

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 1 (15), май, 2024

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 А. Ю. Сидоренко
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 26.04.2024. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 8,90. Уч.-изд. л. 6,00.
Тираж 40 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь». Специальное разрешение (лицензия) на право осуществления полиграфической деятельности № 02330/89 от 3 марта 2014 года.
Адрес: ул. Кальварийская, 17, 220004 г. Минск.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (гл. ред. журн.), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии 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 (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь; 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);

Бельый А. В., академик 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., доктор технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», Могилев, 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); **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.**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Institution of Education "Baranavichy State University".

Editorial address:

21 Voykova Str., 225404 Baranavichy.
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 A. Y. Sidorenko
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 26.04.2024. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 8,90.
Acc.-pub. s. l. 6,00. Circulation of 40 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Republican Unitary Enterprise
"Information and Computing Center of the Ministry of
Finance of the Republic of Belarus". Special permission
(license) for the right to carry out printing activities
No. 02330/89, March 3, 2014.
Address: 17 Kalvariyskaya, 220004 Minsk

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 (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, 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, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus; Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, 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.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in 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.**, DSc in 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 (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor (Institution of Education "Baranavichy State University", Baranavichy, the Republic of Belarus; State scientific institution "Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Mogilev, 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.**, DSc in 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.**, DSc in 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, DSc in 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.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Алифанов А. В., Клубович В. В., Милюкова А. М., Малеронок В. В., Толкачева О. А., Хрущов Е. В.** Исследование комбинированной обработки рессорно-пружинной стали в целях повышения прочности
- Астрейко Л. А., Монжос Ю. С., Змачинская И. А., Лицкевич А. С.** Исследование процесса коррозии титановых сплавов на основе титана в биологических средах
- Константинов В. М., Астрейко Л. А., Мышкевич П. С., Сорокин К. Б.** Повышение качества термодиффузионного цинкования стальных изделий плоской формы
- Семенченко М. В.** Опыт разработки лабораторного оборудования для термодиффузионной обработки стальной проволоки
- Чаевский В. В., Андреев М. А., Жилинский В. В., Рудак О. Г., Милюкова А. М., Толкачева О. А.** Структура и свойства Cr-DND/Hf-Zr-ZrN-покрытий на дереворежущем инструменте
- Шматов А. А., Мэй Шун Чи.** Сравнительный структурно-фазовый анализ многокомпонентных диффузионных карбидных покрытий на инструментальной высокоуглеродистой стали

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

- Ермаков А. И., Зеленко С. А.** Совершенствование аспирационной системы зерноочистительной машины
- Китун А. В., Передня В. И., Бондарев С. Н., Швед И. М.** Определение потребляемой мощности на привод измельчителя-смесителя кормов вертикального типа
- Крупенин П. Ю., Китун А. В.** Математическое описание колебаний расхода жидкости через роторно-импульсный кавитационный аппарат

CONTENTS

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- 4 Alifanov A. V., Klubovich V. V., Miliukova A. M., Maleronok V. V., Tolkachova O. A., Khrushchov E. B.** Research of spring steel combined processing to increase strength
- 12 Astreiko L. A., Monzhos Y. S., Zmachinskaya I. A., Litskevich A. S.** Investigation of the titanium-based medical alloys corrosion process in biological media
- 18 Konstantinov V. M., Astreiko L. A., Myshkevich P. S., Sorokin K. B.** Quality increasing of flat shape steel products thermal diffusion galvanizing
- 24 Semenchenko M. V.** Experience in the development of laboratory equipment for steel wire thermal diffusion treatment
- 29 Chayevski V. V., Andreev M. A., Zhylinski V. V., Rudak O. G., A. M. Miliukova, Tolkachova O. A.** Structure and properties of Cr-DND/Hf-Zr-ZrN-coatings on woodcutting tools
- 37 Shmatov A., Mei Shunqi.** Comparative structural-phase analysis of multi-component diffusion carbide coatings on tool high carbon steel

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

- 45 Ermakov A. I., Zelenko S. A.** Improving the grain cleaning machine aspiration system
- 52 Kitun A. V., Perednya V. I., Bondarev S. N., Shved I. M.** Required power determination for the drive vertical feed shredder-mixer
- 64 Krupenin P. Y., Kitun A. V.,** Mathematical description in the fluid flow fluctuations through a rotary-pulse cavitation apparatus

УДК 004.94; 621.373

А. В. Алифанов¹, доктор технических наук, профессор,

В. В. Клубович², академик, доктор технических наук, профессор,

А. М. Милукова³, кандидат технических наук, доцент,

В. В. Малеронок⁴, кандидат технических наук, **О. А. Толкачева⁵**, **Е. В. Хрущов⁶**

^{1,3,5} Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 367 60 10

¹ Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь

^{2,6} Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь

⁴ Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», ул. Уборевича, 77, 220096 Минск, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ РЕССОРНО-ПРУЖИННОЙ СТАЛИ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ

Проведены исследования физико-механических свойств пружинных сталей до и после комбинированной термической, ультразвуковой и магнитно-импульсной обработок при различных режимах. Показано, что комбинированный метод обработки при определенных параметрах режимов позволяет улучшить механические свойства поверхности (температура, твердость, шероховатость, остаточные макронапряжения второго рода) и микроструктуру рессорно-пружинных марок стали.

Ключевые слова: комбинированная термическая, ультразвуковая и магнитно-импульсная обработки; стальные образцы; температура; режим; амплитуда; энергия импульса; количество импульсов; микроструктура; фазовые превращения; мартенсит; мелкозернистая структура; упрочнение.

Рис. 5. Библиогр.: 4 назв.

A. V. Alifanov¹, DSc in Technical Sciences, Professor,

V. V. Klubovich², Academician, DSc in Technical Sciences, Professor,

A. M. Miliukova³, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

V. V. Maleronok⁴, PhD in Technical Sciences, **O. A. Tolkachova⁵**, **E. B. Khrushchov⁶**

^{1,3,5} Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Academician Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 367 60 10

¹ Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus

^{2,6} Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus

⁴ Institution of Education “Belarusian State Aviation Academy”, 77 Ubovich Str., 220096 Minsk, the Republic of Belarus

RESEARCH OF SPRING STEEL COMBINED PROCESSING TO INCREASE STRENGTH

Studies on the spring steels physical and mechanical properties before and after combined thermal, ultrasonic and magnetic pulse treatments under various modes have been carried out. It has been shown that the combined processing method under certain operating conditions makes it possible to improve the surface mechanical properties (temperature, hardness, roughness, the second kind residual macro stresses) and the microstructure of spring steel grades.

Key words: combined thermal, ultrasonic and magnetic pulse treatments; steel samples; temperature; mode; amplitude; pulse energy; number of pulses; microstructure; phase transformations; martensite; fine-grained structure; hardening.

Fig. 5. Ref.: 4 titles.

Введение. Учеными ФТИ НАН Беларуси, учреждения образования «Барановичский государственный университет» и Белорусского национального технического университета разработан комбинированный метод упрочнения поверхности стальных деталей, включающий кроме традиционной термической ультразвуковую обработку (далее — УЗ) и инновационную технологию воздействия сильным импульсным электромагнитным полем. При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние макронапряжения второго рода, измельчается и становится более однородной структура металла [1; 2]. Известно, что под воздействием магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) на поверхности стального изделия образуется упрочненный слой толщиной 50...200 мкм [3]. Ультразвуковое воздействие приводит к наклепу и структурно-фазовым превращениям, повышению твердости поверхности детали [4]. Преимуществом МИО по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры изделия не меняются, шероховатость поверхности упрочненных изделий может уменьшиться, не требуются дополнительные финишные операции, а сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.

Материалы и методы исследования. Для изготовления рессор и плоских пружин используют углеродистые и легированные стали, упрочняемые деформационным наклепом и мартенситным превращением. Применяемая для этого кремнистая сталь перлитного класса (60С2А), упрочняемая мартенситным превращением, имеет невысокий предел упругости, недостаточные релаксационную стойкость и длительную прочность, склонна к обезуглероживанию, росту зерна и обладает низкой прокаливаемостью. Такой комплекс свойств обусловлен химическим составом стали, в том числе наличием значительного количества кремния.

Хромомарганцевые стали (50ХГ) обладают лучшими технологическими свойствами. Совокупность хрома и марганца повышает прочностные характеристики стали при незначительном изменении пластических свойств. Добавка ванадия в хромомарганцевую сталь (50ХГФА) уменьшает ее чувствительность к перегреву, повышает устойчивость стали к отпуску за счет снижения коагуляции карбидной фазы. В результате сталь при высокой твердости обладает значительными пределами прочности, пропорциональности и упругости — при повышенной пластичности.

В ФТИ НАН Беларуси разработаны, изготовлены и применяются магнитно-импульсные установки (МИУ-2, МИУ-3, МИП-18 и др.) с различными технологическими возможностями, предназначенные для обработки металлических изделий импульсным электромагнитным полем различной напряженности и длительности. Для определения химического состава используемых образцов проводили их анализ на приборе «Спектролап М-5».

Температуру поверхности образцов до и после МИО измеряли за 1 с пирометром марки Testo 835-T1 в диапазоне от -20 до 600 °С с погрешностью измерения $1\% + 1$ °С, а также мультиметром ALEX 9808+ с термопарой ТХА с погрешностью измерения $\pm 1,5\%$ при температуре от -20 до $1\ 000$ °С. Шероховатость поверхности образцов Ra измеряли при помощи профилографа цехового с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем, модель 296. Внутренние остаточные макронапряжения второго рода и структурно-фазовый состав определяли методом рентгеновского структурного анализа с помощью дифрактометра GNR Explorer (Италия) при $\text{CuK}\alpha$ -излучении, шаге съемки $0,20^\circ$, времени интеграции 3 с. Металлографические исследования изменений микроструктуры образцов проводили на оптическом металлографическом комплексе МГК-1.

Результаты исследования и их обсуждение. Помимо варьирования химическим составом стали улучшение её свойств достигают применением различных способов термической обработки (ТО). Стандартная ТО пружинных сталей заключается в закалке на воду или масло и последующем отпуске. Температуру закалки и среду охлаждения выбирают в зависимости от марки используемой стали. После закалки микроструктура стали представляет собой мелкокристаллический мартенсит и (или) нижний бейнит твердостью 58...62 HRC. После отпуска твердость должна составлять не более 46 HRC, микроструктура — бейнит и карбиды.

Изотермическая закалка на нижний бейнит может обеспечить повышение сопротивления динамическому воздействию, повысить пластичность и вязкость материала. Так, после изотермической закалки стали 60С2А с выдержкой при 320 °С предел пропорциональности составляет 142 кг / мм² (1 390 МН / м²). Если после изотермической закалки проводить дополнительный отпуск, то значения предела пропорциональности и упругости повышаются.

Для достижения заданных свойств изделий из пружинных сталей в некоторых случаях следует проводить низко- или высокотемпературную термомеханическую обработку. При высокотемпературной термомеханической обработке фиксируется значительное упрочнение материала с сохранением и даже повышением пластических характеристик.

Данные анализа химического состава образцов из стали 50ХГФА представлены в таблице 1, из которой видно, что по составу они отвечают нормам ГОСТ 14959. Несколько заниженное содержание углерода и кремния обусловлено наличием окалина на образцах, представленных для исследования.

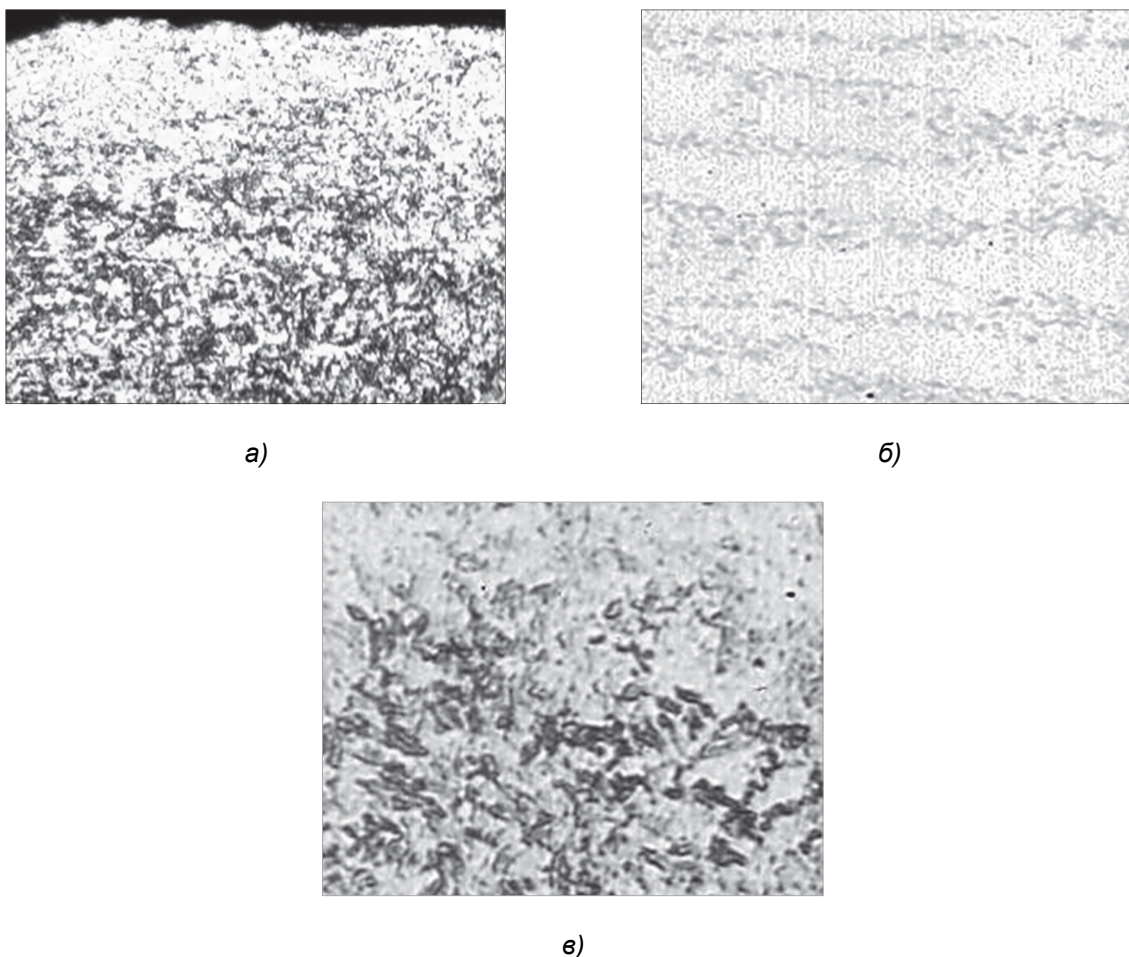
Т а б л и ц а 1. — Химический состав стали, %

Марка стали	Элементный состав								
	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	Cu	P	S
50ХГФА	0,35	0,164	0,864	0,896	0,207	0,082	0,03	0,014	0,028

Микроструктура образцов рессорных полос из стали 50ХГФА представлена на рисунке 1. У поверхности полосы имеет место обезуглероженный слой с ферритной структурой (см. рисунок 1, а). Величина зоны обезуглероживания составляет до 80 мкм. Размер зерен феррита — 8 мкм. Микротвердость феррита — 2 040 МПа. За зоной обезуглероживания следует зона со структурой бейнита и небольшим количеством ферритных зерен. Толщина зоны составляет 940...1 200 мкм. По мере удаления от поверхности ферритная фаза исчезает, а размер зерен бейнитной составляющей увеличивается до 19 мкм. Значение микротвердости поверхностного феррита — 2 400 МПа, бейнита — 3 400 МПа. Микроструктура центральной части полосы — скрытокристаллический мартенсит с размером бывшего аустенитного зерна: вблизи поверхности — 8 мкм, в центре — 19 мкм (см. рисунок 1, б). Микротвердость мартенсита — 6 620 МПа. В центральной зоне на фоне скрытоигольчатого мартенсита выявляются участки крупно- и мелкоигольчатого бейнита (см. рисунок 1, в) в виде сильно травящихся игл, которые в плоскости шлифа располагаются полосами параллельно верхней и нижней поверхностям — так называемые полосы ликвации. Наличие полос ликвации обусловлено технологическими условиями изготовления рессорных полос, в том числе прокаткой.

При прокатке полос через рифленые валки на поверхности опытных образцов образуются параллельные линии вдавливания. Чем выше величина усилия P нанесения рельефа, тем меньше расстояние между этими линиями. При усилии $P = 2\ 887,5$ кг расстояние между линиями рельефа составляет 1 775 мкм, при $P = 12\ 705$ кг — 1 750 мкм, а при $P = 22\ 330$ кг — 1 725 мкм. В поперечном сечении образцов линии вдавливания имеют вид ямок (рисунок 2, а). Глубина ямки достигает 90 мкм. В соответствии с усилием воздействия изменяется микроструктура ближайших слоев. Так, при деформации усилием $P = 2\ 887,5$ кг толщина бейнитной зоны составляет около 900 мкм, при $P = 12\ 705$ кг — 930...1 500 мкм, при $P = 22\ 330$ кг — 1 750...2 300 мкм. Эти данные свидетельствуют о проявлении процесса смещения приповерхностных структурных зон в глубинные слои.

Микроструктура образцов с нанесенным на их поверхность рельефом представлена следующими структурными составляющими. Обезуглероживание поверхности составляет менее 50 мкм и не постоянно вдоль поверхности полосы. Размер ферритных зерен в обезуглероженном слое — 8 мкм. Микротвердость феррита — 2 580...2 850 МПа. Переходная зона представлена микроструктурой бейнита (см. рисунок 2, б). Толщина бейнитной зоны как по длине, так и по ширине рессорной полосы неравномерная. Данный факт объясняется условиями изготовления полос, в том числе закалкой в заневоленном состоянии. Размер зерен бейнитной фазы колеблется от 8 до 19 мкм. Микротвердость составляет 3 400...4 800 МПа.



**Рисунок 1. — Микроструктура рессорной полосы стали 50ХГФА:
а — увеличение $\times 310$; б — $\times 310$; в — $\times 1500$**

Поскольку величина переходной зоны со структурой бейнита различная для всех исследуемых опытных образцов, количество мартенсита в структуре центральной части (см. рисунок 2, в, г) также различное. Структура — мартенсит скрытоигольчатый микротвердостью 6 000...7 700 МПа. Для всех структур имеет место наличие полос ликвации, в которых бейнитная составляющая крупноигольчатая.

Из данных микроструктурного анализа следует: основной структурной составляющей рессорных полос из стали 50ХГФА является мартенсит. Структура по толщине рессорной полосы слоистая: полосы скрытоигольчатого мартенсита чередуются с полосами крупноигольчатого (верхнего) бейнита. После отпуска закаленной стали структура дисперсного нижнего бейнита образуется только вдоль верхней поверхности рессорной полосы и занимает максимум $\frac{1}{4}$ часть от общей площади поперечного сечения, остальная часть сечения имеет структуру мартенсита.

Сравнивая эксплуатационные свойства сталей 60С2А и 50ХГФА, было решено для изготовления экспериментальных образцов выбрать сталь марки 50ХГФА. Подготовленные из стали 50ХГФА образцы исследовали в исходном состоянии, затем подвергали комбинированной упрочняющей обработке МИО и УЗ в различных комбинациях: УЗ и МИО по отдельности (образец I), сначала МИО, затем УЗ (образец II), сначала УЗ, затем МИО (образец III).

Исследованы свойства поверхности (твердость, шероховатость, остаточные макро-напряжения) и микроструктура закаленных по стандартной технологии образцов из рессорной стали 50ХГФА со следующими параметрами:

1) УЗ: частота — 21,8 кГц, амплитуда — 24 мкм, усилие прижима — 80...160 Н, подача продольная и поперечная, ручная со скоростью 0,5...0,7 м / мин, время обработки — 30...50 с (в БНТУ);

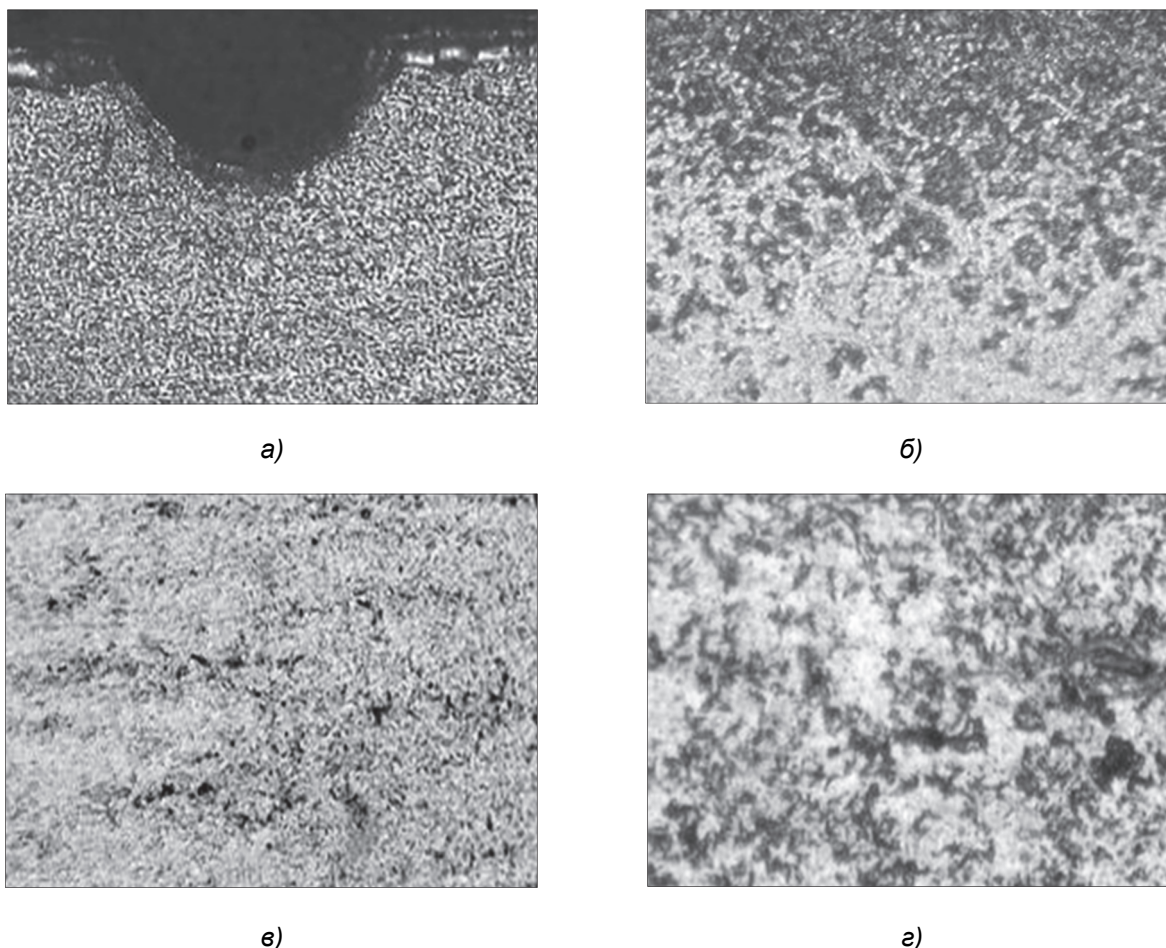


Рисунок 2. — Микроструктура рессорной полосы стали 50XГФА с нанесенным рельефом: а — увеличение $\times 310$; б — $\times 310$, в — $\times 310$; г — $\times 1500$

2) МИО производили на установке МИУ-3 по технологическим режимам: энергия — 8 кДж, 2 и 4 импульса (в ФТИ НАН Беларуси).

После каждой обработки измеряли твердость HRC, шероховатость Ra (при условиях измерения: шаг 1 = 2,5 мм, трасса = 6 мм, предел измерения 10) и остаточные суммарные макронапряжения 2-го рода поверхности.

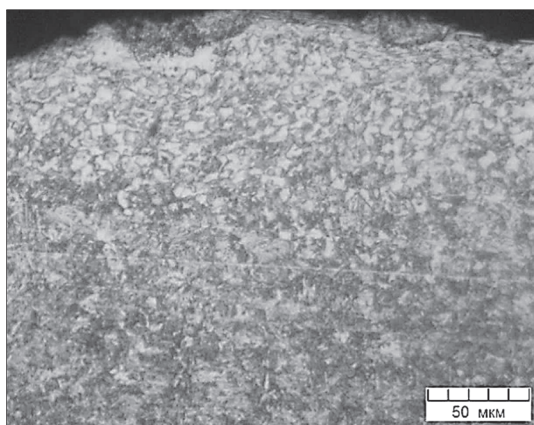
Среднее значение твердости закаленных образцов стали 50XГФА после МИО не изменилось, после УЗ + МИО увеличилось с 41...43 до 42...49 HRC, средняя шероховатость поверхности Ra после МИО снизилась незначительно (в пределах погрешности измерений 3 %), после УЗ — сильно снизилась с 7,3 до 1,42 мкм.

После ТО стальных образцов макронапряжения 2-го рода носят сжимающий характер, но после воздействия УЗ их не наблюдается. Однако после МИО величина сжимающих остаточных макронапряжений несколько возросла, что повышает прочность изделия.

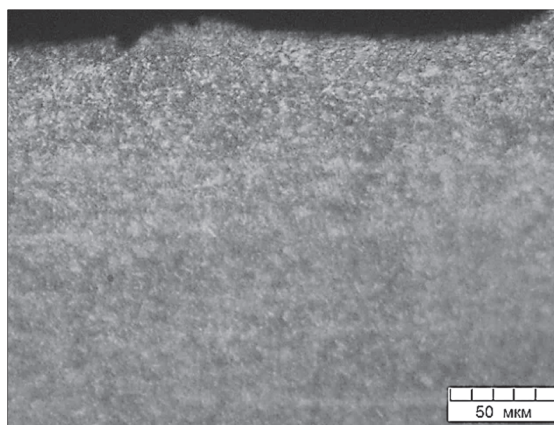
Анализ микроструктуры образцов стали 50XГФА до и после комбинированной обработки при выбранных режимах показал, что основной структурной составляющей является мартенсит, а поверхностный обезуглероженный слой приобрел мелкозернистую структуру на глубину до 100 мкм.

На рисунках 3—5 представлены микроструктуры образцов I, II, III до и после упрочнения комбинацией УЗ и МИО в различной последовательности.

Структура образцов (мартенсит скрытоигольчатый) осталась неизменной в глубине исследованных образцов стали 50XГФА. На поверхности структура приобрела гомогенизированное состояние на глубину до 100 мкм, причем после применения УЗ сильно выражен наклеп.

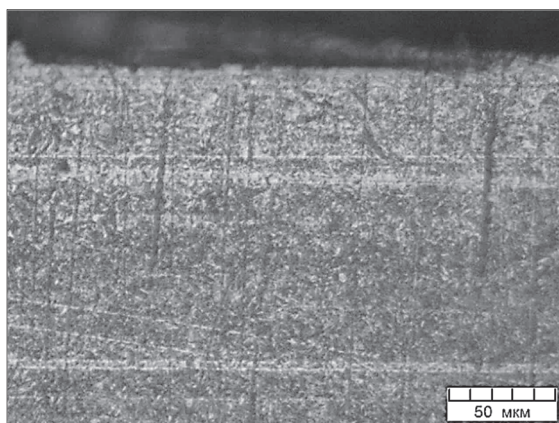


а)

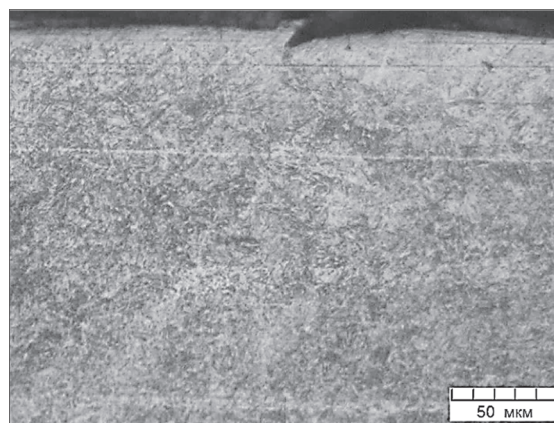


б)

**Рисунок 3. — Микроструктура образца I стали 50ХГФА:
а — исходная; б — после МИО на МИУ-3 при режиме 8 кДж, 2 импульса**

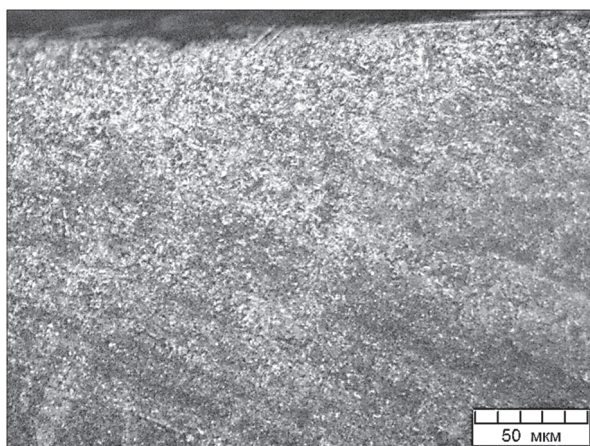


а)

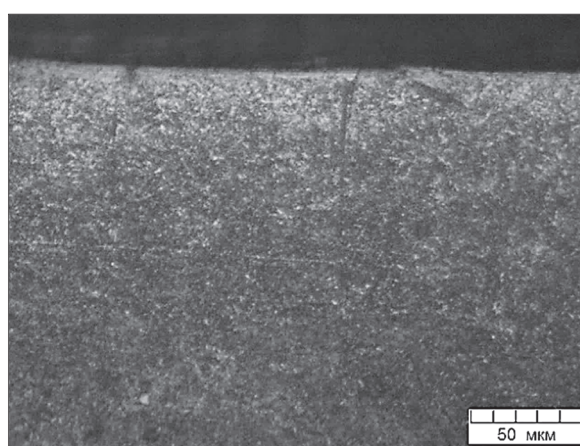


б)

**Рисунок 4. — Микроструктура образца II стали 50ХГФА:
а — исходная; б — после МИО на МИУ-3 при режиме 8 кДж, 2 импульса и затем УЗ**



а)



б)

**Рисунок 5. — Микроструктура образца III стали 50ХГФА:
а — исходная; б — после УЗ и затем МИО на МИУ-3 при режиме 8 кДж, 2 импульса**

Проведено упрочнение стальной пружины диаметром 20 мм с измерением коэффициента упругости до упрочнения и после. Расчеты показали, что, приравняв силу упругости (по закону Гука) (1) и силу тяжести (2), находим коэффициент упругости (3):

$$F_{\text{упр}} = k\Delta l, \quad (1)$$

где k — коэффициент упругости пружины;
 Δl — удлинение пружины;

$$F_m = mg, \quad (2)$$

где m — масса груза;
 g — ускорение свободного падения;

$$k = \frac{mg}{\Delta l}, \quad (3)$$

где $m = 1,144$ кг;
 $g = 9,8$ м / с²;
 $\Delta l = \Delta l_1 = 3,88 \cdot 10^{-3}$, м — модуль удлинения до упрочнения;
 $\Delta l = \Delta l_2 = 3,805 \cdot 10^{-3}$, м — модуль удлинения после упрочнения.

Подставив соответствующие значения в формулу (3), получим два значения коэффициентов упругости — до упрочнения $2,89 \cdot 10^3$ Н / м, после — $2,95 \cdot 10^3$ Н / м. Сравнение этих значений показывает, что произошло увеличение коэффициента упругости пружины, что указывает на появление упрочненного слоя в материале пружины.

