

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 (*адказны за напрамак «Машынабудаванне 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 (*адказны 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.

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

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

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

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

Выдавец: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

Выходзіць на рускай, беларускай і англійскай мовах.

Часопіс распаўсюджваецца на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

Загадчык рэдакцыйна-выдавецкай групы 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
Малеронок В. В., Алифанов А. В., Богданович И. А. Метод исследования упрочненного слоя металлических образцов с использованием токов высокой частоты	70
Михайлов М. И., Мельников В. В. Повышение работоспособности вытяжных конусов стана тонкого волочения	76

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

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

ЗМЕСТ

МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

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

ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

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

CONTENTS

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

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

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

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

УДК 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 скользющем 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).

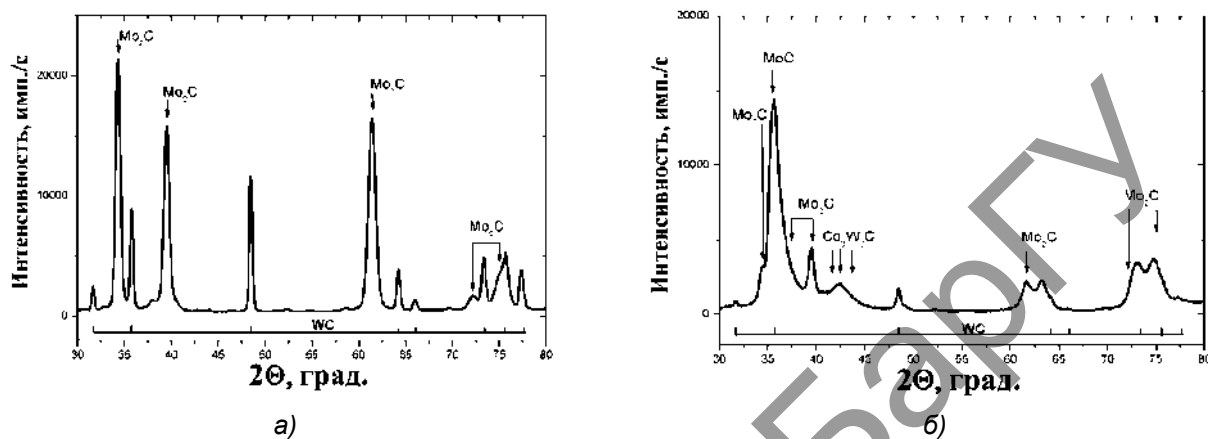


Рисунок 1. — Дифрактограммы образцов твердого сплава с покрытиями Mo_1_мин (а) и Mo_2_мин (б)

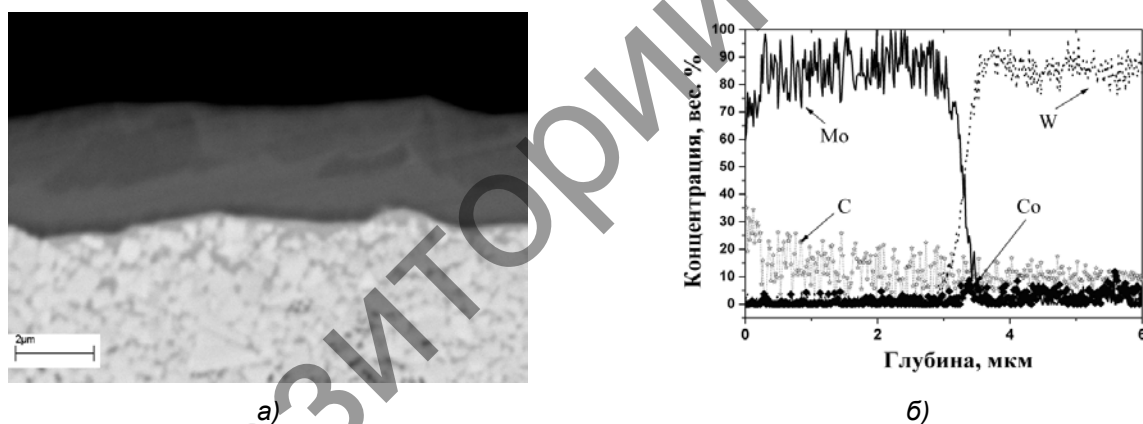


Рисунок 2. — РЭМ-изображение микроструктуры (а) поперечного шлифа покрытия Mo_1_мин и распределение по глубине содержания элементов (б)

