

Учреждение образования
«Барановичский государственный университет»

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 4, июнь, 2016.

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 Никишова Алла Васильевна, кандидат филологических 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 экономики и организации производства инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Редактор текстов на английском языке

Манкевич Жанна Борисовна, кандидат психологических наук, старший преподаватель кафедры теории и практики английского языка учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общенаучных дисциплин 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 механизации и энергообеспечения производства инженерного факультета, декан факультета довузовской подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент 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).

Бетяна Григорий Филиппович, кандидат технических наук, доцент, начальник технологического научно-производственного центра учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Гордиенко Анатолий Илларионович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, начальник Центра индукционных технологий 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).

Добышев Анатолий Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации животноводства и электрификации сельскохозяйственного производства учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, декан 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 и автомобилей учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, заведующий лабораторией пластичности Белорусского национального технического университета (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).

Нерода Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Спиридонов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, доцент, директор Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (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@tut.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 (машиностроение и машиноведение; процессы и машины агроинженерных систем).

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включён в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Издатель: учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь

Заведующий редакционно-издательским отделом Е. Г. Хохол
Технический редактор В. В. Кукреш
Компьютерная вёрстка В. В. Кукреш
Корректор С. А. Березнюк

Подписано в печать 13.06.2016. Формат 60 × 84 ¹/₈. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10,70.
Уч.-изд. л. 5,40. Тираж 75 экз. Заказ .

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: открытое акционерное общество «Красная звезда». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя печатных изданий № 2/7 от 28.10.2013.

Юридический адрес: пер. 1-й Загородный, 3, 220073 Минск.

Почтовый адрес: ул. Советская, 80, 225409 Барановичи.

© БарГУ, 2016

Репозиторий БарГУ

Установа адукацыі
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

Веснік БарДУ

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 4, чэрвень, 2016.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

Заснавальнік: установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

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 Нікішова Ала Васільеўна, кандыдат філалагічных 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 эканомікі і арганізацыі вытворчасці інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

Манкевіч Жанна Барысаўна, кандыдат псіхалагічных навук, старшы выкладчык кафедры тэорыі і практыкі англійскай мовы ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Гаўрылена Андрэй Канстанцінавіч (*адказны за напрамак «Машынабудаванне і машыназнаўства»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры агульнанавуковых дысцыплін інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

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

Анісковіч Генадзь Іосіфавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт установы 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).

Бяцэня Рыгор Піліпавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, начальнік тэхналагічнага навукова-практычнага цэнтра ўстановы адукацыі «Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Гардзіенка Анатолій Іларыёнавіч, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар начальнік Цэнтра індукцыйных тэхналогій 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).

Добышаў Анатолій Сямёнавіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры механізацыі жывёлагадоўлі і электрыфікацыі сельскагаспадарчай вытворчасці ўстановы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Драмук Уладзімір Аляксеевіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дэкан інжынернага факультэта 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 і аўтамабіляў установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клачкоў Аляксандр Віктаравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная 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).

Нярода Міхаіл Уладзіміравіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхналогіі машынабудавання ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Спірыдонаў Мікалай Васільевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры тэхналогіі машынабудавання Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Таміла Вячаслаў Анатольевіч, 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@tut.by

Падпісныя 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 навуках (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-выдавецкага аддзела А. Г. Хахол

Тэхнічны рэдактар В. У. Кукраш

Камп'ютарная вёрстка В. У. Кукраш

Карэктар С. А. Березнюк

Падпісана да друку 13.06.2016. Фармат 60 × 84 ¹/₈. Папера ксераксная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,70. Ул.-выд. арк. 5,40. Тыраж 75 экз. Заказ .

Кошт свабодны.

Паліграфічнае выкананне: адкрытае акцыянернае таварыства «Чырвоная зорка». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 2/7 ад 28.11.2013.

Юрыдычны адрас: завул. 1-ы Загарадны, 3, 220073 Мінск.

Паштовы адрас: вул. Савецкая, 80, 225409 Баранавічы.

Educational Institution
“Baranovichi State University”

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013

Issue 4, June, 2016.

Series “Engineering”

Promoter: Educational Institution “Baranovichi State University”.

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief: Vasily Ivanovich Kochurko, Rector of Baranovichi State University, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, Academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of the Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Deputy Chief Editor: Alla Vasilyevna Nikishova, Ph. D. in Philology, Vice-rector for Scientific Work of Baranovichi State University, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

THE EDITORIAL BOARD OF THE EDITION

Editor of the issue

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

Executive secretary of the issue

Juliya E. Gorbach, Senior lecturer of the Economic Organization of Production Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Editor of English texts

Zhanna B. Mankevich, Senior lecturer of the English Language Theory and Practice Chair of Slavic and Germanic Languages Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Psychology (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

Igor V. Duben (*in charge of the heading “Processes and Machines of Agroengineering Systems”*), Dean of the Pre-University Training Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

Grigory F. Betenya, Head of the Technology Research and Production Center of the Belarusian State Agrarian Technical University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Anatoly I. Gordienko, Head of the Induction Technology Center of the State Research Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Anatoly S. Dobysh, Professor of the Animal Husbandry Mechanization and Electrification of Agricultural Production Chair of “The Belarusian State Agricultural Academy”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir A. Dremuk, Head of Engineering Department of Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

Anatoly N. Kartashevich, Head of the Tractors and Vehicles Chair of the Belarusian State Agricultural Academy, Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus).