Результаты проведенных исследований показывают возможность упрочняющей обработки проволочных пружин, что позволит повысить их эксплуатационные характеристики.

Учитывая, что упрочняющая обработка стальных пружин с применением ультразвукового воздействия является гораздо более сложной и затратной, чем упрочнение методом МИО, представляет практический интерес дальнейшее изучение возможностей и результативности магнитно-импульсной упрочняющей обработки.

Заключение. В целях разработки нового комбинированного метода упрочнения исследованы стальные образцы, которые после термообработки подвергнуты воздействию ультразвука и сильного импульсного электромагнитного поля с различными режимами в различной последовательности: УЗ, МИО, МИО + УЗ, УЗ + МИО. Анализ микроструктуры образцов стали 50ХГФА до и после комбинированной обработки при выбранных режимах показал, что основной структурной составляющей является мартенсит, поверхностный обезуглероженный слой приобрел мелкозернистую структуру на глубину до 100 мкм. Микроструктура образцов (мартенсит скрытоигольчатый) осталась неизменной в глубине исследованных образцов стали 50ХГФА. На поверхности структура приобрела гомогенизированное состояние на глубину до 100 мкм, причем после применения УЗ сильно выражен наклеп.

Учитывая, что упрочняющая обработка стальных пружин с применением ультразвукового воздействия является гораздо более сложной и затратной, чем упрочнение методом МИО, представляет практический интерес дальнейшее изучение возможностей и результативности магнитно-импульсной упрочняющей обработки. Результаты исследований показывают возможности комбинированного метода упрочнения рессор, пружин из стали 50ХГФА, что позволит повысить их эксплуатационные характеристики.

Список цитированных источников

1. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 3. — С. 77—82.
2. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка материалов / А. В. Алифанов [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов* : сб. науч. тр. : в 2 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2021. — Кн. 1, Новые технологии и материалы / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — С. 127—153.
3. *Алифанов, А. В.* Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 4. — С. 25—35.
4. *Алифанов, А. В.* Технологии изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей машиностроения / А. В. Алифанов, А. М. Милукова, В. А. Томило. — Минск : Беларус. навука, 2014. — 321 с.

Поступила в редакцию 28.03.2024.

УДК 620.193.47

Л. А. Астрейко, Ю. С. Монжос, И. А. Змачинская, А. С. ЛицкевичБелорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013 Минск,
Республика Беларусь, +375 (17) 292 81 85, astreiko@bntu.by

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОРРОЗИИ МЕДИЦИНСКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА В БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Для производства медицинских изделий из биоинертных материалов активно применяют сплавы на основе титана. Оптимальное сочетание механических и химических свойств позволяет создать подобный на природный материал, который будет не опасен для биоорганизма.

В данной работе исследовали лабораторные образцы из сплавов BT1-0 и Ti-6Al-4V, которые подвергали поверхностной модификации методами ионно-плазменного азотирования. Оценили *in vitro* коррозионную стойкость данного сплава в биологической среде в виде цельной крови, стойкость к питтингообразованию.

Уделили внимание воздействию абиотического материала на биологическую среду. Испытания проводили в течение 504 ч при постоянной температуре 37 °С, имитирующей условия организма. Определили склонность к тромбообразованию биосреды в присутствии образцов.

Ключевые слова: сплав; титан; азотирование; биологическая среда; питтинг; коррозия; импланты.

Рис. 4. Библиогр.: 9 назв.

L. A. Astreiko, Y. S. Monzhos, I. A. Zmachinskaya, A. S. LitskevichBelarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus,
+375 (17) 292 81 85, astreiko@bntu.by

INVESTIGATION OF THE TITANIUM-BASED MEDICAL ALLOYS CORROSION PROCESS IN BIOLOGICAL MEDIA

Titanium-based alloys are actively used for the production of medical products made of bioinert materials. The optimal combination of mechanical and chemical properties allows to create the similar to natural material, which will not be dangerous to the bioorganism.

In this work, laboratory samples of alloys BT 1-0 and Ti-6Al-4V were examined, which were subjected to surface modification by methods of ion plasma nitriding. The corrosion resistance of this alloy in biological environment, the resistance to pitting formation were evaluated *in vitro*.

It also has been paid attention to the effects of abiotic material on the biological environment. Tests have been carried out for 504 h at a constant temperature of 37 °C, simulating the conditions of the organism. The tendency to the biomedium thrombosis in the presence of samples has been determined.

Key words: alloy; titanium; nitriding; biological environment; pitting; corrosion; implants.

Fig. 4. Ref.: 9 titles.

Введение. Поверхность абиотического материала и граница раздела между имплантатом и биосредой попадают под воздействие большого количества химических и биологических процессов. Такие условия провоцируют агрессивное воздействие на изделие, ускоряя его разрушение. На поверхности имплантов происходят различные химические реакции: образование оксидов и гидроксидов металлов, что способствует образованию слоя определенного состава, но этот слой не всегда обеспечивает защиту поверхности имплантата от коррозии и разрушения. Создание материала, который будет максимально подобен по характеристикам на заменяемый орган, позволит получить изделие, которое не станет провоцировать реакцию организма на отторжение и разрушение имплантата с последующей интоксикацией.

Существует четыре основных класса материалов, используемых в биологических средах [1; 2]: биodeградируемые, биотолерантные, биоактивные, биоинертные материалы.

Биоинертные материалы, практически не взаимодействуя с окружающими тканями, не вызывают образования выраженного фиброзного слоя и стимуляцию остеогенеза. Такие мате-

риалы являются преимущественно диэлектриками, что препятствует проявлению электрохимических и гальванических явлений вокруг имплантата. Титан и его сплавы — биоинертные материалы. Они хорошо принимаются организмом за счет своей прочности, долговечности, пластичности.

Однако ни один материал не является полностью инертным по отношению к организму. Например, растравливание межзеренных границ увеличивает износ поверхностей трения эндопротеза [3; 4]. Это является серьезной проблемой применения легированных титановых сплавов при изготовлении имплантатов. Поэтому использование при протезировании технически чистого титана при условии повышения его механических характеристик до уровня характеристик известных легированных титановых сплавов является перспективным. Такой материал имеет малый удельный вес и высокую биосовместимость. Из-за химических свойств и биоинертности в процессах репаративного остеогенеза титан значительно превосходит большинство вышеперечисленных металлов и сплавов.

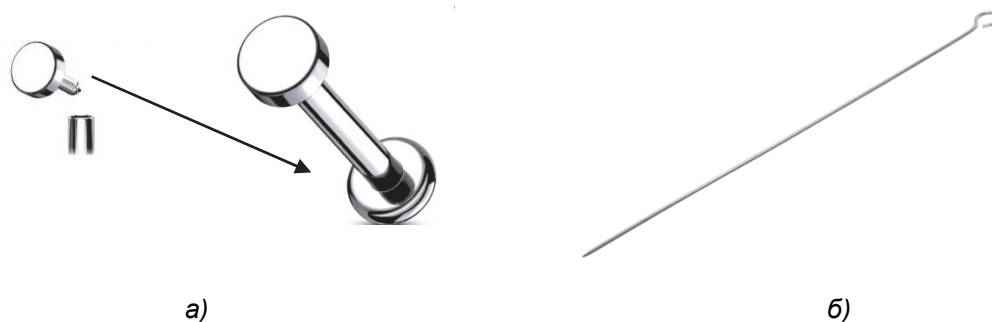
Работая в условиях биоорганизма, медицинские изделия должны обладать высокой износостойкостью и не провоцировать воспалительные процессы, так как низкая износ- и коррозионная стойкость металлических имплантатов способствует выходу ионов металла в организм. Известно, что такие ионы, как Ni^{2+} , Co^{3+} , Al^{3+} , Cr^{3+} , вызывают аллергические и токсические реакции в организме [5].

Повышения износостойкости и эффективности можно добиться, например, используя PVD-покрытие (физическое осаждение паров металлов). Совместное применение предварительных и последовательных процессов химико-термической обработки позволяет сформировать на поверхности слой нового, отличающегося по составу и свойствам композиционного покрытия «термодиффузионный слой — ионно-плазменное покрытие».

Последовательный процесс нанесения покрытий методом ионно-плазменного азотирования и термодиффузия технологичны: насыщение металлической подложки азотом удобно для последующего нанесения покрытий на основе нитридов и формирования границы раздела «подложка—покрытие». Микротвердость и износостойкость упрочняемой поверхности в результате такой обработки могут дополнительно повышаться в 1,2...2,0 и до 2,0 раза соответственно [6; 7].

Износостойкость поверхности является важной характеристикой, так как некроз тканей может быть связан с микроразрушением импланта в процессе эксплуатации. Поэтому исследования, направленные на упрочнение поверхности имплантатов из титановых сплавов с сохранением уровня коррозионных свойств, представляют серьезный интерес.

Материалы и методы исследования. Обработку опытных образцов, представленных на рисунке 1, производили на установке ионно-плазменного азотирования ИПА 0.361 при температуре 550 °С в течение 5 ч в аргоно-водородной среде в целях последующего исследования механических характеристик и коррозионной стойкости в биологически активных средах. Материал образцов для испытаний — титан марки BT1-0 (ГОСТ 19807), Ti-6Al-4V ELI (ASTM).



а — пирсинг из сплава Ti-6Al-4V ELI; б — спица из сплава BT1-0

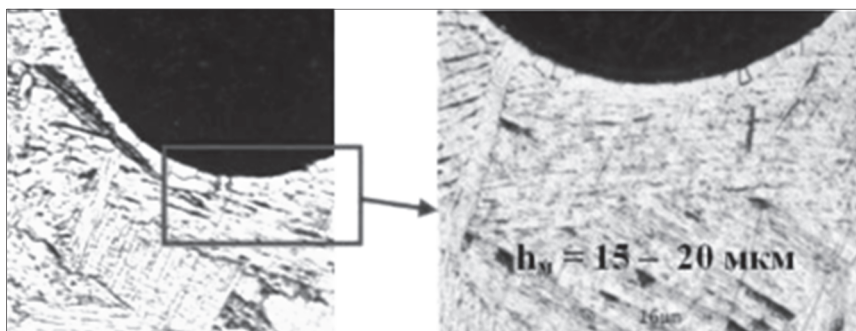
Рисунок 1. — Образцы для испытаний

Испытания на стойкость к питтинговой коррозии проводили путем сравнительной оценки (по ASTM G46-2018). В качестве агрессивной среды использовался три-хлорид железа ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (ГОСТ 9.912 и ГОСТ 9.908). Длительность испытаний — 504 ч.

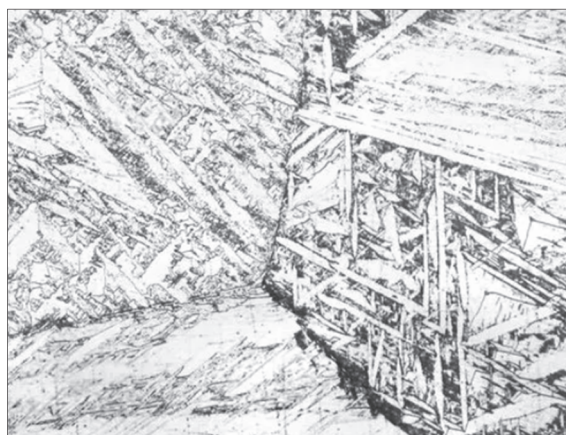
Оценку коррозионной стойкости в биосредах проводили *in vitro* в среде цельной крови. Также проводили оценку влияния абиотических образцов на биологическую среду. Визуальный анализ поведения биосреды и процесс тромбообразования проводили для сред в отдельных флаконах с цельной кровью и экспериментальными образцами. Испытания в среде цельной крови проводили при постоянной температуре 37°C . В течение 504 ч экспериментальные образцы находились в биожидкости в испытательной установке при температуре $36 \dots 38^\circ\text{C}$ (в условиях имитации условий человеческого организма). При определении методики проведения испытаний использовали ГОСТ ISO 10993-4-2020.

Результаты исследования и их обсуждение. После азотирования диффузионный слой (рисунок 2, а) в общем случае может состоять из следующих фаз: твердый раствор $\alpha\text{-Ti}$ с гексагональной плотноупаковочной решеткой (α -фаза), $\beta\text{-Ti}$ с объемно-центрированной кубической решеткой (β -фаза), фаза внедрения TiN с гранецентрированной кубической решеткой (δ -фаза) и промежуточный нитрид Ti_{2-3}N (ϵ -фаза). Под слоем δ -фазы может находиться темный подслои нитрида Ti_{2-3}N (ϵ -фаза) с толщиной $1 \dots 3$ мкм, который образуется в процессе охлаждения из нитрида δ -фазы. При увеличении температуры, как правило, относительная толщина TiN уменьшается, а Ti_{2-3}N увеличивается [8].

Образцы медицинского (Ti-6Al-4V ELI) и технического титана (BT1-0) погружали в герметично закрывающиеся стерильные пробирки с биологическим раствором (цельной кровью) и помещали в лабораторную установку при постоянной температуре 37°C . Согласно ISO 10993-5, объем растворителя составил 4 мл для образцов с площадью поверхности 2 см^2 .



а)



б)

Рисунок 2. — Микроструктура титана BT1-0 после азотирования (а) и перед азотированием (б) [8]

В каждый флакон с цельной кровью помещали по одной детали: пробирки 1, 2 — пирсинг из азотированного титанового сплава Ti-6Al-4V ELI, пробирка 3 — пластина из сплава VT1-0. До и после испытаний проводили промывку образцов деионизированной водой, образцы взвешивали.

После испытаний определили, что пирсинг и пластина изменили цвет и зеркальность поверхности: из серебристого с оттенком белого в золотисто-желтый, пропал естественный цвет титана, блеск (рисунок 3). На поверхности появилась оксидная пленка. За время испытаний вес детали изменился незначительно, не более 0,1 %.

Тромбообразование — активный процесс формирования кровеносными сосудами сгустков крови. Условно материалы медицинского назначения можно разделить на антитромбины и материалы, способствующие свертываемости крови. Данных по рассматриваемой тематике в литературе мало, и они разрознены. В то же время этот процесс может быть как защитным механизмом, так и опасным для жизни. Именно поэтому необходимо уделять особое внимание изучению влияния разрабатываемого материала имплантата на процесс тромбообразования.

В биологической части эксперимента *in vitro* взяли лиофилизированную цельную кровь донора, обогащенную гликированным гемоглобином (для получения жидкости требуется разведение деионизированной водой). По 4 мл биологической жидкости добавляли в пробирки с тестируемыми образцами и помещали на одну неделю при 37 °С в лабораторную установку. Через неделю визуально определяли внешний вид биологической жидкости (гликированного гемоглобина).

По результатам исследований выявили, что внешний вид биологической жидкости не менялся в течение одной недели при условии нахождения при 37 °С и отсутствии контакта с кислородом. Через 336 ч испытаний появились отдельные сгустки, цвет не изменился, что позволяет исключить влияние температуры на изменения цвета. Через 450 ч в пробирке 3 сгустки растворились.

Сделали вывод, что на совместимость предположительно влияют явления, происходящие на поверхности раздела фаз «имплант—раствор»: на антитромбогенные свойства материала будет влиять гидрофильность (высокая смачиваемость) и уровень поверхностной энергии.

Процесс тромбообразования также может быть связан со способностью поверхности адсорбировать протеины крови. Молекулы протеина имеют определенный потенциал и подвергаются воздействию вновь образованного поверхностного потенциала. Чем более положительный потенциал поверхности по отношению к крови, тем более вероятно, что поверхность будет провоцировать тромбообразование.

Таким образом, можно предположить, что чем выше электроотрицательность металла, тем он менее инертный по отношению к крови и будет иметь более высокие антитромбогенные свойства.

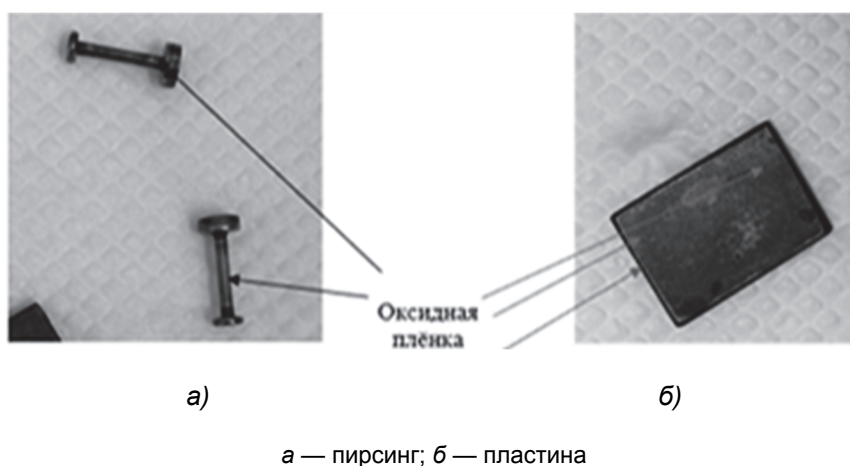


Рисунок 3. — Образцы из титанового сплава, полученные с помощью стереоскопического микроскопа BS-3040, после испытаний в среде цельной крови

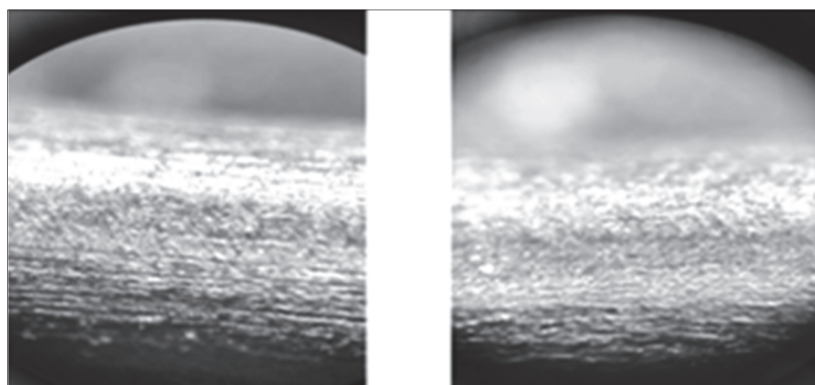
Для имплантатов небольших размеров опасность представляет питтинговая коррозия: функциональная целостность сосудистых стентов может быть разрушена наличием одного незначительного углубления. Потому провели испытания на стойкость к питтинговой коррозии. Методики для проведения испытаний на питтинговую коррозию титановых сплавов нет, поэтому основывались на испытаниях в соответствии с ГОСТ9.912-89 и ASTM-G46-94-2018.

Испытания проводили в растворе хлорида железа ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) с последующим определением потери массы образца из азотированного сплава ВТ 1-0. Испытания проводили для получения сравнительных оценок питтингостойкости. Площадь поверхности образца для проведения корректной оценки должна быть не менее 6 см^2 , а толщина достаточна для исключения образования сквозных питтингов за время испытаний.

Испытания проводили в стеклянных сосудах, термостатированных при температуре раствора (20 ± 1) °С. Объем раствора — не менее 10 см^3 на 1 см^2 площади поверхности образцов. Продолжительность испытаний — 504 ч.

При выдержке в течение трех недель деталь изменила свой цвет из светло-серого в черно-серый с золотистыми пятнами (рисунок 4). Следов сквозных питтингов не выявлено.

Установлено, что на поверхности исследуемых образцов появились единичные питтинги: плотность менее — $2,5 \cdot 10^3$ питтингов / м^2 , площадь поверхности питтинга $< 0,5 \text{ мм}^2$, глубина $< 0,4 \text{ мм}$. Исследуемый материал можно считать стойким к питтингообразованию. По результатам визуального осмотра установлено, что упрочненные методом ионно-плазменного азотирования сплавы ВТ1-0 и Ti-6Al-4V соответствуют уровню А-1 или менее (ASTM-G46-94-2018).



а)

б)

Рисунок 4. — Сравнительные испытания необработанных (а) и предварительно обработанных (б) образцов на питтинговую коррозию

Заключение. После испытаний в среде цельной крови вес азотированных образцов из сплавов ВТ1-0, Ti-6Al-4V изменился незначительно (до 0,1 % максимально).

Внешний вид биологической жидкости не менялся в течение 170 ч нахождения при 37 °С при условиях исключения возможности контакта с воздухом. Оценку влияния абиотического образца на цельную кровь провели по времени тромбообразования: до появления первых сгустков прошло 336 ч. Для азотированного образца из сплава ВТ 1-0 через 450 ч сгустки растворились. Испытания *in vitro* носят качественный характер: по результатам наблюдений предварительно предположили, что образцы имеют антитромбогенные свойства.

По результатам испытаний на стойкость к питтинговой коррозии определили, что поверхностно-упрочненные сплавы ВТ1-0 и Ti-6Al-4V медицинского назначения показали высокую стойкость к питтинговой коррозии. По результатам визуального осмотра установлено, что испытанные образцы соответствуют уровню А-1 или менее по ASTM-G46-94-2018.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать предварительный вывод о потенциальной возможности использования исследуемых материалов в изделиях медицинского назначения, в том числе при использовании в среде цельной крови.

Список цитированных источников

1. Биомедицинское материаловедение : учеб. пособие для вузов / С. П. Вихров [и др.]. — М. : Горячая линия-Телеком, 2006. — 383 с. : ил.
2. Севастьянова, В. И. Биосовместимые материалы / В. И. Севастьянова, М. П. Кирпичникова. — М. : МИА, 2011. — 544 с.
3. Дубок, В. А. Биокерамика — вчера, сегодня, завтра / В. А. Дубок // Порошковая металлургия. — 2000. — № 7/8. — С. 69—87.
4. Hench, L. L. Bioceramics / L. L. Hench // J. Am. Ceram. Soc. — 1998. — Vol. 81, no. 7. — P. 1705—1727.
5. Hydroxyapatite-coated porous titanium for use as an orthopaedic biologic attachment system / S. D. Cook [et al.] // Clin Orthop. — 2013. — Vol. 303. — P. 230—237.
6. Разработка аддитивных технологий упрочнения конструкционных сталей на основе химико-термической обработки и нанесения ионно-плазменных покрытий / В. М. Константинов [и др.] // Актуальные проблемы прочности : монография : [по материалам 60-й Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы прочности», Витебск, 14—18 мая 2018 г.] : в 2 т. / Нац. акад. наук Беларуси, Витеб. гос. технол. ун-т ; под ред. В. В. Рубаника. — Витебск : ВГТУ, 2018. — Т. 2, гл. 18. — С. 378—401.
7. Константинов, В. М. Износостойкие металлоидсодержащие покрытия на сталях, полученные термодиффузионным насыщением и вакуумным осаждением = Wear-Resistant Metalloid-Containing Coatings on Steels Obtained by Thermal Diffusion Saturation and Vacuum Deposition / В. М. Константинов, А. В. Ковальчук // Наука и техника. — 2020. — № 6. — С. 480—491.
8. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин [и др.]. — М. : Металлургия, 1991. — 320 с.
9. Азотирование изделий из титановых сплавов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.procion.ru/azotirovanie-izdelij-iz-titanovyh-splavov/>. — Дата доступа: 21.10.2023.

Поступила в редакцию 08.04.2024.

УДК 621.785.5

В. М. Константинов¹, доктор технических наук, профессор,**Л. А. Астрейко**², кандидат технических наук, доцент,**П. С. Мышкевич**³, **К. Б. Сорокин**⁴^{1, 2, 3}Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65,
220013 Минск, Республика Беларусь⁴Республиканское дочернее унитарное производственное предприятие «Конус» республиканского унитарного предприятия «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», ул. Заводская, 5, 231300 г. Лида, Республика Беларусь

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТЕРМОДИФфуЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ

Исследовано влияние состава насыщающих смесей на получаемую толщину диффузионного слоя для деталей различной конфигурации. Проанализирован процесс термодиффузионного цинкования деталей, имеющих плоскую поверхность. Предложен способ повышения свойств получаемых покрытий при использовании металлического балласта из номенклатуры изделий, обрабатываемых на государственном предприятии «Конус». В данной работе использовали детали S-образной формы. Качество полученных покрытий на изделиях плоской формы при использовании балласта улучшилось, о чем свидетельствует равномерный по толщине и структуре цинковый слой. Ускоренные коррозионные испытания в камере соляного тумана следов поражения на исследуемой поверхности металлических пластин, обработанных в смеси на основе порошка цинка ПЦ-1 с добавкой балласта в реторту, не выявили.

Ключевые слова: термодиффузионное цинкование; апробация технологии; диффузионный слой; микроструктура; коррозионные испытания.

Рис. 6. Табл. 2. Библиогр.: 5 назв.

V. M. Konstantinov¹, DSc in Technical Sciences, Professor,**L. A. Astreiko**², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**P. S. Myshkevich**³, **K. B. Sorokin**⁴^{1, 2, 3}Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus⁴The Republican Subsidiary Unitary Production Enterprise “Konus” of the Republican Unitary Enterprise “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Agricultural Mechanization”,
5 Zavodskaya Str., 231300 Lida, the Republic of Belarus

QUALITY INCREASING OF FLAT SHAPE STEEL PRODUCTS THERMAL DIFFUSION GALVANIZING

The influence of the saturating mixtures composition on the diffusion layer thickness resulting for the parts of various configurations has been studied. The thermal diffusion galvanizing process of parts with a flat surface has been analyzed. A method to improve the properties of the resulting coatings by using metal ballast from the range of products processed at the Konus state enterprise has been proposed. In this work, S-shaped parts have been used. The quality of the resulting coatings on flat-shaped products when using ballast has been improved, as evidenced by a zinc layer that is uniform in thickness and structure. Accelerated corrosion tests in a salt fog chamber did not reveal any traces of damage on the test surface of metal plates processed in a mixture based on PC-1 zinc powder with the addition of ballast to the retort.

Key words: thermal diffusion galvanizing; technology testing; diffusion layer; microstructure; corrosion tests.

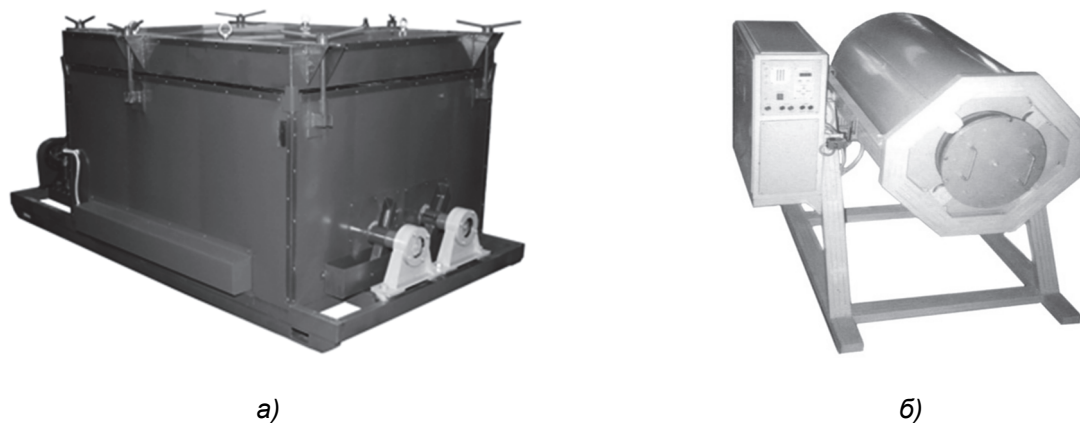
Fig. 6. Table 2. Ref.: 5 titles.

Введение. Термодиффузионное цинкование (далее — ТДЦ) известно более ста лет и является эффективным методом защиты от коррозии изделий из стали и чугуна. Равномерный антикоррозионный слой (от 15 до 100 мкм и более) формируется в результате насыщения цинком поверхности металлических изделий в порошковой среде при температуре 400...500 °С, причём выбор температурного режима зависит от типа стальных изделий и марки стали. Термодиффузионные цинковые слои по сравнению с гальваническими и металлизационными

покрытиями имеют более прочную (диффузионную) связь с защищаемым металлом вследствие диффузии цинка в покрываемый металл, а постепенное изменение концентрации цинка по толщине покрытия обуславливает менее резкое изменение его свойств [1; 2]. Повышенная коррозионная стойкость (до 1 500 ч в камере соляного тумана) такого слоя объясняется его фазовым и химическим составом. В отличие от гальванического и горячего цинкования доминирующими фазами в обсуждаемом слое являются железо-цинковые интерметаллиды.

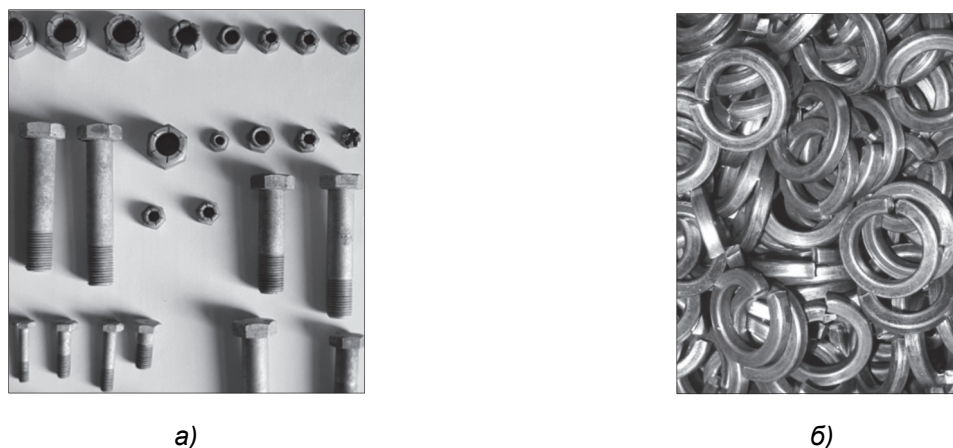
Наиболее распространено в промышленности ТДЦ во вращающемся контейнере в барабанных тупиковых печах. Оборудование для ТДЦ в зависимости от технологических решений имеет множество вариантов конструктивного исполнения. В основном это барабанные электропечи, в которых антикоррозионное покрытие формируется в герметично закрытом барабане. Камеры нагрева в таких печах могут быть шахтного типа с вертикальной загрузкой барабана (рисунок 1, а) либо иметь поворотную раму с электромеханическим приводом вращения барабана (см. рисунок 1, б).

В Республике Беларусь за последние годы создано несколько производств по ТДЦ стальных изделий. Традиционно деталями для ТДЦ являются метизные изделия, детали небольших размеров, приблизительно трехмерной симметрии (рисунок 2, а). Ранее разработана технология ТДЦ упругих мелкогабаритных деталей, совмещенная с операцией среднего отпуска (см. рисунок 2, б) [3; 4]. Трехмерная симметрия обсуждаемых изделий позволяет обеспечить перемешивание деталей с насыщающей цинковой порошковой средой и равномерное формирование цинкового слоя на всех деталях обрабатываемой партии.



