

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрас рэдакцыі:

вул. Войкава, 21, 225404 г. Баранавічы.

Тэлефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by.

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

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

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

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

Выдавец: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

Выходзіць на рускай, беларускай і англійскай мовах.

Часопіс распаўсюджваецца на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

Загадчык рэдакцыйна-выдавецкай групы С. А. Беразнюк

Тэхнічны рэдактар А. І. Бярэзіч

Камп'ютарная вёрстка С. А. Беразнюк

Карэктар С. А. Беразнюк

Падпісана да друку 14.06.2019. Фармат 60 × 84 1/8. Папера 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 Слоніў, Гродзенская вобл.

© БарДУ, 2019

Educational institution
“Baranovichi State University”

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013.

Volume 7, June, 2019.

Engineering Series

Promoter: educational institution “Baranovichi State University”.

EDITORIAL BOARD

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

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

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Editor of the issue

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

Executive secretary of the issue

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

English Text Editor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial address:

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

E-mail: vestnik@barsu.by.

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

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

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

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

Published: educational institution “Baranovichi State University”.

Issued in Russian, Belarusian and English.

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

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

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

Free price.

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

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

© BarSU, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Сенчуров Е. В., Дубновицкий С. К. Магнитно-абразивная обработка маховичков водопроводных вентиляей	10
Алехнович В. Н., Алифанов А. В., Милюкова А. М., Толкачева О. А. Разработка наплавочного плазмотрона, работающего на постоянно-импульсном напряжении	19
Алехнович В. Н., Алифанов А. В., Милюкова А. М., Толкачева О. А. Разработка порошкового питателя, позволяющего осуществлять работу наплавочного плазмотрона в постоянно-импульсном режиме	24
Алифанов А. В., Богданович И. А., Русан С. И., Цуран В. В. Обоснование разработки усовершенствованного высокоточного, высокопроизводительного метода заточки режущего лезвия геликоидальных рубильных ножей	29
Голубев В. С., Вегера И. И., Чернашеюс О., Чаевский В. В. Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя	34
Горчанин А. И., Милюкова А. М., Лях А. А. Повышение эффективности упрочняющей магнитно-импульсной обработки ножей со сложным профилем лезвия	43
Жигалов А. Н. Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом	49
Кулешов А. К., Углов В. В., Русальский Д. П. Формирование износостойких слоистых покрытий из карбидов молибдена, вольфрама и кобальта на твердосплавном инструменте	64
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 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. Vegeera¹, 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.