Alexandr V. Klochkov, Professor, Professor of the Belarusian State Agricultural Academy, Doctor of Technical Sciences (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir V. Klubovich, Head of the Plasticity Laboratory of the Belarusian National Technical University, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Michail V. Neroda, Head of the Mechanical Engineering Chair of Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Nicholai V. Spiridonov, Professor of the Mechanical Engineering Chair of the Belarusian National Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Vyacheslav A. Tomilo, Director of the State Scientific Institution "The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Editorial address:

Voikov Str. 21, 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 E. G. Hohol

Technical editor V. V. Kukresh

Desktop Publishing V. V. Kukresh

Proofreader S. A. Bereznyuk

Signed print 13.06.2016. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox. Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 10.70. Acc.-pub. s. l. 5.40. Circulation of 75 copies. Order

Free price.

Printing performance: Open Joint Stock Company "Red Star". Certificate of the state registration of the publisher, the manufacturer and the distributor of publications № 2/7 since 28.10.2013.

Legal address: 3, 1 Zagorodni Pereulok, 220073 Minsk.

Postal address: 80 Sovietskaya Str., 225409 Baranovichy.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Машиностроение и машиноведение

Алифанов А. В., Горецкий Г. П., Милюкова А. М., Лях А. А., Шишмолин В. Н. Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на микротвёрдость и микроструктуру образцов сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей	11
Бакулин Б. А., Калугин Ю. К. Анализ химического состава и физико-механических свойств материалов для изготовления деталей батанного механизма ткацкого станка	22
Жоглик И. Н. Эмиссия моноэнергетических ионов V^{2+} , Ti^{2+} , Zr^{2+} в вакуумном электродуговом разряде	29
Здор Г. Н. Экспериментальные исследования прессования вытяжных матриц совместным действием статических и динамических нагрузок высокой интенсивности	35
Ищенко М. В. Износ конвейерной ленты в условиях абразивной химически активной среды калийного предприятия	44
Маркевич М. И., Чапманов А. М., Малышко А. Н., Солодуха В. А., Соловьев Я. А., Сарычев О. Э., Щербакова Е. Н. Формирование и исследование диодов Шоттки на основе силицидов платины и никеля	48
Михайлов М. И. Анализ нагрузочного резервирования сборных внутренних фрез	55
Ракицкий А. А. Исследование усталостной прочности деталей машин с термонапылёнными порошковыми покрытиями в условиях циклического растяжения/сжатия	62

Процессы и машины агроинженерных систем

Бегеня Г. Ф., Анискович Г. И., Кривцов А. В., Рогожинский С. Н. Инновационная технология упрочнения дисков роторов и оснований башмаков режущего аппарата косилок	68
Богданович П. Н., Михайлов М. И., Михайлов К. М. Исследование влияния электрофрикционного упрочнения ножей режущего барабана кормоуборочного комбайна на их износостойкость	77

ЗМЕСТ

ТЭХНІЧНЫЯ НАВУКІ

Машынабудаванне і машыназнаўства

Аліфанаў А. В., Гарэцкі Г. П., Мілюкова Г. М., Лях А. А., Шышмолін В. Н. Даследаванне ўплыву рэжымаў магнітна-імпульснай апрацоўкі на мікрацвёрдасць і мікраструктуру ўзораў сталяў, якія прымяняюцца для вырабу рубільных нажоў	11
Бакулін Б. А., Калугін Ю. К. Аналіз хімічнага складу і фізіка-механічных уласцівасцяў матэрыялаў для вырабу дэталей батаннага механізма ткацкага станка	22
Жоглік І. М. Эмісія монаэнергетычных йонаў V^{2+} , Ti^{2+} , Zr^{2+} у вакуумным электрадугавым разрадзе	29
Здор Г. М. Эксперыментальныя даследаванні прэсавання выцяжных матрыц сумесным дзеяннем статычных і дынамічных нагрузкаў высокай інтэнсіўнасці	35
Ішчанка М. В. Зношванне канвеернай стужкі ва ўмовах абразіўнага хімічна актыўнага асяроддзя калійнага прадпрыемства	44
Маркевіч М. І., Чапланаў А. М., Малышка А. М., Саладуха В. А., Салаўёў Я. А., Сарычаў А. Э., Шчарбакова А. М. Фарміраванне і даследаванне дыёдаў Шоткі на аснове сіліцыдаў плаціны і нікеля	48
Міхайлаў М. І. Аналіз нагрузачнага рэзервавання зборных унутраных фрэз	55
Ракіцкі А. А. Даследаванне стомленаснай трываласці дэталей машын з тэрманапыленымі парашковымі пакрыццямі ва ўмовах цыклічнага расцяжэння/сціскання	62

Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм

Бяценья Р. Ф., Анісковіч Г. І., Крыўцоў А. В., Рагажынскі С. М. Інавацыйная тэхналогія ўмацавання дыскаў ротараў і асноў башмакоў рэжучага апарата касілак	68
Багдановіч П. М., Міхайлаў М. І., Міхайлаў К. М. Даследаванне ўплыву электрафрыкцыйнага ўмацавання нажоў рэжучага барабана кормаўборачнага камбайна на іх зносаўстойлівасць	77

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

Machine Building and Engineering Science

Alifanov A. V., Goretsky G. P., Milyukova A. M., Lyakh A. A., Shishmolin V. N. Research of influence of magnetic-pulse treatment modes on microhardness and microstructure steel samples used for chipper knives manufacture	11
Bakulin B. A., Kalugin Ju. K. Analysis of chemical composition and physical-mechanical properties of materials for loom bata mechanism parts production	22
Zhohlik I. N. Emission of monoenergetic flow of V^{2+} , Ti^{2+} , ZR^{2+} ions in vacuum electroarc discharge	29
Zdor G. N. Experimental study of exhaust pressing matrix via the combined action of static and dynamic loads of high intensity	35
Ishchenko M. V. The conveyor belt wear in an abrasive and chemically active environment of the potash plant	44
Markevich M. I., Chaplanov A. M., Malyshko A. N., Solodukha V. A., Solovyev Ya. A., Sarichev O. E., Shcherbakova E. N. Formation and investigation of Schottky diodes based on platinum and nickel silicide	48
Mikhailov M. I. Analysis of prefabricated internal cutters load backup	55
Rakitsky A. A. Investigation of fatigue strength of machine components with thermal spray coatings under cyclic push/pull conditions	62

Processes and Machines of Agroengineering Systems

Betenya G. F., Aniskovich G. I., Krivtsov A. V., Rogozhinsky S. N. Innovative technology for rotor discs and mower cutterbar shoe base strengthening	68
Bogdanovich P. N., Mikhailov M. I., Mikhailov K. M. Research of influence of electrofriction hardening of forage harvester cutting drum knives on their wear resistance	77

УДК 621.81+539.62

А. А. Ракицкий

Белорусский национальный технический университет, Министерство образования Республики Беларусь,
пр. Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 296 34 77, arakitsky@bntu.by

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ТЕРМОНАПЫЛЁННЫМИ ПОРОШКОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ/СЖАТИЯ

Выполнено обоснование технологии поверхностного упрочнения деталей машин в целях повышения усталостной долговечности конструкций. Исследовано влияние термонапылённого порошкового никель-хромового покрытия на сопротивление усталости среднеуглеродистой стали. Проведены испытания на растяжение/сжатие цилиндрических образцов, которые показали неравномерное увеличение ресурса при выбранных параметрах нагружения и технологии упрочнения. Детально изучена и обсуждена область малоциклового усталости при действии близких к пределу текучести основного материала нормальных напряжений, в которой рост числа циклов до разрушения комбинированного образца достигает пятикратного значения. Доказано, что стальной образец с твёрдым покрытием работает как единое целое, и, несмотря на хрупкое трещинообразование, его усталостная долговечность существенно повышается.

Ключевые слова: термонапылённое порошковое покрытие; сопротивление усталости; скорость роста трещин; усталостная долговечность; хрупкое трещинообразование.

Рис. 5. Библиогр.: 4 назв.

A. A. Rakitsky

Belarusian National Technical University, Ministry of Education of the Republic of Belarus,
65, Nezavisimosty ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 296 34 77, arakitsky@bntu.by

INVESTIGATION OF FATIGUE STRENGTH OF MACHINE COMPONENTS WITH THERMAL SPRAY COATINGS UNDER CYCLIC PUSH/PULL CONDITIONS

A substantiation of a surface-strengthening technology of machine components for structures endurance increase was implemented. The influence of a thermal spray powder Ni-Cr-base coating on a medium carbon steel fatigue resistance was investigated. Fully reversed push/pull tests of mild hour-glass profile specimens were carried out which showed an irregular increasing of a durability under chosen loading parameters and strengthening technology. A low cycle fatigue field under close to the yield limit stresses was studied and discussed in detail where a growth of number cycles to failure for a combined specimen runs up to a value divisible by five. It is proved that a steel specimen with a hard coating works as the indivisible whole and in spite of a brittle-type cracking its fatigue endurance increases essentially.

Key words: thermal spray powder coating; fatigue resistance; crack growth speed; fatigue endurance; brittle-type cracking.

Fig. 5. Ref.: 4 titles.