а — установка для ТДЦ 530-1,5.00.000 шахтного типа с вертикальной загрузкой сменного барабана; б — барабанная печь для ТДЦ MDS 125 с поворотной рамой камеры нагрева

Рисунок 1. — Варианты конструктивного исполнения оборудования для ТДЦ



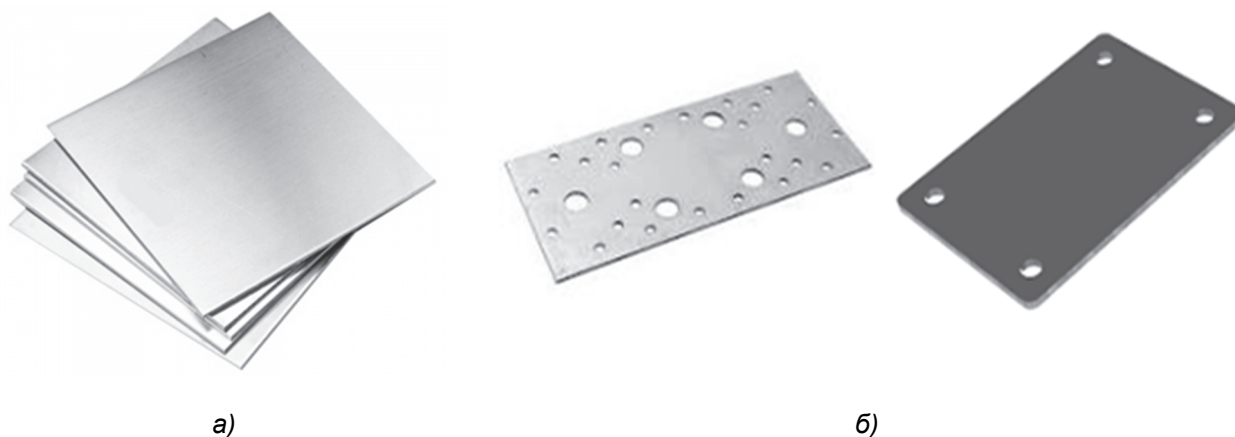
а — крепежные изделия; б — гроверные шайбы

Рисунок 2. — Стальные детали, традиционно подвергаемые ТДЦ

Расширение номенклатуры стальных изделий для ТДЦ сопряжено с определенными сложностями. Плоские, длинномерные изделия склонны к «залипанию» во вращающемся контейнере. Увеличение массы изделий также может негативно сказаться на их внешнем виде. На качество получаемых покрытий существенно влияет конфигурация поверхности обрабатываемого изделия. Стоит отметить неблагоприятное свойство деталей, имеющих плоскую форму (рисунок 3), «склеиваться» при обработке на относительно малых оборотах вращения реторты. Для обсуждаемой ситуации характерно резко неравномерное цинкование вплоть до отдельных неоцинкованных участков плоских изделий.

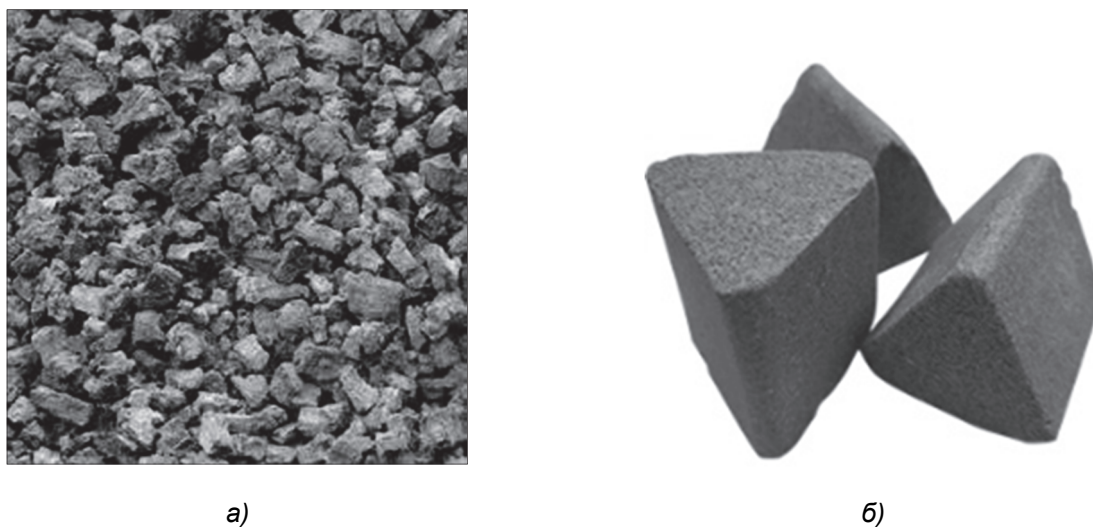
Возможным решением данной проблемы может быть добавка разного рода балласта в реторту (металлическая проволока, керамические галтовочные тела, крупная фракция гартцинка и т. д.), который представлен на рисунке 4.

Из вышесказанного следует, что важным направлением повышения качества и снижения стоимости термодиффузионных цинковых покрытий является интенсификация диффузионных взаимодействий между насыщающим металлом (цинком) и стальной поверхностью насыщаемой детали. Этого можно достигнуть, обоснованно применяя балластные добавки и регулируя количество активного цинка в смеси.



а — стандартные металлические пластины; б — металлические крепежные пластины

Рисунок 3. — Стальные детали, имеющие плоскую форму



а — гартцинк фракцией 0,63...1,00 см; б — керамические галтовочные тела

Рисунок 4. — Балласт для ТДЦ

Материалы и методы исследования. В целях освоения технологии ТДЦ в промышленных условиях проводили исследования по получению необходимой толщины слоя в зависимости от содержания активного цинка в насыщающей смеси и добавки балласта. В качестве деталей для насыщения были выбраны плоские металлические пластины, изготовленные из стали обыкновенного качества марки Ст2. Балластом, в свою очередь, служили детали S-образной формы. Исходными компонентами для диффузионного цинкования являлись порошок цинка марки ПЦ-1 фракцией ≤ 80 мкм и порошок цинка марки ПЦР-1 (ГОСТ 12601-76) зернистостью ≤ 30 мкм. Условно дисперсность используемых смесей можно принять 60...80 мкм, так как основной объем составляет «отработанная» смесь. Составы насыщающих сред и условия получения покрытий приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1. — Составы насыщающих сред и условия получения покрытий

Массовая доля компонентов в насыщающих средах	Режимы ТДЦ	
	T, °C	t, ч
20 % ПЦ-1 + 80 % «отработанной»* смеси	410	2
25 % ПЦР-1 + 75 % «отработанной»* смеси	410	2

Примечание — «отработанная»* смесь —использованная в процессе насыщения смесь, состоящая из смеси порошка цинка марок ПЦ-1 и ПЦР-1.

Насыщение проводили в условиях государственного предприятия «Конус» в печах барабанного типа. Охлаждение проводили с использованием охладителя, вращающегося с определенной скоростью. Анализ микроструктуры полученных термодиффузионных слоев был проведен на высокотемпературном микроскопе Leica DM 2500 P.

Коррозионную стойкость изделий оценивали методом ускоренных коррозионных испытаний в соответствии со стандартом ASTM B 117 в камере соляного тумана Ascott S 120 ip в 5 %-ном растворе соли (NaCl). Продолжительность теста — 168 ч без изменения условий и перерывов. После испытаний была проведена фотофиксация поверхности деталей на предмет выявления очагов коррозионного поражения

Результаты исследования и их обсуждение. Технологические режимы цинкования традиционно подбираются в зависимости от условий эксплуатации покрытий, так как температура, продолжительность процесса и состав смеси влияют при формировании слоя на количественное соотношение фаз и общую толщину [5]. Были изучены два варианта загрузки реторты. Полученные толщины диффузионных слоев представлены в таблице 2.

Значительное увеличение толщины слоя на пластинах, обработанных в смеси на основе порошка цинка ПЦ-1 (фракцией ≤ 80 мкм), можно обусловить добавкой в реторту деталей S-образной формы, что, в свою очередь, служит так называемым балластом и не дает пластинам уплотняться при вращении реторты, в отличие от пластин, обработанных без добавки балласта. Металлический балласт при его многократном использовании также служит дополнительным источником цинка при насыщении.

Т а б л и ц а 2. — Варианты заполнения реторты и полученные толщины диффузионных слоев при режиме цинкования 410 °C, 2 ч

Обрабатываемая номенклатура (плоские металлические пластины), %	Балласт (детали S-образной формы), %	Массовая доля активного цинка в насыщающих средах, %	Получаемая толщина слоя, мкм
70	30	20	Около 60
100	—	25	Менее 15

Визуальные показатели качества слоев соответствуют ГОСТ Р 9.316-2006, цинковые покрытия на деталях имеют одинаковый светло-серый цвет. По результатам сравнительного анализа темплета пластины под микроскопом установлено, что детали имеют равномерный по толщине и структуре цинковый слой с равномерной зоной α -фазы (цинковый феррит) без крупных зерен. Далее тонкая (около 4 мкм) Γ -фаза, хорошо обнаруживаемая под микроскопом до и после травления шлифа, граничащая с твердым раствором цинка в железе (α -фазой) и δ -фазой (рисунок 5).

Были проведены сравнительные коррозионные испытания в камере соляного тумана. После 96 ч коррозионных испытаний отметили наличие участков коррозионного поражения стальной основы на образцах, обработанных в смеси на основе порошка цинка ПЦР-1 без добавления балласта (рисунок 6, а). В период испытаний с 96 до 168 ч отметили увеличение количества очагов коррозионного поражения защитного покрытия.

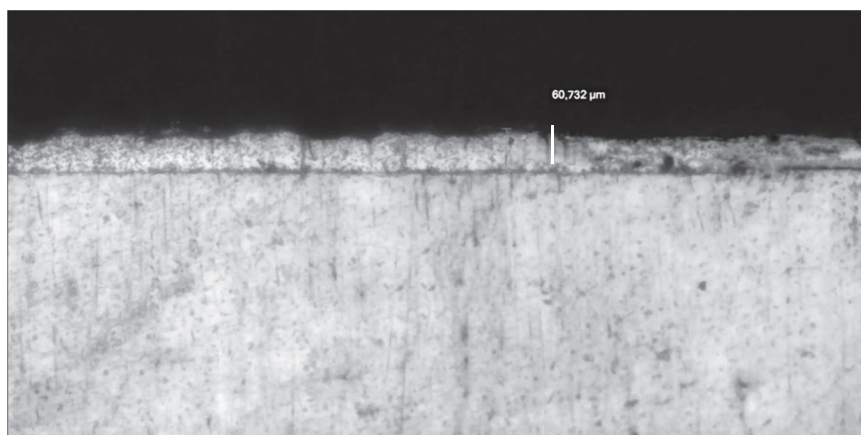
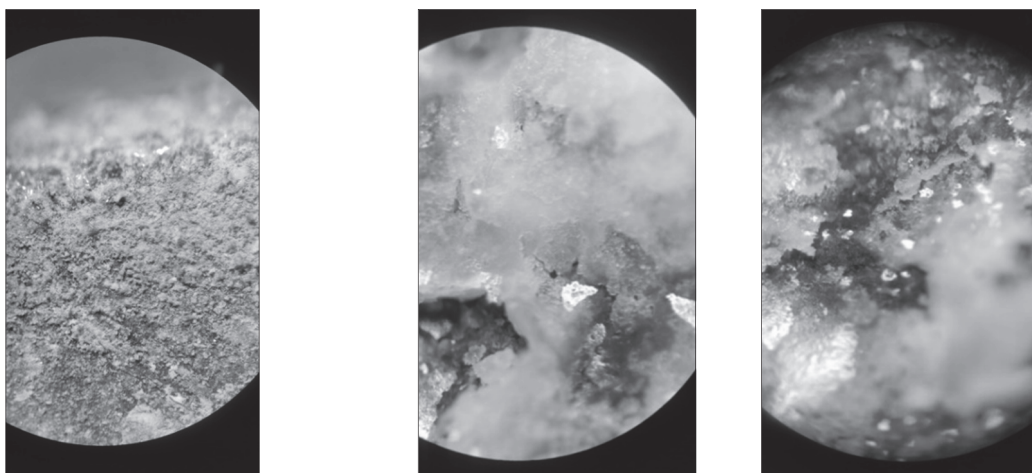


Рисунок 5. — Микроструктура слоя металлической пластины после ТДЦ в смеси на основе порошка цинка ПЦР-1 с добавлением балласта, $\times 100$



а)

б)

а — участок коррозионного поражения на поверхности пластины, обработанной в смеси на основе порошка цинка ПЦР-1 без добавления балласта; б — пленка основных солей цинка на поверхности пластины, обработанной в смеси на основе порошка цинка ПЦР-1 с добавлением балласта

Рисунок 6. — Внешний вид стальных оцинкованных образцов после 168 ч ускоренных коррозионных испытаний в камере соляного тумана

Установлено, что после 168 ч испытаний фрагментов разрушения защитных цинковых покрытий и диффузионных слоев на пластинах, обработанных в смеси на основе порошка ПЦ-1 с добавлением балласта, не обнаружено. Исследуемые детали характеризуются формированием плотной защитной пленки (см. рисунок 6, б). Площадь поражения поверхности составила менее 3 %.

Заключение. Предложены и опробованы в промышленных условиях пути повышения качества термодиффузионных цинковых слоев на стальных плоских деталях, состоящие в рациональном применении цинксодержащего балласта (до 30 %) и увеличении доли активного цинка в насыщающей среде (до 25 %).

Это позволило уменьшить (до 10 %) или полностью исключить наличие необработанных стальных поверхностей при серийном производстве, получить более толстые и равномерные слои с мелкозернистым цинковым ферритом, а также обеспечить требуемую коррозионную стойкость. Существенное значение для обеспечения отсутствия глубоких царапин, сколов термодиффузионного цинкового слоя имеет форма балластной добавки.

Список цитированных источников

1. *Проскуркин, Е. В.* Диффузионные цинковые покрытия: свойства, области применения : справочник / Е. В. Проскуркин, В. А. Геловани, А. Н. Сонк ; под ред. Е. В. Проскуркина, Д. А. Сухомлина. — М. : Наука, 2017. — 311 с.
2. *Константинов, В. М.* Антикоррозионные цинковые покрытия на стальных изделиях: перспективы термодиффузионных покрытий / В. М. Константинов, Н. И. Иваницкий, Л. А. Астрейко // *Литье и металлургия*. — 2013. — № 4 (73). — С. 107—110.
3. *Константинов, В. М.* Влияние термодиффузионного цинкования на эксплуатационные свойства термически обработанных стальных изделий / В. М. Константинов, И. А. Булойчик // *Литье и металлургия*. — 2020. — № 4. — С. 131—138.
4. *Булойчик, И. А.* Анализ изменения структурообразования интерметаллидных слоев на основе цинка при цинковании термоупрочненных стальных изделий диффузионным способом из газовой фазы / И. А. Булойчик // *Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки»*. — 2021. — Вып. 10. — С. 12—16.
5. Термодинамическое моделирование процесса формирования термодиффузионных цинковых покрытий при использовании новых насыщающих сред / Б. Б. Хина [и др.] // *Современные технологии, качество и инновации : Междунар. науч. конф., Киченев, 29 мая — 1 июня 2003 г.* — Кишинев, 2003. — С. 98.

Поступила в редакцию 08.04.2024.

УДК 621.785.545

М. В. Семенченко

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»,
ул. Блохина, 29, 211440 Новополоцк, Республика Беларусь, 8 (0214) 59 95 39, m.semenchenko@psu.by

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕРМОДИФФУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

Способ диффузионного насыщения стальной проволоки путем непосредственного пропускания электрического тока через изделие в режиме термоциклирования позволяет изготовить материал для последующего формирования защитного покрытия. Для реализации способа ранее была предложена лабораторная установка. В процессе последующей эксплуатации были установлены недостатки, повлекшие необходимость ее модернизации.

При совершенствовании лабораторного оборудования определялся порядок подачи проволоки в зону обработки, исполнение элементов, обеспечивающих подачу напряжения на обрабатываемую проволоку, исполнение формирователя управляющих импульсов, способ реализации режима термоциклирования. Модернизированное оборудование позволяет вести обработку при непрерывной и ступенчатой подаче проволоки с диаметром менее 1 мм. Возможна термическая обработка. Замена пары «тиристор—компаратор» твердотельным реле позволила отказаться от аналогового сигнала в пользу цифрового. Управляющее напряжение выбирается из диапазона 3...32 В при максимальной силе тока 100 А, длительности импульса и паузы 0,01...999 с.

Ключевые слова: установка; проволока; химико-термическая обработка; диффузионное насыщение; термоциклирование; пропускание электрического тока; порошковая среда; электроконтактный нагрев.

Рис. 3. Библиогр.: 9 назв.

M. V. Semenchenko

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, 29 Blokhin Str.,
211440 Novopolotsk, the Republic of Belarus, 8 (0214) 59 95 39, m.semenchenko@psu.by

EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF LABORATORY EQUIPMENT FOR STEEL WIRE THERMAL DIFFUSION TREATMENT

The method of diffusion saturation of steel wire by directly passing an electric current through the product in the thermal cycling mode makes it possible to produce a material for the subsequent formation of a protective coating. A laboratory installation to implement the method has previously been proposed. In the course of subsequent operation, shortcomings that necessitated its modernization have been identified.

When improving laboratory equipment, the order of wire feeding into the processing zone, the design of elements providing voltage supply to the processed wire, the design of the control pulse generator, and the method for implementing the thermal cycling mode have been determined. The upgraded equipment allows processing with continuous and stepwise feeding of wire with a diameter of less than 1 mm. Heat treatment is possible. Replacing the “thyristor—comparator” pair with a solid-state relay has made it possible to abandon the analog signal in favor of a digital one. Controlling voltage is selected from the range of 3...32 V at a maximum current of 100 A, pulse duration and pause of 0.01...999 seconds.

Key words: installation; wire; chemical and thermal treatment; diffusion saturation; thermal cycling; electric current transmission; powder medium; electric contact heating.

Fig. 3. Ref.: 9 titles.

Введение. Химико-термическая обработка (далее — ХТО) находит широкое применение в промышленности. Одним из перспективных направлений развития является ХТО микрообъектов — металлических порошков и проволок [1]. Для получения диффузионно-легированных металлических порошков с использованием ХТО разработаны эффективные приемы интенсификации, установлены особенности структурообразования [2; 3].

Стальная проволока, как объект для ХТО, имеет потенциальные возможности при применении электроконтактного нагрева как источника тепла. Ранее выполненные исследования свидетельствуют о существенном ускорении процесса ХТО [4]. Сферы применения такой

проволоки разнообразны. Она может быть применена как присадка для легирования расплава [5]. Перспективным является ее применение для формирования защитных покрытий, может использоваться как самостоятельное изделие, эксплуатируемое в агрессивной среде.

Способ диффузионного насыщения стальной проволоки путем непосредственного пропускания электрического тока через изделие в режиме термоциклирования позволяет изготовить материал для последующего формирования защитного покрытия [6]. Его особенностью является низкий градиент легирующего элемента по поперечному сечению при достаточной концентрации. Для реализации способа ранее была предложена лабораторная установка. В процессе последующей эксплуатации были установлены недостатки, повлекшие необходимость модернизации оборудования для улучшения технических характеристик.

Материалы и методы исследования. При разработке установки для диффузионного насыщения и термической обработки проволоки путем непосредственного пропускания тока через изделия в режиме термоциклирования внимание уделялось:

- порядку подачи проволоки в зону обработки;
- исполнению элементов, обеспечивающих подачу напряжения на обрабатываемую проволоку;
- исполнению формирователя управляющих импульсов;
- способу реализации режима термоциклирования (рисунок 1).

Первый прототип лабораторной установки был предназначен для обработки неподвижной проволоки ограниченной длины и допускал ступенчатую подачу материала в зону обработки [7]. В качестве токоподводящих элементов использовались пластины из сплава на медной основе. Исполнитель управляющих импульсов обеспечивал механическое управление режимами обработки. Режим термоциклирования реализовывала пара «компаратор—тиристор».

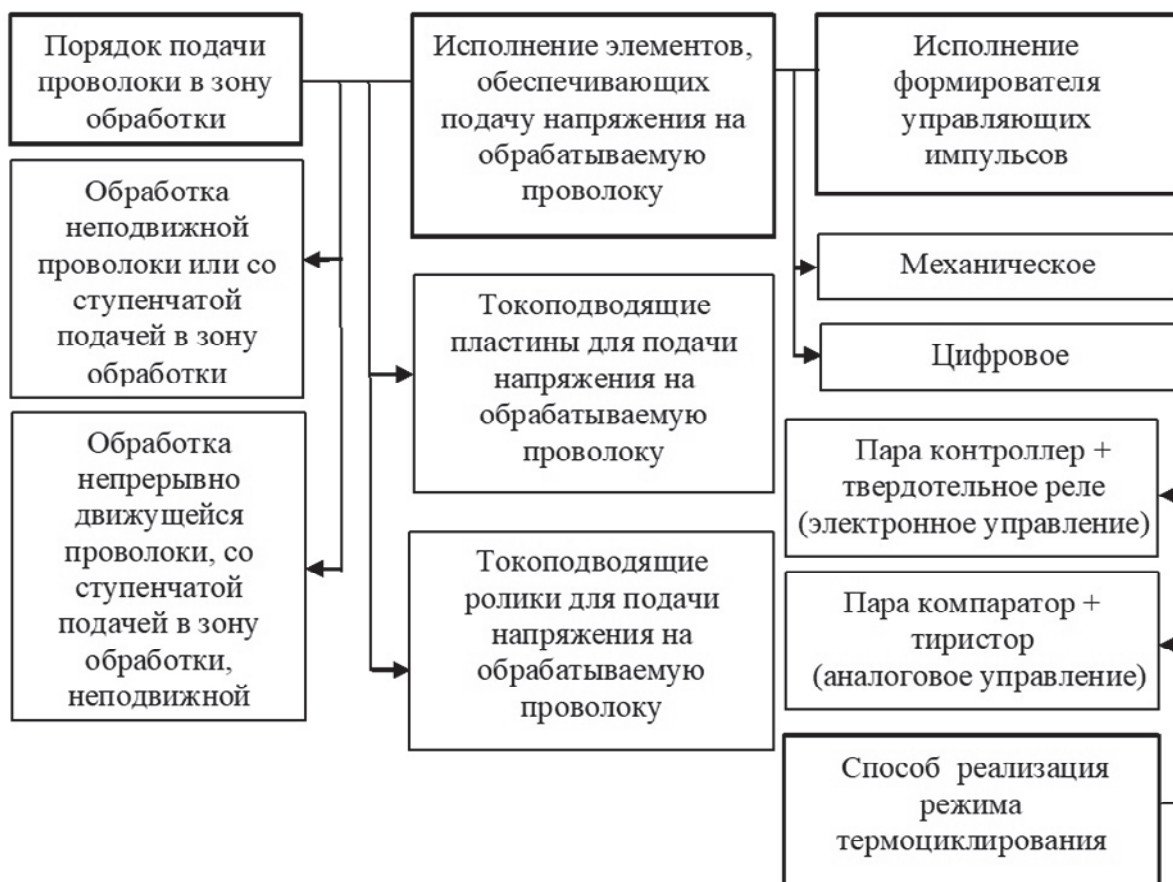


Рисунок 1. — Генезис установки для электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования

Внесенные в последующем конструктивные изменения позволили добавить обработку непрерывно движущейся проволоки [8; 9], что дает возможность получить материал любой протяженности. Установка (рисунок 2) состоит из трансформатора 1, контейнера с насыщающей смесью 2, токопроводящих роликов 3, блока управляющих импульсов 4, включающего компаратор, регулятора 5 (тиристора). Стала возможной обработка непрерывно движущейся с заданной скоростью проволоки, а также подача проволоки в зону обработки с заданным шагом, кратным длине нагрева (расстоянию между токопроводящими роликами 3) или через заданный отрезок времени (время обработки). Также можно производить диффузионное насыщение или термическую обработку неподвижной проволоки ограниченной длины.

Работает установка следующим образом: проволока, подвергаемая диффузионному насыщению, проходит контейнер 2 с насыщающей смесью со скоростью до 0,1 м / мин. При выполнении термической обработки контейнер может отсутствовать. К токопроводящим роликам 3 подается электрический ток от трансформатора 1. Блок управляющих импульсов 4 через регулятор 5 позволяет задать требуемые параметры режима термоциклирования. Электрический ток пропускают через проволоку циклически с длительностью импульса (нагрева) 1...10 с и длительностью паузы (охлаждения) 1...3 с. Сила тока меняется от 15 до 30 А. Напряжение при установившемся режиме работы составляет 16,8 В. Мгновенное значение температуры контролируется оптическим пирометром.

В первом варианте установки формирователь управляющих импульсов, имея цифровое исполнение, не позволял корректно отрегулировать режим оказываемого термического воздействия. Продолжительность нагрева в пределах 1...10 с и охлаждения 1...3 с затрудняла обработку проволоки диаметром менее 1 мм. Для исключения ее плавления и последующего разрушения под действием высокой температуры приходилось увеличивать длину обрабатываемого участка или скорость подачи проволоки в зону обработки. В первом случае это увеличивало продолжительность обработки каждого микрообъема материала, во втором — уменьшалось время оказываемого термического воздействия, что не всегда приводило к желаемым изменениям химического состава или механических свойств.

Нами предложена установка (рисунок 3), позволяющая реализовать диффузионное насыщение проволоки с диаметром менее 1 мм путем непосредственного пропускания тока через изделия в режиме термоциклирования с продолжительностью нагрева или охлаждения менее 1 с. Она состоит из силового трансформатора 1, устройства контроля физических параметров 2, твердотельного реле 3, контроллера 4, источника питания на 12 В 5, токоподводящих роликов 6, контейнера с насыщающей смесью 7.

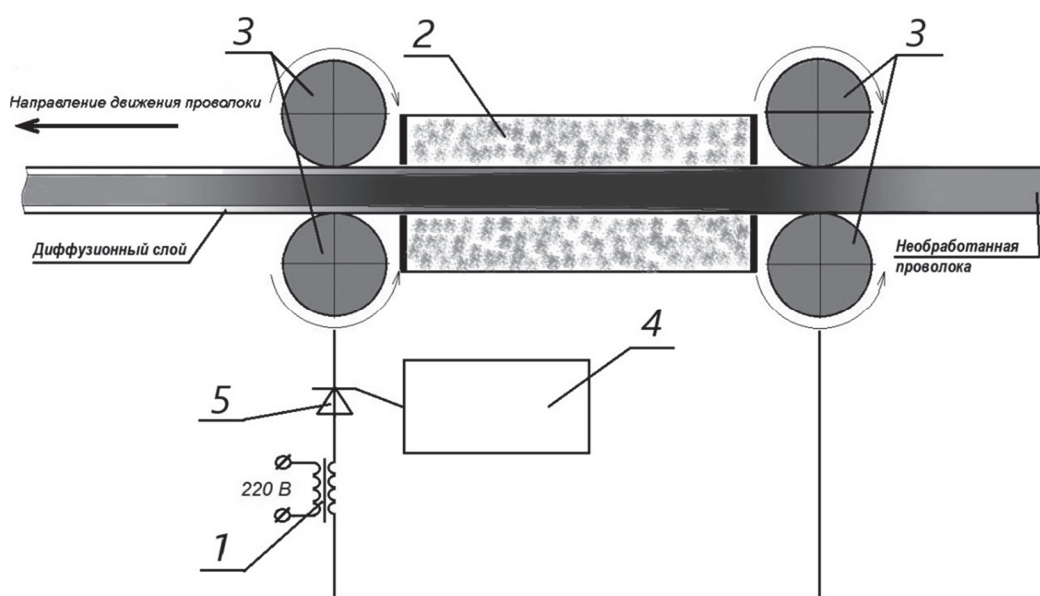


Рисунок 2. — Схема лабораторной установки для диффузионного насыщения проволоки

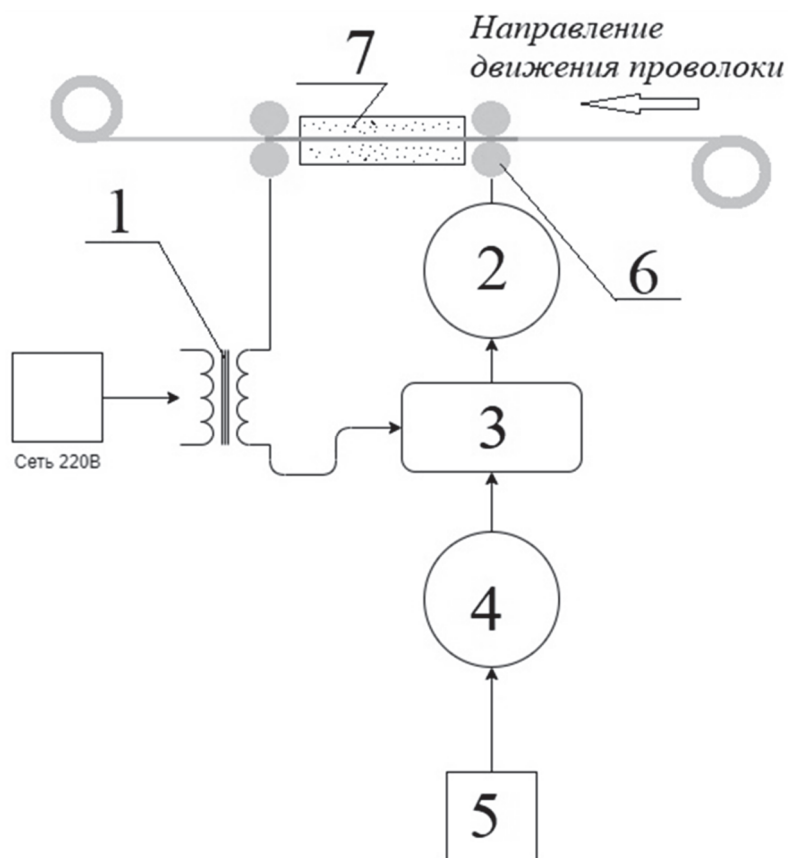


Рисунок 3. — Схема лабораторной установки для диффузионного насыщения проволоки с диаметром менее 1 мм

Работает установка следующим образом: необработанная проволока проходит контейнер 7 с насыщающей смесью с установленной скоростью. Силовой трансформатор 1, работающий от сети 220 В, обеспечивает подачу переменного тока на токоподводящие ролики 6. Контроллер 4 работает от источника питания 5 с напряжением 12 В. Параметры проходящего через проволоку электрического тока контролируются с помощью устройства контроля физических параметров 2. Силовой трансформатор связан с твердотельным реле 3. Контроллер, работающий от источника питания 5, позволяет задать время нагрева и охлаждения образца во время обработки. Электрический ток пропускают через проволоку циклически с длительностью импульса и длительностью паузы от 0,01 до 999 с.

Продолжительность нагрева или охлаждения выбирается в зависимости от диаметра проволоки, ее химического состава, химического состава насыщающей смеси и требуемого уровня термического воздействия. Для выбора режима используется специальное электронное табло. Величина силы тока может быть увеличена до 100 А, что позволяет увеличить диаметр обрабатываемого проволочного материала и длину обрабатываемого участка. Скорость движения в базовом исполнении составляет 10 см / мин, однако при необходимости может быть изменена. Величина напряжения регулируется и составляет 3...32 В.

При поступлении управляющего сигнала от контролера 4 твердотельное реле 3 размыкает цепь. Проволока охлаждается до заданной температуры. После завершения заданного времени охлаждения контроллер 4 отправляет сигнал на твердотельное реле 3, цепь замыкается, проволока начинает нагреваться, цикл обработки повторяется.

Результаты исследования и их обсуждение. Предложенная лабораторная установка для диффузионного насыщения проволоки путем непосредственного пропускания электрического тока в режиме термоциклирования позволяет изготовить экономно-легированную проволоку с заданным химическим составом. Она является хорошей альтернативой дорого-

стоящим сложнолегированным материалам. Длина обработанного материала не ограничивается конструктивными особенностями лабораторных установок. Возможна ступенчатая и непрерывная подача проволоки в зону обработки при ее диффузионном насыщении или термической обработке.

Переход от пары «компаратор—тиристор» (см. рисунки 1, 2) к паре «контроллер — твердотельное реле» (см. рисунок 3) позволил заменить аналоговый сигнал на цифровой. Это повысило точность обработки, быстродействие блока управления, уменьшилось время, затрачиваемое на переход с режима нагрева на режим охлаждения. Величина силы тока, проходящего через проволоку, контролируется устройством контроля физических параметров, что дополнительно повышает точность оказываемого термического влияния.

