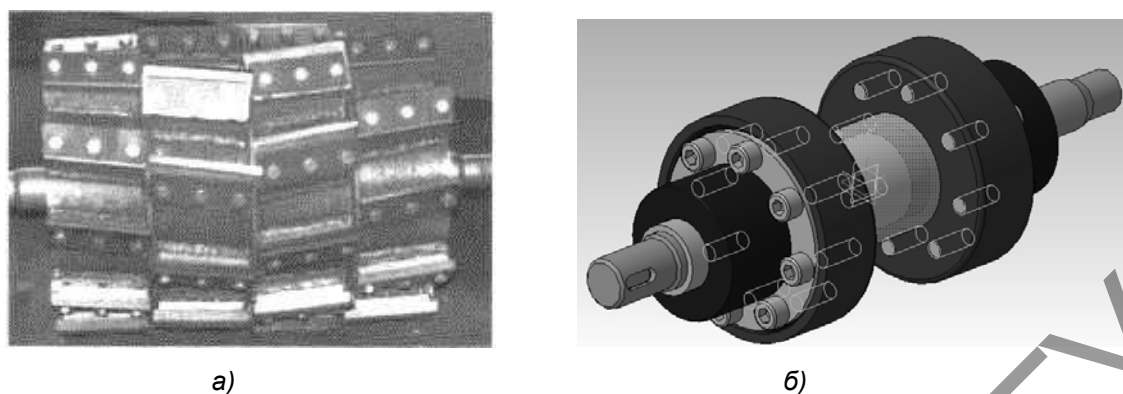


Рисунок 1. — Конструкция барабана (а) и 3D-модель вала барабана с подшипниковыми опорами (б)

Если в конструкцию машины входят подшипники, то их тела качения разделяются на элементы малых размеров, что приводит к росту количества уравнений системы. В результате возникают определенные сложности с достижением необходимой точности исследования сложных узлов машин.

Для изучения особенностей распределения нагрузки в узлах машин требуется решение следующих задач: 1) разработать оптимальную модель узла; 2) разработать модельный узел, заменяющий подшипники качения.

Целью работы является создание эквивалентной компьютерной модели опоры, заменяющей подшипники качения.

Методика исследования. Анализ научных данных [11—13] показал, что решение задачи по моделированию работы подшипника качения сводится к рассмотрению работы подшипника с соединением его деталей без зазора, с зазором и с натягом. Условия нагружения — радиальная вертикальная сила, действующая на наружное кольцо.

Задача математического моделирования решалась численным методом в программном комплексе конечно-элементного анализа SolidWorks. Компьютерная трехмерная геометрическая модель объекта исследования, построенная на основе конструктивных параметров подшипника, приведена на рисунке 1, б.

При создании математической модели контакта деталей подшипника были сделаны следующие основные допущения: 1) зазор в зоне контакта исключен; 2) с целью моделирования сепаратора, обеспечивающего ограничение взаимного перемещения тел качения, была создана жесткая связь, соединяющая тела качения и имеющая в месте соединения с каждым телом три вращательные степени свободы относительно оси, параллельной оси симметрии подшипника.

В качестве материала взаимодействующих тел принималась сталь ШХ15 ГОСТ801-78; для которой модуль Юнга $2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона 0,3. При создании на основе геометрической модели конечно-элементной модели для выделенных околоконтактных объемов исследуемых тел назначался размер элементов величиной 100 мкм (на основании ранее проведенного численного моделирования и сопоставления с результатами аналитического решения), для остальных областей — 1 мм. При создании конечно-элементной модели применялся алгоритм с преобладающим использованием элементов гексагональной формы второго порядка. Созданные конечно-элементные модели приведены на рисунке 2. Условия контактного взаимодействия задавались между поверхностями контактирующих тел и дорожками качения. Для расчета условий контактного взаимодействия использовался уточненный алгоритм Лагранжа. Задавалось несимметричное поведение контактирующих поверхностей, в качестве целевой использовались поверхности дорожек качения, а контактной — тела качения.

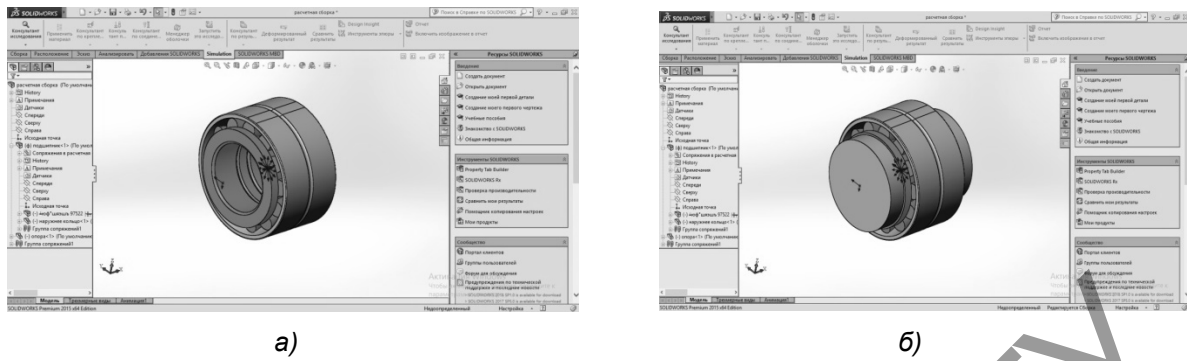


Рисунок 2. — Расчетная схема для определения перемещений в SolidWorks: двухрядный радиальный подшипник (а); сборка подшипниковой опоры (б)

С целью исключения погрешностей компьютерного решения задавалось автоматическое соприкосновение поверхностей деталей. В качестве граничных условий назначалось ограничение перемещений по всем степеням свободы вала. Для упрощения расчетов и анализа полученных результатов действие осевой нагрузки исключали. Действующая радиальная статическая нагрузка прикладывалась к поверхности наружного кольца. Затем прикладывалась силовая нагрузка к заранее выделенной площадке, численное значение которой составляло 1 000 и 10 000 Н.

