

Учреждение образования
«Барановичский государственный университет»

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 8, июнь, 2020.

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор серии

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

Ответственный секретарь серии

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

Редактор текстов на английском языке

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by.

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

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

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

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

Издатель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко

Технический редактор Л. Н. Щербук

Компьютерная вёрстка С. М. Глушак

Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 16.06.2020. Формат 60 × 84^{1/8}. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 16,00. Уч.-изд. л. 9,35. Тираж 100 экз. Заказ

Цена свободная.

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

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

© БарГУ, 2020

Установа адукацыі
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

Веснік БарДУ

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 8, чэрвень, 2020.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

Заснавальнік: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ

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

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

РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ СЕРЫІ

Галоўны рэдактар серыі

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

Адказны сакратар серыі

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

Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрас рэдакцыі:

вул. Войкава, 21, 225404 г. Баранавічы.

Тэлефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by.

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

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

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

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

Выдавец: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

Выходзіць на рускай, беларускай і англійскай мовах.

Часопіс распаўсюджваецца на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

Загадчык рэдакцыйна-выдавецкай групы Г. Ю. Сідарэнка

Тэхнічны рэдактар Л. М. Шчарбук

Камп'ютарная вёрстка С. М. Глушак

Карэктар Н. М. Каладко

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

Кошт свабодны.

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

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

© БарДУ, 2020

Educational institution
“Baranovichi State University”

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013.

Volume 8, June, 2020.

Engineering Series

Founder: Educational Institution “Baranovichi State University”.

EDITORIAL BOARD

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

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

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Executive Editor of the Issue

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

Executive secretary of the issue

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

English Text Editor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial address:

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

E-mail: vestnik@barsu.by.

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

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

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

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

Publishing: Educational Institution “Baranovichi State University”.

Issued in Russian, Belarusian and English.

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

Managing editor A. Y. Sidorenko

Technical editor L. N. Scherbuk

Desktop Publishing S. M. Glushak

Proofreader N. N. Kolodko

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

Free price.

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

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

© BarSU, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

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

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

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

ЗМЕСТ

МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

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

ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

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

CONTENTS

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

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

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

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

УДК 669.056.9.046.516.4.018.8:621.9.048.7

О. В. Дьяченко¹, С. М. Криуша¹, М. А. Кардаполова¹, В. С. Голубев², И. И. Вегера²¹Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 67, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 293 95 04, olg-dyachenko@mail.ru²Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 369 31 24, gvs_fti@mail.ru

ЛАЗЕРНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

В данной работе исследовались особенности влияния энергетических параметров и технологических факторов на эффективность поверхностной обработки с использованием лазерных способов. Изучалась возможность лазерной обработки нанесенных покрытий типа 95X18 и AISI 316LSi в атмосфере различных газов: на воздухе, в аргоне и азоте. При лазерном легировании использовались порошки аморфного бора и некоторых карбидов и боридов. Изучено структурно-фазовое состояние и качество поверхностных и переходных слоев. Показано, что метод лазерного легирования может оказывать упрочняющий эффект как на напыленный слой, так и на слой основы. При использовании для легирования аморфного бора оплавленный слой покрытия из нержавеющей стали AISI 316LSi наблюдался практически на всех используемых режимах, причем на некоторых режимах наблюдалось достаточно равномерное распределение микротвердости по глубине.

Ключевые слова: лазерное легирование; модифицирование; поверхностный слой; микроструктура.
Рис. 6. Табл. 1 Библиогр.: 12 назв.

O. V. Dyachenko¹, S. M. Kriusha¹, M. A. Kardapolova¹, V. S. Golubev², I. I. Vegera²¹Belarusian National Technical University, 67 Independence Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 293 95 04, olg-dyachenko@mail.ru²State Scientific Institution "The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", 10 Kuprevich St., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 31 24, gvs_fti@mail.ru

LASER MODIFICATION OF GAS-THERMAL COATINGS FROM STAINLESS STEELS

In this paper we studied the features of the influence of energy parameters and technological factors on the effectiveness of surface treatment using laser methods. The possibility of laser processing of deposited coatings of the 95X18 and AISI 316LSi type in the atmosphere of various gases (air, argon, nitrogen) was studied. In laser doping, powders of amorphous boron and some carbides and borides were used. The structural phase state and quality of surface and transition layers were studied. It is shown that the laser doping method can exert a strengthening effect on both the evaporated layer and the warp sheet. When using amorphous boron for doping, the melted coating layer of AISI 316LSi stainless steel was observed in almost all the modes used. Moreover, in some modes, a uniform distribution of microhardness in depth was found.

Keywords: laser doping; modification; surface layer; microstructure.
Fig. 6. Table 1. Ref.: 12 titles.

