

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 2 (10), 2021

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.
Телефон: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных подписчиков; 009992 — 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» включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском и английском языках.
Распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор Л. Н. Щербук
Компьютерная верстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 03.11.2021. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,50. Уч.-изд. л. 9,30.
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 г. Слоним, Гродненская обл.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (гл. ред. журн.), 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, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Алифанов А. В. (гл. ред. сер.), лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Горбач Ю. Е. (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Зубрицкая Л. С. (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович И. А. (отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Дубень И. В.** (отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

Белый А. В., член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

Дремук В. А., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**,

кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь);

Карташевич А. Н., доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клочков А. В., доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клубович В. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь);

Сиваченко Л. А., доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь);

Томило В. А., доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Educational institution
"Baranovichi State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichi.
Phone: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;
009992 — 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.

Issued in Russian 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

Signed print 03.11.2021. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 14,50.
Acc.-pub. s. l. 9,30. Circulation of 100 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary
Enterprise "Slonim printing establishment". The state
registration certificate of the publisher, manufacturer and
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim,
Grodno region.

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, 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 Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, Doctor of Technical Sciences, Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A.V.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Educational institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochkov A.V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (educational institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Interstate educational institution of higher education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Алифанов А. В., Милюкова А. М., Ционенко Д. А. Модель воздействия импульсного магнитного поля на изделие из титанового сплава

Булойчик И. А. Анализ изменения структурообразования интерметаллидных слоев на основе цинка при цинковании термоупрочненных стальных изделий диффузионным способом из газовой фазы

Дубень И. В., Дремук В. А. Расчет числа витков пружин кручения

Жигалов А. Н., Горавский И. А. Экспериментальные исследования износа осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненного аэродинамическим звуковым методом

Жигар В. И., Довгяло В. А., Моисеенко В. Л. Определение экономической эффективности практического применения методов повышения производительности звеносборочной линии КБ03

Качанов И. В., Филипчик А. В., Шаталов И. М., Булыга Д. М., Ковалевич В. С., Недвецкий С. В., Денисов В. А. Гидроабразивная технология очистки металлических поверхностей гребных винтов от коррозии

Михайлов М. И., Тетерич Н. Э., Воробей В. И. К вопросу о диагностике резцов по силе резания в условиях роботизированного технологического комплекса

Сиваченко Л. А., Абдукаликова Г. М., Сотник Л. Л., Дыдышко И. М. Проблемы, задачи и пути развития пружинных технологических аппаратов

Сотник Л. Л., Русан С. И., Сиваченко Л. А. Анализ пропускной способности вибровалкового измельчителя с переменными параметрами движения вала

Чаевский В. В., Кулешов А. К., Рудак П. В., Барчик С., Коледа П. Влияние ионно-плазменной обработки лезвий ножей на режущую способность фрезы при фрезеровании древесины

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Дубень И. В. Агротехническая и энергетическая оценка работы плужных корпусов с углоснимами

Крупенин П. Ю. Анализ фазового портрета пульсаций доильного аппарата

Филиппов А. И., Лещик С. Д., Калугин Ю. К., Дубень И. В. Исследование и разработка модели по оптимизации процесса разбрасывания удобрений

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

4 Alifanov A. V., Miliukova A. M., Tsionenko D. A. Model of impact of pulsed magnetic field on titanium alloy product

12 Bulochyk I. A. Analysis of changes in the structure formation of zinc-based intermetallic layers during galvanizing of heat-hardened steel products by diffusion method from the gas phase

17 Duben I. V., Dremuk V. A. Calculation of the number of torsion springs

24 Jigalov A. N., Goravskii I. A. Experimental study of the wear of an axial milling tool made of high-speed steel R6M5, hardened by aerodynamic sound method

42 Zhihar V. I., Dovgualo V. A., Moiseenko V. L. determination of economic efficiency of practical application of methods for improving the productivity of the link assembly line KB03

51 Kachanov I. V., Filipchik A. V., Shatalov I. M., Bulyga D. M., Kovalevich V. S., Nedvetsky S. V., Denisov V. A. Hydro-abrasive technology for cleaning metal surfaces of propellers from corrosion

60 Mikhailov M. I., Teterich N. Э., Vorobei V. I. To the question of cutters diagnostics by cutting force in conditions of a robotic technological complex

67 Sivachenko L. A., Abdalikova G. M., Sotnik L. L., Dydyshko I. M. Problems, tasks and ways of development of spring technological apparatus

78 Sotnik L. L., Rusan S. I., Sivachenko L. A. Analysis of the throughput of a vibrating grinder with variable parameters of the roll movement

88 Chayevski V. V., Kuleshov A. K., Rudak P. V., Barcik Š., Koleda P. The effect of ion-plasma treatment of the blades on the cutting ability of the milling cutter during wood milling