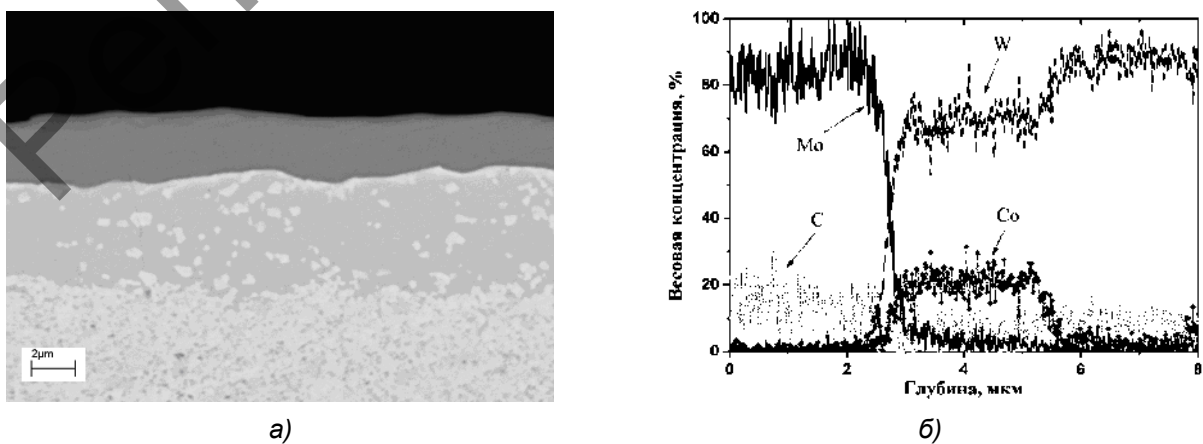


Рисунок 3. — РЭМ-изображение микроструктуры (а) поперечного шлифа покрытия Mo_2_мин и распределение по глубине содержания элементов (б)

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.