Введение. В настоящее время актуальными остаются вопросы дальнейшего увеличения срока эксплуатации оборудования, машин и механизмов. Детали машин и оборудования с покрытиями из нержавеющей сталей работают в том числе и в условиях, которые приводят к преждевременному износу [1]. Для повышения эксплуатационных свойств таких деталей появляется потребность их поверхностного упрочнения. Применение лазерной обработки является весьма перспективным направлением развития такого рода технологий упрочнения [2—5].

С развитием методов лазерного модифицирования, легирования и наплавки появляются новые перспективные возможности для повышения надежности и долговечности быстрознашивающихся деталей и инструмента. С помощью данных технологий удастся создать поверхностные слои с заранее заданными и легко прогнозируемыми свойствами.

Сами по себе покрытия на основе нержавеющей стали обладают высокой коррозионной стойкостью, но недостаточной твердостью. Одним из методов решения данной проблемы является использование комбинированной технологии, включающей плазменное напыление диффузионно-легированного бором порошка ПР-Х18Н9 на основе аустенитной стали. Полученные покрытия обладают гомогенной структурой, благодаря лазерной обработке возможно управлять их свойствами. Данный метод предусматривает длительное (3...5 ч) диффузионное борирование порошка из стали ПР-Х18Н9 [6].

В целом методами лазерного воздействия возможно обрабатывать материалы с различными теплофизическими свойствами, вводя различные легирующие элементы для упрочнения и восстановления деталей и получения покрытий, которые невозможно или экономически нецелесообразно получать другими способами. Данные методы позволяют расширить область применения недорогих углеродистых сталей для изготовления деталей и конструкций, работающих в тяжелых условиях износа, в агрессивной среде или сопровождающихся нагревом [2—5].

Наиболее приемлемыми являются методы лазерной обработки с использованием шликерных обмазок. Эти методы обеспечивают экономный расход легирующих элементов и возможность получения в зоне упрочнения большой концентрации легирующего элемента, которая легко регулируется толщиной слоя обмазки. Кроме того, данным методом можно наносить многокомпонентные и разнообразные легирующие композиции, которые другими методами зачастую нанести невозможно [7; 8].

Материалы и методы исследования. Обработку поверхности проводили с использованием CO₂-лазера непрерывного действия «Комета-2». Режимы лазерной обработки для сталей подбирались в зависимости от мощности лазерного излучения установки, линейных скоростей перемещения лазерного луча, расстояния между лазерными дорожками и диаметром лазерного пятна.

Предварительное напыление на образцы из сталей 3 и 45 покрытия нержавеющей стали типа 95X18 или AISI 316LSi осуществляли способом гиперзвуковой металлизации. Напыление проводилось при помощи установки АДМ-10. Давление сжатого воздуха составляло 0,45...0,6 МПа при давлении пропан-бутана 0,25...0,4 МПа. Проволока для напыления использовалась диаметром 1,6 мм, толщина нанесенного слоя составляла ~0,6 мм.

На первом этапе изучалась возможность лазерной обработки нанесенных покрытий в атмосфере различных газов: на воздухе, в аргоне и азоте. При последующем лазерном легировании использовали порошковые материалы: В, В₄С, TiB₂, WC, W₂B₅ и др. При этом использовали два вида образцов: на одни непосредственно наносили слой легирующих обмазок из аморфного бора и В₄С, на другие на нанесенные покрытия из указанных нержавеющей сталей наносили слои вышеназванных легирующих обмазок. Оплавление образцов осуществляли лазером с мощностью ~500...800 Вт при диаметре пятна лазерного луча от 1 до 2 мм со скоростями перемещения от 2 до 40 мм / с.

Микроструктурный анализ проводили на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-2 и МИКРО 200 на травленых шлифах в поперечных сечениях перпендикулярно поверхности, дюротметрический — на микротвердомере ПМТ-3, рентгеновский фазовый анализ проводили на аппарате ДРОН-3 с графитовым монохроматором на медном излучении CuK_α, элементный анализ — на сканирующем микроскопе MARKO VEGAII IMU (Чехия) с микроанализатором энергодисперсных спектров INCA Energy 350, испытания на износостойкость проводили на машине торцевого трения с контртелом из твердого сплава ВК-6. Исследова-

лось влияние параметров лазерной обработки на размерные параметры зоны обработки: ширину и глубину расплавленной зоны, зоны термического влияния. По данным исследований проводили корреляционный анализ на ПЭВМ с помощью программы “Approximator”. Для каждой пары факторов рассчитаны коэффициенты парной корреляции по всем возможным вариантам взаимодействий, построены графики парного взаимодействия с наибольшим коэффициентом корреляции [9; 10].