Анализ результатов моделирования. В результате проведения численных расчетов были получены картины, отображающие напряжение, перемещение и деформации. Увеличение нагрузки в 10 раз позволило установить, что характер распределения деформаций (рисунки 3, а, и 4, а), напряжений (см. рисунки 3, б, и 4, б) и перемещений (см. рисунки 3, в, и 4, в) изменился незначительно.

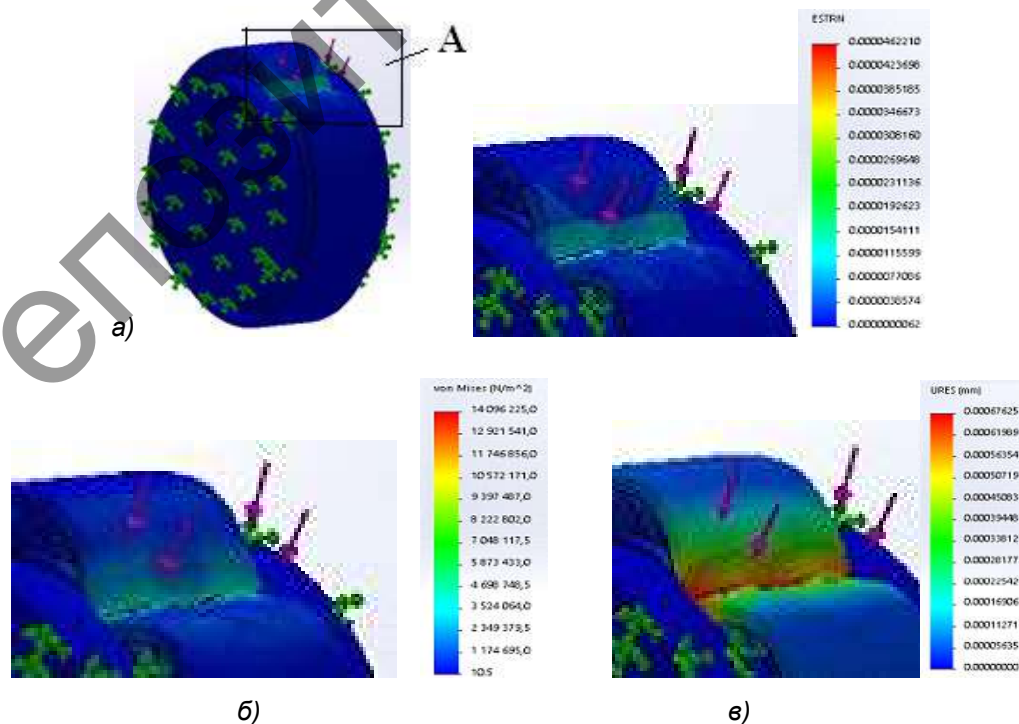


Рисунок 3. — Картины распределения деформаций (а), напряжений (б) и перемещений (в) при нагрузке подшипниковой опоры 1 000 Н

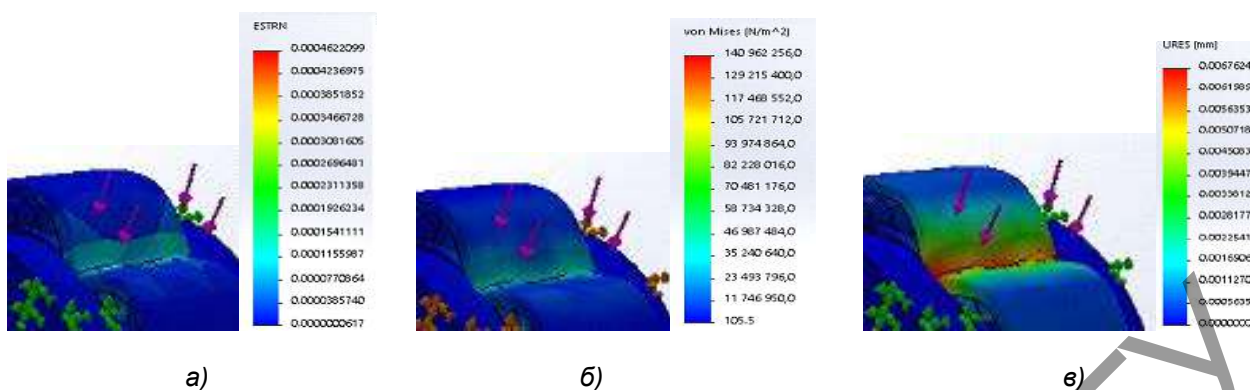


Рисунок 4. — Картины распределения деформаций (а), напряжений (б) и перемещений (в) при нагрузке подшипниковой опоры 10 000 Н

Затем были проведены серии расчетов с модельными опорами вместо подшипника. В результате расчетов установлено, что при постоянных геометрических параметрах исследуемой модели, оптимальным материалом модельной опоры является серое литое железо, обладающее следующими физико-механическими свойствами:

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	66178,1	Н / мм ²
Коэффициент Пуассона	0,27	Не применимо
Модуль сдвига	50 000	Н / мм ²
Массовая плотность	7 200	кг / м ³
Предел прочности при растяжении	151,66	Н / мм ²
Предел прочности при сжатии	572,16	Н / мм ²
Предел текучести		Н / мм ²
Коэффициент теплового расширения	1,2e · 10 ⁵	/К
Теплопроводность	45	Вт / (м · К)
Удельная теплоемкость	510	Д / (кг · К)
Коэффициент демпфирования материала		Не применимо

Рассмотрим результаты расчетов напряженно-деформированного состояния (рисунки 5 и 6). В результате расчетов установлено, что максимальные перемещения модельной опоры под действием силы 1 000 Н составляют $6,6213 \cdot 10^{-4}$ мм, при той же нагрузке максимальные перемещения в подшипнике составили $6,7625 \cdot 10^{-4}$ мм. При нагрузке в 10 000 Н максимальные перемещения в модельной опоре составили $6,62125 \cdot 10^{-3}$ мм, в подшипнике — $6,76247 \cdot 10^{-3}$ мм.