Введение. Большинство изделий машиностроения эксплуатируются в условиях многоциклового нагружения, и их ресурс определяется характеристиками сопротивления усталости элементов конструкции. Интенсивность накопления усталостных повреждений и наступления предельного состояния — разрушения изделия — определяется множеством взаимосвязанных и взаимодействующих факторов: технологических, конструкционных, эксплуатационных и т. д. Как правило, усталостные трещины зарождаются от поверхностных дефектов, особенно в зонах контакта деталей и узлов, где происходят сложные процессы износа, фреттинг-усталости, питтинга и др.

Для комплексного решения проблемы повышения надёжности и долговечности изделий машиностроения по критериям износа и усталости в нашей стране в 1980-х годах сформировалось новое научное

направление — трибофатика (от греч. *tribos* трение, фр. *fatigue* усталость). Объединение опыта учёных и специалистов в смежных областях позволило разработать достаточно эффективные пути упрочнения поверхностей деталей машин, обеспечивающие существенное повышение ресурса сложных конструкций [1].

Выбор технологии поверхностного упрочнения. Обоснование применения упрочняющих покрытий на деталях конструкций для повышения их усталостной долговечности проведено на примере рессорных подвесок наземных мобильных машин: автомобилей, тракторов, прицепов, троллейбусов, трамваев, железнодорожного подвижного состава.

В зонах контактного взаимодействия элементов конструкций происходят сложные процессы трения, износа и накопления усталостных повреждений. Присутствие пыли, грязи и других твёрдых частиц в условиях эксплуатации интенсифицирует абразивное изнашивание деталей. Окружающая атмосфера вызывает протекание дополнительных электрохимических взаимодействий на поверхностях трения. Существенными активизирующими факторами являются наличие вибраций различной частоты, внешних нагрузок и т. д. В любом случае в зонах контакта происходят нарушения фрикционных связей, которые можно разделить на следующие основные виды: микрорезание, пластические и упругие деформации, схватывание поверхностей, сопровождающееся глубинным вырыванием материала.

Для повышения износостойкости рабочих поверхностей, эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания, необходимо обеспечить комплекс специфических, часто противоположных свойств: сопротивление сжатию и сдвигу, твёрдость и вязкость, концентрацию и равномерность распределения упрочняющих фаз. В машиностроении чаще всего в таких случаях увеличивают твёрдость контактирующих участков. Однако более перспективным представляется использование покрытий, которые обладают гетерогенной структурой, сочетающей высокую микротвёрдость дисперсных включений с износостойкой вязкой матрицей, препятствующей протеканию микрорезания. При этом для достижения максимальной износостойкости и замены механизма микрорезания трущихся поверхностей менее интенсивными процессами упругого или пластического сдвига к структуре упрочняющих слоёв предъявляются дополнительные требования. Так, расстояние между твёрдыми включениями структуры должно быть меньше среднего размера абразивных частиц, величина зёрен карбидов и боридов — достаточной для сопротивления абразивному изнашиванию, интенсивность которого уменьшается с ростом толщины твёрдых включений.

Повреждения поверхностей деталей являются очагами зарождения распространяющихся трещин, нарушающих целостность (сплошность) сечений и приводящих к утрате работоспособности или полному разрушению конструкций. При этом геометрические, физико-механические и другие параметры покрытий, а также наличие переходной зоны, несомненно, влияют на скорость роста усталостных макротрещин в матрицах. Таким образом, задача управления процессом контактного взаимодействия деталей состоит в правильном выборе и обосновании материалов, структуры, технологии нанесения покрытий с тем, чтобы исключить или замедлить накопление повреждений на всех стадиях зарождения и распространения трещин и, в конечном счёте, повысить ресурс несущей конструкции.

Среди достаточно большого многообразия методов нанесения покрытий для повышения долговечности листовых рессор выбрано газопламенное напыление порошков самофлюсующихся сплавов [2]. Суть процесса заключается в нагреве, распылении и ускорении частиц порошка в высокотемпературном газовом потоке. На поверхность изделия или основы напыляемый материал поступает в диспергированном состоянии в виде мелких расплавленных или пластифицированных частиц, которые ударяются, деформируются и, закрепляясь, накладываются друг на друга. При этом возможно возникновение трёх видов связей: механических, локализованной диффузии или сплавления, сил Ван-дер-Ваальса.

Высокая эффективность и универсальность данного метода определяются следующими принципиальными особенностями: 1) возможностью нанесения покрытий из различных материалов и в различных сочетаниях; 2) получением покрытий практически на любых элементах конструкций; 3) отсутствием деформации и существенного снижения прочности изделия, поскольку напыление не вызывает его значительного нагрева; 4) небольшой потребностью в порошках, так как толщина покрытия обычно составляет 100...500 мкм; 5) высокой производительностью и универсальностью применяемого оборудования.

Основное требование к наносимому на деталь покрытию — соответствие его параметров условиям эксплуатации изделия. Кроме того, материал покрытия должен обладать такими физико-химическими свойствами, которые обеспечивают совместимость со свойствами основы (матрицы).