Результаты исследований и их обсуждение. Одним из современных методов поверхностной обработки является лазерная наплавка, которая вносит принципиально новые возможности в практику поверхностного упрочнения материалов. Лазерная наплавка представляет собой процесс нанесения металлических, керамических и других покрытий на поверхность изделий с использованием энергии лазерного излучения. Этот процесс подобен более традиционной плазменно-порошковой наплавке и отличается большей локальностью и возможностью формирования достаточно тонких (~1 мм) покрытий, т. е. относится к группе прецизионных технологий.

В процессе лазерной наплавки могут происходить сложные физико-химические превращения в наплавляемых материалах. Среди этих процессов наибольшее значение имеют: термическое разложение и окисление наплавляемого материала, межфазные взаимодействия в системе, наплавляемый материал (материал подложки). Заранее предсказать в полном объеме результат этих процессов, проявляющийся в соответствующем составе наплавляемого слоя и типе сформированной структуры исходя из физико-химических свойств наплавляемого материала, равновесных диаграмм состояния систем с участием элементов покрытия и основы не представляется возможным в силу сложности процессов, происходящих в зоне воздействия лазерного излучения.

Применение технологии лазерной наплавки позволяет решить многие задачи по упрочнению и восстановлению точных и сложнопрофильных деталей с местными и протяженными износами. В настоящее время для реализации процесса лазерной наплавки наиболее перспективно использование порошковых материалов. Они наносятся на подложку в виде обмазки на основе связующего, предварительно напыляются, например, газотермическими методами, подаются дозатором на деталь со сканированием лазерного луча по ее поверхности.

В первой части экспериментов ставились задачи исследовать влияние геометрии фокусировки, энергетического вклада при различных скоростях сканирования луча, окружающей газовой среды на процесс лазерной обработки напыленных покрытий из сталей 95X18 и AISI 316LSi, изучить их качество, микроструктуру и микротвердость. Так, при обработке на воздухе на образцах обоих типов наблюдалось интенсивное плазмо- и искрообразование, выделение большого количества копоти и сажи, в какой-то степени выгорание покрытия в зоне фокусировки лазерного излучения.

Обработка в среде азота проводилась при размере фокусного пятна 2 мм в диапазоне скоростей сканирования луча 2...20 мм / с. При этом при обработке стали 95X18 с более высокими скоростями наблюдалось искрообразование, но отсутствовало образование копоти, при более низких скоростях она могла появляться, особенно это касалось стали AISI 316LSi. Микротвердость расплава при оплавлении стали AISI 316LSi могла достигать 5 020...5 740 МПа, стали 95X18 — 5 950...6 380 МПа. Отмеченные факты свидетельствуют о том, что элементы расплава взаимодействуют с окружающим азотом, что приводит к повышению микротвердости. Кроме того, следует учитывать и тот факт, что на поверхности материала при нагреве вследствие взаимодействия с азотом может происходить изменение поглотительной способности падающего лазерного излучения. При его повышении в равных условиях облучения будет, соответственно, повышаться энергетический вклад, что может приводить к отмеченным выше особенностям. Изменение коэффициента поглощения при обработке в азоте может

быть связано с высокой реакционной способностью некоторых элементов напыленного покрытия. Например, в стали AISI 316LSi содержится ~18 % Cr, ~12 % Ni, ~2,5 % Mo, ~0,5 % Ti. Как известно [11], в ряде металлов (медь, никель, серебро, золото) азот практически нерастворим и может при их сварке использоваться как защитный инертный газ. С другими металлами (железом, титаном, алюминием и их сплавами) он может активно взаимодействовать, и его влияние на их свойства очень значительно. С некоторыми из них (например, с титаном), взаимодействуя при сварочных температурах, азот образует химические соединения — нитриды. В других (например, в железе) он растворяется, образуя жидкие и твердые растворы внедрения, причем растворимость азота в твердом железе с понижением температуры уменьшается, избыточные количества его выпадают из раствора в виде нитридов (Fe_2N , Fe_4N). Также следует отметить [12], что все тугоплавкие металлы 4...6-й групп периодической системы элементов Д. И. Менделеева (а это как раз Ti, Cr, Mo) растворяют азот с выделением тепла. Другой важной особенностью рассматриваемых металлов является то, что они образуют с азотом стойкие нитриды, температура плавления которых может превышать температуру плавления самих металлов. Особенно тугоплавки нитриды металлов 4-й группы периодической системы (Ti). Если легирующий элемент образует тугоплавкий нитрид, то такой нитрид может появиться в твердом виде в расплаве. Так, в жидких сплавах железо—титан при 1 600 °С и давлении азота в 10^5 Па появляется твердый нитрид титана, начиная с содержания титана около 0,1 % (по массе). Поведение растворенного азота при охлаждении и кристаллизации сплавов на основе железа и никеля, содержащих такие сильные нитридообразующие металлы, как титан, очень сложно.

