

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал

Серия 1. Машиностроение

Издается с января 2002 года
Периодичность издания – один раз в два месяца

Учредитель
Белорусский национальный
технический университет



Science and Technique V. 18, No 5
(2019)

International
Scientific and Technical Journal

Series 1. Mechanical Engineering

Published from January 2002
Publication frequency – bimonthly

Founder
Belarusian National
Technical University

Журнал включен в базы данных:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

- Шелег В. К., Леванцевич М. А.,
Пилипчук Е. В., Назаров С. М.**
Структура и триботехнические свойства
хромовых покрытий, сформированных
электродеформационным плакированием
гибким инструментом 359
- Kalinichenko A. S., Ovchinnikov V. I.,
Usherenko S. M., Yazdani-Cherati Javad F.**
Improving Properties of Tool Steels by Method
Of Dynamic Alloying
(Калиниченко А. С., Овчинников В. И.,
Ушеренко С. М., Яздани-Черати Джавад Ф.
Повышение свойств инструментальных сталей
методом динамического легирования) 369
- Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А.,
Пантелеенко А. Ф.**
Материалы для газотермического напыления,
полученные методом диффузионного
легирования из порошков на основе сталей
аустенитного класса 380
- Алексеев Ю. Г., Королёв А. Ю., Будницкий А. С.,
Вэньци Дай**
Электрохимическая прошивка микроотверстий
в трубчатом ступенчатом концентраторе-
волноводе медицинского назначения 386

CONTENTS

Mechanical Engineering

- Sheleg V. K., Levantsevich M. A.,
Pilipchuk Y. V., Nazarov S. M.**
Structure and Tribological Properties
of Chromium Coatings Formed
by Electrodeformation Cladding
with Flexible Tools 359
- Kalinichenko A. S., Ovchinnikov V. I.,
Usherenko S. M., Yazdani-Cherati Javad F.**
Improving Properties of Tool Steels by Method
of Dynamic Alloying 369
- Panteleenko F. I., Okovity V. A.,
Panteleenko A. F.**
Materials for Gas-Thermal
Spraying Obtained by Diffusion
Alloying from Powders Based
on Austenitic Steels. 380
- Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Budnitskiy A. S.,
Wenqi Dai**
Electrochemical Cutting of Micro-Holes
in Tubular Stepped Concentrator-
Waveguide for Medical Purposes 386

Вершина Г. А., Быстренков О. С. Влияние величины запальной порции дизельного топлива газодизельного двигателя на параметры его рабочего процесса	395
Leontiev D. N., Nikitchenko I. N., Ryzhyh L. A., Lomaka S. I., Voronkov O. I., Hritsuk I. V., Pylshchik S. V., Kuripka O. V. About Application the Tyre-Road Adhesion Determination of a Vehicle Equipped with an Automated System of Brake Proportioning (Леонтьев Д. Н., Никитченко И. Н., Рыжих Л. А., Ломака С. И., Воронков А. И., Грицук И. В., Пильщик С. В., Курипка А. В.) Об использовании сил сцепления колес транспортного средства, оборудованного автоматизированной системой регулирования тормозного усилия)	401
Кузьмич В. В., Козлов Н. Г., Карпунин И. И., Балабанова О. В. Экспериментальные исследования по определению состава полимерных упаковочных материалов с биоцидными добавками	409
Козерук А. С., Мальпика Д. Л., Филонова М. И., Кузнечик В. О. Исследования напряжений в оптических деталях со сферическими поверхностями	416
Луговая И. С. Классификация гидравлических систем для перекачивания высоковязких жидкостей	422
Мыльников В. В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов	427
Крутов А. В., Дечко М. М., Бойко М. А. Оптимизация процесса очистки сточных вод постов мойки автотракторной техники по энергетическим затратам	436

Vershina G. A., Bystrenkov O. S. Influence of Diesel Fuel Ignition Portion Value on Working Process Parameters of Gas-Diesel Engine	395
Leontiev D. N., Nikitchenko I. N., Ryzhyh L. A., Lomaka S. I., Voronkov O. I., Hritsuk I. V., Pylshchik S. V., Kuripka O. V. About Application the Tyre-Road Adhesion Determination of a Vehicle Equipped with an Automated System of Brake Proportioning	401
Kuzmich V. V., Kozlov N. G., Karpunin I. I., Balabanova O. V. Experimental Investigations on Determination of Polymer Packing Material Composition with Biocide Additives	409
Kozeruk A. S., Malpica Y. L., Filonova M. I., Kuznechik V. O. Investigations on Stresses in Optical Components with Spherical Surfaces	416
Lugovaja I. S. Classification of Hydraulic Systems for Pumping Highly Viscous Liquids	422
Mylnikov V. V. Influence of Loading Frequency on Fatigue of Construction Materials	427
Krutau A. V., Dechko M. M., Boika M. A. Optimization of Wastewater Treatment Process on Energy Costs at Truck and Tractor Washing Posts	436

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

- В. В. БАБИЦКИЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*
В. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. В. БЕЛЫЙ (Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
В. П. БОЙКОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
С. В. БОСАКОВ (Республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС», Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

- V. V. BABITSKY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*
V. G. BASHTOVOI (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A. V. BYELI (Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
V. P. BOYKOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
S. V. BOSAKOV (Republican Unitary Scientific-Research Enterprise for Construction "Institute Belniis", Minsk, Republic of Belarus),

- Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- О. Г. ДЕВОЙНО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- К. В. ДОБРЕГО (Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь),
- П. И. ДЯЧЕК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- М. З. ЗГУРОВСКИЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
- Р. Б. ИВУТЬ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
- М. Г. КИСЕЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Я. Н. КОВАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- В. В. КОЗЛОВСКИЙ (Минский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Минск, Республика Беларусь),
- В. М. КОНСТАНТИНОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Н. В. КУЛЕШОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. Н. ЛЕОНОВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. А. МАСКЕВИЧ (Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь),
- Э. И. МИХНЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- НГУЕН ТХУ НГА (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- Yu. V. VASILEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- O. G. DEVOINO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- K. V. DOBREGO (Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
- P. I. DYACHEK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- M. Z. ZGUROVSKY (National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine),
- R. B. IVUT (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- A. S. KALINICHENKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
- M. G. KISELEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Ya. N. KOVALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- V. V. KOZLOVSKIY (Minsk Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Minsk, Republic of Belarus),
- V. M. KONSTANTINOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- N. V. KULESHOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- S. N. LEONOVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- S. A. MASKEVICH (International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus),
- E. I. MIHNEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- NGUYEN THU NGA (Institute of Energy Science of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Republic of Vietnam),