Использованные в данной работе материалы — сплавы на основе никеля и хрома с добавлением бора и кремния. Они характеризуются тем, что после напыления могут быть оплавлены на воздухе. Образующиеся при их плавлении соединения бора и кремния связывают окислы никеля и хрома, а также железа, в стекловидные шлаки, всплывающие на поверхность оплавленного металла, и защищают его от дальнейшего окисления. При этом на детали образуется плотное мелкопористое покрытие.

Оплавленные покрытия из самофлюсующихся сплавов обладают высокой износостойкостью в условиях абразивного и эрозионного изнашивания. Они отличаются высокой химической стойкостью к окислению, в том числе при повышенных температурах и в агрессивных средах, способностью удерживать граничные слои смазки и локализовать пластические деформации в поверхностных слоях. Вместе с тем самофлюсующиеся сплавы имеют малую ударную вязкость и высокий коэффициент термического расширения. Поэтому после оплавления для предотвращения растрескивания покрытия необходимо медленное охлаждение, например, на воздухе.

Снижение пористости покрытий, а также повышение прочности сцепления с основным материалом может достигаться в режиме припекания с приложением активирующего давления. В этом случае вместо оплавления используется нагрев до более низкой температуры, что снижает опасность разупрочнения матрицы, и производится обжатие поверхностного слоя.

Материалы и методы исследования. Для проверки предложений по упрочнению стальных деталей машин методом газотермического напыления порошковых материалов проведены усталостные испытания образцов различных форм и размеров при знакопеременном растяжении/сжатии на универсальной сервогидравлической установке фирмы Schenk с усилием 50 кН (рисунок 1).

Образцы изготавливались из прутка среднеуглеродистой стали, химический состав которой следующий (в весовых процентах): 0,4% С; 0,95% Cr; 0,6% Mn; 0,2% Si; 0,15% Ni; остальное — феррит. Механические свойства основного материала определены при статических нагрузках: предел текучести — 647 МПа, предел прочности — 892 МПа, твёрдость — НВ 229. Центральная (вогнутая) часть образца получена точением с последующим дробенаклёпом для лучшего сцепления с покрытием.

Материал покрытия — никель-хромовый самофлюсующийся сплав, имеющий химический состав (в весовых процентах): 0,6% С; 12,5% Cr; 4,5% Fe; 4,0% Si; 75,5% Ni; 2,9% В. Использовался порошок в виде сферических частиц размерами 40...100 мкм. Для увеличения адгезии износостойкого слоя с основным материалом первоначально наносился связующий молибденовый подслои в несколько микрон. Молибден прочно соединяется со сталью, и его шероховатая поверхность обеспечивает надёжное сцепление с последующим слоем. Затем газопламенным способом с помощью установки порошковой термораспылительной (УПТР) на вращающийся в шпинделе токарного станка образец напылялось никель-хромовое покрытие толщиной порядка 0,5 мм, которое оплавлялось с помощью горелки при температуре выше 1 000°C. Окончательно рабочая поверхность образца шлифовалась и полировалась. Средняя твёрдость покрытия составила 50 HRC.

Микроструктура наименьшего сечения образца (см. рисунок 1) исследовалась с помощью электронного микроскопа SEM Philips 500. При данной технологии изготовления пористость получаемого покрытия как на поверхности образцов, так и по глубине составила порядка 10%. Измерения микротвёрдости компонентов покрытия по Виккерсу показали существенно различные результаты от 300 до 1 000 HV (при микротвёрдости зёрен матрицы порядка 200 HV).

Для обнаружения зарождения усталостных трещин и регистрации их размеров использовался метод «реплик». В качестве датчика применялась прозрачная плёнка толщиной 35 мкм из ацетата целлюлозы. Техника эксперимента состоит в следующем. Лист репликационного материала разрезается на полоски необходимых размеров порядка 10 × 20 мм. Поверхность исследуемого образца смачивается ацетоном, и на выбранный его участок пинцетом накладывается вырезанная полоска. За счёт реакции с ацетоном и размягчения последняя плотно прилегает к поверхности металла, точно копируя его форму. Спустя несколько минут «реплика» высыхает и легко снимается с образца. На ней зеркально