Эксперименты, проведенные в защитной атмосфере аргона, показали следующее. На напыленной стали AISI 316LSi в случае широкого пятна облучения (2 мм) процесс обработки проходил достаточно спокойно, без искрообразования и наличия копти. При этом с уменьшением скорости сканирования происходило постепенное увеличение глубины проплавления напыленного материала (рисунок 1). При низких скоростях сканирования (~2 мм / с) удавалось практически полностью расплавить весь напыленный слой, однако металлургическая связь с исходной подложкой не образовывалась.

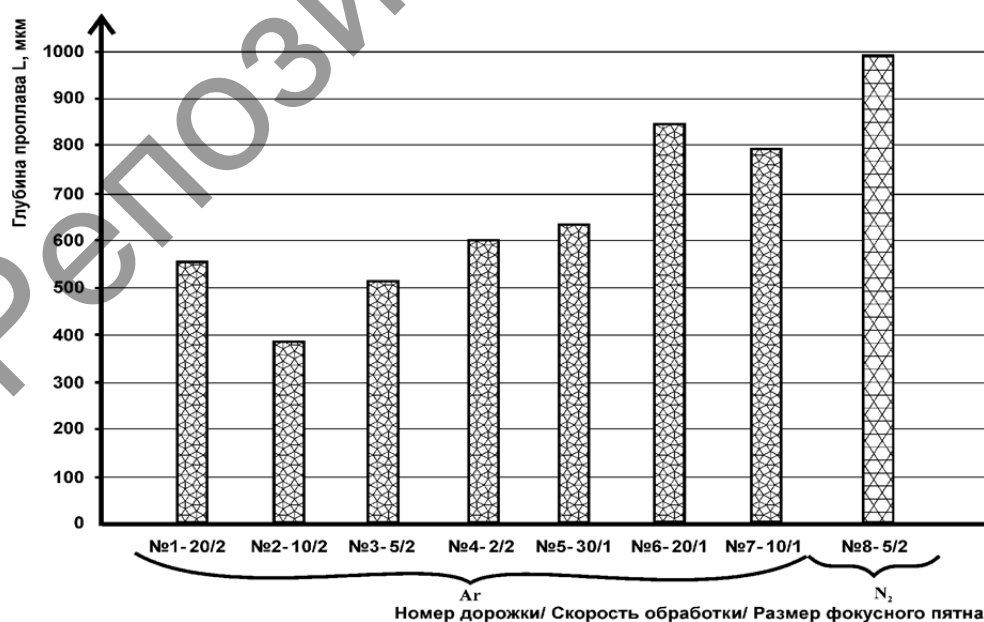


Рисунок 1. — Зависимость глубины проплава (покрытие AISI 316LSi, основа Ст 45) от скорости обработки, размера фокусного пятна и защитной среды

Хотя в ней образовывалась зона закалки в твердой фазе, в которой микротвердость могла достигать 5 740...6 620 МПа. При этом с уменьшением скорости сканирования, т. е. увеличением энергоклада, как и следовало ожидать, возрастали размеры зоны термического влияния (рисунок 2). При более острой фокусировке (диаметр пятна ~1 мм) удавалось расплавить не только этот напыленный материал, но и сформировать хорошую металлургическую связь с подложкой за счет ее подплавления даже при больших скоростях сканирования лазерного луча (~30 мм / с). Характерной особенностью являлся тот факт, что в процессе обработки при такой фокусировке наблюдался интенсивный разброс искр и образование копоти — сажи, которая ложилась на предыдущие дорожки на подложке. Это, по-видимому, можно связать с тем, что происходит взаимодействие элементов расплава напыленного материала и расплава подложки при ее подплавлении. Второй характерной особенностью являлось то, что за счет возникающих термонапряжений могло наблюдаться отслаивание (так называемое «вспучивание») образующегося в напыленном материале расплава. Особенно это было выражено при большей расфокусировке лазерного излучения, т. е. при пятне 2 мм, когда практически не происходило подплавление основы.

Микротвердость расплава при этом составляла ~2 150...2 670 МПа при скорости сканирования 20 мм / с и возрастала до ~4 180...4 430 МПа с уменьшением скорости на порядок. При более острой фокусировке микротвердость в расплаве могла повышаться до значений ~4 700...5 020 МПа (рисунок 3). По-видимому, здесь оказывает влияние некоторое перемешивание расплава напыленного материала и расплава исходной подложки.