М. ОПЕЛЯК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Г. А. ПОТАЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
О. П. РЕУТ (Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики», Минск, Республика Беларусь),
Ф. А. РОМАНИУК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. Л. СОЛОМАХО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
С. А. ЧИЖИК (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
А. Н. ЧИЧКО (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
В. К. ШЕЛЕГ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Й. ЭБЕРХАРДШТАЙНЕР (Венский технический университет, Вена, Австрия),
Б. А. ЯКИМОВИЧ (Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация)

M. OPELYAK (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
G. A. POTAEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
O. P. REUT (Branch of the BNTU "Institute of Advanced Training and Retraining for New Areas of Engineering, Technology and Economy", Minsk, Republic of Belarus),
F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. L. SOLOMAKHO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
S. A. CHIZHIK (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
A. N. CHICHKO (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
V. K. SHELEG (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
J. EBERHARDSTEINER (Vienna University of Technology, Vienna, Austria),
B. A. YAKIMOVICH (M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation)

Ответственный секретарь редакции

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

http://sat.bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 30.09.2019. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,00. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2019

Executive Secretary of Editorial Staff

V. N. Guryanichy

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

http://sat.bntu.by

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-359-368>

УДК 621.793

Структура и триботехнические свойства хромовых покрытий, сформированных электродеформационным плакированием гибким инструментом

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾, канд. техн. наук М. А. Леванцевич¹⁾, магистр техн. наук Е. В. Пилипчук¹⁾, инж. С. М. Назаров¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Приведены результаты исследований структуры и триботехнических свойств хромовых покрытий, сформированных методом электродеформационного плакирования гибким инструментом (ЭДПИ), выполненных с целью оценки перспектив их применения в качестве альтернативы гальваническому хромированию, широко используемому при изготовлении штоков гидроцилиндров металлорежущих станков. В качестве гибкого инструмента применялись вращающиеся металлические щетки с проволоочным ворсом, выполненным из стали 65Г и нержавеющей стали 03Х17Н14М2. Материал-донор при ЭДПИ – компактированный брусок, полученный путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазно-графитовой шихты УДАГ. По результатам исследований установлено, что при формировании покрытий щеткой из нержавеющей стали в состав покрытия привносятся легирующие элементы проволоочного ворса, такие как хром и никель. Так, в случае использования щеток с проволоочным ворсом из нержавеющей стали 03Х17Н14М2 количество хрома и никеля в плакированном слое покрытия по процентному содержанию соответственно в 5,3 и 9,6 раза больше, чем в покрытии, сформированном щеткой из стали 65Г, что может способствовать повышению коррозионной стойкости покрытий. При этом рельеф поверхности покрытия имеет развитую шероховатую структуру, состоящую из плотно уложенных и вытянутых в направлении вращения щетки различных по размерам микрочастиц хрома, а также сглаженных микровыступов и микроуглублений, дефекты покрытия в виде несплошностей и отслоений отсутствуют. Триботехнические испытания выполнялись в условиях «граничной смазки» на машине трения вращательного типа, реализующей трение резинового индентора по плоской поверхности вращающегося диска. По данным триботехнических испытаний установлено, что в условиях «граничного трения» спаренных образцов «диск с покрытием – резиновый ролик» наименьшими значениями величин коэффициента трения скольжения ($f_{тр} = 0,023$) обладают хромовые покрытия, сформированные методом ЭДПИ, которые в 7,5 раза меньше, чем у хромовых, полученных гальваническим осаждением. В то же время износ резиновых роликов в парах с гальваническими хромовыми покрытиями оказывался меньшим, чем в парах с покрытием, сформированным методом ЭДПИ.

Ключевые слова: электродеформационное плакирование гибким инструментом, шток гидроцилиндра, вращающаяся металлическая щетка, материал-донор, покрытие, гальванический хром, ультрадисперсная алмазно-графитовая шихта, коэффициент трения скольжения, «граничное трение», износ, шероховатость

Для цитирования: Структура и триботехнические свойства хромовых покрытий, сформированных электродеформационным плакированием гибким инструментом / В. К. Шелег [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 359–368. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-359-368>

Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Address for correspondence

Sheleg Valery K.
Belarusian National Technical University
9 B. Hmel'nickogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Structure and Tribological Properties of Chromium Coatings Formed by Electrodeformation Cladding with Flexible Tools

V. K. Sheleg¹⁾, M. A. Levantsevich¹⁾, Y. V. Pilipchuk¹⁾, S. M. Nazarov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper contains results of investigations on structure and tribotechnical properties of chromium coatings formed by a method of electrodeformation cladding with flexible tools (EDCFT). The purpose of these investigations is to assess prospects for application of the coatings as an alternative to galvanic chrome plating which is widely used in manufacturing hydraulic cylinder rods of metal-cutting machines. Rotary metal brushes with a wire pile made of 65Г-steel and 03X17H14M2-stainless steel have been used as a flexible tool. A compacted bar obtained by sintering a mixture of pure chromium powders and a nano-sized diamond-graphite blend UDDG has been employed as a donor material for EDCFT. According to results of the research it has been established that alloying elements of wire pile such as chromium and nickel are added to a coating composition while forming coatings a stainless steel brush. So in the case of using brushes with wire pile of 03X17H14M2-stainless steel the amount of chromium and nickel in a clad coating layer is 5.3 and 9.6 times higher in percentage, respectively, in comparison with the coating formed by a 65Г-steel brush that can contribute to improvement of coating corrosion resistance. At the same time, surface relief of the coating has a developed rough structure consisting of chromium microparticles having various size that are tightly packed and elongated in the direction of brush rotation and there are no flaws in the form of discontinuities and delaminations. Tribological tests have been performed under conditions of “boundary lubrication” on a rotary friction machine that implements friction of a rubber indenter on a flat surface of a rotating disk. According to data of the tribotechnical tests it has been ascertained that under conditions of “boundary friction” for such paired samples as “coated disc – rubber roller” chromium coatings formed by the EDCFT method, have the lowest values of a sliding friction coefficient ($f_{tp} = 0.023$) which are 7.5 times lower than chromium coatings obtained by electroplating. At the same time the wear of rubber rollers in pairs with electroplated chromium coatings has turned out to be less than in pairs with the coating formed by the EDCFT method.