Готовая экономно-легированная проволока может применяться как присадочный материал при формировании защитного покрытия путем наплавки или напыления. Ее можно также использовать как готовое изделие. Толщина обрабатываемой проволоки выбирается с учетом назначения. Контроль оказываемого термического воздействия сделал возможным обработку проволоки с диаметром менее 1 мм.

Заключение. Модернизированная установка для электротермической обработки проволоки позволяет изготовить экономно-легированную проволоку, предназначенную для использования в качестве присадочного материала при формировании защитных покрытий или самостоятельного изделия.

При разработке конструкции лабораторной установки была проанализирована возможность изменения порядка подачи проволоки в зону обработки, исполнение формирователя управляющих импульсов, токоподводящих элементов, порядок реализации режима термоциклирования, что позволило предложить новую установку с электронным управлением и использованием цифрового сигнала вместо аналогового.

Предложенная лабораторная установка позволяет выбрать управляющее напряжение из диапазона 3...32 В при максимальной силе тока 100 А, длительности импульса и паузы 0,01...999 с. Это делает возможным обработку проволоки с диаметром менее 1 мм с заданными характеристиками.

Список цитированных источников

1. *Ворошнин, Л. Г.* Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Минск : ФТИ ; Новополоцк : ПГУ, 2001. — 148 с.
2. *Константинов, В. М.* Ускоренная диффузия легирующих элементов в железе при химико-термической обработке порошков во вращающемся контейнере / В. М. Константинов // Докл. НАН Беларуси. — 2007. — Т. 51, № 2. — С. 103—107.
3. *Пантелеенко, Ф. И.* Особенности диффузионных процессов при борировании стальных порошков / Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов // Вес. АНБ. Сер. ФТН. — 1997. — № 1. — С. 8—11.
4. *Семенченко, М. В.* Повышение производительности диффузионного насыщения проволоки путем электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования / М. В. Семенченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. — 2018. — № 11. — С. 78—82.
5. *Семенченко, М. В.* Модифицирование чугуна экономно-легированной проволокой, полученной путем электрохимико-термической обработки / М. В. Семенченко, В. М. Константинов, Т. В. Михайловская // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. — 2009. — № 8. — С. 26—31.
6. Способ диффузионного насыщения стальной проволоки : пат. 13370 : МПК (2009) С 23С 8/00, С 23С 10/00, С 23Д 1/34 / В. М. Константинов, М. В. Семенченко, В. Г. Дашкевич, А. С. Губанов ; дата публ.: 30.06.2010.
7. *Семенченко, М. В.* Электрохимико-термическая обработка проволоки для защитных покрытий : дис. магистра техн. наук : 05.02.01 Материаловедение в машиностроении / М. В. Семенченко ; Полоц. гос. ун-т. — Новополоцк, 2002. — 70 с.
8. Установка для электротермической обработки проволоки : пат. № 696 МПК 7 С21D 1/40 / В. М. Константинов, А. С. Губанов, С. Н. Абраменко, М. В. Семенченко ; дата публ.: 30.12.2002.
9. *Семенченко, М. В.* Совершенствование оборудования для диффузионного насыщения проволоочного материала / М. В. Семенченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. — 2022. — № 3. — С. 27—31.

Поступила в редакцию 08.04.2024.

УДК 539.197; 674.055:621.934:630.652

В. В. Чаевский¹, кандидат физико-математических наук, доцент,**М. А. Андреев²**, кандидат физико-математических наук,**В. В. Жилинский³**, кандидат физико-математических наук, доцент,**О. Г. Рудак⁴, А. М. Милюкова⁵**, кандидат технических наук, **О. А. Толкачева⁶**¹Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. Гикало, 9, 220013 Минск, Республика Беларусь, v.chaevskij@bsuir.by, Белорусский национальный технический университет, ул. Якуба Коласа, 22, 220013 Минск, Республика Беларусь, chaevskiv@gmail.com²ОХП «Институт сварки и защитных покрытий» государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа», ул. Платонова, 12Б, 220005 Минск, Республика Беларусь^{3,4}Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, 220006 Минск, Республика Беларусь^{5,6}Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-ПОКРЫТИЙ НА ДЕРЕВОРЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ

В работе рассмотрены характеристики структуры и свойств комбинированных Cr-ДНА (детонационные наноалмазы) / Hf-Zr-ZrN-покрытий, сформированных на рубильных стальных (марки 6ХС) ножах дерево-режущего инструмента методами ионно-лучевого распыления и конденсации вещества из газоплазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой и гальванической обработки. Микроструктура покрытий была исследована методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Кроме того, применялись методы измерения твердости покрытий и опытно-промышленные испытания образцов. Покрытия Cr-ДНА /Hf-Zr-ZrN имеют слоистую структуру. Верхний Cr-ДНА-слой не перемешивается с промежуточным слоем ZrN и нижним слоем ZrHf. Максимальная величина микротвердости Hf-Zr-ZrN-покрытия составила $6,6 \pm 0,3$ ГПа. Проведенные опытно-промышленные испытания режущих инструментов с покрытием Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN показали, что срок их службы при резании заготовок из древесины хвойных и лиственных пород в 1,7...1,9 раза выше, чем у инструмента без покрытия.

Ключевые слова: дерево-режущие рубильные ножи; покрытия; наноалмазы; хром; цирконий.

Рис. 5. Библиогр.: 16 назв.

V. V. Chayevski¹, PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,**M. A. Andreev²**, PhD in Physics and Mathematics Sciences,**V. V. Zhylinski³**, PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,**O. G. Rudak⁴, A. M. Miliukova⁵**, PhD in Technical Sciences, **O. A. Tolkachova⁶**¹Institution of Education “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, 9 Gikalo Str., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, v.chaevskij@bsuir.by, Institution of Education “Belarusian National Technical University”, 22 Yakub Kolas Str., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, chaevskiv@gmail.com^{2,4}“Institute of Welding and Protective Coatings” of the State Scientific Institution “Powder Metallurgy Institute”, 12B Platonova Str., 220005 Minsk, the Republic of Belarus^{3,4}Institution of Education “Belarusian State Technological University”, 13a Sverdlov Str., 220006 Minsk, the Republic of Belarus^{5,6}State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 10 Ak. Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus

STRUCTURE AND PROPERTIES OF Cr-DND/Hf-Zr-ZrN-COATINGS ON WOODCUTTING TOOLS

In this work research of the structure and properties features of combined Cr-DND (detonation nanodiamonds) / Hf-Zr-ZrN-coatings synthesized on steel (grade 6HC) chopping knives of wood-cutting tools by ion-beam sputtering and Arc-PVD vacuum methods as well as galvanic treatment have been conducted. The microstructure of the coatings by SEM, EDX techniques have been studied. Moreover, methods of a microindentation and pilot testing of coatings have

been used. The coatings Cr-DND/Hf-Zr-ZrN have a layered structure. There is an intermediate ZrN layer between Cr-DND top and ZrHf bottom layers which are not mixed with each other. The maximum value of the microhardness of the Hf-Zr-ZrN coating is 6.6 ± 0.3 GPa. Held pilot tests of Cr-DND/Hf-Zr-ZrN coated cutting tools have proved their increasing durability period to be 1.7...1.9 times higher, if compared with bare tools, when cutting blanks from pine and deciduous wood.

Key words: wood-cutting chopping knives; coatings; nanodiamonds; chromium; zirconium.

Fig. 5. Ref.: 16 titles.

Введение. Процесс обработки древесины считается более сложным, чем процесс обработки металлов [1]. Это связано со специфическими свойствами древесины, в том числе с анизотропией, внутренними напряжениями, твердыми минеральными частицами, переменной плотностью в поперечном сечении. Кроме того, при обработке древесины используются высокие скорости (20...40 м / с), на фрезы действуют высокие термические нагрузки в агрессивных средах [2]. В результате дереворежущий инструмент подвергается высоким механическим и термическим нагрузкам, пластической деформации, адгезии, диффузному износу и окислению [3; 4]. В этих условиях инструменты из стальных сплавов быстро изнашиваются. Поэтому для изготовления фрез используются методы модификации поверхности, такие как покрытия, текстурирование поверхности [5] и режущие кромки различной формы [6]. Защитные покрытия, полученные методом конденсации вещества из газоплазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой (КИБ), широко применяются при обработке древесины благодаря их способности защищать подложку от механического износа и коррозии, рассеивать тепло, снижать напряжения [7; 8]. В настоящее время при разработке покрытий для повышения эффективности их применения используют следующие методы: 1) создание многослойных покрытий, каждый слой которых выполняет собственную функцию и обеспечивает плавный переход физико-механических свойств от поверхности покрытия к упрочняемой (восстанавливаемой) поверхности детали; 2) создание многокомпонентных слоев переменного состава по толщине покрытия [9]. Среди методов создания многослойных покрытий наблюдается новая тенденция — развитие интегрированных многооперационных гибридных (комбинированных) технологий [8].

Использование детонационных наноалмазов (далее — ДНА) [10] при электрохимическом осаждении хрома, никеля, цинка приводит к получению покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, такими как микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость. По этой причине перспективным направлением является использование композиционных электрохимических покрытий (далее — КЭП) на основе хрома с ДНА (Cr-ДНА), обеспечивающих высокую прочностную характеристику для укрепления инструмента. Исследования [8] показали, что период стойкости твердосплавного фрезерного инструмента с комбинированными ZrC-Ni-УДА-покрытиями, сформированными электрохимическим методом (Ni-УДА (ультрадисперсные наноалмазы)) и методом КИБ (ZrC), увеличился в 1,5...1,6 раза по сравнению с необработанным инструментом при резании древесностружечных плит.

В Республике Беларусь широко применяется деревообрабатывающий фрезерный инструмент со строгальными и рубительными ножами из твердых сплавов и быстрорежущих сталей, в основном производства Российской Федерации и дальнего зарубежья (например, марок Pilana (Чехия) и Faba (Польша)), что требует дополнительных материальных производственных затрат, поэтому упрочнение его является актуальной задачей. В связи с этим основной целью данной работы было разработать методику послойного осаждения, сформировать на лезвиях стальных рубительных ножей деревообрабатывающего фрезерного инструмента упрочняющих мультислойных комбинированных гальванических ионно-плазменных покрытий на основе нитридов тугоплавких металлов (Zr, Hf) и Cr-ДНА и исследовать их структуру и физико-механические свойства.

Материалы и методы исследования. Для целей эксперимента были использованы рубительные ножи из стали марки 6ХС рубительной машины МРР8-50ГН (ОАО «Борисовский

ДОК», Борисов, Республика Беларусь) и ультрадисперсные алмазы детанационного синтеза торговой марки «УДА-ВК» производства ЗАО «Синта» (Минск, Республика Беларусь).

Hf-Zr-ZrN-покрытия на лезвиях рубильных ножей (рисунок 1, а) формировались в едином технологическом цикле в вакуумной установке Института сварки и защитных покрытий НАН Беларуси ННВ-6,6-И1 (см. рисунок 1, б), оснащенной электродуговыми источниками генерации плазменных потоков и двухлучевым распылительным ионным источником.

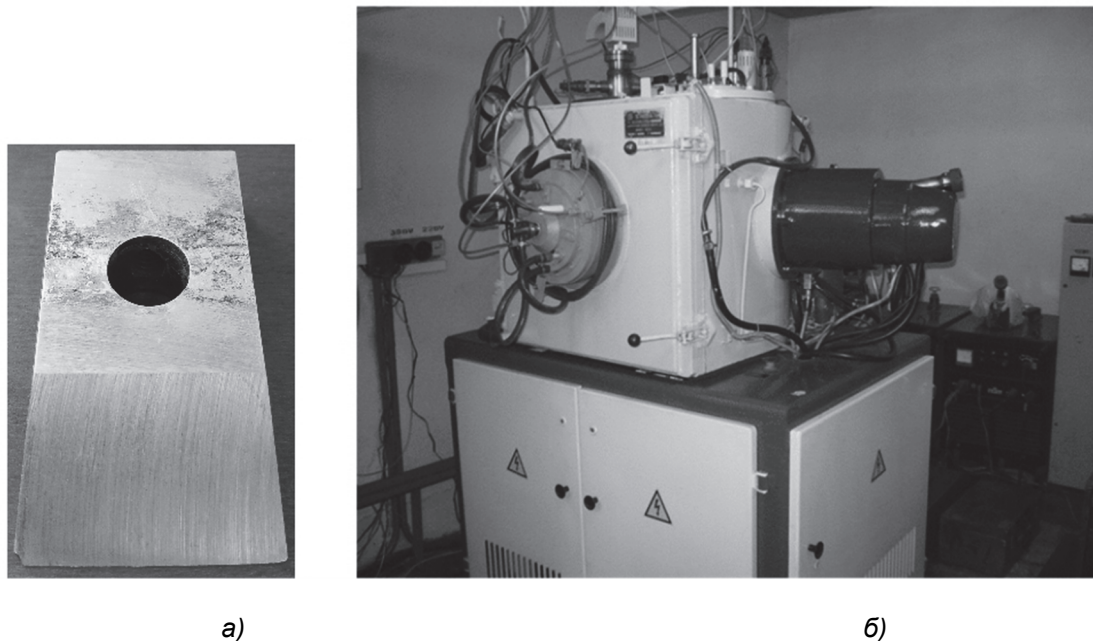


Рисунок 1. — Вид рубильного ножа (а) и оборудования ННВ 6,6-И1 с двухлучевым распылительным ионным источником ИРЛУ-2 и катодным узлом ARC (б)

Слой ZrHf наносился с использованием технологии ионно-лучевого распыления. Один из ионных пучков был направлен в сторону обрабатываемого изделия (ножа фрезы) для предварительной обработки (ионной очистки) в среде инертного газа аргона и активации поверхности изделия перед распылением мишени, обеспечивая высокую адгезию к поверхности изделия. Другой пучок был направлен на распыляемую мишень, в качестве которой был использован сплав циркония с гафнием (сплав ЦГ 20), состоящий из 80 % Zr и 20 % Hf. Слой нитрида циркония (ZrN) формировался методом КИБ в стандартных режимах [11]: предварительно — ионами циркония в вакууме 10^{-3} Па при потенциале, равном -1 кВ, с последующим нанесением покрытия при токах горения дуги катода $100 \dots 120$ А и опорном напряжении -100 В в атмосфере азота при давлении 10^{-1} Па. Температура при осаждении соответствовала $600 \dots 650$ °С.

Затем на поверхность ZrN-покрытия по уже ранее выявленным и апробированным нами методикам [12] наносился слой Cr-ДНА в гальваностатическом режиме электролиза при средней катодной плотности тока 50 А/дм² из классического электролита хромирования с добавлением ДНА $2,5 \dots 5,1$ г/л. Процесс осаждения Cr-ДНА КЭП проводили при температуре $40 \dots 50$ °С. В целях получения высокой адгезионной прочности Cr-ДНА КЭП с ZrN-покрытием предварительно на поверхность ZrN-покрытия осаждались химическим способом слои никеля, так как наличие Ni-слоя в многослойном покрытии улучшает адгезионную прочность покрытия с основой [8]. Также в целях улучшения адгезии Cr-ДНА КЭП с ZrN-покрытием и предотвращением пассивации Ni-слоя, характерной самопассивации КЭП хрома [13] проводилось нанесение электрохимическим способом дополнительного промежуточного слоя меди из серноокислого электролита.

С помощью электронных микроскопов MIRA 3 (TESCAN) и Hitachi S-4800 методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа исследовалась морфология поверхностей, структура и состав сформированных покрытий.

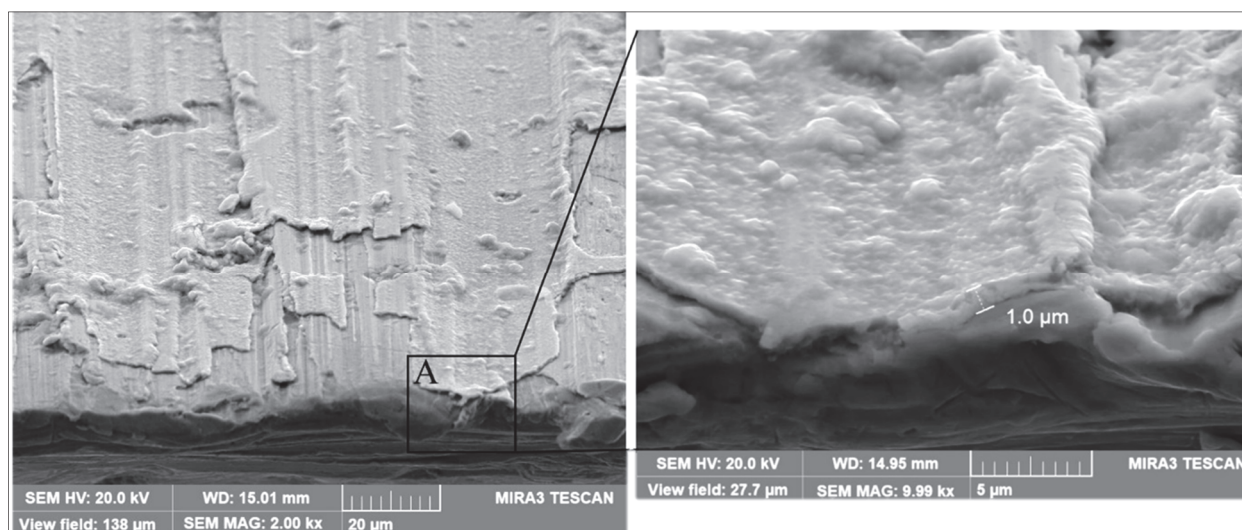
Микротвердость образцов была измерена при нагрузках 50, 100 и 300 г по методу Виккерса с помощью микротвердомеров Wilson Instruments 402MVD (Голландия) и ПМТ-3.

Опытно-промышленные испытания на период стойкости стальных рубительных ножей многоразового использования, модифицированных покрытиями, были проведены на рубительной машине МРР8-50ГН на линии изготовления щепы участка лесосырья на предприятии ОАО «Борисовский ДОК» при изготовлении пилопродукции из хвойных и лиственных пород древесины при следующих режимах: число ножей на фрезерном барабане — 4; скорость подачи — 0,053 м / с; частота вращения фрезерного барабана — 148 мин⁻¹. Обработка велась четырьмя рубительными ножами до затупления режущей кромки лезвия ножа.

Результаты исследования и их обсуждение. Установлено, что покрытие Hf-Zr-ZrN имеет незначительную толщину (~ 1 мкм) на острие лезвия и неравномерно распределено по поверхности (рисунок 2), что объясняется отсутствием операции шлифовки после перезатачивания лезвий ножей на производстве.

На основании изучения морфологии поверхностного слоя Cr-ДНА (рисунок 3, а) можно заключить, что полученные покрытия имеют глобулярные поверхностные образования и содержат поры. Показано [14], что глобулярные образования формируются в виде частиц кластерами наноалмазов, создающих связанные агломераты размером от 204 нм в КЭП до 4,53 мкм в электролитах хромирования. Кластеры наноалмазов в этом случае являются центрами осаждения ионов хрома. Рисунок 3, б, показывает, что верхний слой, содержащий Cr-ДНА и медь, достаточно плотно покрывает ZrN-пленку.

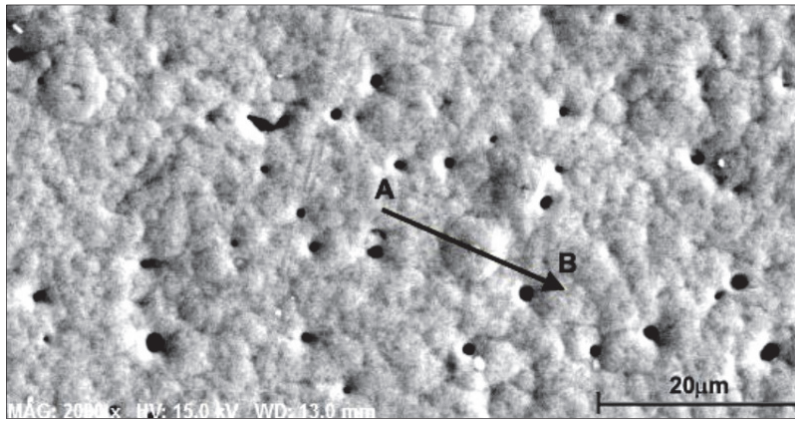
Проведенные ранее исследования [15] доказали, что Cr-ДНА/ZrN-покрытие на лезвии твердосплавного (WC-Co) дереворежущего ножа фрезы имеет слоистую структуру. Было показано наличие слоев различной микроструктуры и толщины для данного покрытия (рисунок 4, а). При этом толщина верхнего слоя составляла 304 нм, промежуточного — 939 нм, нижнего — 2,50 мкм. Верхний слой состоял из Cr-ДНА, промежуточными слоями были медь и никель, нижний слой — ZrN (см. рисунок 4, б, в). Слои не перемешивались друг с другом и основой.



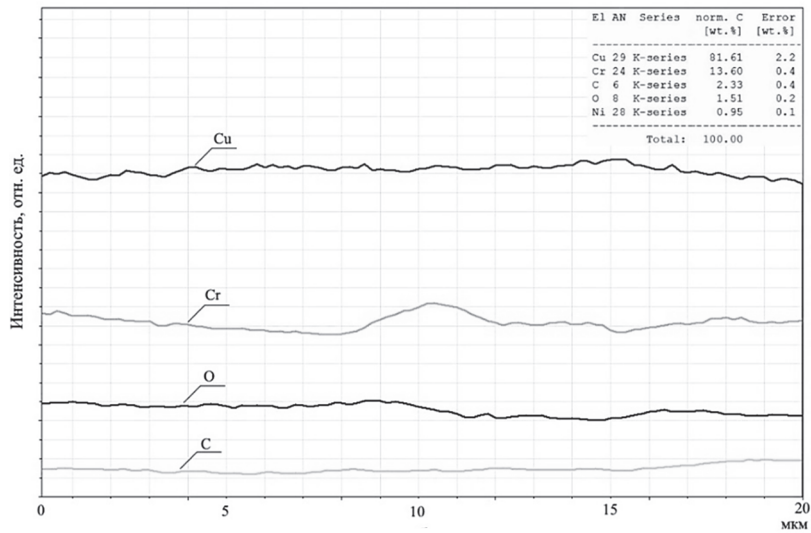
а)

б)

Рисунок 2. — СЭМ-снимки лезвия ножа с Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-покрытием: режущей кромки (а) и выделенной зоны А скола на острие лезвия (б)

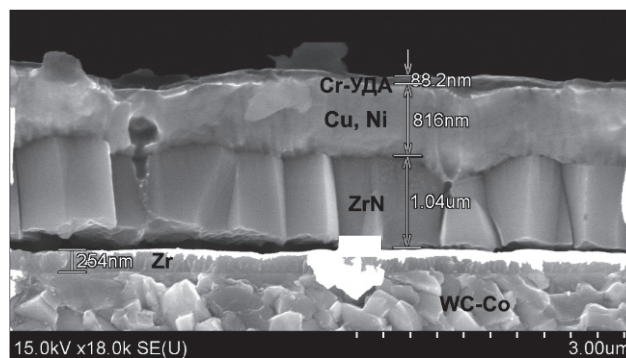


а)



б)

Рисунок 3. — СЭМ-снимок поверхности Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-покрытия (а), элементный состав поверхности и распределение элементов вдоль линии АВ покрытия (б)



а)

Рисунок 4. — Микроструктура твердосплавного (WC-Co) ножа с Cr-ДНА/ZrN-покрытием: СЭМ-снимок фрактографического скола образца (а), распределение характеристического рентгеновского излучения Cr, Cu, Ni, Zr, W (б) и C, Cu, Ni, Zr, Co (в)

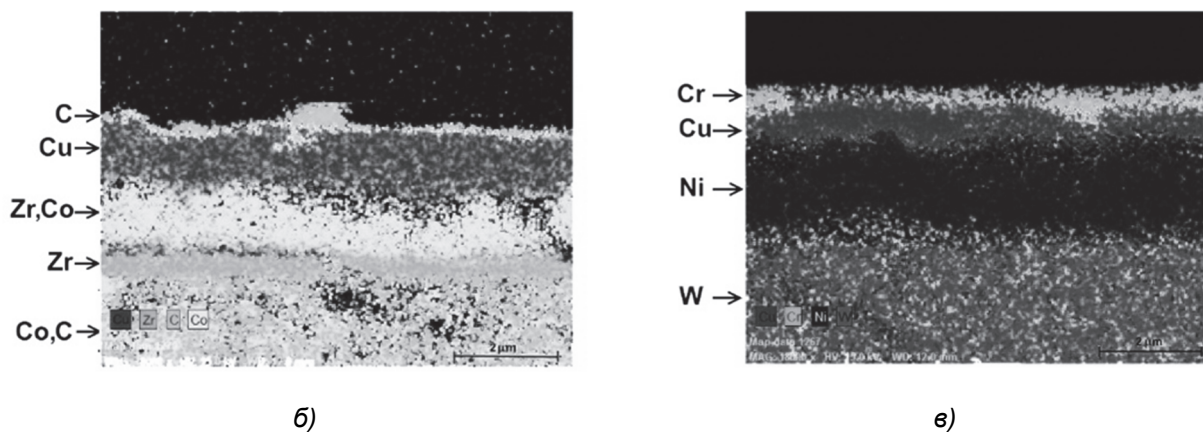
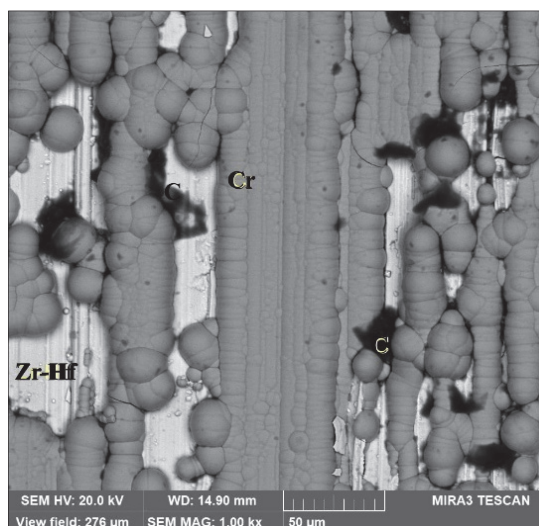


Рисунок 4. — Окончание

Значения микротвердости ($6,6 \pm 0,3$ ГПа) сформированных на рубильных ножах Hf-Zr-ZrN-покрытий превышают твердость ($5,2 \pm 0,2$ ГПа) стальных (марки 6ХС) ножей без покрытия. Опытные-промышленные испытания при резании заготовок из древесины хвойных и лиственных пород на рубильной машине МРР8-50ГН показали, что период стойкости инструмента с рубильными ножами с покрытием на основе Zr-Hf и ZrN и с покрытием на основе Cr-ДНА, Zr-Hf и ZrN в 1,9...2,2 и в 1,7...1,9 раза больше по сравнению с инструментом без покрытий соответственно.

Сформированные комбинированные Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-покрытия также имеют слоистую структуру, состоящую из верхнего гальванического Cr-ДНА-слоя (рисунок 5, а, в), ионно-плазменного среднего ZrN-слоя (см. рисунок 5, в) и нижнего Zr-Hf-слоя (см. рисунок 5, а, в). ZrN-слой не перемешивается с Cr-ДНА- и Zr-Hf-слоями (см. рисунок 5, в). Поверхность верхнего Cr-ДНА-слоя имеет характерную структуру в виде глобулярных образований, сформированных, как доказано в работах [14; 16], фосфидом никеля (Ni_3P) и кластерами наноалмазов.



а)

Рисунок 5. — СЭМ-снимки лезвия ножа с Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-покрытием: поверхности покрытия (а), режущей кромки (б) и выделенной зоны В скола на острие лезвия (в)

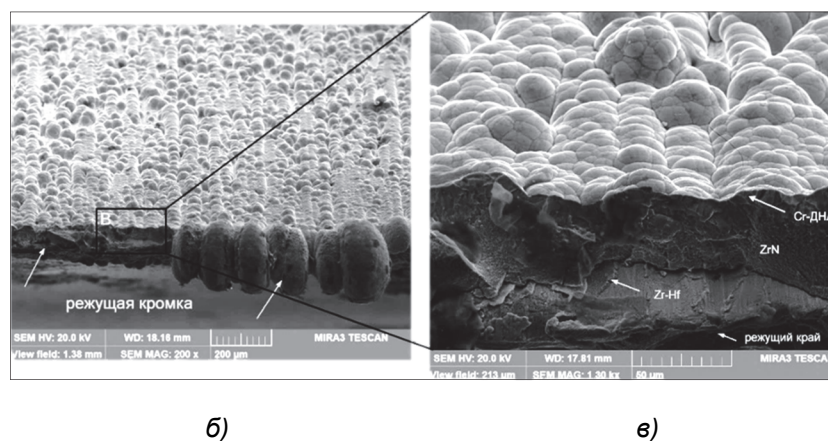


Рисунок 5. — Окончание

Заключение. Комбинированными методами ионно-лучевого распыления, КИБ и гальванической обработки на рубильных стальных (марки 6ХС) ножах фрезерного инструмента сформированы Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN-покрытия. В целях получения высокой адгезионной прочности Cr-ДНА-слоя с ZrN-покрытием дополнительно на поверхность ZrN-покрытия осаждались химическим и электрохимическим способами промежуточные слои никеля и меди. Полученные комбинированные покрытия имеют слоистую структуру, состоящую из верхнего гальванического Cr-ДНА-слоя, ионно-плазменных среднего ZrN-слоя и нижнего Zr-Hf-слоя. ZrN-слой не перемешивается с Cr-ДНА- и Zr-Hf-слоями. Значения микротвердости ($6,6 \pm 0,3$ ГПа) сформированных на рубильных ножах Hf-Zr-ZrN-покрытий превышают твердость ($5,2 \pm 0,2$ ГПа) стальных (марки 6ХС) ножей без покрытия. Опытные-промышленные испытания показали, что период стойкости фрезерного инструмента с рубильными ножами с покрытием Cr-ДНА/Hf-Zr-ZrN в 1,7...1,9 раза больше по сравнению с инструментом без покрытий при резании заготовок из древесины хвойных и лиственных пород.