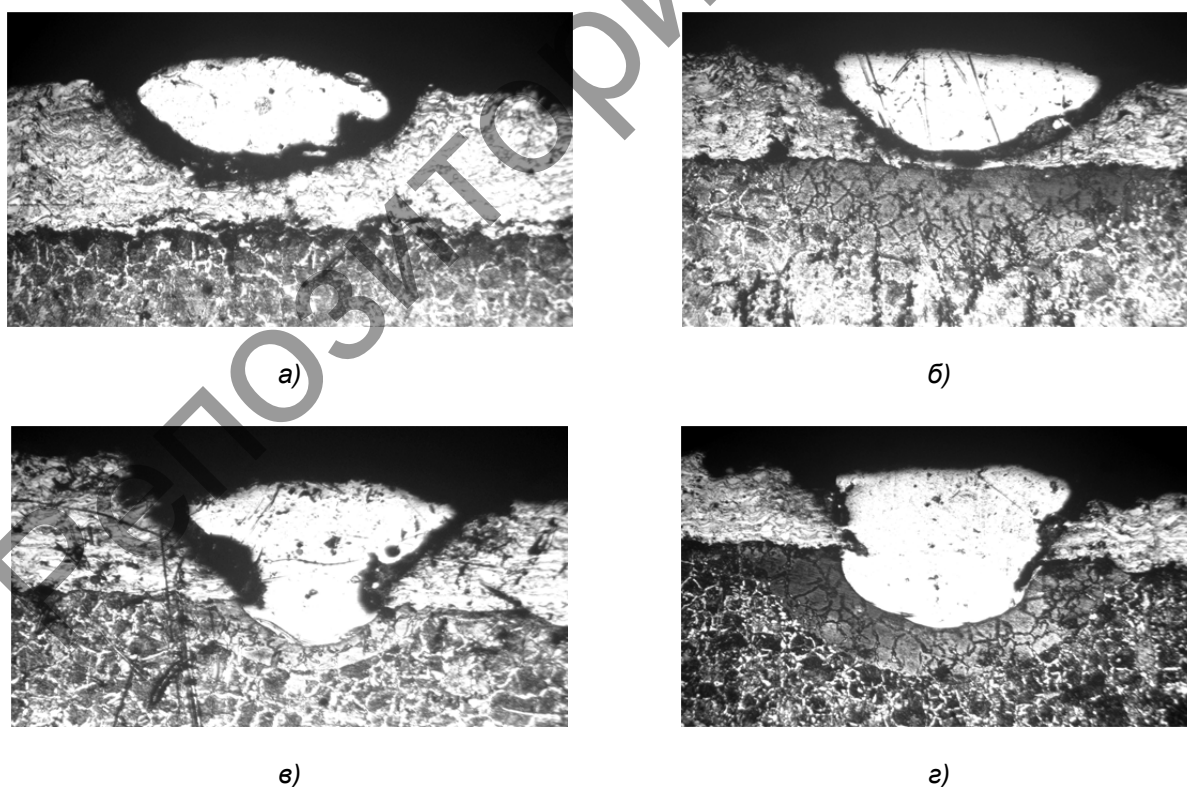


Рисунок 2. — Поперечное сечение лазерных дорожек (покрытие — AISI 316 LSi, основа — Ст 45, обработка в аргоне): скорость обработки (мм / с) / диаметр пятна фокусировки (мм), ($\times 50$) а) 20 / 2; б) 2 / 2; в) 30 / 1; г) 10 / 1

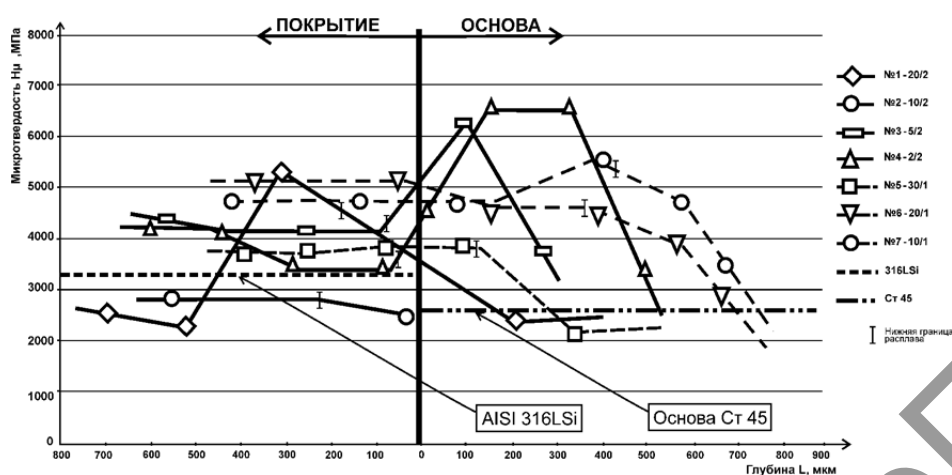


Рисунок 3. — Изменение микротвердости по глубине лазерного воздействия в аргоне (покрытие — AISI 316LSi, основа — Ст 45)