Keywords: electrodeformation cladding with a flexible tool, hydraulic cylinder rod, rotating metal brush, donor material, coating, electroplating chrome, ultradispersed diamond-graphite mixture, coefficient of sliding friction, “boundary friction”, wear, roughness

For citation: Sheleg V. K., Levantsevich M. A., Pilipchuk Y. V., Nazarov S. M. (2019) Structure and Tribological Properties of Chromium Coatings Formed by Electrodeformation Cladding with Flexible Tools. *Science and Technique*. 18 (5), 359–368. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-359-368> (in Russian)

Введение

В различных типах гидроприводов металло-режущих станков широкое применение получили гидроцилиндры возвратно-поступательного движения, использующие в качестве герметизирующих элементов манжетные резиновые уплотнения [1, 2]. Для обеспечения надежной герметизации (уплотнения) соединения «шток – резиновая манжета», а также высокой износо- и коррозионной стойкости поверхность штока в подобных гидроцилиндрах подвергают гальваническому хромированию с осаждением слоя твердого хрома толщиной 20–25 мкм [3]. Однако технологии гальванического хромирования являются экологически вредными и достаточно энергоемкими [4], в связи с чем, например в условиях мелкосерийного и индивидуального производств, при необходимости осаждения хромовых покрытий на разнообразных по номенклатуре и небольших партиях

деталей становятся совершенно нерентабельными. Поэтому возникает острая потребность в изыскании новых, сравнительно недорогих способов формирования хромовых покрытий в качестве альтернативы гальваническому хромированию.

Стоит отметить, что к настоящему времени известны положительные примеры применения технологий гиперзвуковой металлизации [5], газотермического и плазменного напыления [6, 7], электроискрового и лазерного легирования [8, 9] и других, как альтернативы гальваническому хромированию. Однако высокая стоимость используемого технологического оборудования и расходных материалов, а также необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов для его обслуживания сдерживают их широкое промышленное применение.

В последние годы получает развитие сравнительно недорогая, малозероёмкая и экологически чистая технология, основанная на примене-

нии метода электродеформационного плакирования гибким инструментом (ЭДПИ), где слой покрытия на поверхности детали формируется за счет переноса ворсом вращающейся металлической щетки (ВМЩ) частичек материала покрытия (донора), а с целью интенсификации процесса плакирования на ворс ВМЩ и донор подают электрическое напряжение [10, 11]. Установлено, что хромовые покрытия, сформированные с использованием технологии ЭДПИ из доноров, полученных путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазно-графитовой шихты УДАГ (ТУ РБ 28619110.001–95) производства НП ЗАО «Синта» (Республика Беларусь), в режиме «сухого» трения с резиновым контробразцом имеют триботехнические характеристики, сопоставимые с гальваническими хромовыми покрытиями, что создает хорошие предпосылки для их практического применения [11]. Однако в ходе проводимых исследований технологии ЭДПИ было выявлено, что на качество формируемых слоев хромовых покрытий может оказывать влияние материал, из которого изготовлен ворс проволоочной щетки, а именно: из пружинной проволоки из стали 65Г или нержавеющей проволоки из стали 03Х17Н14М2. Кроме того, вследствие отсутствия данных о триботехнических характеристиках плакированных хромовых покрытий в условиях «граничного» (смешанного) трения, характерного для сопряжений «шток – резиновая манжета» [12], признано целесообразным выполнить дополнительные исследования.

Цель работы заключалась в оценке влияния материала проволоочного ворса ВМЩ на структурно-фазовый состав слоев хромовых покрытий, сформированных с использованием технологии ЭДПИ, и их триботехнические характеристики в условиях «граничного» трения.

Методика исследований

Структурно-фазовые исследования проводились на образцах пластин (10×6×2 мм) из стали 45 (HRC 43...45) с хромовым покрытием, сформированным из донора, полученного методами порошковой металлургии путем спекания смеси порошков чистого хрома и нанораз-

мерной алмазно-графитовой шихты УДАГ (не более 1 мас. %). Электродеформационное плакирование осуществлялось поочередно вращающимися металлическими щетками с гофрированным ворсом, выполненным из стали 65Г и нержавеющей стали 03Х17Н14М2 (производства фирмы OSBORN). Диаметр и ширина щеток составляли соответственно 200 и 30 мм, линейная скорость вращения 30 м/с, диаметр и вылет ворса 0,2 и 40 мм, сила тока $I = 140$ А. После обработки толщина сформированного слоя покрытия, измеренного с помощью прибора МТЦ-3, составила 3–5 мкм для покрытий, сформированных щеткой с ворсом, выполненным из стали 65Г, и 7–10 мкм – для покрытий, сформированных щеткой с ворсом из нержавеющей стали. Параметр шероховатости поверхности Ra покрытия: 0,25–0,35 мкм – для покрытия, выполненного щеткой из стали 65Г, и 0,7–0,9 мкм – щеткой из нержавеющей стали.

Для металлографического анализа поверхностных слоев образцов, подвергнутых деформационному плакированию, использовался инвертированный микроскоп «Альтами МЕТ 1МТ». Травление микроструктуры шлифов проводилось с использованием реактива Куррана (HCl – 50 мл; CuSO₄ – 10 г; H₂O – 50 мл), а также Марбле (50 мл HCl; 2 г CuSO₄; 50 мл C₂H₅OH; 50 мл H₂O).

Рентгеноструктурный анализ исследуемых образцов выполняли на дифрактометре ДРОН 3.0 в монохроматизированном CoK α -излучении при ускоряющем напряжении 30 кВ и анодном токе 15 мА. Рентгеновская съемка осуществлялась с фокусировкой по Брэггу – Brentano в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,1° и временем набора импульсов на точку 10 с. С целью исследования фазового состава тонких поверхностных слоев был применен метод скользящего пучка ($\psi = 6^\circ$). Для расшифровки фазового состава использовалась картотека стандартных спектров PDF. Обработку данных рентгеноструктурного анализа осуществляли с помощью автоматизированного программного комплекса DiffractionPlus EVA.

Для проведения триботехнических испытаний использовали образцы в виде дисков из стали 40Х диаметром 70 мм и толщиной 5 мм, подвергнутые объемной закалке до твердо-

сти 50 HRC и последующей шлифовке до $Ra = 0,2\text{--}0,3$ мкм. В качестве контробразцов применяли цилиндрические ролики диаметром 6 мм и длиной 12 мм, изготовленные из маслобензостойкой резины с модулем упругости 15 МПа.

На плоских поверхностях дисков методами гальванического осаждения и ЭДПГИ формировали хромовые покрытия.

В качестве материала-донора при ЭДПГИ использовали компактированный брусок, полученный путем спекания смеси порошков чистого хрома и наноразмерной алмазно-графитовой шихты УДАГ (ТУ РБ 28619110.001–95) производства НП ЗАО «Синта» в количестве не более 1 мас. %.