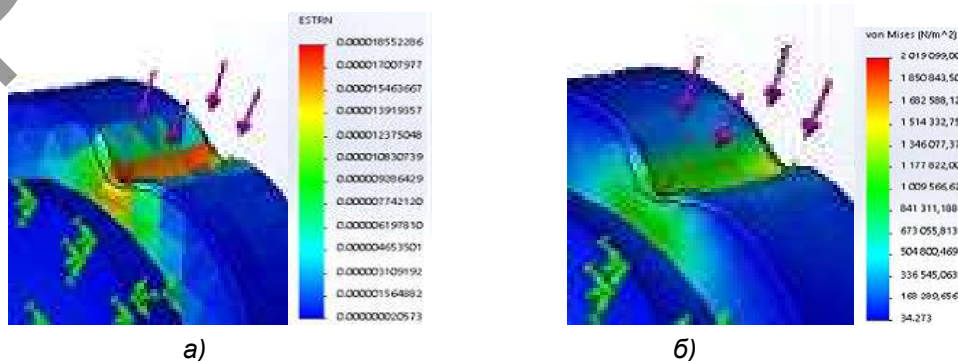
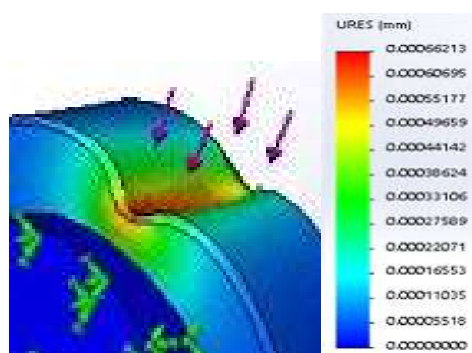
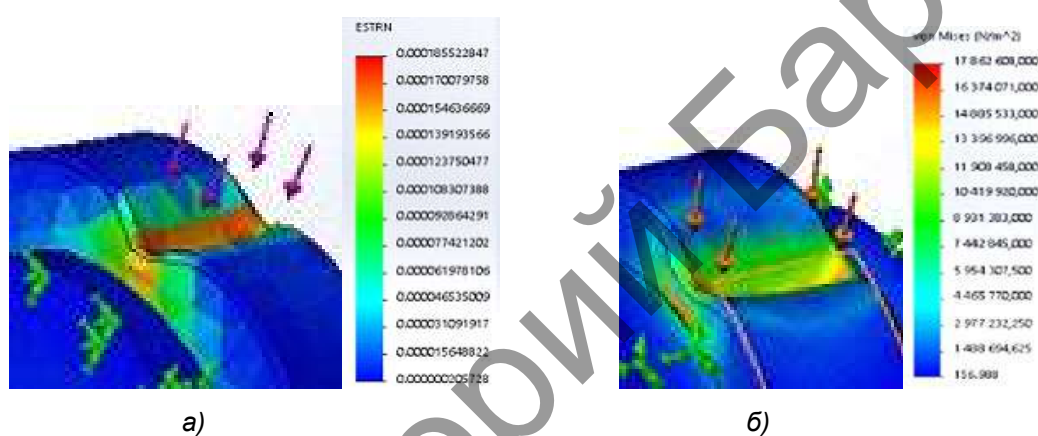


Рисунок 5. — Картины распределения деформаций (а), напряжений (б) и перемещений (в) при нагрузке модельной опоры 1 000 Н



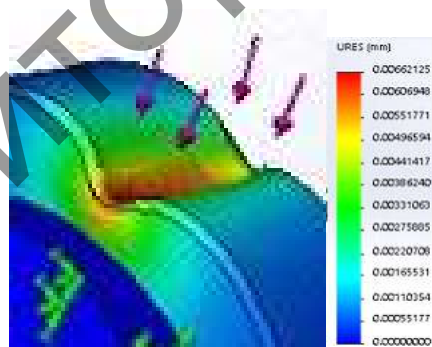
в)

Рисунок 5. — Продолжение



а)

б)



в)

Рисунок 6. — Картины распределения деформаций (а), напряжений (б) и перемещений (в) при нагрузке модельной опоры 10 000 Н

Кроме этого, для дополнительного анализа полученных результатов использовались коэффициенты соответствия

$$K_{ij} = \frac{\sigma_p}{\sigma_m}; K_{ij} = \frac{\delta_p}{\delta_m}; K_{ij} = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m},$$

где σ_p , σ_m , δ_p , δ_m , ε_p , ε_m — напряжения, перемещения и деформации подшипниковых и модельных опор соответственно.

$$K_{11} = 6,9517; K_{12} = 1,0213; K_{13} = 2,38; K_{21} = 7,891; K_{22} = 1,0213; K_{23} = 2,4914.$$

Заключение. Анализ данных, полученных путем математического моделирования, позволяет сделать вывод, что в процессе радиального нагружения подшипника качения его детали испытывают существенные напряжения различного рода; применение модельных опор позволяет упростить задачу при исследовании напряженно-деформированного состояния сложного узла барабана кормоуборочного комбайна; в качестве материала модельной опоры можно использовать серое литое железо.