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

95 Duben I. V. Agrotechnical and energy assessment of the work of plough bodies with trashboard

102 Krupenin P. Y. Analysis of the phase portrait of milking machine pulsations

108 Filippov A. I., Leshchik S. D., Kalugin Yu. K., Duben I. V. Research and development of a model for optimizing the fertilizer spreading process

УДК 62-757.73

И. В. Качанов¹, доктор технических наук, профессор;**А. В. Филипчик**², кандидат технических наук;**И. М. Шаталов**¹; **Д. М. Бульга**²; **В. С. Ковалевич**¹; **С. В. Недвецкий**²; **В. А. Денисов**¹¹Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65,

220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 293 96 13

²Филиал «Институт переподготовки и повышения квалификации» государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», 202135 д. Светлая Роща, 1, Борисовский район, Минская область, Республика Беларусь, +375 (17) 777 27 74

ГИДРОАБРАЗИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ОТ КОРРОЗИИ

В статье анализируются современные технологии для очистки металлических поверхностей от коррозии, даны их преимущества и недостатки. Приведены результаты исследований, проведенных авторами, по очистке металлической поверхности гребного винта от коррозии с использованием технологии струйной гидроабразивной обработки с применением бентонитовой глины. Установлено наличие защитного пленочного покрытия, сформированного в процессе струйной гидроабразивной обработки.

Ключевые слова: технология; гидроабразив; струя; очистка; металлы; коррозия; бентонитовая глина.

Рис. 8. Библиогр.: 12 назв.

I. V. Kachanov¹, Doctor of Technical Sciences, Professor;**A. V. Filipchik**², PhD in Technical Sciences;**I. M. Shatalov**¹; **D. M. Bulyga**²; **V. S. Kovalevich**¹; **S. V. Nedvetsky**²; **V. A. Denisov**¹¹Belarusian National Technical University, 65 Independence Ave.,

220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 293 96 13

²Branch “Institute for Retraining and Advanced Studies” of the State Educational Institution

“University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus”, 202135 Svetlaya Roscha, 1, Borisovsky dist., Minsk reg., the Republic of Belarus, +375 (17) 777 27 74

HYDRO-ABRASIVE TECHNOLOGY FOR CLEANING METAL SURFACES OF PROPELLERS FROM CORROSION

The article analyzes modern technologies for cleaning metal surfaces from corrosion, their advantages and disadvantages are given. The results of the research conducted by the authors on cleaning the metal surface of the propeller from corrosion using the technology of water jet treatment using bentonite clay are presented. The presence of a protective film coating formed during the processing the jet HAC has been established.

Key words: technology; hydro-abrasive; jet; cleaning; metal; corrosion; bentonite clay.

Fig. 8. Ref.: 12 titles.

Введение. При эксплуатации машин и механизмов отмечается значительный рост потерь от коррозионных разрушений, что требует резкого улучшения мер противокоррозионной защиты. Исследования, приведенные рядом авторов, показывают, что весьма эффективно для борьбы с коррозией может быть использована технология гидроабразивной очистки (далее — ГАО), обеспечивающая наряду с очисткой формирование защитного пленочного покрытия с достаточно высокой адгезионной прочностью [1—4].

Практически каждый технологический процесс в современном машиностроительном производстве включает операцию очистки деталей от коррозии, различных загрязнений. Ме-

няющиеся требования к этим процессам неразрывно связаны с модернизацией оборудования для очистки металлических поверхностей. Некоторые новые образцы представляются на международных промышленных выставках по очистке. Например, в 2019 году на выставке в Штутгарте (Германия) фирма Mafac представила моечную установку Java с векторным движением деталей; фирма BVL — установку Libelle Product для точного позиционирования очищаемых деталей; фирма Wigol — специальное средство Booster TE для удаления ржавчины и окалины [5].

Аналитический обзор существующих методов очистки металлических поверхностей от коррозии. В настоящее время за рубежом и в Республике Беларусь для очистки металлических поверхностей от коррозии используются технологии, представленные на рисунке 1.

Выбор того или иного способа очистки зависит от объема выполняемых работ, типа коррозии, размеров очищаемых изделий.

Механический способ предусматривает очистку ручным и механизированным инструментом. При выполнении объема работ, связанного с очисткой металлической поверхности от коррозии, в качестве ручного инструмента могут использоваться скребки, металлические щетки, шарошки и т. п. [1; 3].

В целях повышения производительности очистки механическим способом используется механизированный инструмент — пневматические и электрические зачистные машины. Рабочими органами таких машин являются металлические щетки, иглофрезы, шлифовальные круги и т. п. Для одновременной очистки от коррозии и старых лакокрасочных покрытий используют иглофрезы или щётки различных модификаций [3].

Производительность процесса очистки металлических поверхностей от коррозии с помощью механизированного инструмента составляет $2 \div 10 \text{ м}^2 / \text{ч}$, а энергоёмкость — $0,5 \text{ кВт ч} / \text{м}^2$ [3; 6].