Электродеформационное плакирование гибким инструментом выполняли вращающейся цилиндрической щеткой размером $200 \times 20 \times 22$ мм с длиной и диаметром проволоочного ворса соответственно 55,00 и 0,25 мм. Технологические режимы ЭДПГИ: линейная скорость вращения щетки 30 м/с, натяг 2 мм, число проходов щетки 8, частота вращения диска $7,3 \text{ мин}^{-1}$. Величина подаваемого напряжения 40 В, сила тока 140 А. Толщина слоя хромовых покрытий, сформированных способом ЭДПГИ, не превышала 5–7 мкм, микротвердость $HV_{0,2} = 612\text{--}634$.

Электролитическое хромирование с осаждением слоя твердого ($HV_{0,2} = 990\text{--}1200$) хрома толщиной 30–35 мкм выполнялось по типовой технологии, применяемой на НП ЗАО «Синта». Причем три диска с гальваническим хромовым покрытием подвергали последующему шлифованию и три – шлифованию, затем полированию. Соответственно три диска с хромовыми покрытиями, сформированными методом ЭДПГИ, только полировались и три – использовались в исходном состоянии, т. е. без последующей шлифовки и полировки. Триботехнические испытания экспериментальных образцов дисков с покрытием проводили на машине трения одностороннего вращения, реализующей трение торцевой поверхности резинового ролика (контробразца) по плоской поверхности диска с покрытием.

Испытания на трение и износ выполняли при следующих условиях: скорость вращения диска с покрытием 834 мин^{-1} ; относительная

скорость скольжения ролика по диску 2,4 м/с; удельная нагрузка в зоне контакта торца ролика с поверхностью диска 0,5 МПа; продолжительность испытаний каждой пары трения составляла 120 мин, что соответствовало пути трения 17280 м. В ходе триботехнических испытаний воспроизводился режим, приближенный к режиму «граничного» трения, т. е. к режиму трения с ограниченной подачей смазочного материала. В связи с этим смазывание дорожки трения на диске осуществлялось фитилем, пропитываемым капельным способом (12 капель в минуту) гидравлическим маслом M10G2.

Регистрацию момента силы трения скольжения, который затем пересчитывался в коэффициент трения скольжения $f_{\text{тр}}$, проводили на протяжении всего цикла испытаний каждой пары трения. Износ Δm роликов и дисков оценивали по величине убыли их массы, определяемой по разности масс до и после испытаний путем взвешивания на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до 0,00001 г.

Экспериментальные результаты

Изучение морфологии поверхности хромовых покрытий, сформированных методом ЭДПГИ, показало, что рельеф поверхности покрытия имеет развитую шероховатую структуру (рис. 1а), состоящую из плотно уложенных и вытянутых в направлении вращения щетки различных по размерам микрочастиц хрома, а также сглаженных микровыступов и микроуглублений. Дефекты покрытия в виде несплошностей и отслоений отсутствуют.

Между слоем хромового покрытия и основой наблюдается граница раздела без видимых признаков наличия промежуточного слоя (рис. 1б).

Исследование структуры и фазового состава плакированных слоев хромовых покрытий выявило присутствие в них аустенита и хрома (рис. 2, табл. 1). Период кристаллической решетки плакированного хрома составляет $a = 0,2884$ нм. При этом количество хрома и никеля в плакированном слое покрытия, сформированном щеткой из нержавеющей стали, по процентному содержанию соответственно в 5,3 и 9,6 раза больше, чем в покрытии, сформированном щеткой из стали 65Г (табл. 1).

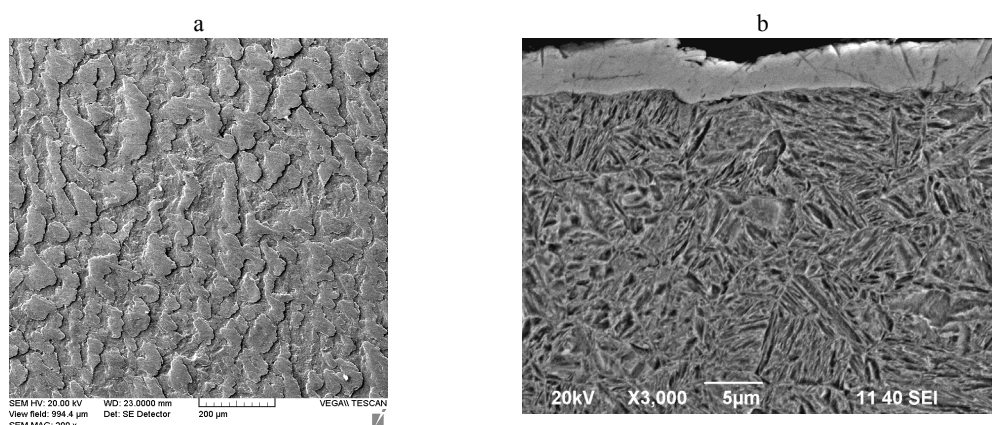


Рис. 1. Фото рельефа поверхности (а) и микроструктуры (b) образца из стали 45 с хромовым покрытием, сформированным методом электродеформационного плакирования гибким инструментом

Fig. 1. Photo of surface relief (a) and microstructure (b) for steel-45 sample with chrome coating formed by electrodeformation cladding [EDCFT] method with flexible tools

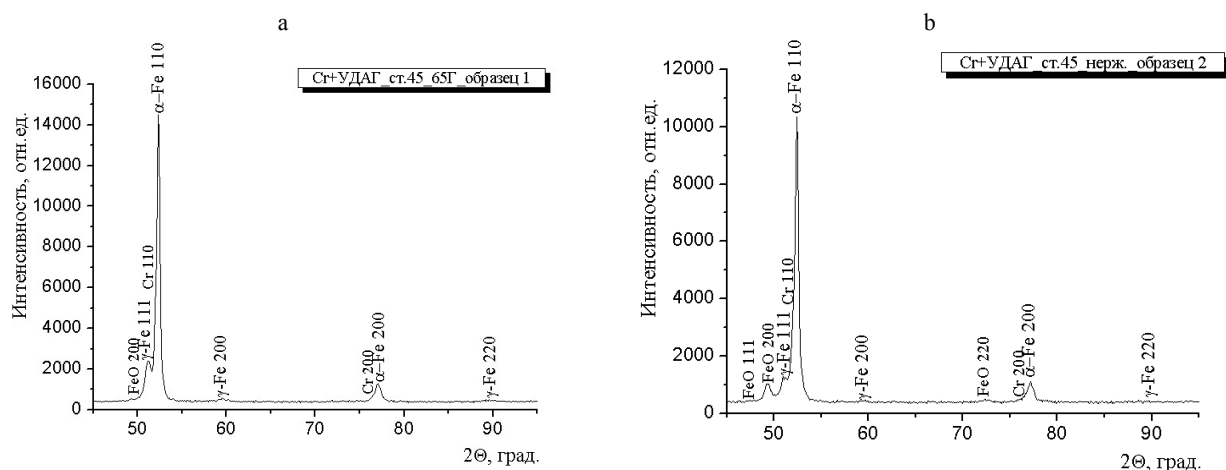


Рис. 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм хромовых покрытий, сформированных методом электродеформационного плакирования гибким инструментом на поверхности стали 45 с использованием вращающихся металлических щеток с ворсом, выполненным из стали 65Г (а) и нержавеющей стали 03X17H14M2 (b)