Что касается напыленной стали 95X18, то выделение копоти — сажи и искрообразование наблюдались в обоих случаях фокусировки даже в инертной атмосфере. Микротвердость в зоне оплавления напыленного покрытия составляла 4 700 ... 5 020 МПа, в зоне перемешивания с исходной подложкой доходила до 5 940 МПа. Такие эффекты искро- и сажеобразования можно связать с наличием большого количества углерода в исходном материале, так и образованием большого количества различных примесей при его напылении методом гиперзвуковой металлизации. Под действием лазерного излучения происходит не только нагрев и плавление напыленного слоя, но и может наблюдаться его интенсивное испарение. При этом образуется не только эрозионный факел из паров материала, но и происходит нагрев окружающего газа. При мощном энергокладе все это может приводить к ионизации образующегося факела и в дальнейшем к образованию низкотемпературной плазмы с последующим низкороговым пробоем окружающего газа. Все эти факторы, в свою очередь, могут способствовать как интенсификации взаимодействия металлической поверхности с окружающей атмосферой, так и предотвращению от такого взаимодействия за счет образования повышенного давления непосредственно в самом факеле.

Далее были проведены эксперименты по лазерному легированию поверхностей образцов с описанными выше покрытиями. Как известно [2], физическая сущность процесса лазерного легирования заключается в возникновении в тонком поверхностном слое металла плоского теплового источника под воздействием лазерного нагрева. Высокий градиент температур между тепловым источником и поверхностью холодного металла приводит не только к нагреву материала, но и к возникновению интенсивного конвективного движения металла в ванне расплава. Расплавленная легирующая композиция перемешивается с металлической матрицей. При этом происходит насыщение поверхности сталей легирующими элементами из композиций, образование химических соединений, частичная гомогенизация в зоне жидкого металла.

С учетом неоднозначной роли образующегося факела при лазерном воздействии данная часть экспериментов проводилась в воздушной атмосфере. Изучались образцы как после лазерного легирования аморфным бором и карбидом бора, нанесенных порошковых покрытий из нержавеющей стали AISI 316LSi на сталь 3, так и просто после легирования этими компонентами непосредственно поверхности стали 3.

На рисунках 4 и 5 показана микроструктура поперечного сечения одной из дорожек и распределение микротвердости по глубине различных дорожек при легировании аморфным бором. Как видно, лазерное легирование оказывает упрочняющий эффект на слой основы, микротвердость которой до легирования составляла 2 060 МПа. Четко прослеживается влияние режимов лазерной обработки на микротвердость поверхностного слоя.

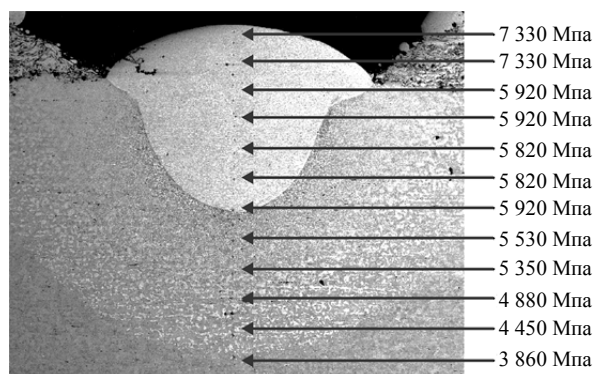


Рисунок 4. — Микроструктура поперечного сечения лазерной дорожки (покрытие — AISI 316LSi, легирование — $V_{ам}$, основа — сталь 3, скорость сканирования — 3,5 мм / с, диаметр пятна — 1 мм)

При использовании для легирования аморфного бора оплавленный слой покрытия из нержавеющей стали AISI 316LSi наблюдался практически на всех используемых режимах, причем на некоторых режимах наблюдалось достаточно равномерное распределение микротвердости по глубине. Наибольшая микротвердость (~7 300 МПа) достигалась при скорости сканирования луча лазера 3,5 мм/с и диаметре лазерного пятна 1 мм. При этом микротвердость покрытия достаточно быстро падала с ~7 300 до ~5 900 МПа на протяжении 0,15 мм, далее такая же микротвердость наблюдалась в зоне оплавления основы на протяжении ~600 мкм (см. рисунок 5). В целом сложная картина с формированием оплавлен-

ного слоя покрытия, его размерами и распределением микротвердости по глубине связана с аналогичными процессами, которые рассмотрены ранее. Но все усложняется тем, что при расплавлении материала покрытия дополнительно происходят процессы его взаимодействия с легирующими компонентами, а также их взаимодействие с окружающей атмосферой — воздухом. Это, в свою очередь, может приводить к интенсификации процессов нагрева — плавления — испарения. Отметим, что при использовании в качестве легирующих компонентов химических соединений типа карбидов, боридов и других картина еще более усложняется. Так, при легировании карбидом бора набор режимов, при которых наблюдались приемлемые слои оплавленного покрытия, был весьма ограничен, а микротвердость таких слоев составляла ~4 000 МПа. Отметим также, что при других режимах, как и при использовании чистого бора, наблюдались довольно значительное повышение микротвердости (5 000...6 000 МПа) в зоне расплава непосредственно самой подложки из стали 3. В этих случаях при оплавлении материал подложки, по-видимому, насыщается элементами как покрытия, так и применяемой легирующей присадки.