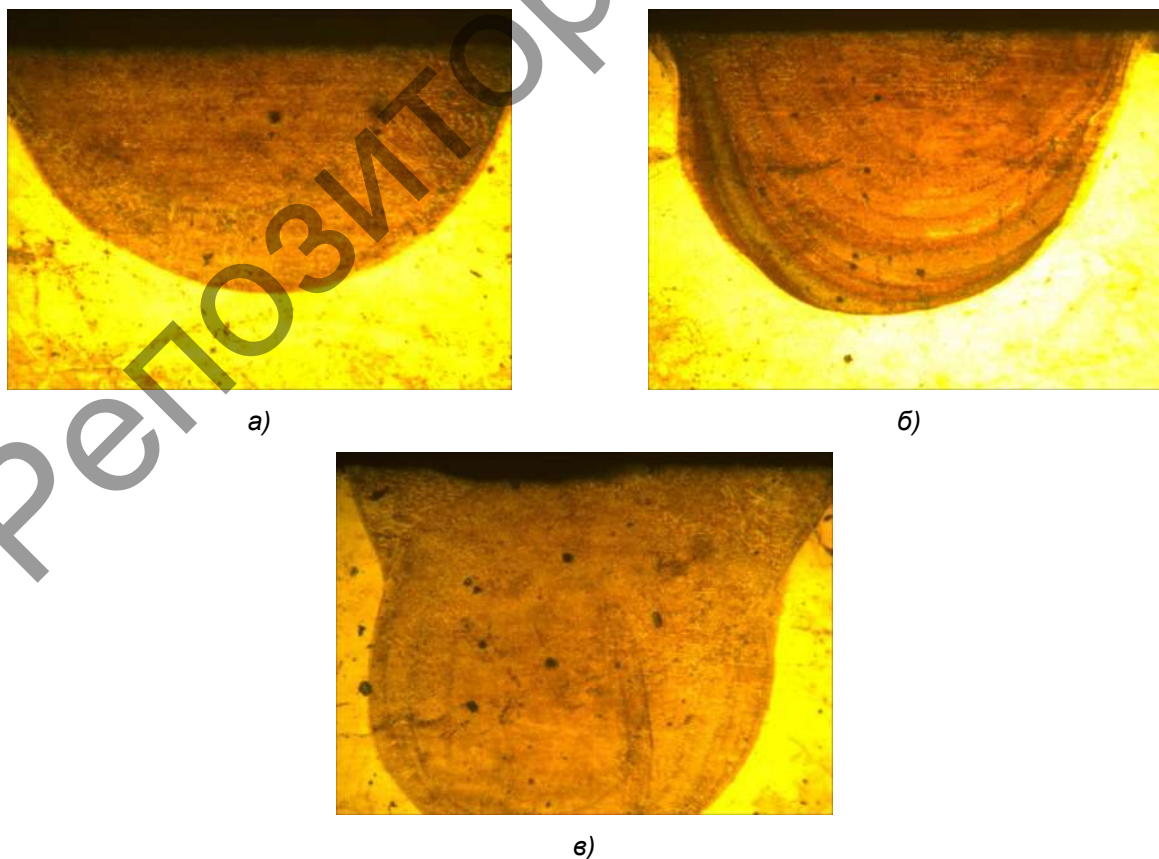


Рисунок 1. — Типичная структура зон лазерного легирования легирующим порошком TaSi₂ при различных режимах обработки. × 126 (а); × 250 (б); × 200 (в)

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.

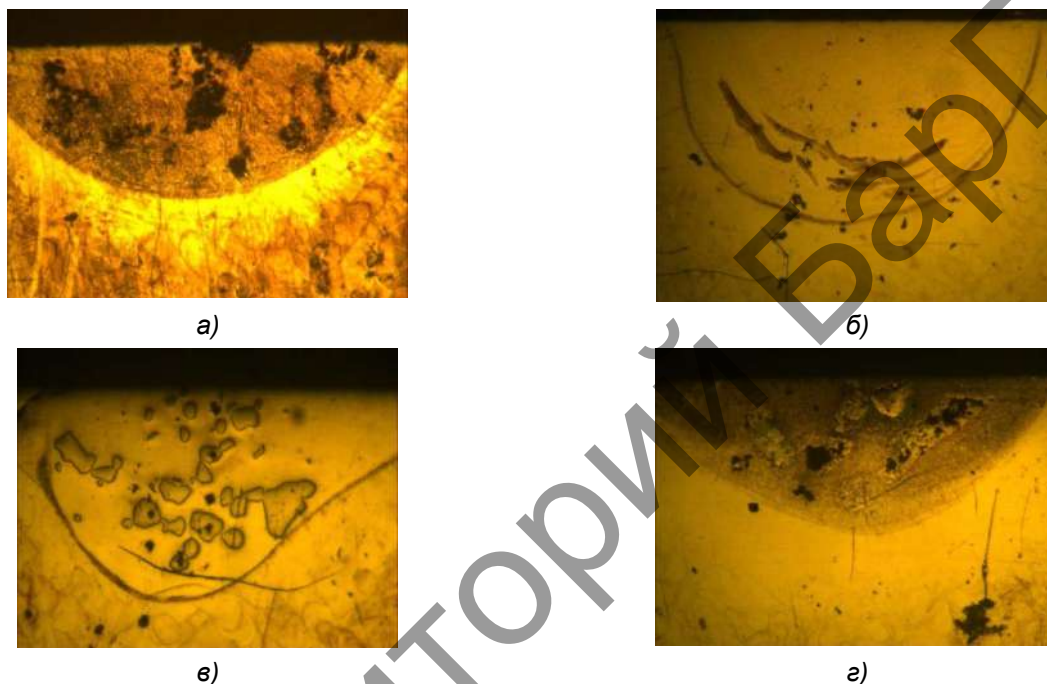
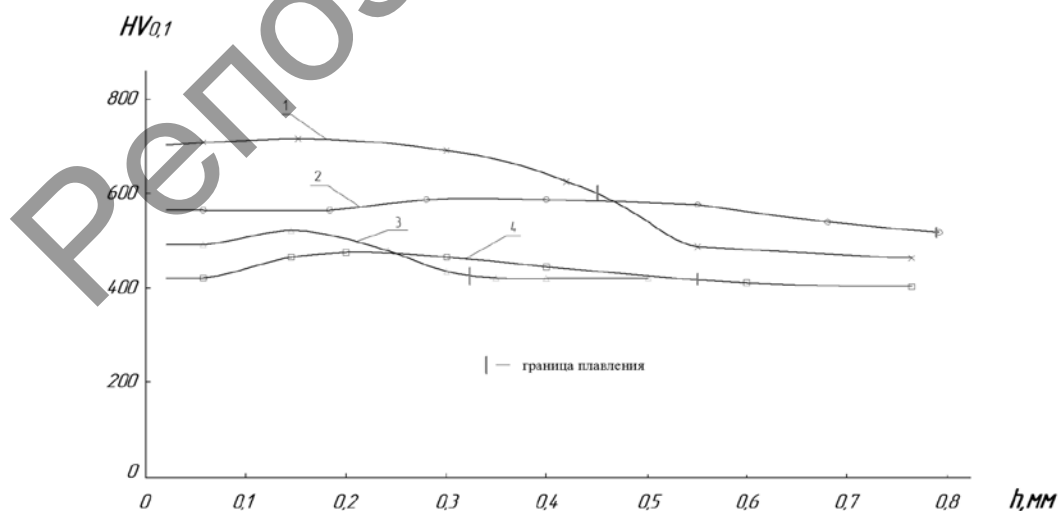