Fig. 2. Fragments of X-ray diffraction patterns for chromium coatings formed by EDCFT method on surface of steel-45 using rotary metal brushes [RMB] with wire pile made of 65Г-steel (a) and 03X17H14M2-stainless steel (b)

Таблица 1

Химический состав хромовых покрытий, сформированных на поверхностях образцов из стали 45 методом электродеформационного плакирования гибким инструментом с использованием вращающихся металлических щеток с ворсом, выполненным из стали 65Г (1) и нержавеющей стали 03X17H14M2 (2)

Chemical composition of chromium coatings formed on surfaces of steel-45 samples by EDCFT method using RMB with pile made of 65Г-steel (1) and 03X17H14M2-stainless steel (2)

№ образца		Al	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Mo	Fe
1	Покрытие		0,441	0,060	0,016	0,506	0,556	0,181	0,153	0,020		Основа
	Основа	0,132	0,441	0,052	0,017	0,121	0,557	0,185	0,170			Основа
2	Покрытие	0,187	0,681	0,074	0,014	2,697	0,660	1,739	0,195		0,015	Основа
	Основа	0,101	0,476	0,053	0,002	0,123	0,552	0,181	0,175		0,010	Основа

Образование аустенита в поверхностных слоях плакированных образцов, а также повышенное содержание хрома и никеля в покрытии, сформированном щеткой из нержавеющей стали, свидетельствуют о том, что в процессе ЭДПГИ, наряду с частичками материала донора, в состав хромового покрытия инкорпорируются и частички материала проволочного ворса щетки, что может способствовать усилению его антикоррозионных свойств.

Анализ результатов измерений шероховатости поверхности экспериментальных образцов дисков без покрытия и с хромовыми покрытиями, сформированными гальваническим осаждением и методом ЭДПГИ, показал, что для гальванических хромовых покрытий последующая после шлифования полировка слабо влияет на снижение как разброса значений, так и общего уровня шероховатости поверхности (рис. 3, столбцы 2, 3). Для этих покрытий полировка способствовала снижению параметра шероховатости поверхности Ra в среднем на 6 %.

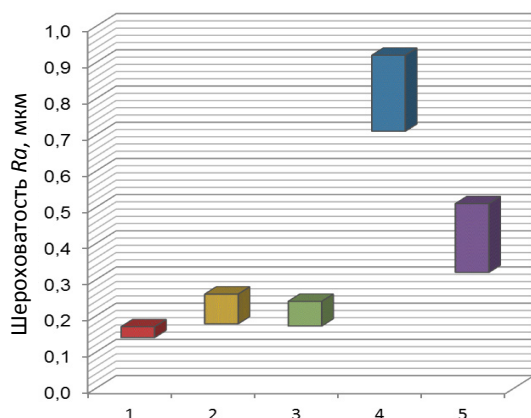


Рис. 3. Диаграмма общего уровня и разброса значений величин параметра шероховатости поверхности Ra экспериментальных образцов дисков с хромовыми покрытиями: 1 – без покрытия; 2 – с гальваническим хромовым покрытием после шлифования; 3 – то же после шлифования и последующего полирования; 4, 5 – с хромовым покрытием, сформированным электродеформационным плакированием гибким инструментом, в исходном состоянии и с последующим полированием соответственно

Fig. 3. Diagram of general level and variation in values of surface roughness parameter Ra for experimental samples of disks with chromium coatings: 1 – uncoated; 2 – with electroplating chrome plating after grinding; 3 – with electroplated chrome plating after grinding and subsequent polishing; 4, 5 – with chrome plating, formed by EDCFT in initial state and with subsequent polishing, respectively

У дисков с плакированными хромовыми покрытиями шероховатость поверхности как по общему уровню, так и по разбросу значений величин параметра Ra значительно больше, чем у гальванических хромовых покрытий (рис. 3, столбцы 4, 5). При этом хотя последующая полировка плакированных хромовых покрытий и снижает параметр шероховатости поверхности Ra с 0,71–0,92 до 0,32–0,51 мкм, тем не менее он больше, чем у гальванических неполированных хромовых покрытий ($Ra = 0,18–0,26$ мкм). Однако, несмотря на худшие показатели шероховатости, по результатам триботехнических испытаний установлено, что пары трения с образцами с неполированными и полированными плакированными хромовыми покрытиями, сформированными методом ЭДПГИ, обладают наименьшими значениями величин коэффициента трения скольжения (рис. 4, кривые 4, 5) нежели пары с образцами с гальваническими неполированными и полированными покрытиями (рис. 4, кривые 2, 3), а также пары без покрытия (рис. 4, кривая 1).

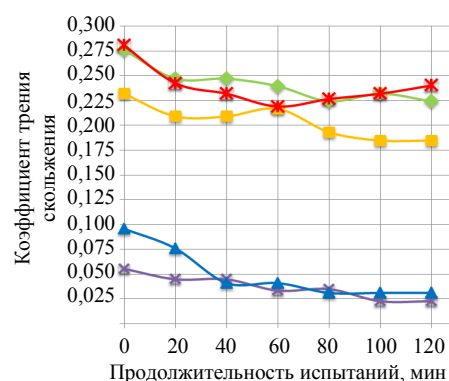


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения скольжения для пар трения с образцами с хромовыми покрытиями от продолжительности испытаний: 1 – без покрытия; 2 – с гальваническим хромовым покрытием после шлифования; 3 – то же после шлифования и последующего полирования; 4, 5 – с хромовым покрытием, сформированным электродеформационным плакированием гибким инструментом, в исходном состоянии и с последующим полированием соответственно

Fig. 4. Dependences of sliding friction coefficient for friction pairs with chrome coating samples on test duration: 1 – without coating; 2 – with electroplating chrome plating after grinding; 3 – with electroplated chrome plating after grinding and subsequent polishing; 4, 5 – with chrome plating formed by EDCFT in initial state and with subsequent polishing, respectively

Коэффициент трения скольжения у пар с образцами с плакированными полированными хромовыми покрытиями в начальный и заключительный периоды испытаний оказался соответственно в 4,5 и 7,5 раза меньше, чем у образцов с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями (рис. 4, кривая 2).