Наряду с достоинствами указанный способ очистки имеет ряд недостатков [3; 6]:

- применение ручного труда;
- образование замкнутой кинематической системы инструмента с обрабатываемой поверхностью;
- влияние тепловыделения и вибрации на качество обрабатываемой поверхности, которое ухудшается в связи с проявлением таких дефектов на поверхности изделия, как прижоги, трещины, следы вибрации (огранка).

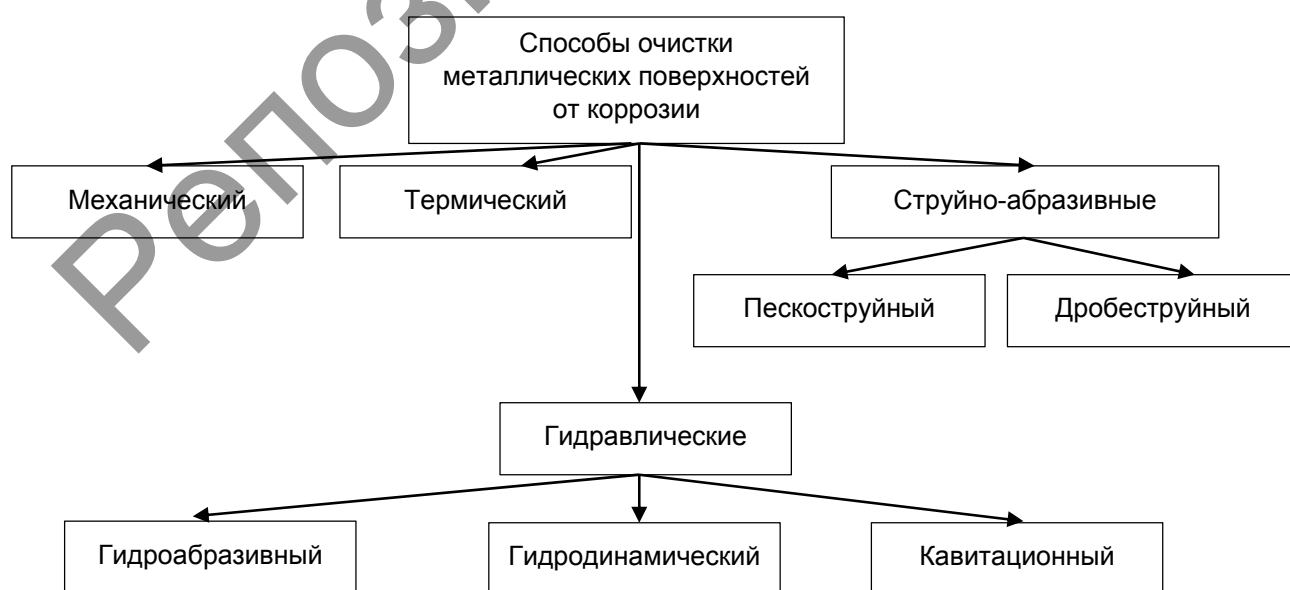


Рисунок 1. — Схема применяемых способов для очистки металлических поверхностей от коррозии [1; 3]

Необходимо отметить, что при очистке металлических поверхностей от коррозии механизированным инструментом на поверхности очищаемого изделия остается до 250 г продуктов коррозии на 1 м^2 [1; 3; 6].

Термические способы очистки поверхностей от коррозии основаны на нагреве пламенем до температуры их сгорания.

Для исключения коробления и температурной деформации данная технология применяется для металлов с толщиной не менее 6 мм. Производительность очистки составляет $1 \div 1,5 \text{ м}^2 / \text{ч}$ [1; 3].

Следует отметить, что ряд существенных недостатков (невозможность удаления продуктов коррозии с тонколистовой стали; необходимость дополнительной очистки металлической поверхности от окалины, а воздуха — от вредных продуктов сгорания) ограничивает применение термических способов [1; 3]. Сложность применяемого оборудования и высокие требования по технике безопасности, экологии ограничивают использование этих способов на машиностроительных предприятиях.

Струйно-абразивные способы очистки находят широкое применение при очистке поверхностей от коррозии, нагара, окалины, старых лакокрасочных покрытий. В качестве абразива используется кварцевый песок, корунд, карбид кремния, стальная или чугунная дробь, стеклянная дробь, косточковая крошка, сухой лёд и другие материалы [1; 3].

На международной выставке Parts2clean 2019 (Германия) было представлено различное оборудование для сухой очистки обработанных деталей с использованием струи замороженного CO_2 . Фирма ACP Systems предложила оборудование Quattro Clean System для очистки перед нанесением лака на детали из синтетических материалов. Очистку деталей осуществляют струей замороженной двуокиси углерода с температурой $78,5 \text{ }^\circ\text{C}$, подаваемой в рабочую зону через струеформирующее устройство [7].