Список цитируемых источников

1. *Bayer, G. Mechanical Wear Fundamentals and Testing* / G. Bayer, G. Raimond. — USA, New York : Marcel Dekker, 2004. — 396 p.
2. *Stachowiak, W. G. Engineering Tribology* / W. G. Stachowiak, A. W. Bachelor. — Munhen : Butterworth-Heinemann, 2001. — 765 p.
3. Трение, изнашивание и смазка / И. В. Крагельский [и др.] ; под общ. ред. В. В. Алисиной. — М. : Машиностроение, 1978. — 400 с.
4. *Горелов, А. А. Современные материалы и технологии в машиностроении* / А. А. Горелов. — М. : МИСиС, 2011. — 312 с.
5. *Попилов, Л. Я. Новые материалы в машиностроении* / Л. Я. Попилов. — М. : Машиностроение, 1967. — 427 с.
6. *Котов, С. Ю. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения тел качения покрытием ZrN на долговечность подшипника* / С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Вести ЛГУ. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. — 2013. — № 11. — С. 38—43.
7. *Котов, С. Ю. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения элементов качения на долговечность подшипника* / С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Наука и техника. — 2014. — № 2. — С. 57—61.
8. *Котов, С. Ю. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения элементов качения PVD покрытием ZrN на температуру подшипникового узла* / С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Вести ГрГУ. — 2013. — № 4. — С. 102—105.
9. Минский подшипниковый завод. Каталог подшипников [Электронный ресурс] / Официальный сайт ОАО «Минский подшипниковый завод». — Минск, 2014. — Режим доступа: <http://mpz.com.by/catalog/bearings/bearing-catalogue/425/8506>. — Дата доступа: 30.01.2019.
10. Подшипники качения : справ. пособие / Н. А. Спицын [и др.] ; под общ. ред. Н. Ю. Благосклонова. — М. : Машгиз, 1961. — 828 с.
11. *Нарышкин, В. Н. Подшипники качения* : справ.-каталог / В. Н. Нарышкин, Р. В. Коросташевский. — М. : Машиностроение, 1984. — 280 с.
12. *Перель, Л. Я. Подшипники качения. Расчет, проектирование и обслуживание опор* / Л. Я. Перель. — М. : Машиностроение, 1983. — 543 с.
13. *Шмелев, А. В. Разработка математической модели взаимодействия элементов качения и кольца шарикового подшипника* / А. В. Шмелев, С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Вести Белорус.-Рос. ун-та. — 2015. — № 4 (49). — С. 94—102.

Поступил в редакцию 17.05.2019

УДК 621.89.097.2

А. А. Пивоварчик¹, А. К. Гавриленя², А. И. Сергей¹

¹Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»,
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Ожешко, 22, 230021, Гродно, +375 (29) 876 68 24,
Pivovarchik_AA@grsu.by

²Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования
Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 222 59 33,
AndrejGavrilenya@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКИХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ИСПОЛЗУЕМЫХ В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Научная новизна работы состоит в получении новых экспериментальных данных по изменению кинематической вязкости полусинтетических моторных масел марки SAE 10W40 производителей компаний Лукойл и Ursa, измеренной при 40 и 100 °С при увеличении пробега транспортного средства.

Показаны результаты исследования кинематической вязкости моторных масел марки SAE 10W40 от производителей: компаний Лукойл (Россия) и Ursa (Бельгия). Результаты исследований будут полезны инженерам-механикам при выборе марки моторного масла, используемого в дизельных двигателях внутреннего сгорания в целях увеличения надежности и работоспособности узлов и агрегатов двигателя.

Ключевые слова: дизельный двигатель внутреннего сгорания; автотранспортные механические средства; моторное масло; вискозиметр; кинематическая вязкость.

Рис. 2. Библиогр.: 14 назв.

A. A. Pivovarchyk¹, A. K. Haurylenia², A. I. Sergey¹

¹Yanka Kupala State University of Grodno, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 22 Ozheshko Str.,
230021 Grodno, the Republic of Belarus, Pivovarchik_AA@grsu.by, tel. +375 (29) 876 68 24

²Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str.,
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, AndrejGavrilenya@mail.ru, tel. +375 (29) 222 59 33

STUDY OF KINEMATIC VISCOSITY OF SEMISYNTHETIC MOTOR OILS, USED IN DIESEL ENGINES OF MECHANICAL VEHICLES

The scientific novelty of the study consists in obtaining new experimental data on changes in the kinematic viscosity of semi-synthetic motor oils of brand SAE 10W40 which was measured at 40 and 100° C with an increase in vehicle mileage. The results of the study of the kinematic viscosity of the engine oils SAE 10W40 that were produced by the companies of Lukoil (Russia) and Ursa (Belgium) have been shown. The data obtained will be useful to mechanical engineers when choosing the brand of motor oil for diesel internal combustion engines in order to increase the reliability and efficiency of engine components and assemblies.

Key words: diesel internal combustion engine; motor vehicles; motor oil; viscometer; kinematic viscosity.

Fig. 2. Ref.: 14 titles.

Введение. Двигатели внутреннего сгорания являются основным потребителем моторных масел. В настоящее время отечественными и зарубежными производителями выпускается более 200 различных марок моторных масел.