Как видно из представленных на рис. 4 зависимостей, значения величин коэффициента трения скольжения для всех испытываемых пар трения на протяжении 80 мин цикла испытаний имеют тенденцию к снижению. При этом коэффициент трения скольжения для пар трения с образцами без покрытия и с гальваническими неполированными и полированными хромовыми покрытиями уменьшается относительно первоначальных значений в среднем в 1,2–1,24 раза (рис. 4, кривые 1, 2, 3), а для пар с образцами с плакированными неполированными и полированными хромовыми покрытиями – в 3,1 и 1,4 раза соответственно (рис. 4, кривые 4, 5). Далее наблюдается стабилизация процесса трения у всех испытываемых пар с образцами с хромовыми покрытиями, кроме пар с образцами без покрытия, где заметно возрастание величины коэффициента трения скольжения (рис. 4, кривая 1). К концу цикла испытаний среднее значение величины коэффициента трения скольжения для трущихся пар составляло: 0,24 – для образцов без покрытия; 0,185 – для образцов с гальваническими неполированными покрытиями; 0,224 – для образцов с гальваническими

полированными покрытиями; 0,031 и 0,023 – для образцов с плакированными неполированными и полированными покрытиями соответственно.

Можно предположить, что снижению значений величин коэффициента трения скольжения у пар с образцами с плакированными хромовыми покрытиями способствует развитый микрорельеф их поверхности, характеризующийся наличием сглаженных микровыступов и микроуглублений (микрокарманов) (рис. 1а). Подобные микрокарманы, как известно, обладают способностью повышать гидроемкость поверхностного слоя, лучше удерживают смазочный материал и в процессе фрикционного взаимодействия с контртелом обеспечивают возможность возникновения гидродинамического эффекта в зоне контакта. К числу их положительных свойств относят также и то, что при преднамеренном формировании на поверхности, например штока гидроцилиндра, они способствуют снижению усилия страгивания штока в случае его длительной выдержки в неподвижном состоянии под нагрузкой благодаря способности сохранения смазочной пленки на трущейся поверхности [13, 14].

По результатам исследований величин износа образцов установлено, что наименьший износ как дисков с покрытиями, так и резиновых контробразцов имеют пары трения с дисками с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями, т. е. обработанные только шлифованием (рис. 5, столбец 2).

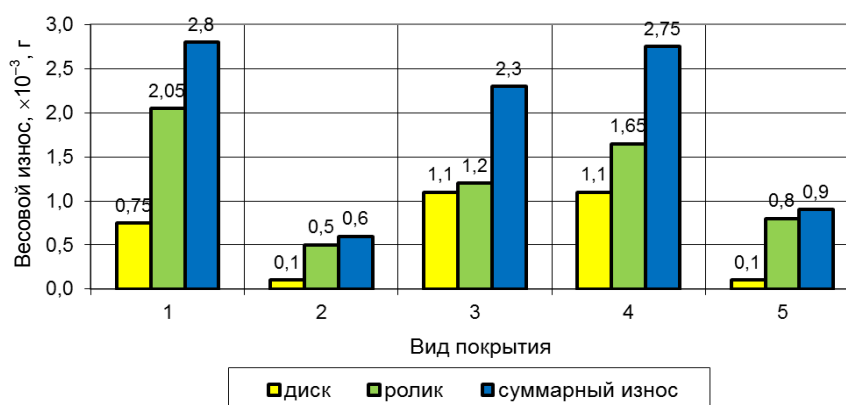


Рис. 5. Диаграмма значений величин износа для пар трения с образцами: 1 – без покрытия; 2 – с гальваническим хромовым покрытием после шлифования; 3 – то же после шлифования и последующего полирования; 4, 5 – с хромовым покрытием, сформированным электродеформационным плакированием гибким инструментом, в исходном состоянии и с последующим полированием соответственно

Fig. 5. Diagram of wear values for friction pairs with samples: 1 – uncoated; 2 – with electroplating chrome plating after grinding; 3 – with electroplated chrome plating after grinding and subsequent polishing; 4, 5 – with chrome plating formed by EDCFT in initial state and with subsequent polishing, respectively

Несколько больший износ имеют пары с плакированными полированными хромовыми покрытиями (рис 5, столбец 5). Для этих пар характерно то, что хотя износ дисков был и сопоставим с износом дисков с гальваническими неполированными покрытиями, износ их резиновых контробразцов оказался на $0,3 \cdot 10^{-3}$ г выше значений износа контробразцов пар с гальваническими неполированными покрытиями. У остальных пар трения, подвергнутых испытаниям, значения величин износа дисков и контробразцов заметно превышали предыдущие (рис. 5, столбцы 1, 3, 4).

ВЫВОДЫ

1. При формировании хромовых покрытий методом электродеформационного плакирования гибким инструментом на химический состав сформированных слоев, помимо элементного состава самого материала донора, влияет и материал ворса, из которого изготовлена проволочная щетка. В случае использования щеток с проволочным ворсом из нержавеющей стали 03X17H14M2 количество хрома и никеля в плакированном слое покрытия по процентному содержанию соответственно в 5,3 и 9,6 раза больше, чем в покрытии, сформированном щеткой из стали 65Г. При этом рельеф поверхности покрытия имеет развитую шероховатую структуру, состоящую из плотно уложенных и вытянутых в направлении вращения щетки различных по размерам микрочастиц хрома, а также сглаженных микровыступов и микроуглублений. Дефекты покрытия в виде несплошностей и отслоений отсутствуют.

2. Шероховатость поверхности плакированных покрытий до полировки ($Ra = 0,71\text{--}0,92$ мкм) и после полировки ($Ra = 0,32\text{--}0,51$ мкм) как по общему уровню, так и по разбросу значений величин параметра Ra выше, чем у гальванических неполированных ($Ra = 0,18\text{--}0,26$ мкм) и полированных ($Ra = 0,17\text{--}0,24$ мкм) хромовых покрытий. Однако, несмотря на повышенную шероховатость поверхности плакированных хромовых покрытий, по результатам триботехнических испытаний установлено, что пары трения с образцами с неполированными и полированными плакированными хромовыми покрытиями, сформированными методом электродеформационного плакирования гибким инструментом, обладают наименьшими значениями величин коэффициента трения скольжения,

чем пары с образцами с гальваническими неполированными и полированными покрытиями, а также пары без покрытия. Среднее значение величины коэффициента трения скольжения для трущихся пар составляло: 0,24 – для образцов без покрытия; 0,185 – для образцов с гальваническими неполированными покрытиями; 0,224 – для образцов с гальваническими полированными покрытиями; 0,031 и 0,023 – для образцов с плакированными неполированными и полированными покрытиями соответственно. Можно предположить, что снижению значений величин коэффициента трения скольжения у пар с образцами с плакированными хромовыми покрытиями способствует развитый микрорельеф их поверхности, характеризующийся наличием сглаженных микровыступов и микроуглублений (микрокарманов), которые повышают гидроемкость поверхностного слоя, лучше удерживают смазочный материал и в процессе фрикционного взаимодействия с контртелом обеспечивают возможность возникновения гидродинамического эффекта в зоне контакта. Однако, несмотря на низкие значения величин коэффициента трения скольжения у пар с плакированными хромовыми покрытиями, наименьший износ резиновых контробразцов отмечен у пар с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями, т. е. обработанных только шлифованием.