Рисунок 2. — Характерные структуры зон поверхностного легирования при использовании различных легирующих материалов: легирующий порошок TiN (а); $Cr_{23}C_6$ (б); W (в); Co_3B (г)



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].

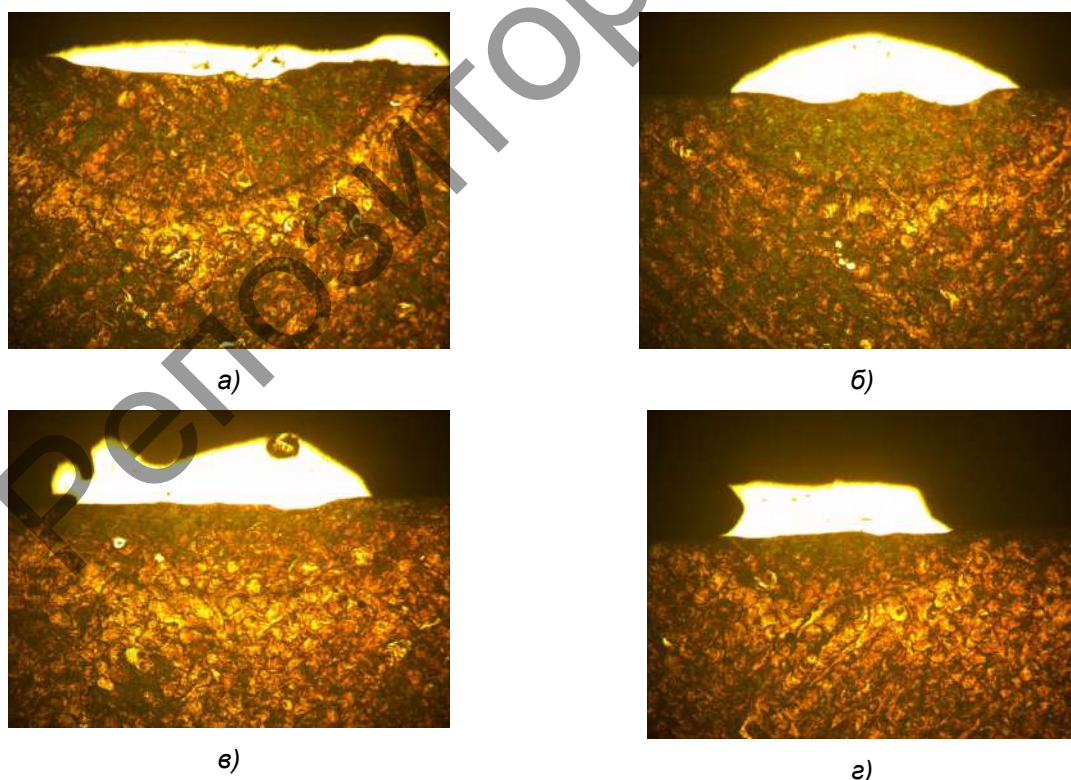
Отметим также, что при лазерном легировании упрочняющие фазы могут иметь свои морфологические особенности. После лазерного воздействия в структуре легированных зон, так же, как и наплавленных слоев [5], могут присутствовать глобулярные, линейчатые или звездчатые фрагменты. Например, линейчатые фрагменты 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.