Моторные масла представляют собой сложные по химическому составу эксплуатационные материалы, в значительной степени определяющие работу двигателя. Правильно подобранное моторное масло позволяет увеличить ресурс работы двигателя в среднем до 40 %. В свою очередь, знание состава и эксплуатационных свойств моторных масел — необходимое условие для специалиста, работающего в сфере эксплуатации и обслуживания автотранспортных механических средств.

Вязкость является одним из наиболее важных свойств смазочного масла. Именно от вязкости в значительной степени зависят надежность поступления масла в зазоры основных узлов трения двигателя, создание достаточно прочной масляной пленки при трении, легкость пуска двигателя при низких температурах, механические потери, расход топлива, интенсивность изнашивания и т. д. [1—4].

Кинематическая вязкость (высокотемпературная) — эксплуатационный показатель качества для всех видов моторных масел. Она представляет собой отношение динамической вязкости к плотности моторного масла. Кинематическая вязкость также характеризует внутреннее трение состава или его сопротивление собственному течению, а также позволяет оценить показатели текучести моторного масла при рабочих температурах 40 °С и 100 °С.

В работах [3; 5] отмечается, что моторные масла по вязкости при 100 °С классифицируются на маловязкие (3...4 мм²/с), средневязкие (4...6 мм²/с), а также вязкие (8...9 мм²/с и выше). Вязкость моторного масла определяет толщину масляной пленки, образующуюся на поверхностях трения в процессе работы двигателя внутреннего сгорания, а следовательно, степень износа деталей двигателя, его прокачиваемость при низких температурах, а также надежность смазывания при высоких температурах. Кроме того, вязкость оказывает существенное влияние на потери на трение и расход топлива.

Из ГОСТ 10541-78 «Масла моторные универсальные и для автомобильных карбюраторных двигателей. Технические условия» следует, что кинематическая вязкость универсальных моторных масел, используемых в дизельных двигателях внутреннего сгорания при 100 °С, должна находиться в пределах от 8±0,5 до 17 мм²/с.

В работе [6] утверждается, что кинематическая вязкость моторного масла для дизельных двигателей при 100 °С должна находиться в пределах от 8 до 16,5 мм²/с, а при 40 °С — не ниже 160 мм²/с, что обеспечит высокую работоспособность двигателя.

По мнению, изложенному в работе [7], кинематическая вязкость моторного масла для дизельных двигателей при 100 °С должна находиться в пределах 12,0...14,0 мм²/с, что позволяет увеличить срок работы двигателя.

Для определения сроков службы моторного масла в двигателях ряд авторов рекомендует использовать так называемые браковочные показатели, при достижении которых моторное масло следует заменить [8—11]. Браковочные показатели для значения кинематической вязкости соответствуют следующим значениям: в сторону увеличения значения кинематической вязкости на 25 % и уменьшения первоначального значения более чем на 20 % [9—11].

Вследствие того, что условия эксплуатации механических транспортных средств могут быть весьма различны, в том числе по причине износа элементов двигателя внутреннего сгорания, нарушения температурного режима работы и других факторов, степень снижения эксплуатационных свойств моторных масел существенно возрастает, и, как итог, установленные заводом-изготовителем требования по замене моторного масла могут не выполняться. В связи с этим представляет интерес анализ возможного снижения одного из важнейших эксплуатационных свойств моторного масла — кинематической вязкости, измеренной при 40 и 100 °С, в целях уточнения фактических сроков замены моторного масла, что позволит увеличить срок службы двигателя.

Методика проведения исследований. Для исследований выбрали полусинтетические моторные масла для дизельных двигателей внутреннего сгорания Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 (Россия) и Ursa Premium TD SAE 10W40 (Бельгия). Выбор указанных марок связан с тем, что данные моторные масла централизованно закупаются Республикой Беларусь и используются на автотранспортных предприятиях. Выбранные марки моторных масел заливали в пассажирские автобусы марки МАЗ 203060, оборудованные дизельным двигателем DAIMLER AG с газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха соответственно. Перед проведением исследований провели замену моторного масла, при этом

пробег автотранспортного средства составлял 96 000 км. После чего через каждые 2 000 км до 20 000 км включительно отбиралась проба моторного масла для выполнения исследований по определению кинематической вязкости моторного масла при 40 °С и 100 °С.

После проведения исследований моторных масел образцы масла обратно заливали в двигатель автомобиля. Доливание свежего моторного масла в двигатель не проводили вследствие того, что перед проведением исследований масла залили до максимального уровня по щупу, что, в свою очередь, позволило получать более корректные экспериментальные данные. Перед отбором пробы исследуемого образца и продолжением дальнейших исследований следили за уровнем моторного масла в двигателе.

Кинематическую вязкость образцов моторного масла исследовали с использованием вискозиметра капиллярного ВПЖ-4 ГОСТ 10028-81 по методике, изложенной в ГОСТ 33-2000 «Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости». Сущность метода по определению кинематической вязкости заключается в измерении комбинированным стеклянным вискозиметром ВПЖ-4 времени истечения (в секундах) определенного объема испытуемой жидкости (моторного масла) под воздействием силы тяжести при постоянной температуре.

Кинематическую вязкость моторного масла определяли по формуле

$$\nu = \Pi \cdot t, \text{ мм}^2 / \text{с};$$

где Π — калибровочная постоянная вискозиметра, $\text{мм}^2 / \text{с}$;

t — время истечения образца из вискозиметра, с.

Образец для исследования помещали в термостатирующее подогревающее устройство и выдерживали в течение 1 ч при температуре 60 ± 2 °С, при этом осуществляли периодическое тщательное перемешивание пробы стеклянной палочкой. Температуру при выполнении экспериментов контролировали с помощью термометра А1 (ГОСТ 28498-90) с ценой деления 1 °С, после чего образец заливали в колбу 1-300-1 (ГОСТ 1770-74) 300 см³ в количестве, необходимом для заполнения вискозиметра до уровня, указанного на приборе. Затем погружали колбу с пробой на 30 мин в баню с кипящей водой. Вискозиметр также помещали в термостатирующее устройство для предварительного прогрева до температуры испытания.