3. По результатам исследований величин износа образцов установлено, что наименьший износ как дисков с покрытиями, так и резиновых контробразцов имеют пары трения с дисками с гальваническими неполированными хромовыми покрытиями. Для этих пар характерно то, что хотя износ дисков был и сопоставим с износом дисков с плакированными полированными покрытиями, износ их резиновых контробразцов оказался на $0,3 \cdot 10^{-3}$ г меньше значений величин износа контробразцов пар с плакированными полированными покрытиями.

4. Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что технология формирования покрытий на основе хрома методом электродеформационного плакирования гибким инструментом, хотя и обладает определенными недостатками, главным из которых может оказаться повышенный износ контртел, выполненных из резины, однако в силу простоты ее реализации, малой энергоемкости и экологической чистоты вполне может быть использована в

промышленности для хромирования деталей гидроприводов.

5. Опытнo-промышленная апробация и внедрение технологии электродеформационного плакирования гибким инструментом выполнены в ОАО «Минский завод автоматических линий имени П. М. Машерова». Покрытия из хрома, легированного УДАГ, были сформированы методом электродеформационного плакирования гибким инструментом на рабочих поверхностях штоков гидроцилиндров объемных гидроприводов гидравлического оборудования станков (рис. 6а). Испытания штоков с покрытием «хром + УДАГ» в составе гидроцилиндров проводили на Минском заводе автоматических линий имени П. М. Машерова на испытательном стенде (рис. 6б). В ходе испытаний установлено, что опытные гидроцилиндры полностью соответствуют предъявляемым техническим требованиям и пригодны для эксплуатации в составе гидроприводов станков.

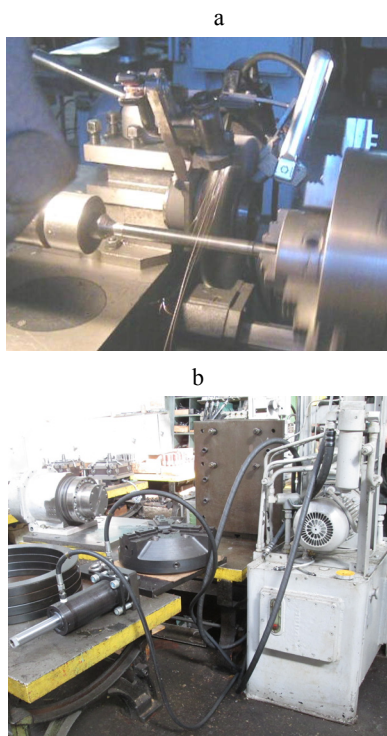


Рис. 6. Формирование покрытия «хром + УДАГ» методом электродеформационного плакирования гибким инструментом на рабочих поверхностях штока гидроцилиндра (а) и проверка функционирования штока с покрытием в составе гидроцилиндра (б)

Fig. 6. Formation of “chromium + ultradispersed detonation diamond graphite charging material” coating by EDCFT method on working surfaces of hydraulic cylinder rod (a) and checking of rod operation with coating in composition of cylinder (b)

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭДПИГ (EDCFT) – электродеформационное плакирование гибким инструментом (electrodeformation cladding with a flexible tool);

УДАГ (UDDG) – ультрадисперсная алмазно-графитовая шихта (ultradispersed diamond-graphite mixture);

ВМЩ (RMB) – вращающаяся металлическая щетка (rotary metal brush);

$f_{тр}$ (f_{rp}) – коэффициент трения скольжения (coefficient of sliding friction);

Δm (Δm) – весовой износ (weight wear).

ЛИТЕРАТУРА

1. Свешников, В. К. Станочные гидроприводы: справочник / В. К. Свешников. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
2. Гидроцилиндры: учеб.-метод. пособие / Д. Ю. Воронов [и др.]. Тольятти: ТГУ, 2011. 72 с.
3. Бельский, М. А. Электроосаждение металлических покрытий: справ. / М. А. Бельский, А. Ф. Иванов. М.: Металлургия, 1985. 288 с.
4. Фаличева, А. И. Экологические проблемы хромирования и альтернативного покрытия / А. И. Фаличева, Ю. А. Стекольников, Н. И. Глянец // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естеств. и техн. науки. 1999. Т. 4, вып. 2. С. 256–257.
5. Перспективы замены гальванического хромирования гиперзвуковой металлизацией / М. А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А. А. Дюжев [и др.]. 2014. Вып. 3. С. 324–328.
6. Verstak, A. Activated Combustion HVOF Coatings for Protection against Wear and High Temperature Corrosion / A. Verstak, V. Baranovski // Thermal Spray 2003. Advancing the Science and Applying the Technology: Proceedings of the 2003 International Thermal Spray Conference, 5–8 May 2003 Orlando, Florida. USA, Ohio, 2003. P. 535–541.
7. Пилюшина, Г. А. Состояние и пути повышения работоспособности гидропривода лесозаготовительных машин / Г. А. Пилюшина, С. В. Тяпин // Автотракторостроение-2009: Междунар. науч. симпозиум (Москва). М.: МГТУ «МАМИ», 2009. Кн. 1. С. 452–455.
8. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / П. П. Лезин [и др.]. Саранск: Красный Октябрь, 2003. 504 с.
9. Raykis, O. High-Speed Laser Metal Deposition Replaces Hard Chrome Plating / O. Raykis // Laser Technik Journal. 2017. No 1. P. 28–30.
10. Белевский, Л. С. Фрикционный и электрофрикционный способы нанесения покрытий / Л. С. Белевский, И. В. Белевская // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2012. № 38. С. 158–163.
11. Износостойкость легированных хромовых покрытий, сформированных способом деформационного плакирования с электрическим напряжением / М. А. Леван-

- цевич [и др.]. Минск, 2017. // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С. Н. Поддубко [и др.]. 2017. Вып. 6. С. 159–162.
12. Борисов, Г. А. Технологические основы повышения ресурса штокового узла гидроцилиндра / Г. А. Борисов, Е. Е. Семенова, В. Ю. Чикунков // Вестник РГАТУ. 2010. № 2. С. 44–50.
 13. Шнейдер, Ю. Г. Влияние шероховатости металлической поверхности на трение в гидроуплотнительных парах возвратно-поступательного движения / Ю. Г. Шнейдер, А. Л. Рейнус // Вестник машиностроения. 1970. № 5. 19–20.
 14. Проволоцкий, А. Е. Технологические методы повышения долговечности деталей гидромашин / А. Е. Проволоцкий, С. П. Лапшин, С. Л. Негруб // Промислова гідравліка і пневматика. 2004. Т. 4, вып. 2. С. 68–71.