Список цитированных источников

1. CrCN/CrNta-C multilayer coating for applications in wood processing / A. Gilewicz [et al.] // Tribology Intern. — 2013. — Vol. 57. — P. 1—7.
2. Hard coatings for woodworking tools a review / J. Ratajski [et al.] // J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2009. — Vol. 37, no. 2. — P. 668—674.
3. Corrosion mechanisms in the wood industry, especially caused by tannins / H. Winkelmann [et al.] // Materials and Corrosion. — 2009. — Vol. 60, iss. 1. — P. 40—48.
4. Pamfilov, E. A. Mechanochemical fracture of the components of wood-cutting equipment / E. A. Pamfilov, S. V. Lukashov, Ya. S. Prozorov // Materials Science. — 2014. — Vol. 50, no. 1. — P. 148—155.
5. State of the art of tool texturing in machining / A. R. Machado [et al.] // J. of Materials Processing Technology. — 2021. — Vol. 293. — P. 117096.
6. Performance of helical edge milling cutters in planing wood / W. Darmawan [et al.] // Europ. J. of Wood and Wood Products. — 2011. — Vol. 69. — P. 565—572.
7. Hard CrCN/CrN multilayer coatings for tribological applications / B. Warcholinski [et al.] // Surface and Coatings Technology. — 2010. — Vol. 204, iss. 14. — P. 2289—2293.
8. Structural and mechanical properties of the ZrC/Ni-nanodiamond coating synthesized by the PVD and electroplating processes for the cutting knives / V. Chayeuski [et al.] // J. of Materials Engineering and Performance. — 2019. — Vol. 28. — P. 1278—1285.
9. Investigation of Properties of the Zr,Hf-(Zr,Hf)N-(Zr,Hf,Me,Al)N coatings, where Me means Cr, Ti, or Mo / A. Vereschaka [et al.] // Coatings. — 2021. — No. 11. — P. 1471.
10. Detonation nanodiamonds: new aspects in the theory and practice of synthesis, properties and applications / V. Yu. Dolmatov [et al.] // Russ. Chem. Reviews. — 2020. — Vol. 89, no. 12. — P. 1428—1462.
11. Влияние ZrN, Mo-N покрытий, сульфатирования на износ ножей дереворежущего инструмента / А. К. Кулешов [и др.] // Трение и износ. — 2014. — Т. 35, № 3. — С. 276—285.
12. Preparation and characterization of the Cr-nanodiamonds/MoN coatings with performant mechanical properties / V. Chayeuski [et al.] // Coatings. — 2022. — Vol. 12, iss. 7. — P. 1012.

13. Electrodeposition of nanocrystalline chromium coatings from Cr(III)-based electrolyte using pulsed current / F. I. Danilov [at al.] // *Protection of Metals and Phys. Chemistry of Surfaces*. — 2011. — Vol. 47, no. 5. — P. 598—605.

14. *Tseluikin, V. N.* On the structure and properties of composite electrochemical coatings. A review / V. N. Tseluikin // *Protection of Metals and Phys. Chemistry of Surfaces*. — 2016. — Vol. 52, no. 2. — P. 254—266.

15. *Чаевский, В. В.* Формирование и структура Cr-ДНА/ZnN покрытия на твердом сплаве / В. В. Чаевский, В. В. Жилинский // *Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, Беларусь, 21—24 сент. 2021 г.* — Минск : БГУ, 2021. — С. 557—560.

16. *Чаевский, В. В.* Влияние параметров электрохимического осаждения на структуру и фазовый состав покрытия сплавом Ni-P / В. В. Чаевский, В. В. Жилинский, О. Чернашеюс // *Тр. БГУ*. — 2016. — № 6. — С. 106—109.

Поступила в редакцию 28.03.2024.

УДК 621.793

А. А. Шматов, доктор технических наук, профессор,
Мэй Шун Чи, кандидат технических наук, профессор
Уханьский текстильный университет, пр-т Миньцу, 1, 430073 Ухань,
Китайская Народная Республика, +86 (135) 88 561 418, dr.shmatov2014@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДИФфуЗИОННЫХ КАРБИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

В статье представлены результаты анализа структуры и фазового состава двух- и трехкомпонентных карбидных покрытий, полученных методом химико-термической обработки. Процесс получения диффузионных карбидных покрытий включает два этапа: 1) предварительное приготовление насыщающей смеси путем синтеза металлов из оксидов в составе 98 % (50 % Al_2O_3 + 50 % (70 % Me_xO_y + 30 % Al)) + 2 % NH_4Cl , где Me_xO_y = оксиды Cr_2O_3 , TiO_2 , V_2O_5 , MnO_2 ; 2) химико-термическую обработку стали У8 (0,8 %) в синтезированной порошковой смеси при 1 100 °С в течение 6 ч. Обобщены результаты фазового анализа карбидных слоев в насыщающих системах на основе оксидов Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-V-Mn. Проведен структурный и фазово-химический анализ оптимальных Cr-V, Ti-Mn, Cr-Ti-V и Cr-Ti-Mn карбидных покрытий, в которых достигаются наивысшие показатели микротвердости и износостойкости. После нанесения многокомпонентных диффузионных карбидных покрытий эксплуатационная стойкость стальных штампов и техоснастки повысилась в 2...10 раз по сравнению с традиционными.

Ключевые слова: химико-термическая обработка; высокоуглеродистая сталь; многокомпонентные диффузионные карбидные покрытия.

Рис. 2. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

A. Shmatov, DSc in Technical Sciences, Professor,
Mei Shunqi, PhD in Technical Sciences, Professor
Wuhan Textile University, 1 Mintsu Ave., 430073 Wuhan,
The People's Republic of China, +86 (135) 88 561 418, dr.shmatov2014@yandex.ru

COMPARATIVE STRUCTURAL-PHASE ANALYSIS OF MULTI-COMPONENT DIFFUSION CARBIDE COATINGS ON TOOL HIGH CARBON STEEL

The results of an analysis of the structure and phase composition of two- and three-component carbide coatings obtained by thermochemical treatment are presented in the article. The process of obtaining diffusion carbide coatings includes two stages: 1) preliminary preparation of a saturating mixture by synthesizing metals from oxides in the composition 98 % (50 % Al_2O_3 + 50 % (70 % Me_xO_y + 30 % Al)) + 2 % NH_4Cl , where Me_xO_y = oxides Cr_2O_3 , TiO_2 , V_2O_5 , MnO_2 ; 2) thermochemical treatment of U8 steel (0.8 %) in a synthesized powder mixture at 1 100 °C for 6 h. The results of carbide layers phase analysis in saturating systems based on Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-V-Mn oxides are generalized. Structural and phase-chemical analysis of optimal Cr-V, Ti-Mn, Cr-Ti-V and Cr-Ti-Mn carbide coatings, in which the highest levels of microhardness and wear resistance are achieved. After multi-component diffusion carbide coatings applying, the steel dies operational durability and technical equipment increased by 2...10 times compared to traditional ones.

Key words: chemical-thermal treatment; high-carbon steel; multi-component diffusion carbide coatings.

Fig. 2. Table 2. Ref.: 8 titles.

Введение. Существуют различные способы поверхностного упрочнения инструментальных материалов путем совместного термического и химического воздействия в условиях высоких температур, в результате чего формируются сверхтвердые износостойкие покрытия [1—3]. За рубежом используют вакуумные термохимические процессы, активированные высокоэнергетическими источниками нагрева (плазмой, тлеющим разрядом, электронным лучом), для создания многослойных покрытий из разных тугоплавких соединений [3]. Недостатками этих процессов являются малая производительность, большая энергоемкость и стоимость.

В отечественной практике широкое применение получил простой метод химико-термической обработки (далее — ХТО) с использованием герметичных контейнеров, заполненных порошковой насыщающей смесью. Применение алюминотермически синтезированных сред существенно удешевляет процессы ХТО за счет замены дорогостоящих порошков металлов и неметаллов на менее дорогие оксиды [1]. Наибольший интерес представляют процессы получения сверхтвердых многокомпонентных карбидных покрытий путем диффузионного насыщения углеродсодержащих сталей нескольких карбидообразующих металлов при высокотемпературном (950...1100 °С) нагреве, поскольку среди тугоплавких соединений карбиды обладают лучшим комплексом свойств, которые значительно повышаются в сложных карбидных системах [4; 5]. Однако в настоящих источниках существуют только разрозненные данные о структурно-фазовом составе известных многокомпонентных карбидных слоев на инструментальных сталях.

В связи с изложенным целью данной работы явилось проведение системного анализа фазового состава диффузионных карбидных покрытий в зависимости от сочетания и количества насыщающих элементов и изучение структуры оптимальных по свойствам двух- и трехкомпонентных карбидных слоев, полученных на высокоуглеродистой стали, а также промышленная апробация технологии многокомпонентной карбидизации стальных инструментов.

Материалы и методы исследования. Химико-термической обработке подвергали высокоуглеродистую сталь У8 (0,8 % С), которую широко используют для изготовления штамповых инструментов. При проведении ХТО стальные образцы помещали в контейнер из жаропрочной стали, заполненный специально приготовленной порошковой насыщающей смесью, которую герметично защищали плавким затвором. Затем контейнер с образцами загружали в электрическую печь, разогретую до температуры 1100 °С, где выдерживали в течение 6 ч.

Насыщающую смесь получали алюминотермическим методом путем восстановления оксидов металлов алюминием в порошковых смесях следующего состава, мас. %:



где оксиды $\text{Me}_x\text{O}_y = \text{Cr}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2, \text{V}_2\text{O}_5, \text{MnO}_2$ являлись поставщиками карбидообразующих металлов. Предварительно восстановленную смесь размалывали и просеивали. Смесь для ХТО считалась готовой к употреблению, когда в нее еще добавляли активатор (2 % NH_4Cl).

Для изучения структуры и фазового состава карбидных слоев применяли микроструктурный, рентгеноструктурный, дюрOMETрический и микрорентгеноспектральный анализы. При выполнении микрорентгеноспектрального анализа содержание элементов в поверхностном слое диффузионно обработанной стали оценивали по соотношению относительной интенсивности линий элементов к их эталонной интенсивности.

Испытания на абразивную износостойкость карбидных слоев на стали У8 проводили на машине типа ХБ-4 при скорости вращения абразивного круга 0,5 м/с, радиальной подаче испытываемого образца 1 мм на оборот и статической нагрузке 1 МПа (ГОСТ 17367-71). Стойкость при абразивном изнашивании оценивали двумя показателями: 1) по относительной износостойкости K_w , определяемой по формуле $K_w = \Delta m_2 / \Delta m_1$, где Δm_2 — потеря массы стального образца без покрытия; Δm_1 — потеря массы стального образца с покрытием; 2) длительности процесса изнашивания L покрытия, выраженной через длину пути трения до полного его износа.

Испытания стойкости карбидных слоев на сталях при молекулярно-механическом изнашивании (или при изнашивании схватыванием 1-го рода) проводили на машине типа Шкоды—Савина в условиях сухого трения скольжения. Стойкость покрытий оценивали в абсолютных и относительных значениях: 1) по объему лунки износа V , мм³, образованной за 20 мин контртелом трения (диском из ВКЗ) при нагрузке 1 МПа и скорости вращения 1 м/с; 2) относительной износостойкости K_w , определяемой по формуле $K_w = V_2 / V_1$, где V_2 — объем лунки в стальном образце с хромированным карбидным покрытием; V_1 — объем лунки в стальном образце с покрытием.

Скальваемость покрытий оценивали по удельной потере массы к площади поверхности образцов при их осадке на прессе с 10 %-ной деформацией.

Результаты исследования и их обсуждение. На основании рентгеновского фазового анализа в настоящей работе построены условные диаграммы (рисунок 1) фазового состава карбидных слоев, полученных диффузионным насыщением стали У8 одним, двумя и тремя карбидообразующими металлами в тройных системах насыщающих элементов на основе оксидов Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-V-Mn [6]. Установлено, что в формировании многокомпонентных карбидных слоев участвуют все карбидообразующие металлы, которые либо образуют самостоятельные фазы, либо легируют другие карбиды. Из рисунка 1 также видно, что монокарбидные слои формируются при насыщении в составах с преобладанием оксида одного из карбидообразующих металлов.

На диаграммах преобладают области из карбидов двух насыщающих элементов с участием сильных карбидообразователей: титана, ванадия, хрома. Сложное строение карбидного слоя обусловлено присутствием в нем двух и более карбидов с различной кристаллографической структурой.

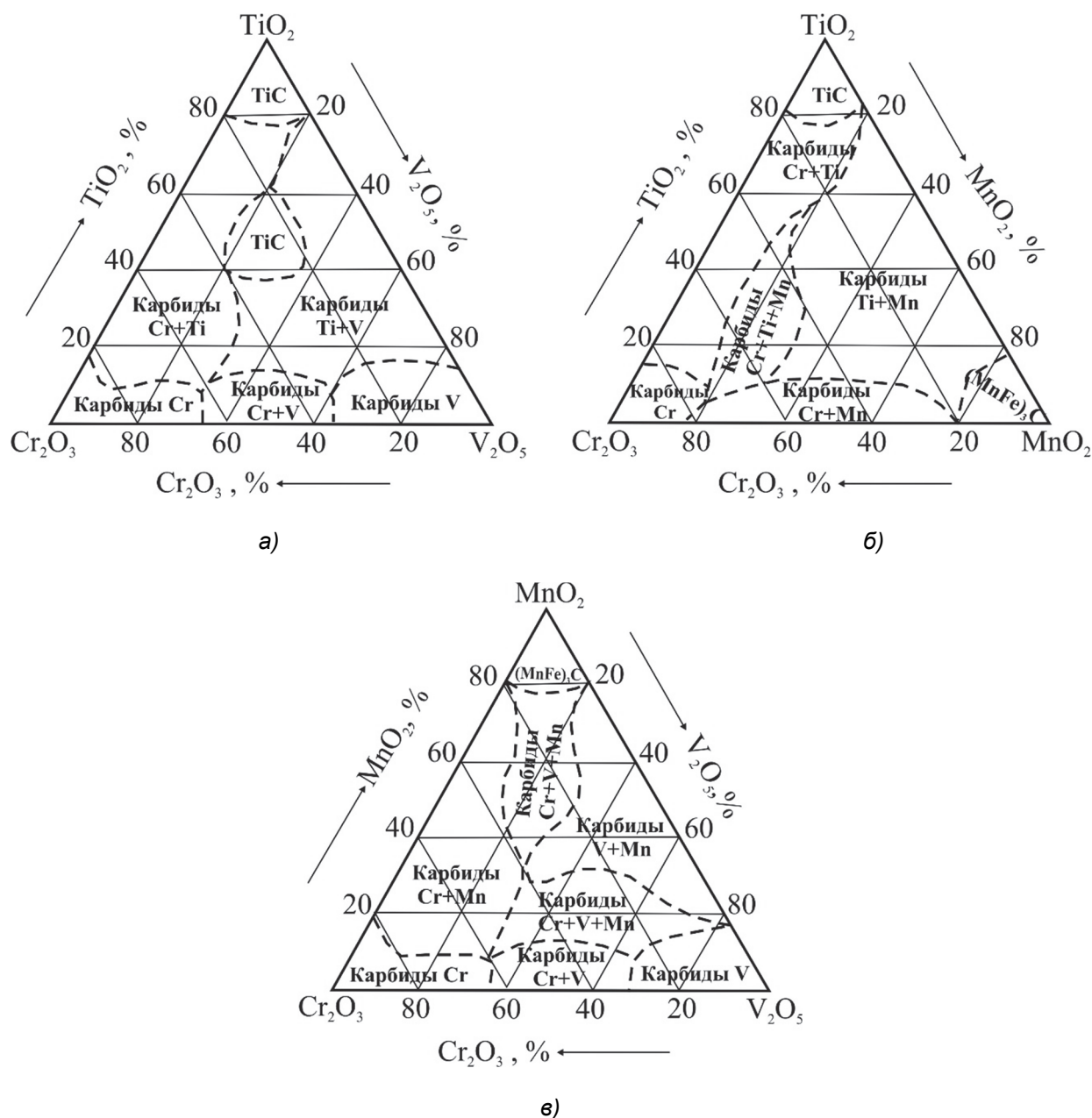


Рисунок 1. — Зависимость фазового состава карбидных слоев на стали У8 от состава насыщающей смеси в системах на основе оксидов Cr-Ti-V (а), Cr-Ti-Mn (б), Cr-Mn-V (в) [6]

Сравнительный анализ условных диаграмм фазового состава карбидных слоев в системах на основе Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-V-Mn (см. рисунок 1) с известными диаграммами равновесного состояния карбидных систем на основе указанных насыщающих металлов Cr-Ti-C, Ti-V-C, V-Mn-C, Ti-Mn-C, Cr-V-C, Cr-Mn-C [6] позволил сделать вывод о несоответствии в количестве и распределении карбидных фаз на диаграммах. Между ними имеется очень далекое сходство, связанное со взаимной растворимостью карбидных фаз, что подтверждается образованием в диффузионных слоях сложнoleгированных изоморфно растворимых карбидов. О точном совпадении количества и состава карбидных фаз в покрытиях, согласно диаграммам равновесного состояния, не приходится говорить, поскольку процесс ХТО не является равновесным и недостаточно длителен для гомогенизации фаз, причем образцы после ХТО не закаливают, как требуется при построении диаграмм состояний, а медленно охлаждают. Более того, в образовании карбидов участвуют не только углерод инструментальной основы и насыщающие карбидообразующие металлы, но и другие элементы: Al — восстановитель оксидов насыщающих элементов, Fe — составляющая стальной матрицы.

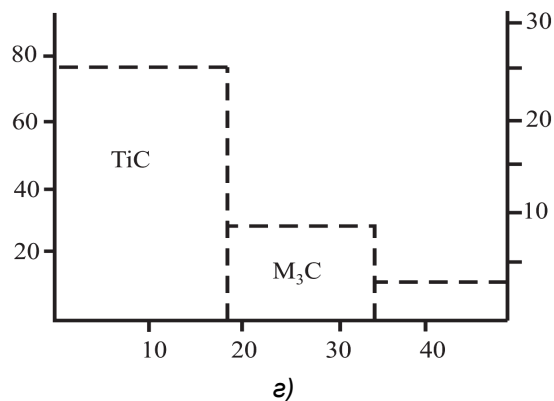
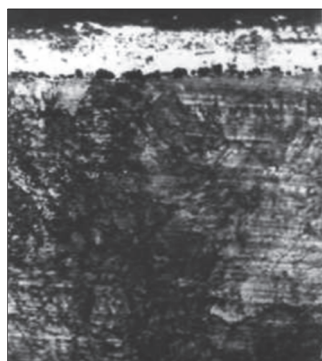
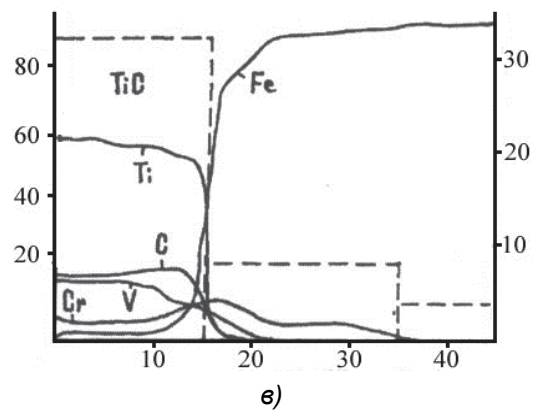
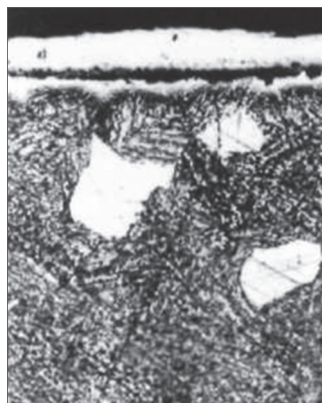
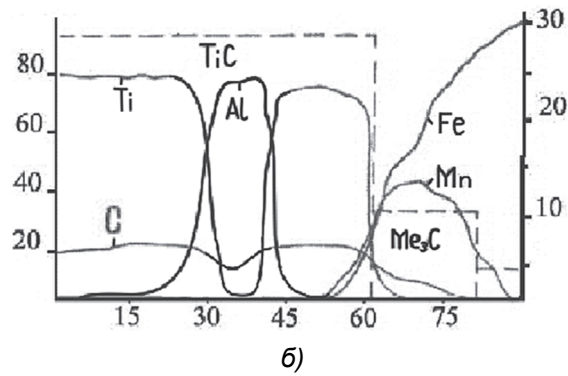
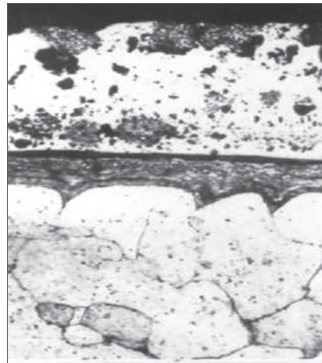
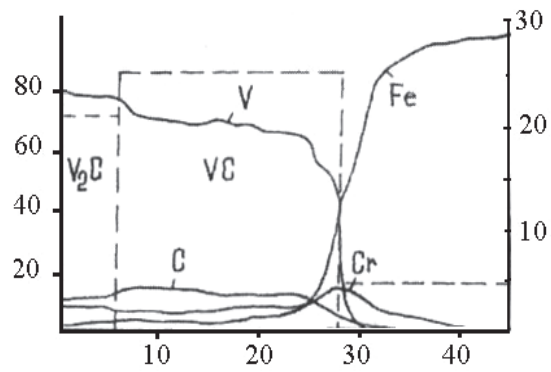
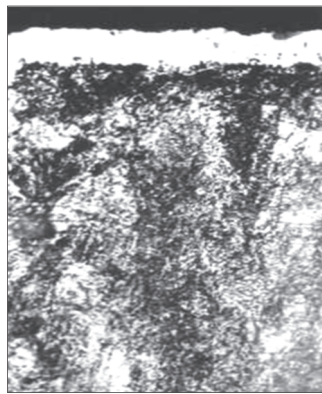
Сами процессы формирования многокомпонентных и многофазовых карбидных слоев имеют сложную природу и являются результатом диффузионного взаимодействия насыщающих карбидообразующих металлов с углеродом стальной матрицы. Диффузионный процесс сопровождается перераспределением элементов подложки (C, Fe в стали) из-за взаимного влияния насыщающих элементов, например, градиент химического потенциала хрома сильно влияет на диффузионный поток углерода в матрице [6] и т. д. Неравновесный характер процесса ХТО приводит к образованию метастабильной фазовой структуры поликарбидных слоев. Например, при титанованадировании (50 % TiO₂ + 50 % V₂O₅) стали формируется слой, состоящий из отдельных карбидов титана и ванадия, что не соответствует составу равновесной диаграммы состояния системы Ti-V-C [7], когда в псевдобинарном разрезе TiC-VC карбиды титана и ванадия образуют неограниченный твердый раствор. По-видимому, анизоморфизм образуемых карбидов при насыщении стали титаном и ванадием обусловлен особенностями формирования диффузионных слоев в многокомпонентной системе, разницей свободных энергий образования карбидов и теплот адсорбции поверхностью стали атомов титана и ванадия, а также многими другими причинами.

В настоящей работе выбраны оптимальные многокомпонентные карбидные покрытия, сформированные при диффузионном насыщении стали У8 несколькими карбидообразующими металлами тройных систем (Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn), в которых достигаются наиболее высокие показатели микротвердости и износостойкости в сочетании с другими рабочими свойствами (таблица 1).

На рисунке 2 представлены результаты структурного и фазово-химического анализа указанных в таблице 1 оптимальных многокомпонентных карбидных покрытий.

Т а б л и ц а 1. — Свойства оптимальных диффузионных карбидных слоев на стали У8

Тип карбидного слоя (наибольший % оксида металла в составе насыщающей смеси)	Жаростойкость слоя, г / м ²	Скальваемость покрытия при сжатии, г / м ²	Микротвердость слоя Н ₂₀₀ , МПа	Абразивная износостойкость K _w / L, м	Стойкость при сухом трении скольжения K _w
Однокомпонентное диффузионное карбидное покрытие					
Cr (100 % Cr ₂ O ₃)	60	9,5	18 000	2,3 / 4,9	1,0
Оптимальные многокомпонентные диффузионные карбидные покрытия					
Cr-V (85 % V ₂ O ₅)	1 220	22,4	28 000	40,5 / 38,1	20,1
Ti-Mn (75 % MnO ₂)	500	69,0	20 300	30,0 / 101,0	8,4
Cr-Ti-V (50 % TiO ₂)	620	47,4	35 000	70,5 / 81,3	3,8
Cr-Ti-Mn (50 % TiO ₂)	740	33,6	29 000	26,2 / 35,0	4,5
Исходная сталь У8 (закалка + низкий отпуск)					
Сталь У8	1 100	—	—	1,0	0,8



Концентрация насыщающих элементов, % по массе

Микротвердость H_{200} , ГПа

Расстояние от поверхности, мкм

Соотношение оксидов насыщающих металлов в смеси: а — 15 % Cr_2O_3 + 85 % V_2O_5 ; б — 25 % TiO_2 + 75 % MnO_2 ; в — 25 % Cr_2O_3 + 50 % TiO_2 + 25 % V_2O_5 ; г — 25 % Cr_2O_3 + 50 % TiO_2 + 25 % MnO_2

Рисунок 2. — Микроструктура ($\times 240$), распределение фаз, химических элементов и изменение микротвердости по толщине оптимальных диффузионных слоев на стали У8. Режим ХТО: $T = 1100^\circ C$, $\tau = 6 ч$ [6]

Полученные результаты (см. рисунок 2) говорят о том, что оптимальные Ti-Mn, Cr-Ti-Mn диффузионные слои на инструментальной стали У8 сформированы в виде структурной композиции с градиентом твердости, плавно снижающейся от поверхности к сердцевине, что обеспечит инструментам с такими покрытиями повышенную работоспособность [8]. Отмечено, что под диффузионным Ti-Mn карбидным слоем (см. рисунок 2, б) и твердым раствором располагается обширная обезуглероженная зона, созданная интенсивным оттоком углерода из стальной основы в зону карбидообразования, а при высоких температурах (1 100 °С) проведения ХТО формируется крупнозернистая структура стали. Не исключено, что укрупнение зерен при таком диффузионном насыщении стали титаном и марганцем также вызвано тепловыделением в результате реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза между присутствующими в смеси алюминием и невосстановленными оксидами металлов [6]. Поскольку крупнозернистая структура стали вызывает ее охрупчивание, для исправления этого недостатка все стальные инструменты после многокомпонентной диффузионной карбидизации обязательно подвергаются термообработке.

В работах [5; 6] при участии автора был проведен подробный сравнительный анализ структур и фазово-химического состава двух- и трехкомпонентных карбидных слоев, сформированных на инструментальной стали У8 во всех системах насыщающих элементов на основе Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-V-Mn. С учетом этих данных сделано заключение, что распределение элементов в диффузионных слоях обуславливается электронным строением и типом связи карбидообразующих элементов, кристаллографической структурой образующихся карбидов и степенью их взаимной растворимости. В инструментальных сплавах при наличии взаимной растворимости образуемых в диффузионном слое карбидов карбидообразующие элементы распределяются по всей толщине покрытия, создавая собственные карбиды или легируя более устойчивые карбиды. Это относится к Cr-Ti-V карбидным слоям на стали У8 и др. При отсутствии взаимной растворимости образуемых в покрытии карбидов они распределяются в нем послойно. Например, в Ti-Mn и Cr-Ti-Mn диффузионных слоях на стали У8 под зоной карбида титана TiC формируется зона сложного цементита на основе марганца и железа (Mn,Fe)₃C.

Результаты микроструктурного, рентгеновского и микрорентгеноспектрального анализов (см. рисунки 1, 2) многокомпонентных карбидных слоев, полученных на стали У8 методом ХТО в оптимальных насыщающих смесях при 1 100 °С в течение 6 ч, показали следующее.

При **хромованадировании инструментальной стали У8** в насыщающей смеси на основе 15 % Cr₂O₃ + 85 % V₂O₅ формируется сплошное карбидное покрытие (см. рисунок 2, а) толщиной 35 мкм с микротвердостью 28 000 МПа. Такой хромванадиевый диффузионный слой состоит на 100 % из карбидов ванадия VC и V₂C, легированного хромом. В самом карбидном диффузионном слое и под ним наблюдаются темно-травящиеся участки.

При **титаномарганцировании инструментальной стали У8** в насыщающей смеси на основе 25 % TiO₂ + 75 % MnO₂ образуется несплошной карбидный слой (см. рисунок 2, б) толщиной 77...84 мкм с микротвердостью 20 300 МПа. Это титанмарганцевое покрытие состоит из слоя карбида TiC, под которым располагается слой карбида (Mn,Fe)₃C, переходная зона и зона твердого раствора марганца в железе. Благодаря наличию включений пластичного алюминия (см. рисунок 2, б), покрытие Ti-Mn, содержащее 80 % карбида TiC, отличается малой хрупкостью. Следует отметить аномальный рост (в 2,5...3,0 раза по сравнению с другими карбидными слоями) Ti-Mn карбидного покрытия при ХТО стали У8 в среде на основе 25 % TiO₂ + 75 % MnO₂, обусловленный ускорением диффузии карбидообразующих элементов и синтеза карбидов в жидкометаллической фазе на базе Al [6].

При **хромотитанованадировании инструментальной стали У8** в насыщающей смеси на основе 25 % Cr₂O₃ + 50 % TiO₂ + 25 % V₂O₅ формируется сплошной карбидный слой (см. рисунок 2, в) толщиной 28 мкм с микротвердостью 35 000 МПа. Данное хромотитанванадиевое покрытие состоит на 100 % из карбида TiC, легированного хромом и ванадием.

При **хромотитаномарганцировании инструментальной стали У8** в насыщающей смеси на основе 25 % Cr₂O₃ + 50 % TiO₂ + 25 % MnO₂ на их поверхности формируется сплошной карбидный слой (см. рисунок 2, г) толщиной 35 мкм с микротвердостью 29 000 МПа. Указанное

хромтитанмарганцевое покрытие состоит на 59 % из карбида TiC, легированного хромом, и на 41 % из карбида (Mn,Fe)₃C, легированного титаном и хромом. Самостоятельно карбид хрома на поверхности стали У8 не образуется.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что оптимальные сверхтвердые карбидные покрытия могут быть рекомендованы для поверхностного упрочнения стальных инструментов, испытывающих изнашивание схватыванием, абразивное и окислительное изнашивание.

Результаты производственных испытаний показали, что ХТО в оптимальных многокомпонентных карбидообразующих составах позволяет увеличить эксплуатационную стойкость различных видов инструментов из высокоуглеродистых сталей в 2...10 раз по сравнению с необработанными (таблица 2) [6]. Технологический процесс многокомпонентной диффузионной карбидизации стальных пресс-форм и ножей нашел применение на белорусском предприятии «Химпласт», Витебское ПО. Суммарный экономический эффект от использования этого процесса составил около 93 тыс. дол. США в эквиваленте.

Т а б л и ц а 2. — Результаты производственных испытаний стальных инструментов, подвергнутых многокомпонентной термодиффузионной карбидизации

Вид инструмента	Материал инструмента	Обрабатываемый материал	Повышение стойкости инструмента K_w
ОАО «Гомсельмаш»			
Клеймы	Сталь У8	Конструкционные стали	2...3
Направляющие для навивки пружин		Пружинные стали	Выше 10
Минский филиал ВНИСМИ			
Малярные форсунки	Сталь У8	Малярные составы	2...3
«Химпласт», Витебское ПО			
Пресс-формы	Сталь У8	Пластмассы	2
Ножи	Сталь У10	Бумага	3

Заключение. На основании исследований влияния состава насыщающих смесей в системах оксидов Cr-Ti-V, Cr-Ti-Mn, Cr-V-Mn при ХТО высокоуглеродистой стали на структуру, фазово-химический состав, толщину и свойства двух- и трехкомпонентных карбидных покрытий установлено, что в их формировании участвуют все карбидообразующие металлы, которые либо образуют самостоятельные фазы, либо легируют другие карбиды; карбидный состав покрытий не соответствует диаграммам равновесного состояния. Титан, как наиболее сильный карбидообразователь, преобладает в большинстве многокомпонентных карбидных слоев, а марганец формирует отдельную зону сложных карбидов (Mn,Fe)₃C. Установлен аномальный рост (77...84 мкм) Ti-Mn карбидного покрытия при ХТО стали У8 в среде на основе 25 % TiO₂ + 75 % MnO₂.

Отмечено, что эффект упрочнения и улучшения рабочих свойств диффузионных многокомпонентных карбидных слоев создается благодаря преобладанию в составе покрытий сверхтвердых карбидов титана и ванадия, а также образованию сложнелегированных карбидов, в которых растворены один или два легирующих элемента.