Время истечения исследуемого объема образца из вискозиметра при температуре 40 °С и 100 °С от первой отметки до второй фиксировали с использованием секундомера, с точностью измерения 0,1 с. Перед исследованием очередного образца моторного масла вискозиметр тщательно промывали, используя уайт-спирит, а затем сушили путем пропускания струи сухого отфильтрованного воздуха в течение не менее 2 мин до полного удаления следов уайт-спирита.

Результаты исследований и их обсуждение. Полученные экспериментальные данные по изменению кинематической вязкости моторных масел при температуре 40 °С показали, что исследуемый показатель с увеличением пробега автомобиля снижается для обеих марок моторного масла Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 и Ursa Premium TD SAE 10W40 (рисунок 1).

Из рисунка 1 видно, что наиболее интенсивное снижение кинематической вязкости при 40 °С происходит при пробеге двигателя 4 тыс. км и более. При этом кинематическая вязкость при 40 °С при пробеге автомобиля 4 тыс. км при работе двигателя на моторном масле Ursa Premium TD SAE 10W40 уменьшается от 129,8 до 103,7 $\text{мм}^2 / \text{с}$, а при использовании моторного масла марки Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 данный показатель снижается от 131,0 до 105,9 $\text{мм}^2 / \text{с}$.

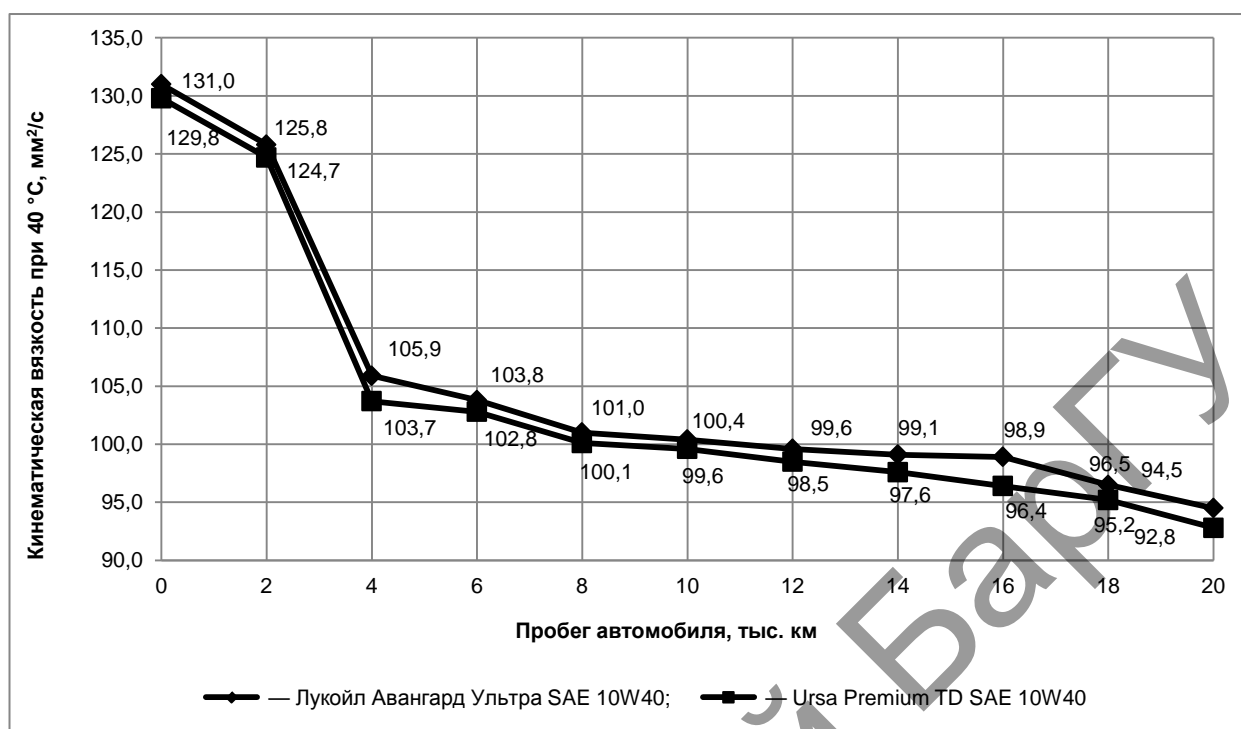


Рисунок 1. — Результаты исследования кинематической вязкости моторных масел марки Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 и Ursa Premium TD SAE 10W40 при 40 °C

Установлено, что при пробеге 4 тыс. км кинематическая вязкость при 40 °C образцов моторного масла марки Ursa Premium TD SAE 10W40 уменьшается на 20,1 %, а у моторного масла марки Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 — на 19,2 % в сравнении с исходными значениями исследуемого показателя качества моторного масла.

Также следует отметить, что при пробеге автомобиля до 20 тыс. км кинематическая вязкость при 40 °C при использовании моторного масла марки Ursa Premium TD SAE 10W40 понижается до 92,8 мм²/с, а у моторного масла марки Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 — до 94,5 мм²/с.

Как видно из рисунка 1, в результате пробега автомобиля до рекомендуемого срока замены моторного масла (20 тыс. км) кинематическая вязкость при 40 °C моторного масла марки Ursa Premium TD SAE 10W40 уменьшается на 28,5 %, моторного масла марки Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 — на 27,9 % соответственно в сравнении с первоначальным значением данного исследуемого показателя качества моторного масла.