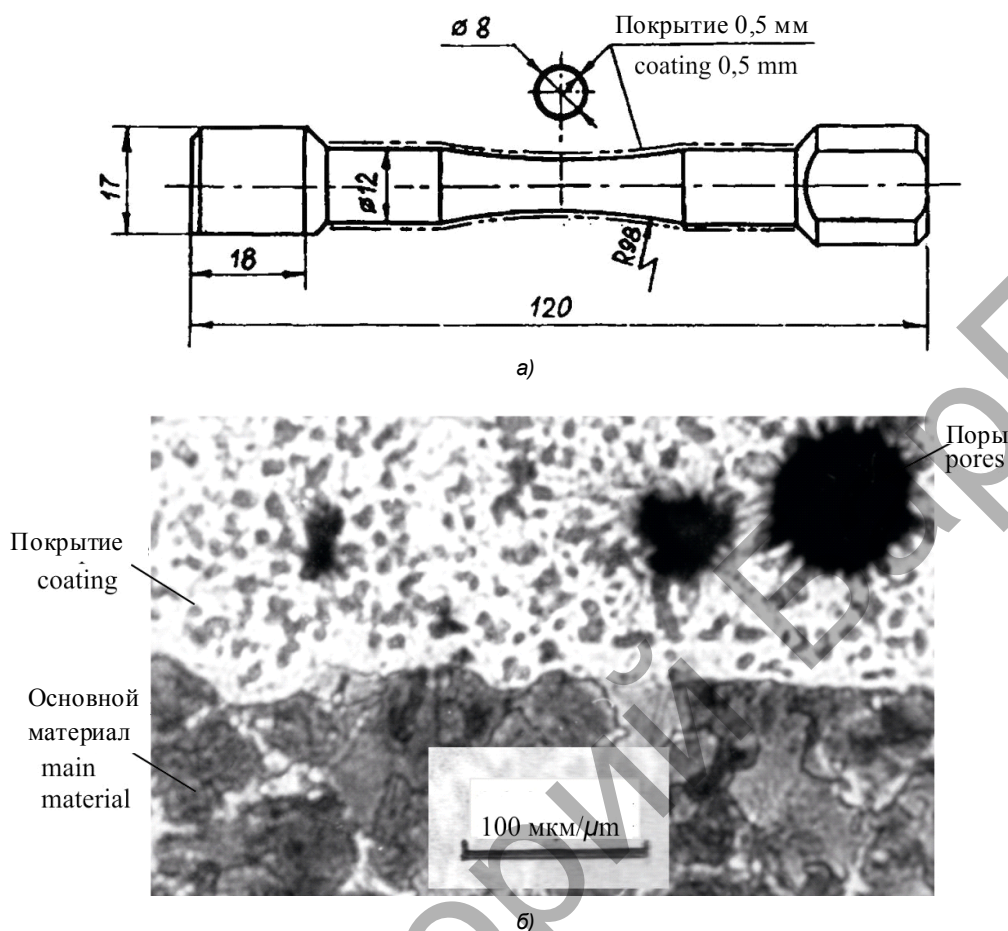


Рисунок 1. — Геометрия (а) и микроструктура (б) образца

отображается весь рельеф поверхности: дефекты, включения, трещины и т. п. Затем плёнка закрепляется с помощью клеящей ленты на стекло, образуя слайд, готовый для наблюдения под микроскопом.

Реализация метода «реплик» возможна только в статическом состоянии образца, при этом для уверенного обнаружения и измерения дефектов необходимо зафиксировать нагружающее устройство стэнда в экстремальном положении цикла, т. е. при действии максимальных напряжений (деформаций) и, соответственно, при максимальном раскрытии трещин. Число остановок стэнда для контроля зависит от особенностей поставленной задачи. Обычно используют 15...20 реплик в течение наработки образца до разрушения, что позволяет достаточно точно описать зависимости скорости роста усталостных трещин. Мониторинг зарождения и развития дефектов осуществлялся с помощью аппаратно-программной системы, которая включает в себя оптический микроскоп, видеокамеру, аналого-цифровые преобразователи и персональный компьютер. Оптическое изображение «реплики», которое исследователь наблюдает в окуляре микроскопа, фотографируется видеокамерой и с помощью преобразователей превращается в электронные цифровые сигналы, передаваемые в память компьютера. Изображение «реплики» на экране монитора компьютера может быть очерчено цветным лучом, управляемым мышью, при этом возможно описать точки, линии и площади любой формы. Пакет программ позволяет автоматически вычислять любые статистические характеристики дефектов, касающихся их геометрии.

Результаты исследования и их обсуждение. При анализе результатов ранее проведённых исследований сопротивления усталости среднеуглеродистой стали с износостойкими термонапылёнными покрытиями [3] сделано заключение, что при знакопеременном растяжении/сжатии их циклическая долговечность слегка повышается по сравнению с теми же показателями для стали без покрытия. Статистическая обработка данных эксперимента позволила установить следующую зависимость:

$$\Delta\sigma = 2184,0 - 315,8 \cdot \log N,$$

где $\Delta\sigma$ — размах нормальных напряжений в наименьшем поперечном сечении образца с покрытием, МПа;
 N — число циклов нагружения до разрушения образца.

Вычисления показывают, что циклическая долговечность образцов с нанесённым покрытием изменяется существенно: при относительно низком размахе напряжений 400 МПа рост числа циклов до разрушения составляет 16%, а при высоком ($\Delta\sigma$ равно 1 000 МПа) — увеличивается примерно в 5 раз. Исходя из вышесказанного, отметим, что особый интерес представляет детальное изучение поведения комбинированных материалов в области малоциклового усталости.