Как показывает мировой промышленный опыт, из различных струйно-абразивных способов достаточно широкое распространение получили пескоструйная и дробеструйная очистка металлических поверхностей от коррозии.

Гидроабразивная очистка предусматривает использование в струйном потоке жидкости таких абразивных материалов как стекло, пемза, кварц, гранит, тальк, известняк, глина [1; 3].

При ГАО на поверхности обрабатываемой детали образуется жидкостная пленка, заполняющая неровности поверхности; абразивные частицы при ударе по выступающим неровностям не преодолевают сопротивления этой пленки и поэтому воздействуют только на выступы; частицы же, которые ударяют по впадинам, должны преодолеть сопротивление жидкостной пленки, поэтому эффективность их воздействия невелика. Вследствие этого происходит постепенное уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности до $Ra = 0,05 \div 1 \text{ мкм}$. Производительность ГАО составляет $5 \div 6 \text{ м}^2 / \text{ч}$ [1; 3].

К числу достоинств гидроабразивного способа можно отнести:

- отсутствие пылевыведения в зоне очистки;
- устранение проблемы разупрочнения поверхности за счет теплоотвода повышенной температуры в зоне обработки посредством воды;
- отсутствие зависимости от исходной шероховатости обрабатываемого материала;
- повышенный срок использования абразива (в 2-3 раза выше, чем при пескоструйной обработке) за счет демпфирующего действия рабочей жидкости.

Оборудование для реализации технологии ГАО предлагается фирмой WardJet LLC и представляет установку (X-1530) для быстрой и точной ГАО с соответствующим программным обеспечением для автоматизации операций загрузки/выгрузки и очередности обработки деталей. Установка оснащается специальным насосом, подающим гидроабразивную струю под давлением 420 МПа, что позволяет эффективно и точно обрабатывать стекло, сталь, пластики и различные сплавы [8].

Гидродинамический способ очистки предусматривает использование струй воды низкого (до 1 МПа), среднего ($1 \div 5 \text{ МПа}$) и высокого давления ($5 \div 60 \text{ МПа}$) [1; 3].

Основным препятствием на пути применения высоконапорных гидродинамических установок является их высокая стоимость и значительные энергозатраты. Для создания высокого давления приходится использовать дорогое и громоздкое энергоемкое оборудование.

Кавитационный способ очистки основан на использовании эффекта схлопывания кавитационных парогазовых микропузырьков. При схлопывании кавитационного микропузырька в локальном объеме вблизи и внутри него возникают поля высоких давлений (до 1 000 МПа) и температур (1 000÷2 000 °С). При коллапсе пузырька в жидкости генерируются волны разрежения/сжатия, способные на обработанной поверхности сформировать кумулятивные микроструи со скоростями движения в 100÷520 м / с [1; 3].

Очистка от коррозии кавитационными струями является эффективным способом обработки поверхностей, а присутствие кавитационных пузырьков усиливает эрозионное воздействие [1; 3].

Существенными недостатками рассмотренных гидравлических способов очистки являются: быстрая повторная коррозия очищенных влажных поверхностей; необходимость обязательного пассивирования поверхности; повышенный износ струеформирующих устройств.

Анализ вышеуказанных современных технологий позволил разработать на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ новый отечественный способ борьбы с коррозией с применением бентонитовой глины, кальцинированной соды, полиакриламида, обеспечивающий наряду с очисткой формирование защитного пленочного покрытия с высокой адгезионной прочностью. Следует отметить, что разработанная технология ГАО обладает патентной новизной [9—12].

Материалы и методы исследования. Для экспериментального исследования, а также для оценки практической применимости новой технологии ГАО в качестве образца был выбран гребной винт (марка материала — ВСтЗсп4), применяемый в роли движителя на буксире-толкаче проекта 861У.

Гребной винт до обработки (рисунок 2, а), имевший серьезный износ от биологической и химической коррозии основного металла, не мог обладать проектными качествами, что приводило к потере ходкости судна, а следовательно, снижению КПД пропульсивного комплекса и повышенному расходу топлива.

В ходе экспериментальных исследований в лабораторных условиях гребной винт был обработан с помощью новой технологии — струйной ГАО (рисунок 2, б). После обработки было обнаружено и зафиксировано на поверхности гребного винта пленочное покрытие (рисунок 3), которое далее было исследовано на морфологию и химический состав.