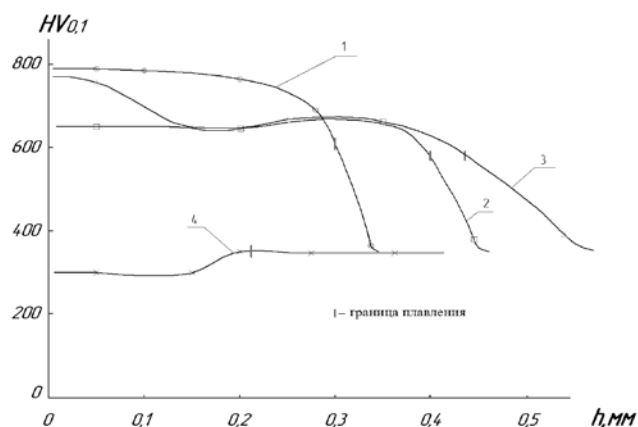
Так, ширина ЗТВ уменьшается с 2,2 мм до 1,25, а глубина — с 1,0 мм до 0,5 мм. Наблюдается также, что под действием давления от «паров отдачи» (см. рисунок 4, а, справа) расплав может смещаться за пределы ЗТВ. Максимальная интенсивность лазерного факела при лазерной обработке наблюдалась именно при минимальных 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).



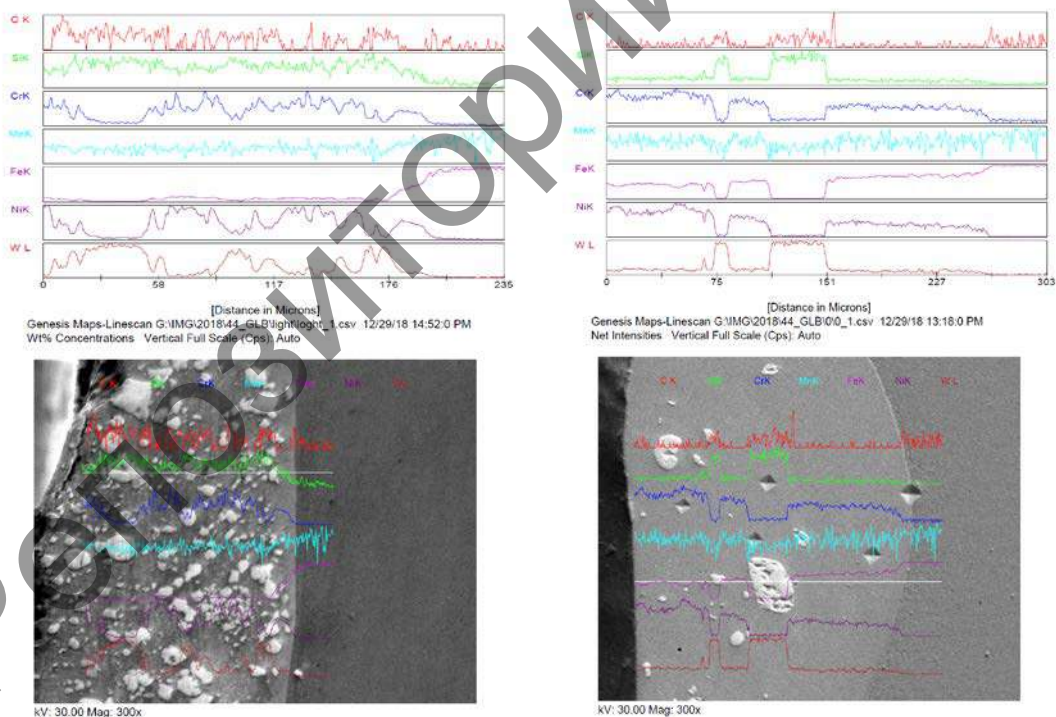
$V = 10$ (а), 20 (б), 30 (в), 40 (г) см / мин

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



а)

б)

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 $13\ 000...18\ 000\ МПа$, 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 (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 топографию 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 : Белорус. 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