Из приведенных графиков и микроструктур можно предположить, что получаемые лазерным легированием покрытия содержат не только достаточную долю металлической матрицы (твердого раствора), обладающей большим запасом пластичности и способной к значительной поверхностной пластической деформации, но и дисперсные фазы высокой твердости. Проведенный рентгеновский анализ подтверждает высказанное предположение.

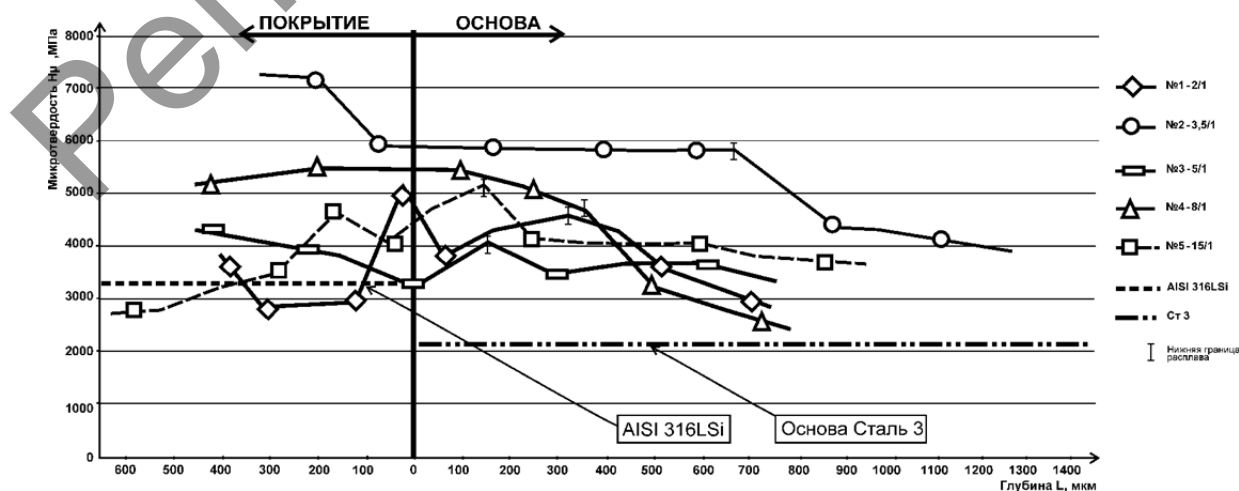


Рисунок 5. — Распределение микротвердости по глубине образца после лазерного сканирования (покрытие — AISI 316LSi, легирование — $V_{ам}$, основа — сталь 3)

Так, фазовый состав напыленного слоя: гамма-железо (аустенит); дельта-железо $d\text{-FeCr}$; карбиды $(\text{CrFe})\text{C}_3$. Фазовый состав модифицированного напыленного слоя с использованием порошка карбида бора представляет уже альфа-железо, карбиды хрома Cr_{23}C_6 и исходные карбиды бора B_4C . Не противоречат этому и результаты исследований распределения химических элементов в различных участках зоны лазерной обработки. Так, например, при легировании покрытий боридом вольфрама (W_2B_5) помимо исходных боридов обнаруживались не только карбиды железа, но и вольфрама, а также их карбобориды, в том числе совместные. Содержащиеся фазы высокой твердости, по-видимому, могут повысить износостойкость получаемых покрытий. Сравнительные износостойкие испытания подтвердили такую тенденцию.

Корреляционный анализ с помощью программы “Approximator” дал возможность исследовать влияние параметров лазерной обработки на глубину упрочненной зоны покрытий и микротвердости получаемых покрытий. Так, для примера рассмотрим влияние скорости обработки лазерного луча на глубину (зона проплава) стали 3. Четко прослеживается зависимость для всех режимов обработки: с увеличением скорости обработки глубина зоны проплава уменьшается.

Быстрее всего глубина проплава падает с 600 до 200 мкм в случае аморфного бора без покрытия из AISI 316LSi. В случае же лазерного легирования покрытия из нержавеющей стали AISI 316LSi аморфным бором на глубину проплава меньше влияет скорость обработки (рисунок 6, таблица 1). Из таблицы 1 видно, что параметры лазерной обработки хорошо коррелируют с величинами глубины зоны проплава.