Рисунок 2. — Внешний вид лопастей гребного винта:
а — поверхность до обработки; б — обработанная поверхность

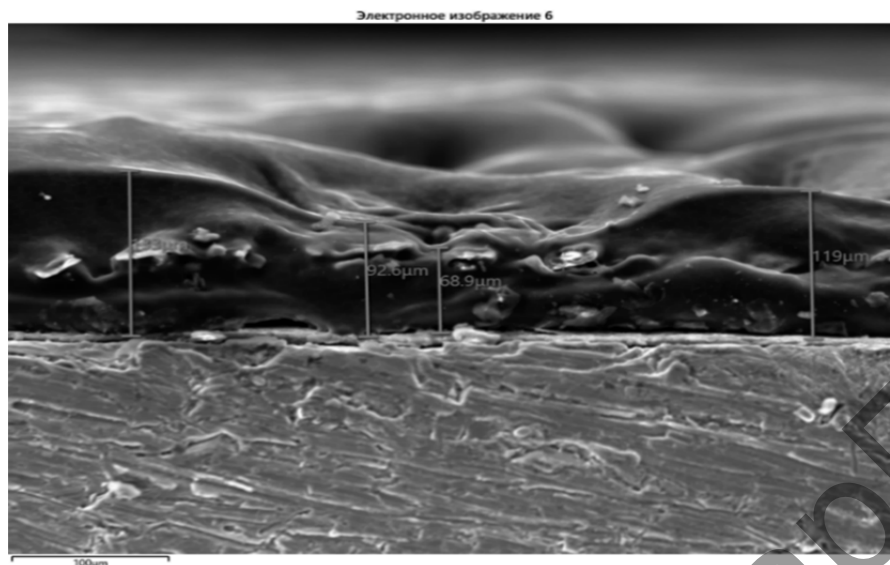
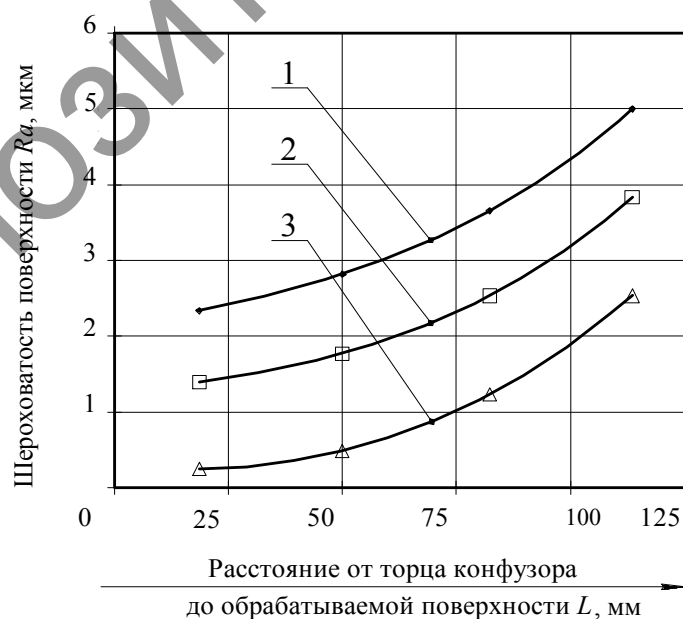


Рисунок 3. — Пленочное покрытие, образованное после обработки струйной ГАО на поверхности гребного винта

Для установления химического состава пленочного покрытия на поверхности гребного винта в нескольких точках производился рентгеновский энергодисперсионный спектрометрический анализ с учетом Fe и без учета Fe. Анализ полученных данных позволил установить, что в состав пленочного покрытия входят те же элементы, которые составляют химическую основу компонентов рабочей жидкости (бентонитовая глина, кальцинированная сода, полиакриламид).

Одними из важных морфологических характеристик, влияющих на пропульсивные качества гребного винта, являются шероховатость и микротвердость засасывающей и нагнетательной поверхностей. На рисунке 4 представлено влияние расстояния L от конфузора до обрабатываемой поверхности на шероховатость поверхности Ra при изменении давления на входе в конфузур $p_{вх}$ от 17 до 30 МПа.



1 — $p_{вх} = 17$ МПа; 2 — $p_{вх} = 22$ МПа; 3 — $p_{вх} = 30$ МПа;
 $K_б = 3\%$; $K_п = 10^{-5}\%$; $K_{к.с} = 2\%$; остальное — вода;
 материал — ВСтЗсп4

Рисунок 4. — Зависимость шероховатости Ra от расстояния L

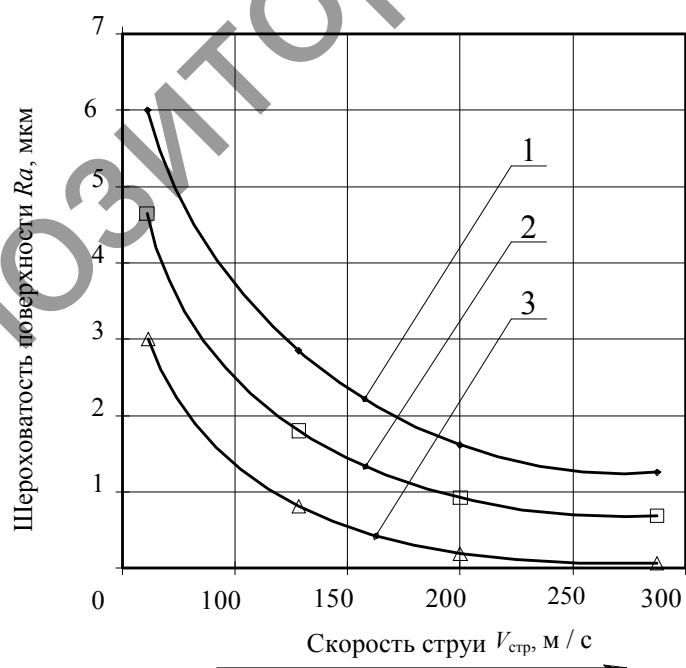
Исследования морфологических характеристик гребного винта проводились в испытательном центре государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа» (Минск). При проведении испытаний шероховатость определялась на профилометре-профилографе модели 252 типа А1. Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере Micromet-2. Адгезионная прочность измерялась методом склерометрии.