Анализ «реплик», снятых с поверхности испытуемого образца, показывает, что при высоких растягивающих/сжимающих нагрузках буквально после первых циклов наработки в покрытии образуются множество микротрещин по наименьшему диаметру образца (обозначены стрелками на рисунке 2).

Далее они объединяются в макротрещину, развиваясь в глубь опасного сечения и приводя к окончательному разрушению образца. Вышесказанное хорошо иллюстрируется графиками (рисунок 3).

Первые 400...500 циклов наблюдаются несколько субтрещин, исчисляемых микронами. От 700 до 1 500 циклов длина некоторых из них достигает значений 0,5...3,5 мм. В диапазоне от 2 000 до 3 000 нагружений скорость роста двух трещин 1 и 2 резко возрастает, а далее большинство трещин стремительно увеличиваются в размерах, сливаются, вплоть до полного разрушения образца, наступившего при наработке 5 165 циклов. Вычисление скоростей роста всех зафиксированных при испытаниях (порядка двух десятков) трещин в зависимости от их длины показывает широкий разброс значений от сотых долей до нескольких микрон за цикл, что отражает отсутствие строгой математической зависимости этих факторов между собой в данном эксперименте (рисунок 4).

Вместе с тем, если анализировать изменение скорости роста каждой отдельной трещины, можно отметить четыре характерные зоны (рисунок 5).

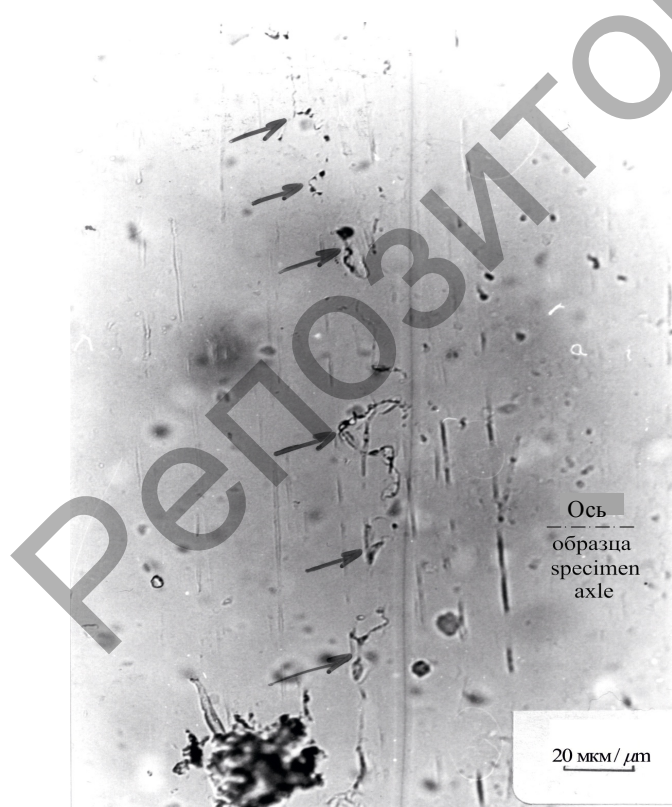


Рисунок 2. — Несколько микротрещин на поверхности образца с покрытием перед их объединением в макротрещину при $\Delta\sigma$, равном 998 МПа

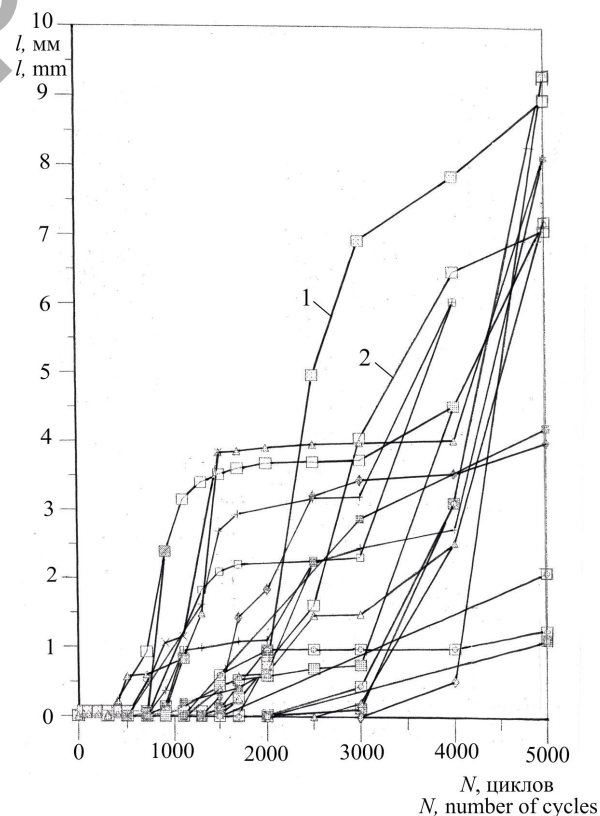


Рисунок 3. — Зависимость длины развивающихся усталостных трещин от наработки покрытого образца в циклах