Разработанный метод многокомпонентной диффузионной карбидизации является эффективным способом поверхностного упрочнения инструментов. После нанесения оптимальных карбидных покрытий стойкость стальных штампов и техоснастки повысилась в 2...10 раз по сравнению с традиционными. Суммарный экономический эффект от внедрения данной технологии составил 93 тыс. дол. США в эквиваленте.

Список цитированных источников

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / под ред. Л. С. Ляховича. — М. : Металлургия, 1981. — 424 с.
2. Герасимова, Н. С. Химико-термическая обработка / Н. С. Герасимова. — Калуга : Изд-во КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — 48 с.
3. Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки ; пер. с англ. — М. : Мир, 2000. — 518 с.
4. Самсонов, Г. В. Сплавы на основе тугоплавких соединений / Г. В. Самсонов, К. Н. Портной. — М. : Оборонгиз, 1961. — 300 с.
5. Shmatov, A. Forming of diffusion multi-carbide coatings on tool alloys / A. Shmatov, L. Soos, Z. Krajny. — Bratislava : Slovak Techn. Univ., 2018. — 137 p.
6. Шматов, А. А. Научные и технологические основы термохимических и термоциклических методов упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.01 ; 05.02.07 / А. А. Шматов. — Минск, 2020. — 344 с.
7. Третьяченко, Л. А. Строение некоторых сплавов системы титан-ванадий-углерод / Л. А. Третьяченко, В. Н. Еременко // Порошковая металлургия. — 1966. — № 8. — С. 33—37.
8. Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. — М. : Машиностроение, 1986. — 192 с.

Поступила в редакцию 28.03.2024.

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 631.362.3

А. И. Ермаков¹, кандидат технических наук, доцент,

С. А. Зеленко², кандидат технических наук

¹Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 293 65 05, ermakov@bntu.by

²Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 357 78 97, zelenko.pererab@bsatu.by

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АСПИРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Описана технология послеуборочной обработки зернового вороха на предприятиях агропромышленного комплекса, перечислены основные признаки разделения, используемые при очистке зерна основной культуры от примесей. Представлены данные об устройстве и принципе действия аспирационной системы воздушно-решетной зерноочистительной машины МУЗ-16 производства ЗАО «Борисовский завод «Металлист»». Описана методика проведения экспериментальных исследований работы аспирационной системы МУЗ-16 в производственных условиях и на лабораторном макете пневматического канала окончательной аспирации. Представлены результаты экспериментальных исследований, показавшие, что часть аспирационной системы МУЗ-16, обеспечивающая предварительную аспирацию, работает эффективно, используя для очистки зерновой смеси 1 145 м³/ч воздуха, а подсосы составляют только 6,01 % от засасываемого в данную часть аспирационной системы воздуха, при этом часть системы, отвечающая за окончательную аспирацию зерновой смеси, неэффективна и имеет значительные подсосы воздуха. Установлено, что зазор между передней стенкой пневматического канала и пластиной для поступления зерна в канал существенно влияет на направление воздушных потоков в пневматическом канале окончательной аспирации, его значение в 4 см обеспечивает возможность работы канала на максимальной удельной производительности 666 кг / (см · ч) с минимальными подсосами воздуха в 7,70 % от количества воздуха, поступающего в канал. Представлены рекомендации по совершенствованию конструкции аспирационной системы МУЗ-16.

Ключевые слова: зерноочистительная машина; аспирационная система; пневматический канал; скорость воздуха; расход воздуха.

Рис. 6. Библиогр.: 10 назв.

A. I. Ermakov¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

S. A. Zelenko², PhD in Technical Sciences

¹Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 293 65 05, ermakov@bntu.by

²Institution of Education “Belarusian State Agrarian Technical University”, 99 Nezavisimosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 357 78 97, zelenko.pererab@bsatu.by

IMPROVING THE GRAIN CLEANING MACHINE ASPIRATION SYSTEM

The technology for post-harvest processing of grain heaps at agro-industrial complex enterprises is described, and the main separation features used in cleaning the main crop grain from impurities are listed. Data on the design and principle of the aspiration system operation of the MUZ-16 air-sieve grain cleaning machine produced by JSC Borisov Plant Metallist are presented. The methodology for conducting experimental studies of the MUZ-16 aspiration system operation in production conditions and on a laboratory model of the final aspiration pneumatic channel is described. The results of experimental studies are presented. It shows that the part of the MUZ-16 aspiration system that provides preliminary aspiration works effectively, using 1 145 m³ / h of air to clean the grain mixture, and suction amounts to only 6.01 % of the air sucked into this part of the aspiration system. In this case, the part of the system responsible for the final aspiration of the grain mixture is not effective and has significant air leaks. It has been established that the gap between the front wall of the pneumatic channel and the plate for the grain entry into the channel significantly affects the air flows direction in the pneumatic channel of final aspiration; its value of 4 cm allows the channel to operate at a maximum

specific productivity of 666 kg / (cm · h) s minimal air leaks of 7.70 % of the air amount entering the channel. Recommendations for improving the design of the MUZ-16 aspiration system are presented.

Key words: grain cleaning machine; aspiration system; pneumatic channel; air speed; air flow.

Fig. 6. Ref.: 10 titles.

Введение. Зерновой ворох сельскохозяйственных культур, получаемый после обмолота и поступающий на послеуборочную обработку, представляет собой неоднородную смесь, состоящую из зерна основной культуры, а также сорной и зерновой примесей [1; 2]. Послеуборочная обработка — обязательный технологический процесс, включающий приемку зернового вороха, предварительную и первичную его очистку, сушку или активное вентилирование, вторичную очистку и сортирование [3; 4].

Очистка зернового вороха — процесс отделения примесей от зерна основной культуры, который осуществляется при помощи зерноочистительных машин (сепараторов) и основан на различии свойств зерна основной культуры и примесей, которые называют признаками разделения. В качестве признаков разделения могут использоваться: геометрические размеры (толщина, ширина, длина), аэродинамические свойства, форма, магнитные свойства, плотность, коэффициент трения, упругость, цвет [5—10]. Широкое применение в послеуборочной обработке нашли зерноочистительные машины, отделяющие примеси, отличающиеся толщиной, шириной и аэродинамическими свойствами. Машины данного типа оснащаются пространственными или плоскими ситовыми поверхностями (решетками), на которых происходит отделение примесей, отличающимися толщиной и шириной, а также аспирационными системами. Аспирационные системы состоят из одного или нескольких пневматических каналов, в которых при помощи воздушного потока, проходящего через зерновую смесь, осуществляется отделение примесей, отличающихся аэродинамическими свойствами, а также могут включать соединенные с каналами осадочные камеры или другие устройства, предназначенные для очистки воздушного потока от примесей, и вентиляторы. Зерноочистительные машины данного типа называют воздушно-ситовыми, или воздушно-решетными, сепараторами.

Ведущим производителем зерноочистительного оборудования для послеуборочной обработки в Республике Беларусь является ЗАО «Борисовский завод «Металлист»», выпускающий оборудование под брендом «Полымя». В линейке предприятия имеются воздушно-решетные сепараторы МУЗ, КСП и Grain Max.

Целью представленной работы является исследование работы аспирационной системы воздушно-решетной зерноочистительной машины МУЗ-16 и разработка предложений по ее совершенствованию.

Материалы и методы исследования. Исследования работы аспирационной системы воздушно-решетной зерноочистительной машины МУЗ-16 проводились в несколько этапов.

На первом этапе исследований была изучена работа аспирационной системы в производственных условиях. Принципиальная схема машины и устройство ее аспирационной системы представлены на рисунке 1.

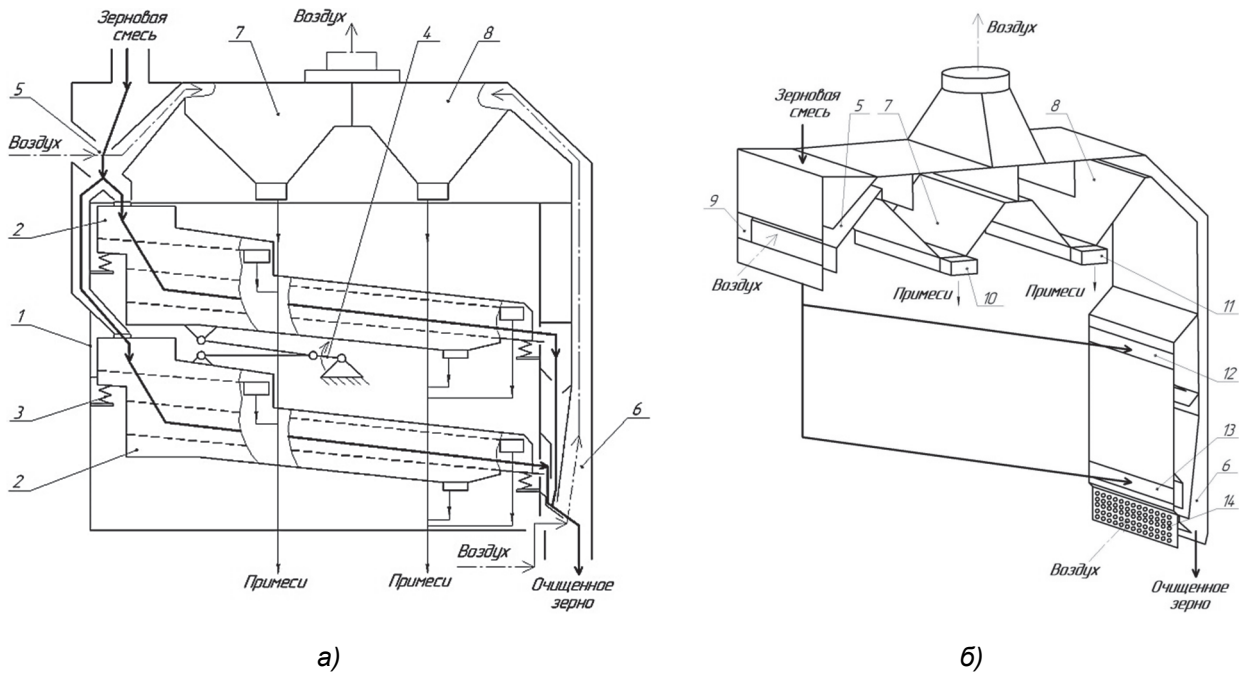
В качестве исследуемых параметров первого этапа были выбраны скорость и расход воздуха, поступающего в аспирационную систему машины через различные конструктивные элементы: забор воздуха через входы 9 и 14, подсосы воздуха через выходы примесей 10, 11 и входы зерна 12, 13 (см. рисунок 1, б).

Для измерения скорости воздуха использовали термоанемометр Testo 425 с зондом для измерений температуры и скорости воздуха Ø 7,5 мм и телескопической рукояткой.

Расход воздуха, поступающего в аспирационную систему машины через различные конструктивные элементы, рассчитывался по формуле

$$V_i = 3\,600 v_{\text{ср}i} S_i,$$

где V_i — расход воздуха, поступающего в систему через i -й элемент, м³ / ч;
 $v_{\text{ср}i}$ — среднее значение скорости воздуха в сечении i -го элемента, м / с;
 S_i — площадь сечения i -го элемента, м².



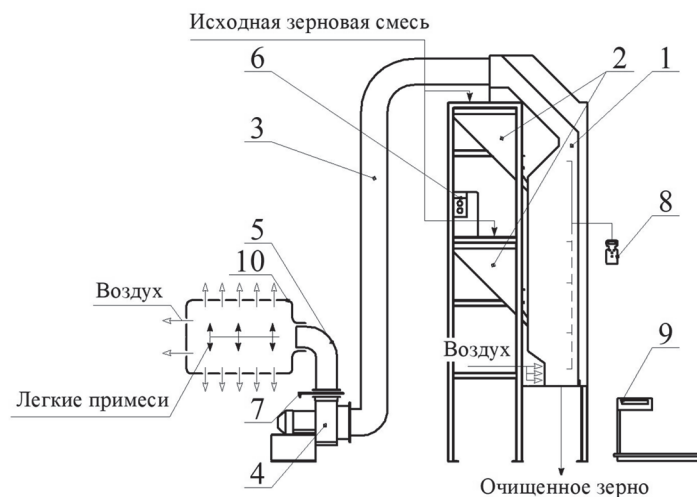
1 — корпус; 2 — ситовые кузова; 3 — виброопоры; 4 — приводной эксцентриковый механизм; 5 — пневматический канал предварительной аспирации; 6 — пневматический канал окончательной аспирации; 7, 8 — осадочные камеры; 9, 14 — входы воздуха в пневматические каналы; 10, 11 — выходы примесей из осадочных камер; 12, 13 — входы зерновой смеси в пневматический канал окончательной аспирации

**Рисунок 1. — Воздушно-решетчатая зерноочистительная машина МУЗ-16:
а — принципиальная схема; б — аспирационная система**

Производительность по исходной зерновой смеси составляла 40 т / ч. Параметры исходной зерновой смеси были следующие: гречиха, влажность — 15,2 %; сорная примесь — 4,2 %, вредные примеси — 0,2 %, зерновая примесь — 1,4 %.

На втором этапе исследований изучили влияние режимных и конструктивных параметров пневматического канала окончательной аспирации на скорость и расход воздуха, поступающего в него.

Исследования второго этапа проводились на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рисунке 2.



1 — лабораторный макет пневматического канала окончательной аспирации МУЗ-16; 2 — бункера для исходной зерновой смеси; 3, 5 — воздуховод; 4 — вентилятор; 6 — магнитный пускатель двигателя вентилятора; 7 — заслонка; 8 — термоанемометр; 9 — весы; 10 — фильтровальная перегородка

Рисунок 2. — Схема экспериментального стенда

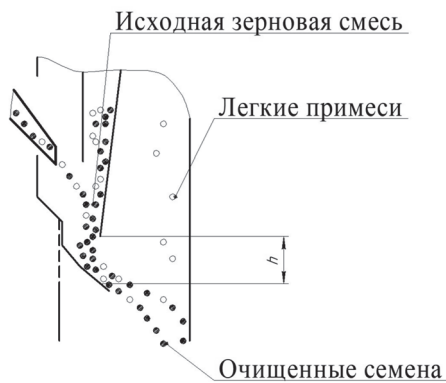


Рисунок 3. — Схема аспирационного канала с указанием места зазора h

Основным элементом экспериментального стенда является лабораторный макет пневматического канала окончательной аспирации МУЗ-16.

Размеры лабораторного макета пропорциональны размерам пневматического канала окончательной аспирации МУЗ-16: по глубине канала в масштабе 1:1, ширине канала — 1:10, высоте канала — 1:1, за исключением прямого вертикального участка канала после его сужения, длина участка уменьшена с 1 450 до 600 мм.

В качестве выходных функций на втором этапе были выбраны следующие показатели, характеризующие эффективность работы пневматического канала:

- скорость воздуха в поперечном сечении канала v , м / с;
- объем подсосов воздуха через входы зерна

в пневматический канал V , м³ / с.

Факторами варьирования на втором этапе выбраны следующие режимные и конструктивные параметры, оказывающие наибольшее влияние на процесс воздушного сепарирования:

- удельная производительность канала $q_{уд}$ в интервале от 222 до 444 кг / (ч · см);
- зазор между передней стенкой пневматического канала окончательной очистки и пластиной для поступления зерна в канал h в интервале от 4 до 9,5 см (рисунок 3).

Удельная производительность канала $q_{уд}$, кг / (ч · см), рассчитывалась по формуле

$$q_{уд} = Q / B, \quad (1)$$

где Q — производительность, кг / ч;

B — ширина пневматического канала, см.

Для второго этапа экспериментальных исследований был спланирован факторный эксперимент. Перед началом каждого опыта производилась настройка режимных и конструктивных параметров экспериментального стенда в соответствии с матрицей планирования.

Регулировка удельной производительности сепаратора осуществлялась установкой положения заслонок в бункерах, настройка положения производилась при отключенном вентиляторе. При этом перед загрузкой в бункер масса зерна взвешивалась на весах, заслонки фиксировались в определенном положении, измерялось время опорожнения бункеров. Расчет удельной производительности сепаратора производят по формуле (1). Регулировка зазора производилась, пока удельная производительность не соответствовала заданной с отклонением не более 3 %.

Регулировка зазора h осуществлялась установкой в канал фасонной пластины, контроль ее положения проводился штангенциркулем.

На втором этапе в качестве зерновой смеси использовали пшеницу с натурой 730 г / л и влажностью от 14 до 15 %.

Объемная производительность вентилятора составляла 0,15 м³ / с, так как данная производительность без наличия подсосов обеспечивает скорость воздуха в месте подачи зерновой массы в канал на уровне 5,5 м / с, что позволяет выделять большинство аэродинамически легких примесей без уноса зерна основной культуры.

Результаты исследования и их обсуждение. Исследования работы аспирационной системы МУЗ-16 в производственных условиях показали, что только 1 250,3 м³ / ч воздуха поступает в нее через входы воздуха в пневматические каналы 9, 14 (см. рисунок 1, б), продувая зерновую смесь и очищая ее от примесей, отличающихся аэродинамическими свойствами, а остальные 6 585,9 м³ / ч являются подсосами, снижая эффективность пневматической сепарации.

При анализе данных в разрезе предварительной и окончательной аспираций выявлено, что часть аспирационной системы МУЗ-16, обеспечивающая предварительную аспирацию, использует для очистки зерновой смеси $1\ 145\ \text{м}^3/\text{ч}$ воздуха, а подсосы составляют только $73,3\ \text{м}^3/\text{ч}$ или $6,01\ \%$ от засасываемого в данную часть аспирационной системы воздуха. При этом в части системы, отвечающей за окончательную аспирацию, подсосы составляют $6\ 512,6\ \text{м}^3/\text{ч}$ воздуха.

Второй этап эксперимента показал, что зазор между передней стенкой пневматического канала и пластиной для поступления зерна в канал h (см. рисунок 3) существенно влияет на направление воздушных потоков в пневматическом канале окончательной аспирации. Его значение в $4\ \text{см}$ обеспечивает возможность работы канала на максимальной удельной производительности $666\ \text{кг}/(\text{см} \cdot \text{ч})$ с минимальными подсосами воздуха в $7,7\ \%$ от количества воздуха, поступающего в канал, что обеспечивает оптимальную с точки зрения эффективности очистки скорость воздуха в канале ($5,5\ \text{м}/\text{с}$). Однако при понижении удельной производительности до $222\ \text{кг}/(\text{ч} \cdot \text{см})$ при зазоре в $4\ \text{см}$ подсосы увеличиваются до $22,18\ \%$, а скорость воздуха падает до $4,56\ \text{м}/\text{с}$.

На основании проведенных исследований установлены места и основные причины подсосов воздуха в аспирационную систему МУЗ-16:

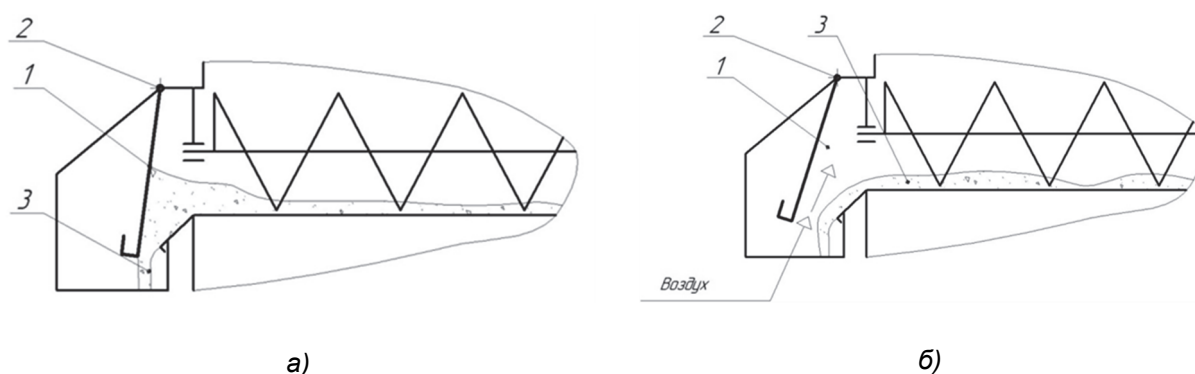
1) подсосы воздуха через выход примесей осадочных камер, которые связаны конструкцией заслонки, установленной у данных выходов (рисунок 4). Заслонка, закрывающая выход и предотвращающая подсос воздуха в осадочную камеру, должна находиться в вертикальном положении, незначительно отклоняясь от него под действием примесей, выталкиваемых шнеком из камеры. Однако при анализе работы МУЗ-16 в ООО «Божедары» отмечено заедание петли заслонки и ее тугой ход, что приводит к подсосу воздуха (см. рисунок 4, б);

2) подсосы воздуха через входы зерновой смеси в пневматический канал окончательной аспирации обусловлены увеличенным зазором между передней стенкой пневматического канала и пластиной для поступления зерна в канал $h = 95\ \text{мм}$;

3) неудачное расположение заборной решетки для поступления воздуха в пневматический канал окончательной аспирации, обладающей высоким сопротивлением.

Для устранения подсосов воздуха и, как следствие, повышения эффективности работы аспирационной системы зерноочистительной машины МУЗ-16 в ее конструкцию необходимо внести следующие изменения:

1) оснастить заслонки, установленные на выходе примесей из осадочных камер, грузом-противовесом, а также изменить конструкцию петли для предотвращения заедания (рисунок 5). После сборки и при дальнейшей эксплуатации необходимо следить, чтобы заслонка легко перемещалась от руки, заедание недопустимо;



1 — заслонка; 2 — петля; 3 — примеси

Рисунок 4. — Конструкции выхода примесей из осадочных камер: а — схема при нормальной работе заслонки; б — схема работы при заедании петли или тугом ходе заслонки

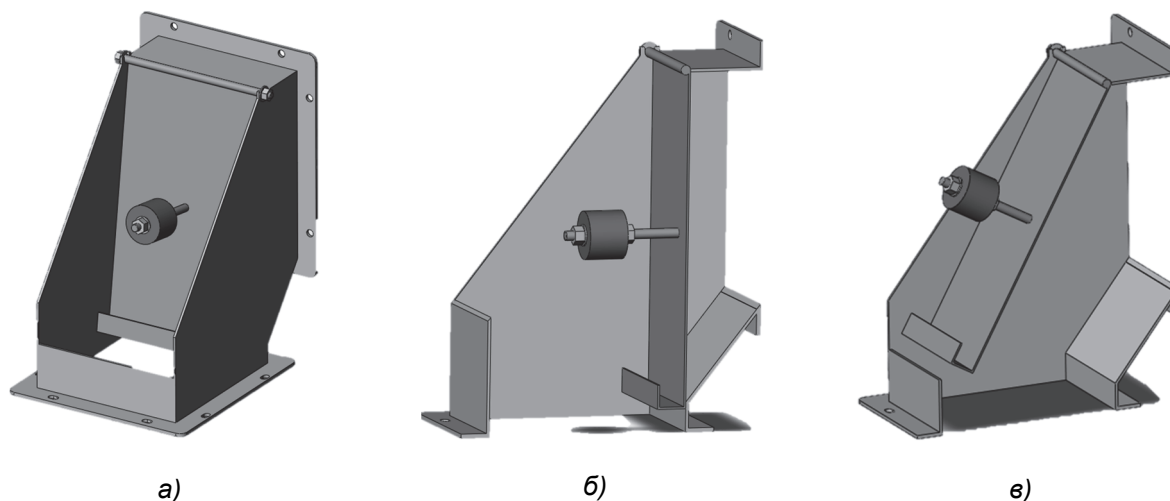
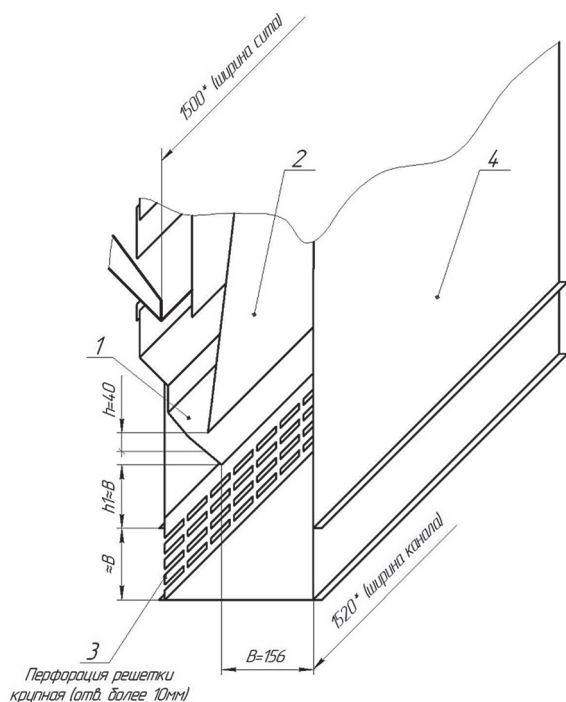


Рисунок 5. — Усовершенствованная конструкция заслонки, установленной на выходе примесей из осадочных камер: а — общий вид; б — положение «закрыто»; в — положение «открыто»

2) зазор между передней стенкой пневматического канала окончательной аспирации и пластиной для поступления зерна в канал h должен составлять 40, а не 95 мм, как в базовом варианте, что обеспечит работу при производительности в 100 т / ч. Величина подсоса через зазор h при минимальной производительности машины в 16 т / ч составит 25 % от воздуха, необходимого для работы пневматического канала окончательной аспирации, или 10 % от воздуха, поступающего в аспирационную систему, что необходимо учитывать при проектировании и подборе вентилятора;



1 — пластина для поступления зерна в канал; 2 — передняя стенка канала; 3 — заборная решетка для воздуха; 4 — задняя стенка аспирационного канала; B — глубина пневматического канала

Рисунок 6. — Схема размещения основных элементов усовершенствованного пневматического канала окончательной аспирации МУЗ-16

3) заборная решетка для поступления воздуха в пневматический канал окончательной аспирации должна размещаться ниже кромки пластины для поступления зерна в канал на расстоянии $h_1 \approx B$, где B — глубина пневматического канала. Высота решетки также должна соответствовать глубине канала, а задняя стенка 4 быть прямолинейной, без изгибов.

Рекомендуемые параметры пневматического канала окончательной аспирации зерноочистительной машины МУЗ-16 представлены на рисунке 6.

На основе представленных рекомендаций конструкторским отделом ЗАО «Борисовский завод «Металлист»» разработана конструкторская документация для изготовления опытного образца зерноочистительной машины МУЗ-16 с усовершенствованной аспирационной системой.

Заклучение. На основании результатов экспериментальных исследований работы аспирационной системы зерноочистительной машины МУЗ-16, проведенных в производственных условиях и на лабораторном макете пневматического канала окончательной аспирации, были выявлены основные причины снижения эффективности ее работы и разработаны рекомендации для их устранения. Конструкторским отделом ЗАО «Бори-

совский завод «Металлист»» разработана конструкторская документация для изготовления опытного образца зерноочистительной машины МУЗ-16 с усовершенствованной аспирационной системой, испытания которого позволят оценить эффективность предложенных решений и целесообразность их использования в серийном производстве.

Работа выполнена в рамках договора на выполнение НИОКР с ЗАО «Борисовский завод «Металлист»» от 15.09.2023 № ВНК-0923.

Список цитированных источников

1. Сычугов, Н. П. Машины, агрегаты и комплексы послеуборочной обработки зерна и семян трав : монография / Н. П. Сычугов, Ю. В. Сычугов, В. И. Исупов. — Киров : ВЕСИ, 2015. — 404 с.
2. Поздняков, В. М. Повышение эффективности подготовки семенного материала на основе совершенствования конструкции сепаратора вибропневматического принципа действия / В. М. Поздняков, С. А. Зеленко, А. И. Ермаков // Вестн. БГСХА. — 2014. — № 1. — С. 163—167.
3. Two-aspiration air-sieve grain cleaning machines of new generation / V. I. Orobinsky [et al.] // IOP Conf. Ser. Earth and Environmental Science. — 2022. — Т. 954, no. 1. — С. 12—26.
4. Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain / P. Savinyh [et al.] // Proceedings of 17th Intern. Scientific Conf. Engineering for Rural Development Engineering for Rural Development. — 2018. — С. 124—130.
5. Badretdinov, I. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine / I. Badretdinov [et al.] // J. of Appl. Engineering Science. — 2019. — Т. 17, no. 4. — С. 529—534.
6. Иванов, А. В. Повышение эффективности очистки семян злаковых культур от трудноотделимых примесей на основе создания новых конструкций машин / А. В. Иванов, А. И. Ермаков, В. М. Поздняков // Агропанорама. — 2011. — № 3. — С. 20—23.
7. Галкин, А. Д. Машины и оборудование послеуборочной обработки зерна и подготовки семян из влажного комбайнового вороха : рекомендации / А. Д. Галкин, В. Д. Галкин. — Пермь : Прокрость, 2020. — 47 с.
8. Харченко, С. А. Способ повышения эффективности процесса очистки воздушного потока и разработка циклона аспирационных систем зерноочистительных машин / С. А. Харченко, Е. А. Гаек // Механізація с.-г. виробництва. — 2013. — Т. 1, № 135. — С. 87—92.
9. Гаек, Е. А. Сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований в разработанном циклоне аспирационных систем зерноочистительных машин / Е. А. Гаек // Техніч. системи і технології тваринництва. — 2015. — Т. 1, № 157. — С. 203—208.
10. Шафоростов, В. Д. Оптимизация конструктивных параметров подающего устройства воздушно-решётной зерноочистительной машины МВУ-1500 / В. Д. Шафоростов, И. Е. Припоров // Маслич. культуры. — 2012. — № 1 (150). — С. 106—109.

Поступила в редакцию 28.03.2024.

УДК 631.363

А. В. Китун¹, доктор технических наук, профессор,
В. И. Передня², доктор технических наук, профессор,
С. Н. Бондарев³, **И. М. Швед**⁴

^{1,3,4}Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

²Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОЙ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-СМЕСИТЕЛЯ КОРМОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА

Критериями оценки качества работы машин и оборудования для приготовления кормов являются эксплуатационно-технологические показатели: качество выполнения технологического процесса, производительность работы и энергетические показатели.

Измельчение является одним из наиболее важных технологических процессов в кормоприготовлении. Приготовление кормов с использованием современного оборудования сопровождается значительными энергозатратами.

Для измельчения грубых кормов любой влажности, а также измельчения других кормовых компонентов и их перемешивания применяются машины с многоплоскостным измельчающим аппаратом. В этих машинах корма перемещаются в сторону выгрузной камеры, совершая круговые движения по внутренней поверхности рабочей камеры. Во время движения они попадают в рабочую зону лезвия режущих элементов, конструктивно-кинематические параметры которых воздействуют на усилие для резания кормовых компонентов и, как следствие, являются влияющим фактором, изменяющим мощностные показатели установки.

В статье представлены результаты теоретических исследований по определению потребной мощности на привод многоплоскостного измельчающего аппарата многофункционального измельчителя-смесителя кормов с учетом его конструктивных особенностей, физико-механических свойств кормов и возможных колебаний подачи в рабочую камеру кормов.

Ключевые слова: измельчение; ротор; смеситель; нож; динамический режим; камера; момент инерции; транспортер.

Рис. 3. Библиогр.: 3 назв.

A. V. Kitun¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
V. I. Perednya², DSc in Technical Sciences, Professor,
S. N. Bondarev³, **I. M. Shved**³

^{1,3,4}Institution of Education “Belarusian State Agrarian Technical University”, 99 Nezavisimosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

²Republican Unitary Enterprise “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization”, 1 Knorina Str., 220049 Minsk, the Republic of Belarus

REQUIRED POWER DETERMINATION FOR THE DRIVE VERTICAL FEED SHREDDER-MIXER

The criteria for assessing the work quality of machines and equipment for preparing feed are operational and technological indicators: the quality of the technological process, work productivity and energy indicators. Grinding is one of the most important technological processes in feed preparation. Preparing feed using modern equipment is accompanied by significant energy consumption. At present, the issues of feed grinding mechanization have not yet been sufficiently resolved.