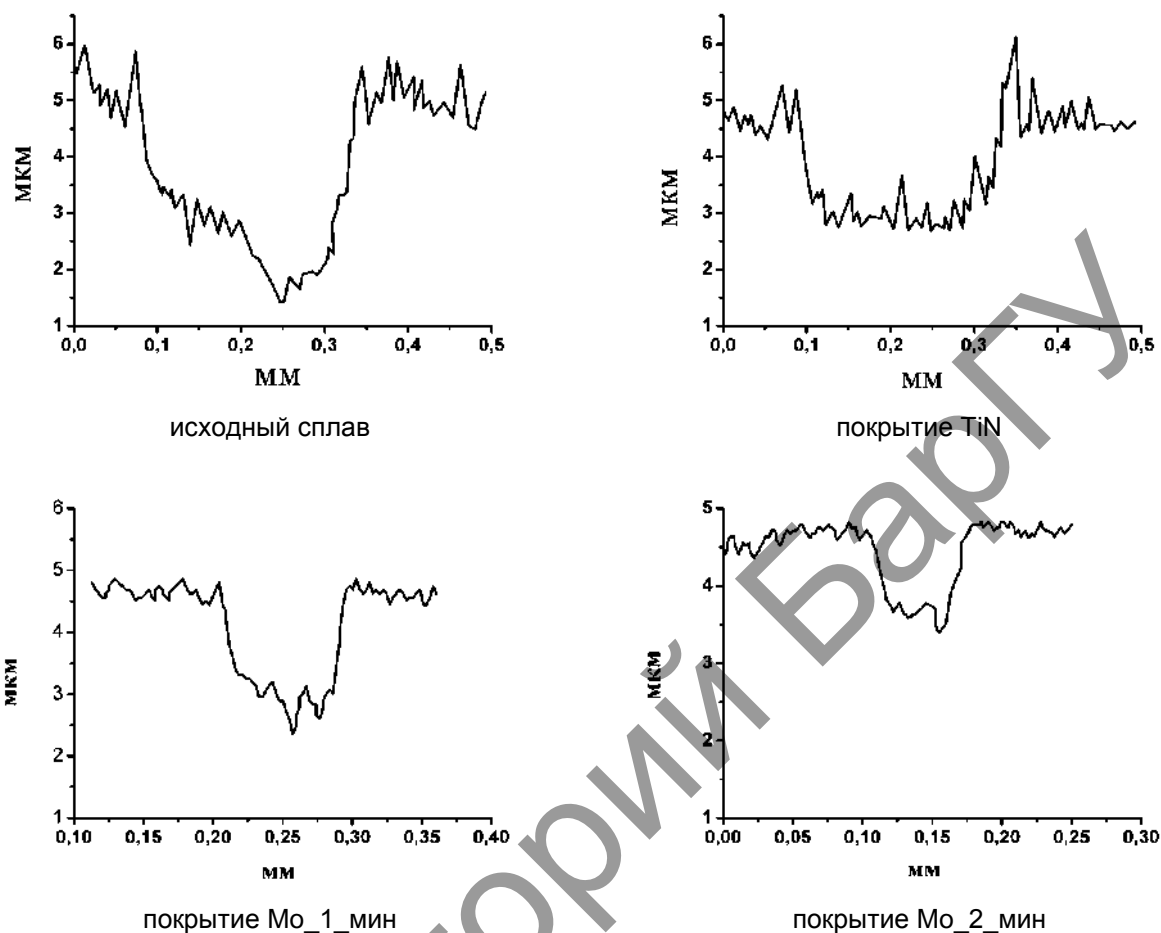


Рисунок 4. — Профилограммы треков износа твердого сплава и покрытий TiN, Mo_1_мин и Mo_2_мин, сформированных на твердосплавном инструменте

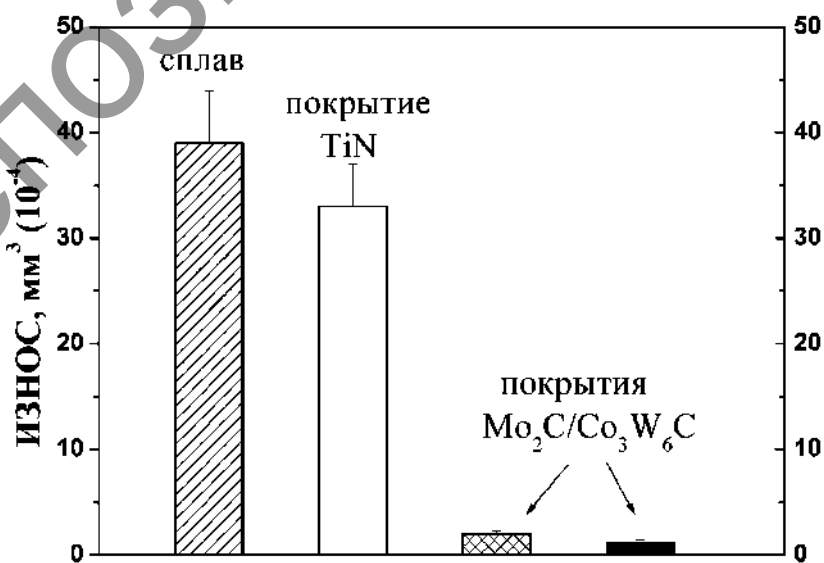


Рисунок 5. — Объемный износ твердого сплава и покрытий TiN, Mo₂C/Co₃W₆C (Mo_1_мин, Mo_2_мин), сформированных на твердосплавном инструменте, соответствующий их трекам износа

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