Результаты исследования и их обсуждение. Как следует из рисунка 4, шероховатость обработанной поверхности Ra увеличивается от 0,2 до 5,5 мкм при изменении L от 20 до 110 мм. Увеличение Ra объясняется тем, что силовое воздействие уменьшается по мере удаления обрабатываемой поверхности от выходного сечения конфузора за счет раскрытия факела струи.

На рисунке 4 видно, что при давлении на входе в конфузор $p_{вх} = 30$ МПа и расстоянии L от 15 до 50 мм значения шероховатости $Ra = 0,2 \div 0,4$ мкм, что согласно ГОСТ 8054-81 является оптимальным показателем для поверхности гребного винта.

На рисунке 5 представлена зависимость изменения шероховатости поверхности Ra от скорости струи рабочей жидкости $V_{стр}$.

Из анализа кривых на рисунке 5 следует, что шероховатость обработанной поверхности Ra уменьшается от 6 до 0,2 мкм при увеличении $V_{стр}$ от 15 до 280 м/с. Уменьшение Ra объясняется тем, что с увеличением скорости струи рабочей жидкости $V_{стр}$ происходит увеличение силового воздействия струи рабочей жидкости на обрабатываемую поверхность. При изменении скорости струи от 200 до 250 м/с ($L = 20$ мм) шероховатость изменяется в диапазоне $Ra = 0,2 \div 0,4$ мкм, что, согласно ГОСТ 8054-81, является оптимальным показателем для поверхности гребного винта.



1 — $L = 150$ мм; 2 — $L = 100$ мм; 3 — $L = 20$ мм;
 $K_6 = 3\%$; $K_n = 10^{-5}\%$; $K_{к.с} = 2\%$; остальное — вода;
 материал — ВСтЗсп4

Рисунок 5. – Зависимость шероховатости Ra от скорости струи $V_{стр}$

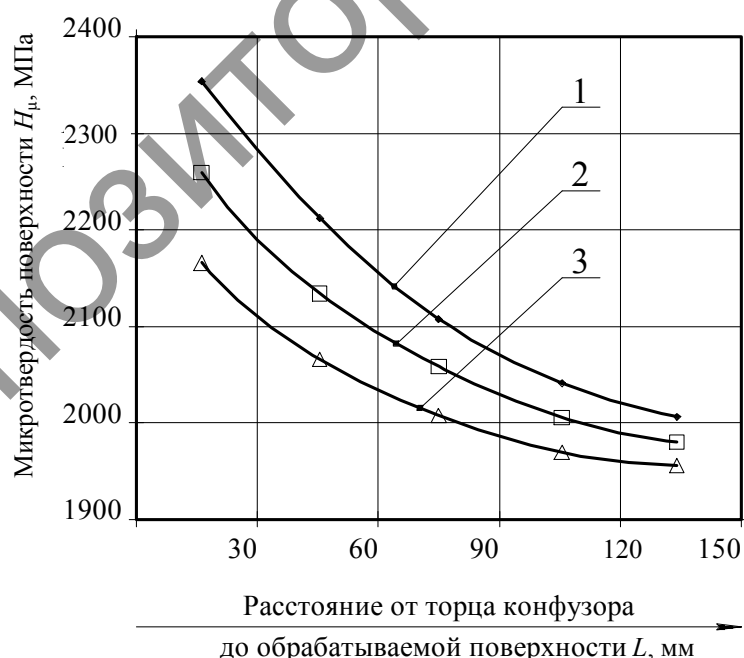
Наряду с исследованиями влияния гидроабразивной очистки на шероховатость также изучалось влияние струйной обработки на микротвердость H_{μ} (МПа) поверхности. На рисунке 6 представлена зависимость влияния расстояния L от конфузора до обрабатываемой поверхности на микротвердость поверхности H_{μ} при изменении давления на входе в конфузор.

Как следует из рисунка 6, микротвердость обработанной поверхности H_{μ} уменьшается от 2 350 до 1 950 МПа при изменении L от 15 до 135 мм. Уменьшение H_{μ} объясняется тем, что силовое воздействие уменьшается по мере удаления обрабатываемой поверхности от конфузора.