For grinding roughage of any moisture content, as well as grinding other feed components and mixing them, machines with a multiplane grinding apparatus are used. In a chopper with a multiplane grinding apparatus, feed moves towards the unloading chamber, making circular movements along the inner surface of the working chamber. During movement, they enter the working zone of the cutting elements blade, the design and kinematic parameters of which influence the force applied to grind the feed components entering the working chamber and, as a result, are an influencing factor that changes the power indicators of the installation.

The article presents the results of theoretical studies to determine the required power for the multifunctional shredder-mixer drive of feed, taking into account its design features, physical and mechanical properties of feed and possible fluctuations in feed supply to the working chamber.

Key words: grinding; rotor; mixer; knife; dynamic mode; chamber; moment of inertia; conveyor.

Fig. 3. Ref.: 3 titles.

Введение. Для измельчения грубых стебельчатых кормов и корнеклубнеплодов используются ножевые и молотковые рабочие органы. Достоинствами ножевых рабочих органов являются малый удельный расход энергии при лучшем качестве измельчения и возможность измельчать корма любой влажности.

Перечисленные преимущества предопределили наибольшее применение для измельчения корнеклубнеплодов и стебельчатых кормов ножевых рабочих органов, которые могут быть установлены в вертикально или горизонтально расположенной рабочей камере.

Преимуществом измельчителей с вертикально расположенной рабочей камерой является возможность автоматизировать процесс подачи кормов в камеру измельчения и выгрузку готового продукта.

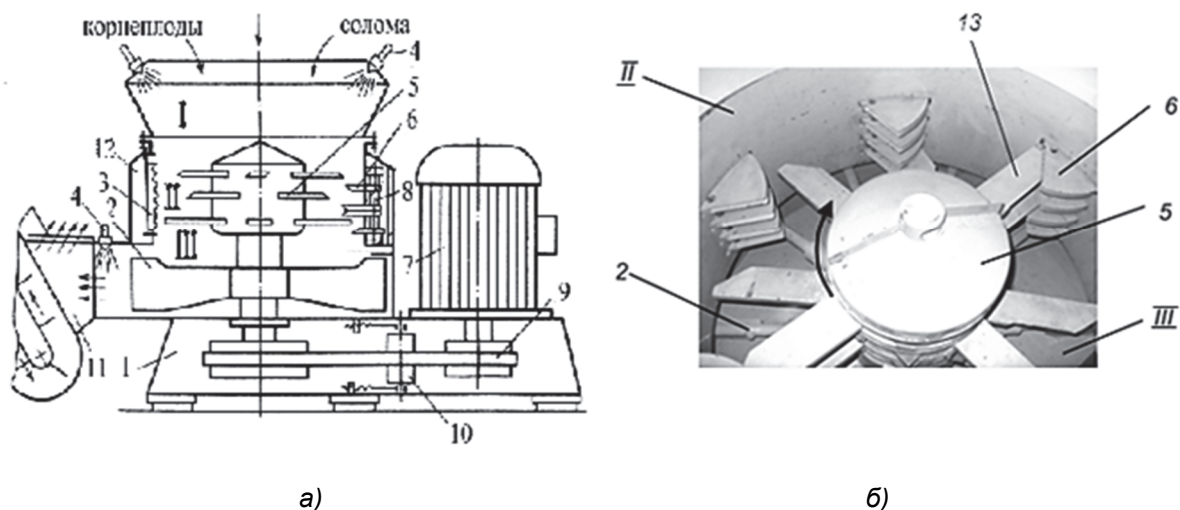
Таким образом, при проектировании машин для измельчения кормов в вертикальном потоке необходимо учитывать параметры, определяющие величину затрат энергии на рабочий процесс машины. Данный показатель обуславливает выбор электродвигателя для привода измельчителя кормов вертикального типа.

Материалы и методы исследования. Измельчитель-смеситель кормов ИСК-3 состоит из вертикально расположенных одна над другой приемной I, измельчения и смешивания (рабочей) II и выгрузной III камер (рисунок 1).

Рабочая камера II имеет шесть окон, в которых устанавливают пакеты ножей-противорезов 6 и (или) зубчатые деки 3. Окна закрывают с наружной стороны кожухами 12. Внутри рабочей камеры II соосно расположен ротор 5.

Ротор 5 измельчителя-смесителя кормов расположен вертикально, на нем закреплены четыре яруса ножей. В каждом ярусе расположено по четыре ножа. Ножи каждого нижнего яруса смещены на 45° относительно ножей верхнего яруса. Расположение ножей по указанным на рисунке 2 схемам позволяет равномерно распределить корма по периметру рабочей камеры и организовать их перемещение в выгрузную камеру по винтовой линии. Изложенный режим позволяет исключить неравномерную нагрузку на ротор и обеспечить оптимальный энергетический режим работы измельчителя.

В рабочем режиме ножи 13 и ножи-противорезы 6 (см. рисунок 1) образуют режущие пары. При работе измельчителя-смесителя корма загружаются в камеру I и попадают в зону взаимодействия ножей-противорезов 6 с ножами ротора 5, где измельчаются и равномерно



1 — приемная камера; II — камера измельчения и смешивания; III — выгрузная камера; 1 — рама; 2 — швырялка; 3 — зубчатая дека; 4 — форсунка; 5 — ротор; 6 — нож-противорез; 7 — электродвигатель; 8 — ось блока противорезов; 9 — клиноременной привод; 10 — ролик; 11 — выгрузной транспортер; 12 — кожух; 13 — нож ротора

Рисунок 1. — Измельчитель-смеситель ИСК-3; а — схема и общий вид измельчителя-смесителя кормов ИСК-3; б — вид сверху

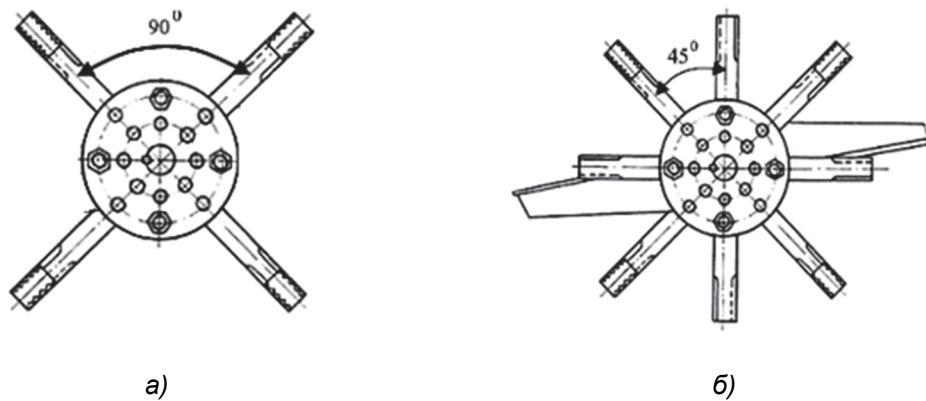


Рисунок 2. — Схемы расположения ножей на роторе измельчителя-смесителя кормов ИСК-3: а — расположение смежных ножей в ярусе ротора; б — расположение ножей относительно смежных ярусов ротора

распределяются по периметру рабочей камеры. Затем частицы кормов увлекаются на гладкий участок внутренней поверхности камеры и под действием силы тяжести по спирали несколько перемещаются вниз.

В нижней части вала 5 ротора, расположенной в выгрузной камере, находится швырляка 2, которая транспортирует кормосмесь в приемный транспортер.

Таким образом, необходимо определить затраты энергии на рабочий процесс в рабочей и выгрузной камерах.

Результаты исследования и их обсуждение. Мощность, затрачиваемая на резание корма в вертикальном потоке, определим на примере конструкции измельчителя-смесителя кормов вертикального типа ИСК-3.

Из перечисленных составляющих камер ИСК-3 корм подвергается механическому воздействию в рабочей II и выгрузной III камерах. Следовательно, потребную мощность на привод измельчителя-смесителя кормов вертикального типа определим по формуле

$$N_{\text{дв}} = N_{\text{изм}} + N_{\text{выгр}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{изм}}$ — мощность, затрачиваемая на измельчение корма в рабочей камере, кВт;

$N_{\text{выгр}}$ — мощность, затрачиваемая на транспортировку корма в выгрузной камере, кВт.

Попадая в рабочую камеру, корм под действием гравитационной силы перемещается вниз и встречает на своем пути грани расположенных последовательно в вертикальной плоскости ножей 5 и ножей-противорезов 6 [1].

Следовательно, при работе измельчителя-смесителя кормов вращающийся ротор можно рассматривать как маховик, вращающийся относительно неподвижной оси под действием момента $M_{\text{дв}}$ с угловой скоростью ω . В этом случае уравнение привода ротора в динамическом режиме будет иметь следующий вид:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_{\text{с}},$$

где $I \frac{d\omega}{dt}$ — момент инерции ротора измельчителя-смесителя, Н · м;

$M_{\text{дв}}$ — момент, возникающий от электродвигателя, Н · м;

$M_{\text{с}}$ — момент сопротивления вращению ротора, Н · м.

Для привода системы на вращение затрачивается мощность, величину которой можно определить по формуле

$$N_{\text{изм}} = M_{\text{дв}} \omega,$$

где ω — частота вращения ротора, с^{-1} .

Для определения мощности, необходимой для привода ротора измельчителя, следует определить момент, возникающий от электродвигателя. Для этого уравнение привода ротора в динамическом режиме представим в следующем виде:

$$M_{\text{дв}} = I \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{с}}. \quad (2)$$

Определим составляющие уравнения (2).

Сопротивление движению ротора возникает:

- при измельчении кормов $M_{\text{изм}}$;
- при перемещении кормов внутри рабочей камеры $M_{\text{движ}}$;
- на преодоление трения в подшипниках;
- на преодоление сопротивления воздуха.

В общем виде рассмотренные моменты можно представить в следующем виде:

$$M_{\text{с}} = M_{\text{изм}} + M_{\text{движ}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{воз}}. \quad (3)$$

Анализ уравнения (3) показывает, что два последних слагаемых $M_{\text{тр}}$ и $M_{\text{воз}}$ в измельчителе-смесителе вертикального типа будут оказывать небольшое влияние на сопротивление движению системы. В измельчителях этого типа узлы трения размещены за пределами рабочей камеры и надежно изолированы от попадания пыли или других примесей. Горизонтальное расположение боковых плоскостей ножей и небольшая толщина оказывают минимальное сопротивление воздушному потоку.

Таким образом, с принятыми допущениями уравнение (2) будет иметь вид:

$$M_{\text{дв}} = I \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{изм}} + M_{\text{движ}}. \quad (4)$$

При работе измельчителя-смесителя кормов происходит изменение подачи кормовых компонентов в рабочую камеру. В результате колебания поступающих кормов возможно возрастание момента при измельчении кормов [2], т. е.

$$M_{\text{изм}} = M'_{\text{изм}} + \Delta M_{\text{изм}}. \quad (5)$$

где $M'_{\text{изм}}$ — момент при измельчении кормов, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

$\Delta M_{\text{изм}}$ — приращение момента при колебании поступающих кормов в рабочую камеру, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Момент, возникающий при измельчении корма, выразим через удельный расход энергии:

$$M'_{\text{изм}} = (\omega, q, f, t) = \frac{A_{\text{уд. изм}}(\omega, q, f, t)}{\omega} q, \quad (6)$$

где $A_{\text{уд. изм}}$ — удельный расход энергии на измельчение и смешивание кормов, $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$;

ω — частота вращения ротора, с^{-1} ;

q — производительность измельчителя-смесителя, $\text{кг} / \text{с}$;

f — коэффициент трения;

t — время, затрачиваемое на выполненный процесс, с.

Величину приращения момента $\Delta M_{\text{изм}}$ можно определить по формуле

$$\Delta M_{\text{изм}} = \frac{\Delta A(\omega, q, f, t)}{\omega} (q + \Delta q), \quad (7)$$

где Δq — величина изменения производительности измельчителя-смесителя кормов в процессе работы, кг / с.

В уравнении (7) приращение удельных затрат энергии на измельчение и смешивание кормов при незначительных изменениях независимых переменных можно определить по формуле

$$\Delta A = \frac{dF(\omega, q, f)}{dq} \Delta q - \frac{dF(q, \omega, f)}{d\omega} \Delta \omega + \frac{dF(q, \omega, f)}{df} \Delta f$$

или

$$\Delta A = K_q \Delta q - K_\omega \Delta \omega + K_f \Delta f, \quad (8)$$

где Δq — величина изменения производительности измельчителя-смесителя кормов, кг / с;

$\Delta \omega$ — величина изменения частоты вращения ротора, с⁻¹;

Δf — величина изменения коэффициента трения.

K_q, K_ω, K_f — приращение частных производных исходного режима работы измельчителя-смесителя кормов;

Подставив в формулу (5) значения (6)—(8), определим момент сопротивления при измельчении кормов:

$$M_{\text{изм}} = \frac{KA_{\text{уд. изм}}}{\omega} q + \left(\frac{K_q \Delta q}{\omega} - \frac{K_\omega \Delta \omega}{\omega} + \frac{K_f \Delta f}{\omega} \right) (q + \Delta q)$$

или, упростив,

$$M_{\text{изм}} = \omega^{-1} \left[A_{\text{уд. изм}} q + (K_q \Delta q - K_\omega \Delta \omega + K_f \Delta f) (q + \Delta q) \right]. \quad (9)$$

Момент, затрачиваемый на ускорение корма в рабочей камере, представим в виде:

$$M_{\text{движ}} = M'_{\text{движ}} + \Delta M_{\text{движ}},$$

где $M'_{\text{движ}}$ — момент, затрачиваемый на ускорение корма, Н · м;

$\Delta M_{\text{движ}}$ — приращение момента, затрачиваемого на ускорение корма в рабочей камере измельчителя, Н · м.

Момент

$$M'_{\text{движ}}(\omega, q, t) = \frac{m(\omega, q) v_{\text{ск}}^2(\omega, q, t)}{2}, \quad (10)$$

где m — масса корма в рабочей камере, кг;

$v_{\text{ск}}$ — скорость слоя корма в рабочей камере, м / с.

В рабочей камере измельчителя вертикального типа корм действием ножей увлекается в круговое движение и под действием силы тяжести перемещается в выгрузную камеру. Таким образом, частицы корма в рабочей камере совершают равномерное винтовое движение, скорость которого можно определить по формуле

$$v_{\text{ск}} = \frac{S_{\text{ч}} \omega_{\text{ч}}}{2\pi},$$

где $S_{\text{ч}}$ — шаг винтовой линии движения частиц корма, м;

$\omega_{\text{ч}}$ — угловая скорость частиц корма в рабочей камере измельчителя, с^{-1} .

Шаг винтовой линии движения частиц корма в измельчителе вертикального типа можно определить по формуле [3]

$$S_{\text{ч}} = \frac{\pi D_{\text{к}} H_{\text{к}}}{L_{\text{ч}}},$$

где $D_{\text{к}}$ — диаметр рабочей камеры измельчителя, м;

$H_{\text{к}}$ — высота рабочей зоны камеры измельчителя, м;

$L_{\text{ч}}$ — путь частиц корма в рабочей камере, м.

Тогда скорость движения корма внутри рабочей камеры можно определить по формуле

$$v_{\text{ск}} = \frac{D_{\text{к}} H_{\text{к}} \omega_{\text{ч}}}{2L_{\text{ч}}}.$$

Подставляя в формулу (10) значение (11), можно определить момент, затрачиваемый на ускорение корма в рабочей камере измельчителя-смесителя вертикального типа:

$$M_{\text{движ}} = \frac{m (D_{\text{к}} H_{\text{к}} \omega_{\text{ч}})^2}{4L_{\text{ч}}^2} + K_{\text{движ } q} \Delta q - K_{\text{движ } \omega} \Delta \omega. \quad (12)$$

Приращение момента, затрачиваемого на ускорение корма, зависит от колебания массы корма в рабочей камере:

$$m = F(q, \omega)$$

или приращение

$$\Delta M_{\text{движ}} = \frac{dF(q, \omega)}{dq} \Delta q - \frac{dF(q, \omega)}{d\omega} \Delta \omega. \quad (13)$$

Упростив уравнение (13), получим

$$\Delta M_{\text{движ}} = K_{\text{движ } q} \Delta q - K_{\text{движ } \omega} \Delta \omega.$$

Момент инерции ротора измельчителя в общем виде можно определить по формуле

$$I \frac{d\omega}{dt} = \omega^2 \sum_{i=1}^n m_p r_p^2, \quad (14)$$

где ω — частота вращения ротора измельчителя, с^{-1} ;

m_p — масса ротора, кг;

r_p — радиус инерции i -го элемента ротора относительно оси вращения, м.

Удельный расход энергии на измельчение и смешивание кормов

$$A_{\text{уд.изм}} = \frac{A_{\text{изм}}}{m},$$

где $A_{\text{изм}}$ — работа, затрачиваемая на преодоление сопротивления резанию корма, Дж.

Для определения работы, затрачиваемой на преодоление сопротивления резанию корма, рассмотрим силы, возникающие при выполнении данного процесса.

При движении ножа в рабочем режиме слой корма, находящийся между ножом и противорезом, сжимается. Силу сжатия корма для этого случая найдем по формуле

$$F_{\text{обж}} = \mu \frac{E h_{\text{сж}}^2}{2 \Delta_1},$$

где μ — коэффициент Пуассона;

E — модуль деформации корма, $\text{Н} / \text{м}^2$;

$h_{\text{сж}}$ — величина сжатого слоя корма, м;

Δ_1 — зазор между ножом и противорезом, м.

Работа, затрачиваемая на преодоление силы $F_{\text{обж}}$, определяется по формуле

$$A_{\text{тр1}} = \mu \frac{E h_{\text{сж}}^2}{2 \Delta_1} f_k l_{\text{н.пр}},$$

где f_k — коэффициент трения корма по металлу;

$l_{\text{н.пр}}$ — длина ножа, движущегося над плоскостью противореза, м.

В процессе работы измельчителя корм поступает в зазор между внутренней поверхностью рабочей камеры и ножом. В результате возникает горизонтально направленная сила обжатия, величину которой можно рассчитать по формуле

$$F_{1\text{обж}} = \mu \frac{E h_{\text{сж}}^2}{\Delta_2},$$

где Δ_2 — зазор между внутренней поверхностью рабочей камеры и ножом, м.

Работу, затрачиваемую на преодоление силы обжатия $F_{1\text{обж}}$, можно найти по формуле

$$A_{\text{тр2}} = \mu \frac{E h_{\text{сж}}^2}{\Delta_2} f_k b_n.$$

При резании корма лезвием ножа на его активной части возникает критическая сила резания, работу, затрачиваемую на ее преодоление, можно определить по формуле

$$A_{\text{кр.рез}} = F_{\text{рез}} l_{\text{лезв}},$$

где $F_{\text{рез}}$ — сила резания, Н;

$l_{\text{лезв}}$ — длина активной части лезвия ножа, м.

Сопротивление резанию $F_{рез}$ состоит из силы, связанной с преодолением сопротивления слоя материала сжатию $F_{1сж}$, силы непосредственного резания $F_{1рез}$, т. е.

$$F_{рез} = F_{1рез} + F_{1сж}.$$

Сопротивление резанию

$$F_{1рез} = \delta l_{лезв} \sigma_p,$$

где δ — толщина (острота) лезвия ножа, м;
 σ_p — разрушающее контактное напряжение, Н / м².
 Сила сжатия на фаске ножа

$$F_{1сж} = \frac{ES_n h_{сж}}{h},$$

где E — модуль деформации корма, Н / м²;
 S_n — площадь лезвия ножа, участвующая в сжатии, м²;
 $h_{сж}$ — величина сжатия корма, м;
 h — толщиной слоя корма, м.

Тогда работа, затрачиваемая на преодоление критической силы резания,

$$A_{кр.рез} = \left(\delta l_{лезв} \sigma_p + \frac{ES_n h_{сж}}{h} \right) l_{лезв}. \quad (15)$$

Подставив в формулу (4) значение формул (9), (12), (14) и (15), определим мощность, затрачиваемую на привод ротора измельчителя при выполнении технологического процесса измельчения:

$$N_{изм} = \omega^{-1} \left[\frac{\left(\delta l_{лезв} \sigma_p + \frac{ES_n h_{сж}}{h} \right) l_{лезв}}{m} A_{уд.изм} q + (K_q \Delta q - K_\omega \Delta \omega + K_f \Delta f) (q + \Delta q) \right] + \frac{m(D_k H_k \omega_c)^2}{4L_q^2} + K_{двиг. q} \Delta q - K_{двиг. \omega} \Delta \omega + \omega^2 \sum_{i=1}^n m_p r_p^2. \quad (16)$$

Формула (16) позволяет определить мощность на привод ротора измельчителя в режиме измельчения корма с учетом его конструктивных особенностей, физико-механических свойств кормов и возможных колебаний подачи кормов в рабочую камеру.

Выгрузная камера III измельчителя-смесителя ИСК-3 представляет собой цилиндр с выгрузным окном, соединенным с трубопроводом. Для транспортировки сыпучего материала внутри камеры на роторе 5 установлена швырляка 2 (см. рисунок 1). Во время работы измельчителя материал под действием гравитационной силы поступает на лопасти швырляки и перемещается вдоль ее оси ко внутренней поверхности цилиндра. Достигнув выгрузного окна, частицы материала лопастями швырляки выбрасываются в трубопровод.

Мощность, затрачиваемую на транспортировку корма в рабочей камере ИСК-3, в общем виде можно определить по формуле

$$N_{выгр} = Q_{ш} \omega_{ш} R^2, \quad (17)$$

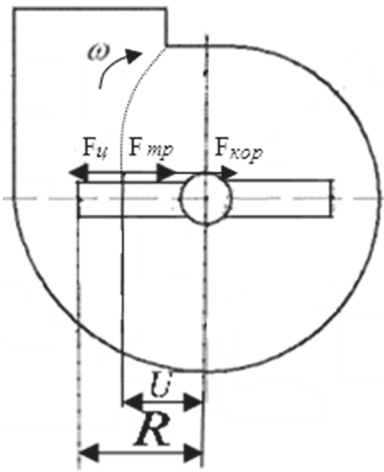


Рисунок 3. — Схема к определению производительности выгрузной камеры измельчителя-смесителя ИСК-3

где $Q_{ш}$ — производительность швырляки, кг / с;
 $\omega_{ш}$ — угловая скорость лопасти швырляки, c^{-1} ;
 R — радиус лопастей швырляки, м.

Для определения производительности швырляки рассмотрим перемещения корма внутри выгрузной камеры. Так, момент схода частиц материала начинается на некотором расстоянии U от края лопасти (рисунок 3).

Производительность вентилятора есть величина, пропорциональная изменению разности $R - U$, т. е.

$$Q_{ш} = b(R^2 - U^2)\rho\omega_{ш}, \quad (18)$$

где b — ширина лопасти, м;
 R — радиус, описываемый лопастью, м;
 U — расстояние до момента схода частиц материала с лопасти в рабочей зоне выгрузного окна, м;
 ρ — плотность материала, $кг / м^3$;
 $\omega_{ш}$ — угловая скорость лопасти, c^{-1} .

Определим расстояние до момента схода частиц материала с лопасти. Для этого рассмотрим силы, действующие на частицу материала в момент схода ее с лопасти:

1) сила тяжести —

$$G = mg,$$

где m — частицы материала, кг;

g — ускорения свободного падения, $м / с^2$;

2) сила трения частицы материала о плоскость лопасти —

$$F_{тр} = fG, \quad (19)$$

где f — коэффициент трения;

3) центробежная сила —

$$F_{ц} = m\omega_{ш}^2 U;$$

4) сила Кориолиса —

$$F_{кор} = 2f m \omega_{ш} \frac{dU}{dt}, \quad (20)$$

где $\frac{dU}{dt}$ — скорость перемещения частицы по плоскости лопасти в радиальном направлении, $м / с$;

t — время перемещения частицы корма по плоскости лопасти в радиальном направлении, с.

С учетом формул (19) и (20) определим силу трения частицы материала о плоскость лопасти:

$$F_{тр.л} = f(F_{тр} + F_{кор}).$$

Тогда с учетом перечисленных сил получим дифференциальное уравнение относительного движения частицы корма по лопасти:

$$-m \frac{d^2 U}{dt^2} + m\omega_{ш}^2 U - f \left(2m\omega_{ш} \frac{dU}{dt} + fmg \right) - fmg = 0.$$

После преобразования дифференциальное уравнение относительного движения частицы корма по лопасти имеет вид:

$$\frac{d^2U}{dt^2} + 2f\omega_m \frac{dU}{dt} - \omega_m^2 U = f. \quad (21)$$

Полученное выражение (21) представляет собой полное дифференциальное уравнение второго порядка. Полное решение этого уравнения равно сумме общего линейного и частного уравнения.

Общее решение неполного дифференциального уравнения:

$$U_1 = C_1 e^{\left(f\omega_m + \omega_m \sqrt{f^2+1}\right)t} + C_2 e^{\left(f\omega_m - \omega_m \sqrt{f^2+1}\right)t}, \quad (22)$$

где C_1, C_2 — производные постоянной интегрирования.

Частное решение уравнения (21) ищем в подобии правой части $U_2 = C$. Отсюда $\frac{d^2U}{dt^2} = 0$ и $\frac{dU}{dt} = 0$. Тогда уравнение (21) будет иметь вид: $0 + 0 - \omega_m^2 C = f$. Откуда $C = -\frac{f}{\omega_m^2}$.

Искомое решение уравнения (22) будет иметь вид:

$$U = U_1 + U_2 = C_1 e^{\left(f\omega_m + \omega_m \sqrt{f^2+1}\right)t} + C_2 e^{\left(f\omega_m - \omega_m \sqrt{f^2+1}\right)t} - \frac{f}{\omega_m^2}. \quad (23)$$

При начальных условиях $t = 0; \frac{dU}{dt} = 0; U = 0$ получим

$$\begin{cases} U_0 = C_1 + C_2 - \frac{f}{\omega_m^2} = 0; \\ U_0 = C_1 \omega_m (f + \sqrt{f^2+1}) + C_2 \omega_m (f - \sqrt{f^2+1}) = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Решая систему (24), получим

$$\begin{cases} C_1 = \frac{f}{\omega_m^2} \left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2+1}}{2\sqrt{f^2+1}}\right); \\ C_2 = f \frac{(f + \sqrt{f^2+1})}{2 \omega_m^2 \sqrt{f^2+1}}. \end{cases} \quad (25)$$

Полученные значения (25) подставим в уравнение (23):

$$U = \frac{f}{\omega_m^2} \left[\left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2+1}}{2\sqrt{f^2+1}}\right) e^{t\omega_m(f + \sqrt{f^2+1})} + \left(\frac{f + \sqrt{f^2+1}}{2\sqrt{f^2+1}}\right) e^{t\omega_m(f - \sqrt{f^2+1})} - 1 \right]. \quad (26)$$

Подставив значения (26) в уравнение (18), определим производительность вентилятора:

$$Q_{\text{ш}} = b \left(R^2 - \left(\frac{f}{\omega_{\text{ш}}^2} \left[\left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f + \sqrt{f^2 + 1})} + \left(\frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f - \sqrt{f^2 + 1})} - 1 \right] \right)^2 \right) \rho \omega_{\text{ш}}. \quad (27)$$

Из формулы (27) видно, что производительность швырялки зависит от конструктивных особенностей лопастей и физико-механических свойств транспортируемого материала.

Увеличить производительность вентиляционного пневмотранспортного оборудования можно, уменьшив силу трения материала между лопастями и внутренней поверхностью цилиндрического корпуса.

Подставив в уравнение (17) формулу (27), определим мощность, затрачиваемую на транспортировку корма в рабочей камере ИСК-3:

$$N_{\text{выгр}} = b \left(R^2 - \left(\frac{f}{\omega_{\text{ш}}^2} \left[\left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f + \sqrt{f^2 + 1})} + \left(\frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f - \sqrt{f^2 + 1})} - 1 \right] \right)^2 \right) \rho \omega_{\text{ш}}^3 R^2. \quad (28)$$

Из формулы (28) видно, что мощность, затрачиваемая на транспортировку корма в рабочей камере ИСК-3, зависит от конструктивных параметров выгрузной камеры и физико-механических свойств корма.

Подставив в уравнение (1) формулы (16) и (28), определим мощность на привод измельчителя-смесителя кормов вертикального типа:

$$N_{\text{дв}} = \omega^{-1} \left[\frac{\left(\delta l_{\text{лезв}} \sigma_p + \frac{ES_{\text{н}} h_{\text{сж}}}{h} \right) l_{\text{лезв}}}{m} A_{\text{уд. изм}} q + (K_q \Delta q - K_{\omega} \Delta \omega + K_f \Delta f)(q + \Delta q) \right] + \\ + \frac{m(D_{\text{к}} H_{\text{к}} \omega_{\text{ч}})^2}{4L_{\text{ч}}^2} + K_{\text{движ } q} \Delta q - K_{\text{движ } \omega} \Delta \omega + \omega^2 \sum_{i=1}^n m_p r_p^2 + N_{\text{выгр}} = \\ = b \left(R^2 - \left(\frac{f}{\omega_{\text{ш}}^2} \left[\left(1 - \frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f + \sqrt{f^2 + 1})} + \left(\frac{f + \sqrt{f^2 + 1}}{2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{i\omega_{\text{ш}}(f - \sqrt{f^2 + 1})} - 1 \right] \right)^2 \right) \rho \omega_{\text{ш}}^3 R^2. \quad (29)$$

Из формулы (29) видно, что мощность на привод измельчителя-смесителя кормов вертикального типа зависит от физико-математических и конструктивно-кинематических параметров машины.

Заключение. Полученная формула (29) показывает, что при определении мощности на привод измельчителя-смесителя кормов вертикального типа необходимо учитывать комплекс показателей:

- рассматривать физико-механические свойства обрабатываемых кормов. Если при выполнении рабочего процесса обработке подвергается одновременно несколько видов кормов с различными физико-механическими свойствами, то удельные затраты энергии на выполняемый процесс будут варьироваться;

- учитывать колебания подачи исходных кормов в рабочую камеру измельчителя-смесителя. В целях исключения перегрузок машины необходимо минимизировать рассматриваемый параметр;

– формировать рабочую и выгрузную камеры для выполнения конкретных задач. Измельчающий аппарат должен обеспечивать обработку кормов в соответствии с заданными зоотехническими требованиями. Швырялка выгрузной камеры должна обеспечивать эвакуацию готового продукта в приемное устройство с учетом колебаний поступления обрабатываемых кормов.

Список цитированных источников

1. *Китун, А. В.* Механизация процесса приготовления и раздачи кормов на скотоводческих фермах на основе многофункциональных модульных агрегатов : монография / А. В. Китун. — Минск : БГАТУ, 2009. — 207 с.
2. *Китун, А. В.* Минимизация энергозатрат в кормоизмельчителе / А. В. Китун, В. И. Передня // Тракторы и с.-х. машины. — 2006. — № 9. — С. 31—32.
3. *Ревенко, И. И.* О зазоре между молотками и рабочей поверхностью дробильной камеры / И. И. Ревенко, К. Ф. Рожковский // Механизация и электрификация социалист. сел. хоз-ва. — 1973. — № 3. — С. 19—21.