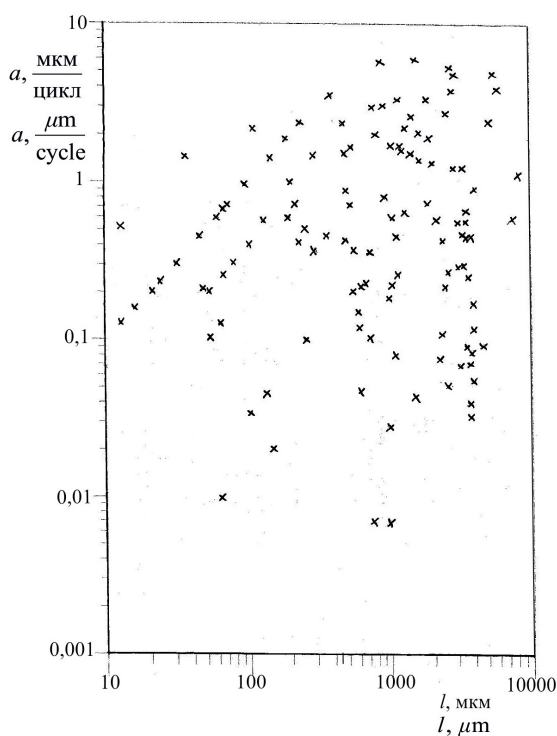


Рисунок 4. — Поле рассеяния скоростей роста усталостных трещин на поверхности покрытия при высоких нормальных напряжениях от растяжения/сжатия образца

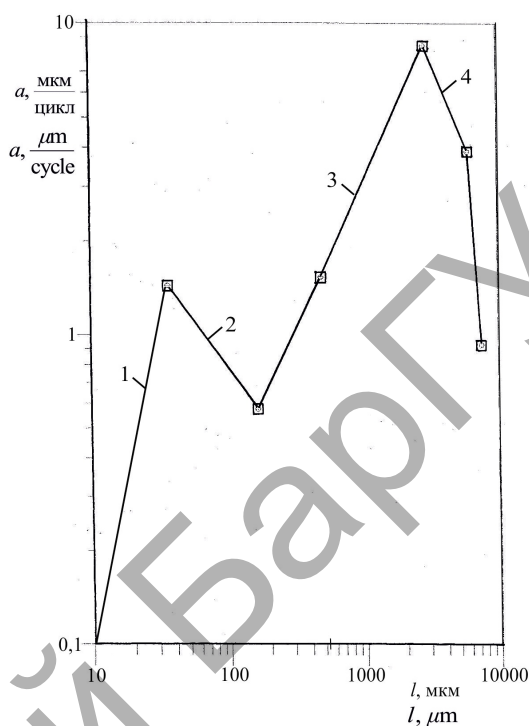


Рисунок 5. — Зависимость скорости роста трещины от её длины на поверхности образца с покрытием в области малоциклового усталости $\Delta\sigma$, равном 998 МПа, N_f — 5 165 циклов

После хрупкого образования и распространения трещины до одного-двух десятков микрон (линия 1) удлинение её на поверхности замедляется (линия 2), так как накапливаемая энергия разрушения идёт на развитие повреждения в глубь твёрдого покрытия вплоть до перехода к основному металлу (матрице). Далее происходит быстрое межзёрненное разрушение более мягкого материала — среднеуглеродистой стали (линия 3). При достижении поверхностной трещины длины порядка 2...3 мм скорость роста снова снижается (линия 4), вследствие, по-видимому, взаимного влияния других, параллельно растущих трещин, так как энергия разрушения расходуется, в своём роде перераспределяется, на несколько участков усталостного повреждения.

Заключение. В результате проведённых исследований показана возможность и эффективность применения термонапылённых порошковых покрытий для упрочнения деталей машин, ресурс которых лимитируется усталостными разрушениями. Правильным выбором материалов и технологий изготовления достигается сопротивление внешним растягивающим и сжимающим нагрузкам биметаллического соединения как единого целого.

Список цитируемых источников

1. Ракицкий А. А. Эффективные пути снижения повреждающего действия фреттинг-процессов в силовых системах машин // Трибофатика : Труды V Международного симпозиума по трибофатике, 3—7 октября 2005 г. Иркутск, 2005. Т. 1. С. 135—141.
2. Белоцерковский М. А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий : монография. Минск : Технопринт, 2004. 200 с.
3. Rakitsky A. A., de los Rios E. R., Miller K. J.: 1) Fatigue resistance of a medium carbon steel with a wear resistant thermal spray coating // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 1994. Vol. 17. No 5. P. 563—570 ; 2) Fractographic analysis of fatigue damage for steel specimens with a wear resistant thermal spray coating // Proceedings of III International Symposium in Tribo-Fatigue, 2000. Beijing, China : Hunan University Press, 2000. P. 248—252.

Поступила в редакцию 26.04.2016.