На рисунке 7 представлена зависимость изменения микротвердости от скорости струи рабочей жидкости $V_{стр}$.

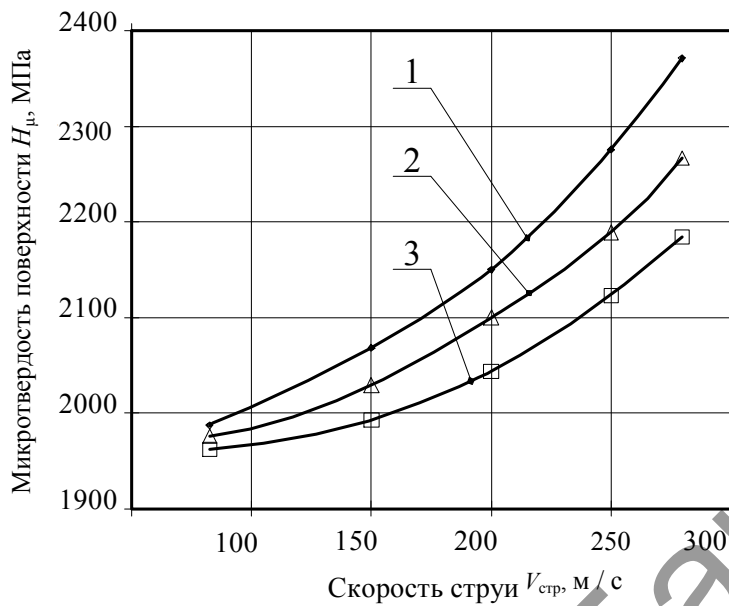
Из анализа данных рисунка 7 видно, что микротвердость обработанной поверхности увеличивается от 1 970 до 2 360 МПа при увеличении скорости струи от 70 до 270 м / с. Микротвердость возрастает в среднем на 25÷30 % по отношению к исходной величине ($H_{\mu 0} = 1\ 800 \div 1\ 900$ МПа). Увеличение H_{μ} объясняется увеличением наклепа обработанной поверхности, что связано с ростом кинетической энергии струи рабочей жидкости при возрастании скорости $V_{стр}$. При этом с увеличением расстояния L до обрабатываемой поверхности от 20 до 150 мм при скорости струи 100 м / с отмечается практически незначительное уменьшение H_{μ} от 2 000 до 1 960 МПа. При скоростях 250÷270 м / с снижение микротвердости с ростом расстояния L отмечается более существенное — от 2 320 до 2 140 МПа, т. е. в среднем на 10÷12 %.

Одним из основных параметров при исследовании пленочного покрытия является его адгезионная прочность, определяемая в момент разрушения индентором (рисунок 8).



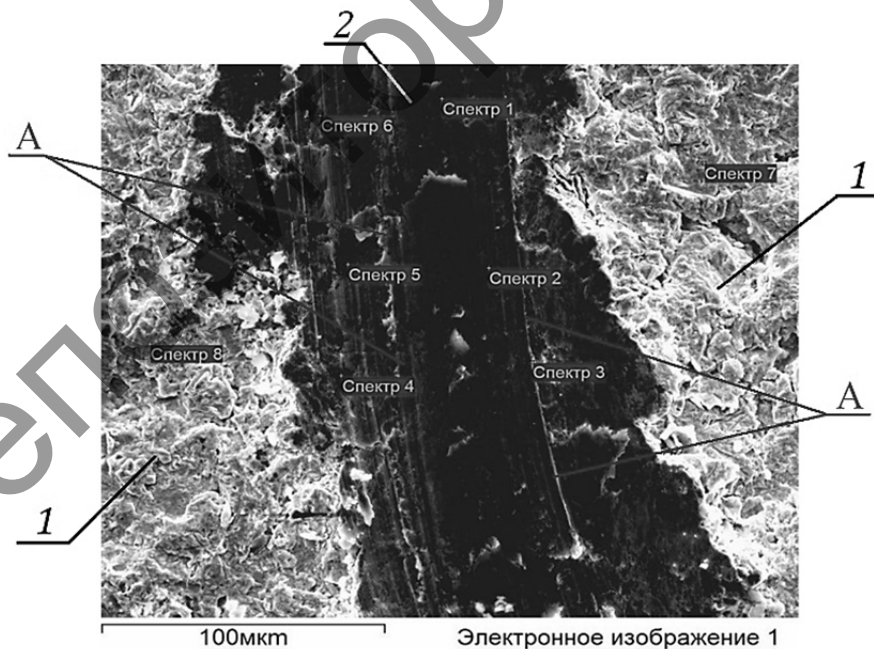
1 — $p_{вх} = 18$ МПа; 2 — $p_{вх} = 23$ МПа; 3 — $p_{вх} = 32$ МПа;
 $K_b = 3$ %; $K_n = 10^{-5}$ %; $K_{к.с} = 2$ %; остальное — вода;
 материал — ВСтЗсп4