Результаты исследований показали, что значение кинематической вязкости при 100 °C при исследовании образцов моторного масла марки Ursa Premium TD SAE 10W40 при пробеге 20 тыс. км снижается с 14,8 мм²/с до 11,2 мм²/с (рисунок 2). Установлено, что при пробеге 4 тыс. км кинематическая вязкость при 100 °C уменьшается наиболее значительно: с 14,8 до 12,0 мм²/с. При дальнейшем увеличении пробега до 6 тыс. км отмечен небольшой рост кинематической вязкости до 12,3 мм²/с, после чего кинематическая вязкость равномерно уменьшается в среднем на 0,1 мм²/с на последующих контрольных этапах измерения кинематической вязкости при 100 °C, равных 2 тыс. км.

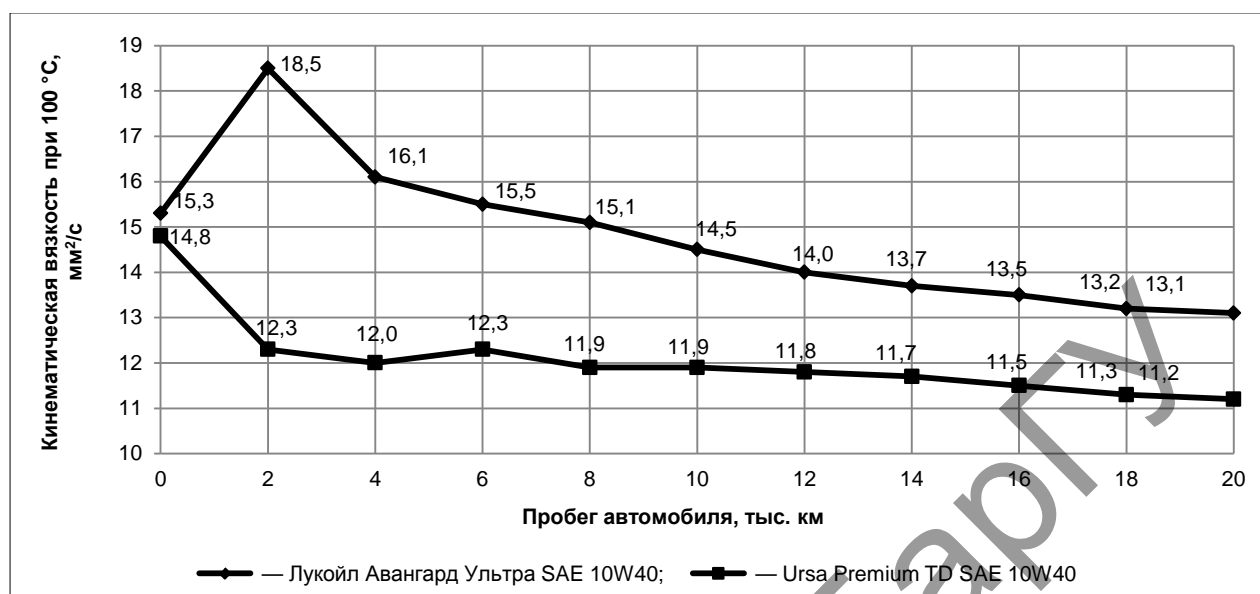


Рисунок 2. — Результаты исследования кинематической вязкости моторных масел марки Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 и Ursa Premium TD SAE 10W40 при 100 °C

Снижение значения кинематической вязкости при 100 °C моторного масла марки Ursa Premium TD SAE 10W40 при пробеге автомобиля 20 тыс. км составила 24,3 % (см. рисунок 2). Это свидетельствует о потере моторным маслом своих технологических свойств, так как, по мнению, изложенному в работах [12—14], моторное масло необходимо заменять раньше установленного нормативной документацией срока при снижении показателя более чем на 20 %. Однако мнение авторов, представленное в работах [9—11], свидетельствует о том, что замену моторного масла следует проводить при снижении кинематической вязкости на 30 % и более. Можно также предположить, что за последующие 2 тыс. км пробега значение кинематической вязкости уменьшается до значений, указывающих на преждевременную замену моторного масла.

На рисунке 2 показано, что кинематическая вязкость при 100 °C моторного масла Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 при пробеге автомобиля 20 тыс. км снижается с 15,3 до 13,1 мм²/с. Данные численные изменения вязкости соответствуют 14,4 %, что ниже рекомендуемого значения изменения вязкости, свидетельствующего о досрочной замене моторного масла. Однако при пробеге 2 тыс. км кинематическая вязкость возрастает до значения 18,5 мм²/с, что соответствует увеличению вязкости на 23,3 % в сравнении с исходным значением. Причиной роста кинематической вязкости после замены масла может быть испарение легких фракций, а также накопление продуктов полимеризации и нерастворимых побочных продуктов.

В работе [3] автор указывает на то, что вязкость моторного масла возрастает под влиянием трибоэлектрических полей, которые проявляются в результате возникновения разности потенциалов на границе раздела фаз «металл — моторное масло». Можно предположить, что после замены моторного масла на трущихся поверхностях цилиндропоршневой группы образовывалась защитная масляная пленка, являющаяся токопроводящей средой, что, в свою очередь, способствовало возникновению электро-вязкостного эффекта, вызывающего повышение кинематической вязкости исследуемого моторного масла.

Установлено, что наибольшее изменение значений кинематической вязкости моторного масла Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 наблюдается при пробеге от 2 до 12 тыс. км при изменении параметра от 18,5 до 14,0 мм²/с. При дальнейшем увеличении пробега с 12 до 20 тыс. км кинематическая вязкость моторного масла Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40, измеренная при 100 °C, изменяется с 14,0 до 13,1 мм²/с.