Поступила в редакцию 28.03.2024.

УДК 631.363.5

П. Ю. Крупенин¹, кандидат технических наук, доцент,**А. В. Китун²**, доктор технических наук, профессор¹ Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, pavel@krupenin.com² Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, ktmg@batu.edu.by

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОЛЕБАНИЙ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ РОТОРНО-ИМПУЛЬСНЫЙ КАВИТАЦИОННЫЙ АППАРАТ

Роторно-импульсные аппараты применяются для измельчения различных материалов в жидкости, приготовления высокодисперсных суспензий и эмульсий, интенсификации массообменных процессов, гомогенизации и обеззараживания жидкостей. Существует несколько способов расчета параметров роторно-импульсного аппарата, однако для реализации любого из них необходимо знать закономерности движения жидкости как в каналах ротора и статора, так и за пределами аппарата.

Статья посвящена теоретическому исследованию процесса движения жидкости через роторно-импульсный аппарат. В результате исследований выявлена закономерность роста значений амплитуды и периода пульсаций общего расхода жидкости через аппарат по мере увеличения наибольшего общего делителя чисел каналов ротора и статора.

Предложена синусоидальная функция $Q_{\sin}(t)$ для описания изменений мгновенного расхода жидкости Q через роторно-импульсный аппарат. Коэффициентами функции $Q_{\sin}(t)$ являются средний расход жидкости через аппарат, амплитуда и период пульсаций. Методами математической статистики установлено, что функция $Q_{\sin}(t)$ имеет сильную корреляционную связь (коэффициент $r \geq 0,85$) со значениями мгновенного расхода Q и может быть использована для определения параметров потока обрабатываемого материала на входе и выходе из роторно-импульсного аппарата.

Ключевые слова: роторно-импульсный аппарат; кавитация; уравнение Бернулли; метод Рунге—Кутты; теоретические исследования; Mathcad.

Рис. 4. Библиогр.: 13 назв.

P. Y. Krupenin¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**A. V. Kitun²**, DSc in Technical Sciences, Professor¹Institution of Education “Belarusian State Agricultural Academy”,

5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus, pavel@krupenin.com

²Institution of Education “Belarusian State Agrarian Technical University”,

99 Nezalezhnosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, ktmg@batu.edu.by

MATHEMATICAL DESCRIPTION IN THE FLUID FLOW FLUCTUATIONS THROUGH A ROTARY-PULSE CAVITATION APPARATUS

Rotary pulse devices are used for grinding various materials in liquids, preparing highly dispersed suspensions and emulsions, intensifying mass transfer processes, homogenizing and disinfecting liquids. There are several ways to calculate the rotary-impulse apparatus parameters, however, to implement any of them, it is necessary to know the fluid movement patterns both in the rotor and stator channels, and outside the apparatus.

The article is devoted to theoretical studies of fluid movement through a rotary-impulse apparatus. As a result of the research, a growth pattern in the amplitude and period of pulsations of the total fluid flow through the apparatus has been revealed as the greatest common divisor of the numbers of its rotor and stator channels increases.

A sinusoidal function $Q_{\sin}(t)$ to describe the pulsation of liquid flow Q through a rotary-pulse apparatus is proposed. The coefficients of the function $Q_{\sin}(t)$ are the average fluid flow through the apparatus, the amplitude and period of the pulsations. Using mathematical statistics methods, it has been established that the function $Q_{\sin}(t)$ has a strong correlation (coefficient $r \geq 0.85$) with the instantaneous flow rate values Q and can be used to determine the processed material flow parameters at the inlet and outlet of the rotary-impulse apparatus.

Key words: rotary-impulse apparatus; cavitation; Bernoulli equation; Runge—Kutta method; theoretical research; Mathcad.

Fig. 4. Ref.: 13 titles.

Введение. Роторно-импульсные кавитационные аппараты являются эффективным устройством для комплексного воздействия на обрабатываемую среду. Данные устройства применяются для измельчения различных материалов в жидкости, создания высокодисперсных суспензий и эмульсий, интенсификации массообменных процессов, гомогенизации и обеззараживания жидкостей [1]. Вышеперечисленные свойства роторно-импульсных аппаратов могут быть использованы в сельском хозяйстве для приготовления высокодисперсных кормов и кормовых добавок, пастеризации молочного корма для телят, подготовки субстратов для биогазовых комплексов, производства органических и комплексных удобрений [2; 3].

Импульсный, сопровождаемый кавитационными эффектами характер движения жидкой среды в сочетании с режуще-стирающим воздействием рабочих элементов роторно-импульсного аппарата на частицы твердой фазы суспензии обеспечивает комплексную обработку материала, включающую в себя факторы механического, гидроимпульсного и кавитационного воздействий. Существует несколько методик расчета параметров роторно-импульсного аппарата для интенсификации одного или нескольких из перечисленных воздействий на обрабатываемый материал [4—6], однако для применения любой из них необходимо знать закономерности движения жидкости или суспензии по каналам ротора и статора.

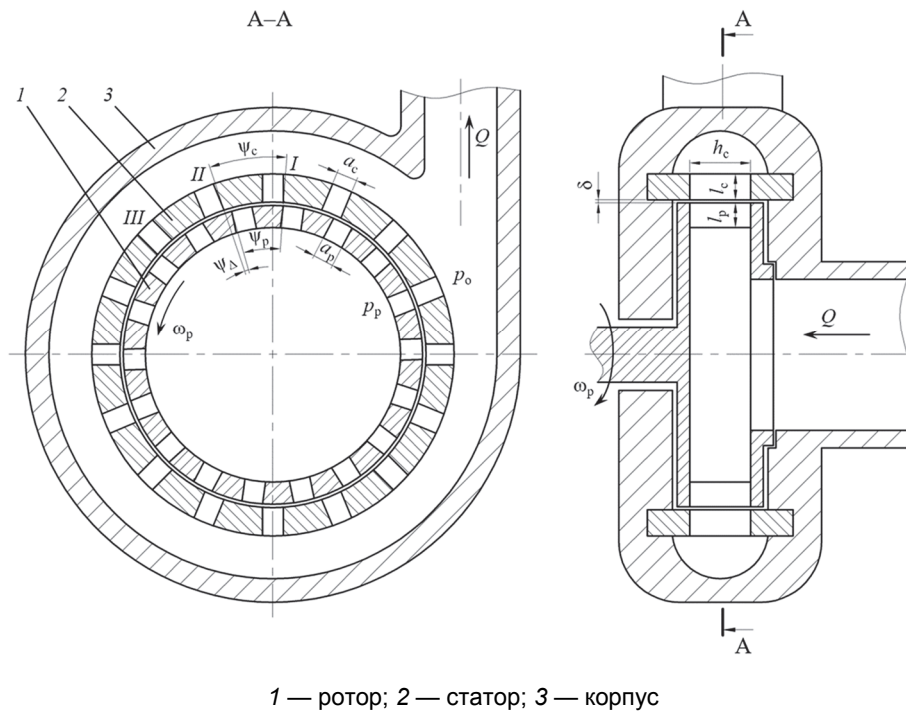
В результате анализа существующих математических моделей, описывающих движение жидкости в рабочих элементах роторно-импульсного аппарата [7; 8], установлено, что значительная их часть получена с существенными допущениями или же имеет узкоспециализированную направленность. Расхождение между расчетными значениями расхода жидкости через диспергатор и экспериментальными данными может составлять 25...40 % [9]. Из этого следует, что вопрос получения адекватной математической модели для теоретического описания процесса движения жидкости через роторно-импульсный кавитационный аппарат остается открытым.

Методология и методы исследования. Принцип работы роторно-импульсного кавитационного аппарата (рисунок 1) заключается в следующем. Обрабатываемая жидкость (суспензия, эмульсия) под давлением p_p подается во входной патрубке и заполняет полость ротора 1. Вращение ротора с угловой скоростью ω_r обеспечивает периодическое соединение и разъединение его каналов с каналами статора 2, в результате чего в каналах создается прерывистое движение жидкости, сопровождаемое пульсациями скорости, расхода и давления.

В качестве базовой математической модели движения жидкости в сообщающихся каналах ротора и статора аппарата может быть принято уравнение Бернулли для неустановившегося потока [10]:

$$\frac{p_p + p_\omega}{\rho} + \frac{u_p(\tau)^2}{2} = \frac{p_o}{\rho} + \frac{u_c(\tau)^2}{2} (1 + \zeta(\tau)) + (l_p + l_c + \delta) \frac{du(\tau)}{d\tau}, \quad (1)$$

- где p_p — абсолютное давление в полости ротора, Па;
 p_ω — прирост давления за счет раскрутки жидкости в каналах ротора, Па;
 $u_p(\tau), u_c(\tau)$ — скорость жидкости на входе в канал ротора и на выходе из канала статора соответственно, м / с;
 ρ — плотность жидкости, кг / м³;
 p_o — абсолютное давление в рабочей камере статора, Па;
 $\zeta(\tau)$ — обобщенный коэффициент гидравлического сопротивления каналов ротора и статора;
 l_p, l_c — длина каналов ротора и статора, м;
 δ — радиальный зазор между ротором и статором, м.



1 — ротор; 2 — статор; 3 — корпус

Рисунок 1. — Конструктивно-технологическая схема роторно-импульсного аппарата

Результаты исследования и их обсуждение. Для решения дифференциального уравнения (1) может использоваться численный метод Рунге—Кутты 4-го порядка [10; 11], в результате чего получают матрицу значений скорости потока жидкости в канале статора $u_{p-к}$. Результат расчета значений скорости $u_{p-к}$ при таких конструктивно-технологических параметрах роторно-импульсного аппарата, как $l_p = 17,5 \cdot 10^{-3}$ м, $l_c = 16,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\delta = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м, $p_p = 0,27 \cdot 10^6$ Па, $p_0 = 0,1 \cdot 10^6$ Па, $p_\omega = 0,12 \cdot 10^6$ Па, $\rho = 1\ 000$ кг / м³, представлен на рисунке 2.

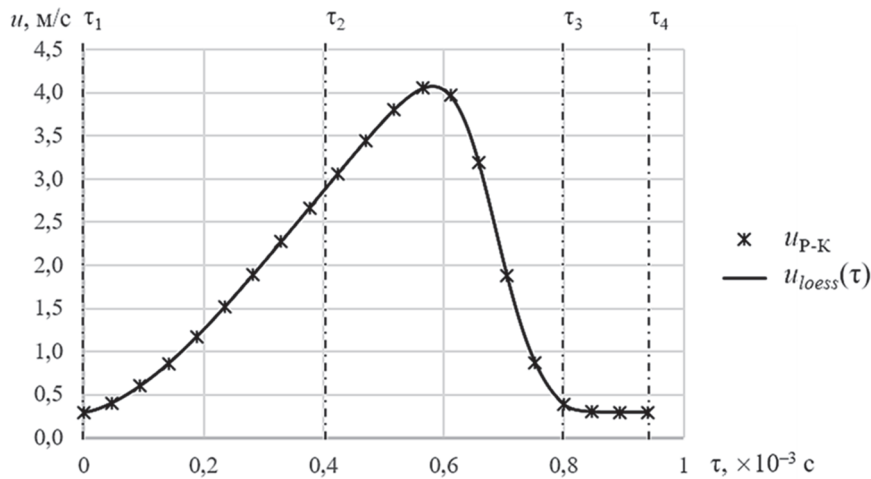


Рисунок 2. — Зависимость скорости u от относительного времени τ

На графике (см. рисунок 2) можно выделить четыре ключевых момента относительного времени τ : $\tau = \tau_1$ — начало цикла, соответствующее моменту начала совмещения канала статора с каналом ротора (состояние канала I статора на рисунке 1); $\tau = \tau_2$ — момент времени, когда каналы ротора и статора полностью совмещены; $\tau = \tau_3$ — момент полного перекрытия канала статора (состояние канала III статора); $\tau = \tau_4$ — момент начала совмещения канала

статора со следующим каналом ротора (конец цикла). Значения $\tau_1 \dots \tau_4$ могут быть определены по следующим формулам [11]:

$$\tau_1 = 0; \quad \tau_2 = \frac{2 \arcsin(a_c / 2R_2)}{\omega_p}; \quad \tau_3 = \frac{4 \arcsin(a_c / 2R_2)}{\omega_p}; \quad \tau_4 = \frac{2\pi}{z_p \omega_p},$$

где a_c — ширина канала статора, м;
 R_2 — радиус внешней окружности ротора, м;
 ω_p — угловая скорость вращения ротора, рад / с;
 z_p — число каналов ротора.

За функцию скорости $u(t)$ может быть принято уравнение регрессии, достаточно точно аппроксимирующее значения $u_{p-к}$, полученные в результате численного решения уравнения (1). Точную (коэффициент корреляции $r > 0,9999$) аппроксимацию значений скорости $u_{p-к}$ обеспечивает функция $u_{loess}(\tau)$ в виде нескольких отрезков аппроксимирующих полиномов 2-й степени [12]. Для расчета коэффициентов аппроксимирующей функции $u_{loess}(\tau)$ применяется система компьютерной алгебры Mathcad с использованием в ней команды $loess(\tau, u_{p-к}, span)$, где $span$ — условная длина отрезка аппроксимирующего полинома 2-й степени [13]. Из графика на рисунке 2 видно, что при $span = 0,2$ функция $u_{loess}(\tau)$ весьма точно описывает набор значений скорости $u_{p-к}$, в связи с чем регрессионная модель $u_{loess}(\tau)$ с некоторым приближением может быть принята в качестве истинной функции скорости жидкости в канале статора $u(\tau)$.

Зная функцию скорости $u(\tau)$, мгновенный расход жидкости

$$q(\tau) = a_c h_c u(\tau),$$

где h_c — высота канала статора, м.

Для получения функции мгновенного расхода $Q(t)$ для роторно-импульсного аппарата в целом рассмотрим несколько каналов статора. При разном числе каналов ротора z_p и статора z_c угловые расстояния между каналами ψ_p и ψ_c (см. рисунок 1) также не равны друг другу, следовательно, в любой момент абсолютного времени t относительное время цикла τ для разных каналов статора будет отличаться. Для смежных каналов статора, например, для каналов I и II, расхождение в относительном времени

$$\tau_\Delta = \frac{\psi_\Delta}{\omega_p} = \frac{\psi_p - \psi_c}{\omega_p},$$

где ψ_p, ψ_c — угловое расстояние между смежными каналами на роторе и статоре соответственно, рад.

Положительные значения τ_Δ говорят о том, что рабочий цикл следующего по направлению вращения ротора канала статора опережает цикл предыдущего канала, отрицательные — отстает от него.

Поскольку движение жидкости по каналу статора осуществляется циклично (относительное время цикла τ увеличивается от $\tau_1 = 0$ до $\tau_4 = \tau_\Pi$, по достижении которого переменная τ «сбрасывается» на 0 и цикл повторяется) относительное время τ_I канала I может быть увязано с абсолютным временем t зависимостью

$$\tau_I(t) = |t + \tau_\Pi| \bmod \tau_\Pi, \tag{2}$$

где τ_Π — продолжительность цикла канала статора, $\tau_\Pi = \tau_4$, с.

Поскольку относительное время цикла τ канала II отличается на величину τ_Δ , то для него выражение (2) примет следующий вид:

$$\tau_{II}(t) = |t + \tau_\Delta + \tau_\Pi| \bmod \tau_\Pi.$$

В общем виде зависимость относительного времени цикла τ для i_c -го канала статора от абсолютного времени t запишется как

$$\tau_{i_c}(t) = |t + \tau_{\Delta}(i_c - 1) + \tau_{\Pi}| \bmod \tau_{\Pi}; \quad i_c \in 0 \dots z_c, \quad (3)$$

где i_c — порядковый номер канала статора;

z_c — число каналов статора.

Зависимость мгновенного расхода жидкости через i_c -й канал статора от абсолютного времени t получим из выражения (3) путем замены аргумента функции $u(\tau)$ с τ на $\tau_{i_c}(t)$:

$$q_{i_c}(t) = a_c h_c u(\tau_{i_c}(t)).$$

Графики расходов q_I , q_{II} и q_{III} для I , II и III каналов статора, полученные при $h_c = 0,025$ м, $z_p = 22$, $z_c = 24$, представлены на рисунке 3. Из рисунка видно, что функция $q_{i_c}(t)$, описывающая расход жидкости через отдельные каналы статора, является периодической с периодом, равным τ_{Π} , причем фазы II и III каналов сдвинуты по времени относительно фазы I канала на величину τ_{Δ} и $2\tau_{\Delta}$ соответственно.

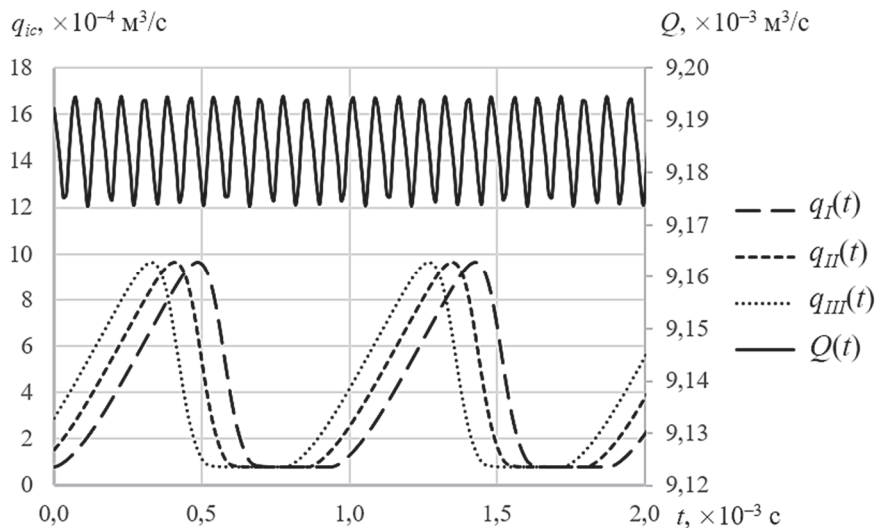


Рисунок 3. — Зависимость расходов жидкости через отдельные каналы q и аппарат Q от времени t

Мгновенный расход жидкости через роторно-импульсный аппарат Q определяется суммированием расходов q_{i_c} всех его каналов статора:

$$Q(t) = \sum_{i_c=1}^{z_c} q_{i_c}(t). \quad (4)$$

Анализируя представленный на рисунке 3 график функции расхода жидкости через роторно-импульсный аппарат $Q(t)$, можно отметить, что суммарный расход жидкости также характеризуется периодическими пульсациями, образующимися в результате наложения друг на друга его составляющих $q_{i_c}(t)$. Для вышеприведенных значений конструктивно-технологических параметров роторно-импульсного аппарата размах пульсаций расхода $Q(t)$

сравнительно невелик и составляет порядка $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$. Период пульсаций расхода Q в 12 раз короче периода пульсаций его составляющих $q_i(t)$.

Рассмотрим влияние количества каналов ротора z_p и статора z_c на характер пульсаций суммарного расхода жидкости через роторно-импульсный аппарат Q . На рисунке 4 представлены графические зависимости расхода Q при различных сочетаниях z_p и z_c . Прочие конструктивно-технологические параметры неизменны и зафиксированы на вышеприведенных в статье уровнях.

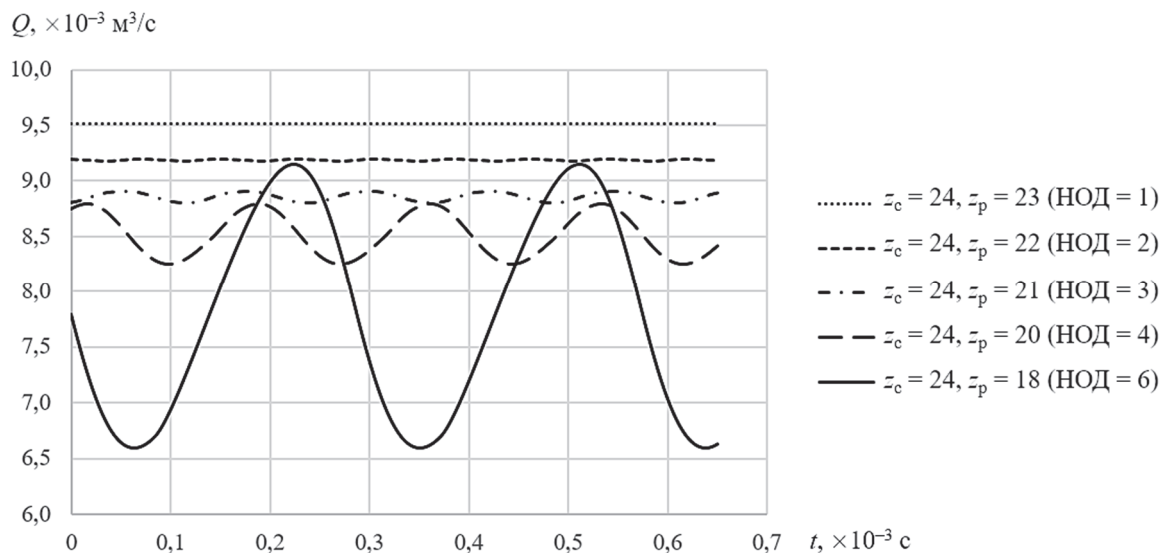


Рисунок 4. — Зависимость расхода Q от времени t при различных числах каналов статора z_c и ротора z_p

В результате теоретических исследований выявлена закономерность роста значений амплитуды и периода пульсаций расхода Q по мере увеличения наибольшего общего делителя (далее — НОД) чисел каналов ротора z_p и статора z_c . Например, при $z_p = 23$ и $z_c = 24$ (НОД = 1) амплитуда пульсаций расхода A_Q составляет менее $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ при периоде $T_Q = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. При увеличении НОД чисел z_p и z_c до 6 ($z_p = 18$, $z_c = 24$) амплитуда пульсаций расхода возрастает на четыре порядка до $A_Q = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, а период $T_Q = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

Также следует отметить влияние НОД чисел z_p и z_c на средний расход \bar{Q} жидкости через роторно-импульсный аппарат. Как видно из графика на рисунке 4, увеличение НОД с 1 до 6 понижает средний расход \bar{Q} на 17 % с $9,5 \cdot 10^{-3}$ до $7,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, что обусловлено как меньшим числом каналов ротора z_p , а следовательно, уменьшением количества их совмещений с каналами статора, так и повышением амплитуды пульсаций Q , увеличивающих инерционное гидравлическое сопротивление проточных частей аппарата.

В целом снижение среднего расхода \bar{Q} по мере увеличения НОД чисел z_p и z_c может иметь как отрицательный, так и положительный эффект. С одной стороны, снижение пропускной способности роторно-импульсного аппарата уменьшает его производительность и, вероятно, повышает затраты энергии на обработку материала; с другой — создание масштабных, с амплитудой более 15 % от среднего расхода \bar{Q} , пульсаций скорости и давления жидкости не только в каналах ротора и статора аппарата, но и в подводящем и отводящем трубопроводах может стать дополнительным фактором интенсификации процессов диспергирования и эмульгирования, а также послужить отправным пунктом в исследованиях резонансных процессов. Таким образом, изучение закономерностей изменения параметров пульсаций расхода жидкости через роторно-импульсный кавитационный аппарат представляет научный и практический интерес.

На основании анализа изменений периода T_Q в зависимости от различных сочетаний чисел каналов ротора z_p и статора z_c получена формула, позволяющая определять значение периода пульсаций общего расхода Q жидкости через роторно-импульсный аппарат:

$$T_Q = \frac{\tau_{\text{цНОД}}(z_p, z_c)}{z_c},$$

где $\text{НОД}(z_p, z_c)$ — НОД чисел каналов ротора z_p и статора z_c .

Амплитуда A_Q пульсаций расхода роторно-импульсного аппарата представляет собой величину максимального отклонения функции мгновенного расхода $Q(t)$ от среднего значения \bar{Q} , которое может быть определено отношением объема жидкости V_{T_p} , прошедшего через аппарат за один оборот ротора, к периоду вращения ротора T_p :

$$\bar{Q} = \frac{V_{T_p}}{T_p}.$$

Значение объема V_{T_p} может быть получено интегрированием функции $Q(t)$ в интервале времени t от 0 до T_p :

$$V_{T_p} = \int_0^{T_p} Q(t) dt.$$

Анализируя представленные на рисунке 4 графики, следует отметить, что мгновенный расход жидкости через роторно-импульсный аппарат представляет собой периодическую синусоидальную функцию, которая с некоторыми допущениями может быть записана в виде

$$Q_{\sin}(t) = \bar{Q} + A_Q \sin \left[\frac{2\pi}{T_Q} (t + t_0) \right], \quad (5)$$

где t_0 — поправка ко времени t , с, обеспечивающая необходимый фазовый сдвиг функции.

Для определения численного значения поправки t_0 рассмотрим функцию $Q(t)$ в точках экстремума. Из формулы (5) следует, что для моментов времени, когда мгновенный расход Q принимает максимальные значения, должно выполняться условие

$$\sin \left[\frac{2\pi}{T_Q} (t_{\max} + t_0) \right] = 1, \quad (6)$$

где t_{\max} — момент времени, соответствующий максимальному значению расхода Q , с.

Из уравнения (6) несложно получить искомое значение поправки t_0 :

$$t_0 = \frac{T_Q}{4} - t_{\max}.$$

Адекватность применения синусоидальной функции $Q_{\sin}(t)$ для описания пульсаций мгновенного расхода Q жидкости через роторно-импульсный кавитационный аппарат проверена посредством расчета значений коэффициента корреляции Пирсона r , выполняемого

в системе компьютерной алгебры Mathcad [13]. Согласно расчетам, для представленных на рисунке 4 сочетаний чисел каналов ротора z_p и статора z_c значение коэффициента корреляции r увеличивается с 0,85 при $\text{НОД}(z_p, z_c) = 1$ до $r = 0,98 \dots 1,00$ при $\text{НОД}(z_p, z_c) \geq 4$. Несколько меньшее по сравнению с другими сочетаниями значение коэффициента r при $\text{НОД}(z_p, z_c) = 1$ обусловлено меньшей амплитудой пульсаций и, как следствие, ростом влияния погрешностей численного метода решения дифференциального уравнения (1), а также алгоритма, применяемого для последующей аппроксимации результатов этого решения.

В целом высокие значения коэффициента корреляции r указывают на сильную связь между синусоидальной функцией $Q_{\sin}(t)$ и мгновенным расходом Q , определяемым по формуле (4), что позволяет рекомендовать упрощенное выражение (5) для расчета параметров потока обрабатываемого материала на входе и выходе из роторно-импульсного аппарата. Функция $Q_{\sin}(t)$ может быть использована для оптимизации конструктивно-технологических параметров последовательно соединенных с роторным кавитационным аппаратом вспомогательных устройств (насосы, мацераторы и др.), а также для описания резонансных процессов в трубопроводном контуре роторно-импульсного аппарата.

Заключение. Мгновенный расход жидкости $Q(t)$ через роторно-импульсный аппарат характеризуется периодическими пульсациями, образующимися в результате наложения друг на друга его составляющих — расходов жидкости $q_k(t)$ по отдельным каналам статора. Установлена зависимость амплитуды A_Q и периода T_Q пульсаций расхода Q от НОД чисел каналов ротора z_p и статора z_c . При $z_p = 23$ и $z_c = 24$ ($\text{НОД} = 1$) амплитуда пульсаций расхода A_Q составляет менее $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, а период $T_Q = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. При увеличении НОД чисел z_p и z_c до 6 ($z_p = 18, z_c = 24$) амплитуда пульсаций расхода возрастает на три порядка до $A_Q = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, период пульсаций также увеличивается до $T_Q = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

Для описания пульсации расхода жидкости Q через роторно-импульсный аппарат предложена синусоидальная функция $Q_{\sin}(t)$. Ее коэффициентами являются средний расход жидкости через аппарат \bar{Q} , амплитуда A_Q и период T_Q пульсаций. Методами математической статистики установлено, что функция $Q_{\sin}(t)$ имеет сильную корреляционную связь (коэффициент $r \geq 0,85$) со значениями мгновенного расхода Q и может быть использована для определения параметров потока обрабатываемого материала на входе и выходе из роторно-импульсного аппарата.

Список цитированных источников

1. Промтов, М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества / М. А. Промтов. — М. : Машиностроение-1, 2004. — 136 с.
2. Червяков, А. В. Диспергирование плющеного зерна кукурузы / А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Комбикорма. — 2009. — № 5. — С. 36—37.
3. Кулик, А. М. Обоснование рационального способа производства гуминовых удобрений из торфа / А. М. Кулик, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2023. — № 3. — С. 181—185.
4. Промтов, М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М. А. Промтов. — М. : Машиностроение-1, 2001. — 247 с.
5. Шаршунов, В. А. Основы расчета кавитационного роторного диспергатора-измельчителя / В. А. Шаршунов, А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Вестн. Могилев. гос. ун-та продовольствия. — 2010. — № 1. — С. 80—87.
6. Червяков, А. В. Оптимизация параметров роторно-импульсного кавитационного аппарата для интенсификации диспергирования кормовых смесей / А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2014. — № 2. — С. 194—198.
7. Карепанов, С. К. Реализация математической модели течения рабочей жидкости в каналах ротора и статора гидромеханического диспергатора / С. К. Карепанов, В. П. Ружицкий // Математические методы в механике прерывистых течений : межвуз. сб. науч. ст. — СПб. : Технопанорама, 1999. — С. 19—27.
8. Червяков, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования производительности роторного кавитационного измельчителя-диспергатора кормов / А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2010. — № 3. — С. 131—135.

9. Червяков, А. В. Влияние конструктивно-технологических параметров на подачу роторно-импульсного кавитационного диспергатора кормов / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2016. — № 1. — С. 102—106.

10. Крупенин, П. Ю. Математическая модель движения кормовой суспензии в каналах роторного импульсного аппарата / П. Ю. Крупенин // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 96—103.

11. Крупенин, П. Ю. Теоретические исследования движения жидкости в каналах роторно-импульсного аппарата / П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2023. — № 1. — С. 137—142.

12. Cleveland, W. S. Smoothing by local regression: Principles and methods / W. S. Cleveland, C. Loader // Statistical Theory and Computational Aspects of Smoothing : Proceedings of the COMPSTAT '94 Satellite Meeting held in Semmering, Austria, 27—28 August 1994. — Physica-Verlag HD, 1996. — С. 10—49. DOI: org/10.1007/978-3-642-48425-4

13. Новиковский, Е. А. Работа в системе MathCAD : учеб. пособие / Е. А. Новиковский. — Барнаул : Тип. АлтГУ, 2013. — 114 с.

Поступила в редакцию 28.03.2024.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Научная концепция журнала предполагает публикацию современных достижений в области технических наук; представление результатов фундаментальных и прикладных исследований, а также результатов, полученных в производственных условиях областей, включая результаты национальных и международных исследований. Статьи аспирантов, докторантов и соискателей последнего года обучения публикуются вне очереди при условии их полного соответствия требованиям, предъявляемым к научным публикациям.

Публикация статей в журнале бесплатная.

Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках.

Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ (URL: https://publish.barsu.by/index.php/technik_science/index).

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The scientific strategy of the journal suggests publishing modern achievements in the fields of Engineering sciences; presentation of the results of fundamental and applied research, as well as the results obtained under production conditions, both at the domestic and international level. Articles by postgraduate and doctoral students in their final year of traineeship are published out of turn if they are written in strict conformity with the specified requirements.

Publication of articles is free.

Articles can be written in the Russian, Belarusian or English languages.

More detailed instructions for authors can be found on the official website of BarSU (URL: https://publish.barsu.by/index.php/technik_science/index).

ДЛЯ ЗАМЕТОК