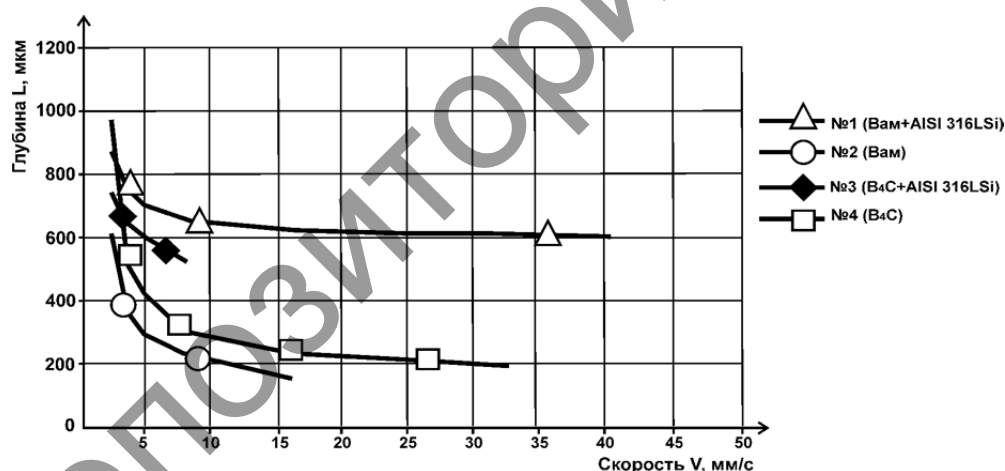


Рисунок 6. — Влияние скорости обработки лазерного луча на глубину зоны проплава стали 3

Т а б л и ц а 1. — Коэффициенты корреляции скорости лазерного луча и глубины проплава

Образец	Формула для расчета корреляции	Значение A	Значение B	Среднее отклонение	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент корреляции
$\text{B}_{\text{ам}}+\text{AISI 316LSi}$	$Y = A + B / X$	595,4012	31 300,858	8,9216	73,0869	0,7978
$\text{B}_4\text{C}+\text{AISI 316LSi}$	$Y = A * X ^ B$	2 487,6796	-0,2488	8,0256	0,0963	0,8353
B_4C	$Y = A + B / X$	156,996	80 045,6881	39,6918	78,7082	0,9545
$\text{B}_{\text{ам}}$	$Y = A + B / X$	140,1064	46 850,0443	6,5025	20,2907	0,9907

Заключение. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что лазерное поверхностное модифицирование многокомпонентных покрытий из нержавеющей сталей является задачей непростой, однако использование этих методов весьма обнадеживающее и перспективное. При оптимальных условиях и режимах лазерной обработки, правильном выборе легирующих порошковых компонентов удается получать достаточно качественные слои приемлемой толщины с неплохой металлургической связью с подложкой, обладающих специфическими структурами и свойствами, причем на конечный результат такой обработки влияет большое количество технологических факторов, в том числе окружающая атмосфера. Грамотный подход к этому вопросу с учетом реакционной способности газовой атмосферы и элементного состава легирующей присадки открывает дополнительные возможности по поверхностному модифицированию в целях получения слоев с регламентированными свойствами.

Список цитируемых источников

1. *Петренко, К. П.* Структурная модель проектирования упрочняющих технологических процессов, обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя / К. П. Петренко // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2013. — № 1. — С. 7—9.
2. *Григорьянц, А. Г.* Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с. : ил.
3. *Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик [и др.].* — Минск : Белорус. наука, 2008. — 252 с.
4. *Тарасова, Т. В.* Особенности формирования структуры наплавленных слоев при лазерной обработке / Т. В. Тарасова, В. С. Голубев, С. Д. Кузьмин // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2014. — № 9. — С. 26—30.
5. *Астапчик, С. А.* Лазерные технологии: возможности и перспективы обработки деталей и инструмента / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков // Тяжелое машиностроение. — 2004. — № 2. — С. 33—37.
6. *Девойно, О. Г.* Исследование износостойких покрытий диффузионно-легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой / О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко // Наука и техника. — 2017. — Т. 16, № 3. — С. 249—255.
7. *Белова, С. А.* Возможности лазерного легирования при изготовлении быстрорежущего инструмента [Электронный ресурс] / С. А. Белова // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6. — Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15967>. — Дата доступа: 11.05.2020.
8. *Белова, С. А.* Повышение эксплуатационных свойств поверхности стали методом лазерного карбохромирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / С. А. Белова. — Пермь, 1999. — 24 с.
9. *Новик, Ф. С.* Математические методы планирования экспериментов в металловедении / Ф. С. Новик. — М., 1971. — 106 с.
10. *Вознесенский, В. А.* Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. — М. : Финансы и статистика, 1981. — 264 с.
11. Интернет-портал “Studopedia” [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.studopedia.su/>. — Дата доступа: 15.04.2020.
12. Интернет-портал “Metal-archive” [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.metal-archive.ru/>. — Дата доступа: 16.04.2020.

Поступила в редакцию 13.05.2020