Рисунок 6. — Зависимость микротвердости поверхности H_{μ} от расстояния L



1 — $L = 20$ мм; 2 — $L = 70$ мм; 3 — $L = 150$ мм; $K_6 = 3\%$;
 $K_n = 10^{-5}\%$; $K_{к.с} = 2\%$; остальное — вода; материал — ВСтЗсп4

Рисунок 7. — Зависимость микротвердости поверхности H_{μ} от скорости струи $V_{стр}$



1 — участки поверхности гребного винта с неразрушенным пленочным покрытием; 2 — вид участка поверхности гребного винта после разрушения индентором пленочного покрытия

Рисунок 8. — Внешний вид защитного пленочного покрытия, разрушенного на очищенной поверхности гребного винта после проведения испытаний на адгезионную прочность

При ширине царапины 105 мкм и критической нагрузке 0,5 Н адгезионная прочность пленочного покрытия составила 28 МПа. Рисунок 8 подтверждает наличие пленочного покрытия на участках 1 обработанной поверхности гребного винта. Здесь же видны следы А, которые образовались при перемещении индентора в процессе разрушения пленочного покрытия на участке 2 поверхности гребного винта.

Эффективность метода гидроабразивной очистки, а также стойкость обработанной поверхности к образованию очагов повторной коррозии была подтверждена с помощью визуального наблюдения. Изменения, происходившие на поверхности обработанного гребного винта во времени, фиксировались последовательным фотографированием (см. рисунок 2, б). Визуальное наблюдение позволило фиксировать изменение внешнего вида поверхности металла, при этом отмечено, что в течение как минимум трех недель после обработки металлическая поверхность гребного винта сохраняла матовый цвет, очаги возникновения повторной коррозии отсутствовали.

Заключение. Проанализированы преимущества и недостатки основных технологий очистки металлических поверхностей от коррозии, применяемых как за рубежом, так и в Республике Беларусь. Проведенный анализ позволил разработать новый отечественный способ борьбы с коррозией.

Приведены результаты очистки поверхности гребного винта от коррозии по новой технологии — ГАО. Установлено наличие защитного пленочного покрытия, в состав которого входят компоненты рабочей жидкости, которой производилась обработка. Защитное покрытие обладает высокой адгезионной прочностью и оптимальным показателем шероховатости поверхности.

Список цитируемых источников

1. Технология судостроения / В. Л. Александров [и др.] ; под общ. ред. А. Д. Гармашева. — СПб. : Профессия, 2003. — 341 с.
2. Неверов, А. С. Коррозия и защита материалов : учеб. пособие / А. С. Неверов, Д. А. Родченко, М. И. Цырлин. — Минск : Высш. шк., 2007. — 221 с.
3. Филипчик, А. В. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты стальных изделий от коррозии с использованием в составе рабочей жидкости бентонитовой глины : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / А. В. Филипчик ; Белорус. нац. техн. ун-т. — Минск, 2013. — 146 л.
4. Влияние поверхностной пластической деформации, вызванной дробеструйной обработкой, на коррозионное поведение низколегированной стали / Kovaci H. [etc.] // The effect of surface plastic deformation produced by shot peening on corrosion behavior of a low-alloy steel. Surface and Coat. Technol. — 2019. — С. 78—86.
5. Itasse Stephane. Международная выставка по промышленной очистке Parts2clean. Dafur lohnt sich die Parts2clean // Maschinenmarkt. — 2019. — V. 125. — С. 10—13.
6. Димов, Ю. В. Производительность и качество обработки плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками / Ю. В. Димов, Д. Б. Подашев // Металлообработка. — 2019. — № 5. — С. 3—10.
7. Очистка поверхностей деталей. Eine trockene Angelegenheit // Ind.-Anz. — 2019. — № 28. — С. 52—55.
8. Станок для гидроабразивной обработки // Waterjet series bundled with multi-touch software. Mod. Mach. Shop. — 2019. — V. 92, № 4. — С. 155.
9. Способ создания кавитирующей струи жидкости : пат. 13312 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/04, В 63В 59/00 / И. В. Качанов, В. Н. Яглов, В. К. Недбальский, А. В. Филипчик ; дата публ.: 30.06.2010.
10. Способ создания кавитирующей струи жидкости : пат. 14239 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/04, В 63В 59/00 / И. В. Качанов, В. К. Недбальский, И. М. Шаталов, А. В. Филипчик ; дата публ.: 30.04.2011.
11. Способ очистки металлических поверхностей : пат. 21512 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/02, В 08В 3/04 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, А. С. Исаенко ; дата публ.: 30.12.2017.
12. Состав рабочей жидкости для гидродинамической очистки металлических поверхностей от коррозии перед лазерной резкой : пат. 21455 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/02, В 08В 3/04 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. Н. Яглов, А. В. Филипчик ; дата публ.: 30.10.2017.