Следует отметить, что изменение исследуемого в данной работе эксплуатационного показателя моторного масла, очевидно, происходит вследствие естественного «старения», вызванного тяжелыми условиями его эксплуатации. Это вышесказанное подтверждается выполненной в процессе эксплуатации транспортного средства диагностикой автомобиля, в результате проведения которой не обнаружено каких-либо отклонений в работе двигателя и его основных конструктивных элементов системы питания автомобиля. Периодичность проведения диагностики транспортного средства составляла 1 раз через каждые 5 тыс. км пробега автомобиля.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что кинематическая вязкость моторного масла марки Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40, измеренная при 40 °С, снижается при пробеге автомобиля 4 тыс. км на 0,9 % меньше, чем аналогичный показатель моторного масла Ursa Premium TD SAE 10W40, что свидетельствует о более высоком качестве масла.

Также установлено, что кинематическая вязкость моторного масла марки Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40, измеренная при 100 °С, при пробеге 20 тыс. км уменьшается на 9,8 % меньше, чем у моторного масла Ursa Premium TD SAE 10W40.

Таким образом, в качестве моторного масла для дизельных двигателей целесообразнее использовать моторное масло марки Лукойл Авангард Ультра SAE 10W40 вследствие более высокого значения кинематической вязкости.

Список цитируемых источников

1. *Васильева, Л. С.* Автомобильные эксплуатационные материалы / Л. С. Васильева. — М. : Наука-Пресс, 2003. — 421 с.
2. *Топливо, смазочные материалы и технические жидкости / В. В. Остриков [и др.].* — Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. — 304 с.
3. *Карташевич, А. Н.* Топливо, смазочные материалы и технические жидкости / А. Н. Карташевич, В. С. Товстыка, А. В. Гордеенко. — М. : Инфра-М, 2015. — 420 с.
4. *Геленов, А. А.* Автомобильные эксплуатационные материалы / А. А. Геленов, Т. И. Соченко, В. Г. Спиркин. — 4-е изд., стер. — М. : Академия, 2015. — С. 115—116.
5. *Долгова, Л. А.* Обеспечение рационального ресурса моторного масла в двигателях / Л. А. Долгова, В. В. Салмин // *Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И. Я. Яковлева.* — 2012. — № 2 (74). — С. 146—156.
6. *Трембач, Е. В.* Моторные и трансмиссионные масла, присадки / Е. В. Трембач. — Ростов н/Д : Феникс, 2000. — С. 81—97.
7. *Остриков, В. В.* Методические рекомендации по обоснованию наиболее информативных показателей качества работающих моторных масел и анализ существующих средств контроля / В. В. Остриков, В. В. Белогорский. — Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2007. — 62 с.
8. *Трофименко, И. Л.* Автомобильные эксплуатационные материалы / И. Л. Трофименко, Н. А. Коваленко, В. П. Лобах. — Минск : Новое знание, 2008. — 232 с.
9. *Сырбаков, А. П.* Топливо и смазочные материалы / А. П. Сырбаков, М. А. Корчуганова ; Том. политехн. ун-т. — Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. — 159 с.
10. *Каня, В. А.* Автомобильные эксплуатационные материалы / В. А. Каня, В. С. Пономаренко. — Омск : СибАДИ, 2012. — 242 с.
11. *Трубилов, А. К.* Автомобильные эксплуатационные материалы / А. К. Трубилов, В. А. Хитрюк. — Минск : Респ. ин-т проф. образования, 2012. — С. 79—105.
12. *Доблер, В. И.* Повышение эксплуатационной надежности двигателей дорожных и строительных машин трибологическим контролем состояния и активацией моторных масел : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. И. Доблер ; Том. политехн. ун-т. — Томск, 2005. — 23 с.
13. *Дашивец, Г. И.* Обоснование периодичности замены моторных масел при эксплуатации тракторных двигателей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Г. И. Дашивец ; ЦНИИ механизации и электрификации сел. хоз-ва Нечернозем. зоны СССР. — Минск, 1990. — 15 с.
14. *Чудиновских, А. Л.* Разработка научных основ химмотологической оценки автомобильных моторных масел : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / А. Л. Чудиновских ; Рос. гос. ун-т нефти и газа (нац. исслед. ун-т) им. И. М. Губкина. — М., 2016. — 50 с.

Поступил в редакцию 11.01.2019

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Научная концепция журнала предполагает публикацию современных достижений в области технических наук; представление результатов фундаментальных и прикладных исследований, а также результатов, полученных в производственных условиях областей, включая результаты национальных и международных исследований. Статьи аспирантов, докторантов и соискателей последнего года обучения публикуются вне очереди при условии их полного соответствия требованиям, предъявляемым к научным публикациям.

Публикация статей в журнале бесплатная на основании заключённого договора о передаче исключительных прав на объект авторского права (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках посредством заполненной формы по Интернету (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The scientific strategy of the journal suggests publishing modern achievements in the fields of Engineering sciences; presentation of the results of fundamental and applied research, as well as the results obtained under production conditions, both at the domestic and international level. Articles by postgraduate and doctoral students in their final year of traineeship are published out of turn if they are written in strict conformity with the specified requirements.

Publication of articles is free of charge in accordance with the existing contract on transfer of authority to the subject matter of copyright (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

Articles can be written in the Russian, Belarusian or English languages and should be sent by the Internet (see the form to fill in: URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

More detailed instructions for authors can be found on the official website of BarSU: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>.

Репозиторий БарГУ