Поступила 01.04.2019

Подписана в печать 11.06.2019

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Sveshnikov V. K. (2004) *Machine Hydraulic Drive*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 512 (in Russian).
2. Voronov D. Yu., Voloskov V. V., Drachev A. O., Boichenko O. V. (2011) *Hydraulic Cylinders*. Tolyatti, Togliatti State University. 72 (in Russian).
3. Belenkii M. A., Ivanov A. F. (1985) *Electrodeposition of Metal Coatings*. Moscow, Metallurgiya Publ. 288 (in Russian).
4. Falicheva A. I., Stekolnikov Yu. A., Glyantsev N. I. (1999) Ecological Problems of Chroming and Alternative Coating. *Vestnik Tambovskogo Universiteta. Seriya Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki = Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 4 (2), 256–257 (in Russian).
5. Belotserkovsky M. A., Sosnovsky A. V., Grigorchik A. N., Prjadko A. S., Cherepko A. E. (2014) Prospects of Substitution of the Galvanic Chromium Coating by Hypersonic Metallization. *Aktual'nye Voprosy Mashinovedeniya: Sb. Nauch. Tr.* [Pertinent Issues in Mechanical Engineering: Collection of Research Papers]. Minsk, (3), 324–328 (in Russian).
6. Verstak A., Baranovski V. (2003) Activated Combustion HVOF Coatings for Protection Against Wear and High Temperature Corrosion. *Thermal Spray 2003. Advancing the Science and Applying the Technology: Proceedings of the 2003 International Thermal Spray Conference*, 5–8 May 2003 Orlando, Florida, USA, Ohio, 535–541.
7. Pilyushina G. A., Tyapin S. V. (2009) State and Approaches for Improvement of Hydrodrive Performance in Tree Harvesting Machines. *"Avtotraktorostroenie-2009", Mezhdunarodnyi Nauchnyi Simpozium (Moskva). Kniga 1* ["Autotractor-building-2009", International Scientific Symposium (Moscow). Book 1]. Moscow, Moscow State Technical University "MAMI", 452–455 (in Russian).
8. Lezin P. P., Senin P. V., Ivanov V. I., Velichko S. A., Ionov P. A. (2003) *Electric Spark Technologies for Reconditioning and Strengthening of Machine Parts and Tools (Theory and Practice)*. Saransk, Krasny Oktyabr Publ. 504 (in Russian).
9. Raykis O. (2017) High-Speed Laser Metal Deposition Replaces Hard Chrome Plating. *Laser Technik Journal*, (1), 28–30. <https://doi.org/10.1002/latj.201700006>.
10. Belevskii L. S., Belevskaya I. V. (2012) Friction and Electric-Friction Methods for Coating Deposition. *Obrabotka Splushnykh i Sloistykh Materialov* [Processing of Solid and Multi-Layer Materials], (38), 158–163 (in Russian).
11. Levantsevich M. A., Pilipchuk E. V., Sheleg V. K., Kalach V. N. (2017) Wear Resistance of Alloy Chrome Platings Formed while Using Method of Deformative Cladding with Electric Voltage. *Aktual'nye Voprosy Mashinovedeniya: Sb. Nauch. Tr.* [Pertinent Issues in Mechanical Engineering: Collection of Research Papers]. Minsk, (6), 159–162 (in Russian).
12. Borisov G. A., Semenova E. E., Tchikunkov V. Yu. (2010) Technique for Improvement of Resource in Rod Unit of Hydrocylinder. *Vestnik Ryazanskogo Gosudarstvennogo Agrotekhnologicheskogo Universiteta imeni P. A. Kostycheva = Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev*, (2), 44–50 (in Russian).
13. Shneider Yu. G., Reynus A. L. (1970) Influence of Metallic Surface Roughness on Friction in Hydraulic Sealing Pairs of Backward and Forward Action. *Vestnik Mashinostroyeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], (5), 19–20 (in Russian).
14. Provolotsky A. E., Lapshin S. P., Negrub S. L. (2004) Technological Methods for Improvement of Longevity in Hydraulic Machine Parts. *Promislova Gidravlika i Pnevmatika = Industrial Hydraulics and Pneumatics*, 4 (2), 68–71 (in Russian).

Received: 01.04.2019

Accepted: 11.06.2019

Published online: 30.09.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-369-379>

UDC 534.2

Improving Properties of Tool Steels by Method of Dynamic Alloying

A. S. Kalinichenko¹⁾, V. I. Ovchinnikov²⁾, S. M. Usherenko¹⁾, Javad F. Yazdani-Cherati¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾The State Scientific Institution "Powder Metallurgy Institute", Separate self-supporting division "Research Institute of Pulse Processes with pilot production" (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Abstract. The influence of high-speed particle fluxes on changes in the structure and properties of materials has been widely studied currently. The effect exerted by particles moving at very high speeds can have both negative (in spacecrafts) and positive character (dynamic processing of tool steels). Therefore a task for studying an effect of high-speed particle flows on structure change in tool steels and improving their performance properties has been set in the paper. The study has used an explosive method for creation of a high-speed flow of SiC + Ni and Al₂O₃ particles. Samples after dynamic alloying have been subjected to diffusion nitriding. Microstructure of specimens made of X12M, R18, R6M5K5- steel has been studied using optical and electron metallography. Wear resistance of the samples has been also tested on a friction machine. Theoretical and experimental results on a complex effect of high-speed microparticle flows and nitriding on a structure and properties of tool steels have been obtained during the research. It has been established that dynamic alloying by particles leads to formation of a specific structure in a composite material reinforced with channels. Central fiber (channel) zone with powder particles residues is surrounded by areas of amorphous state which is succeeded by a zone with a nanocrystalline fragmented cellular structure. Then we observe a zone with a microcrystalline structure that transits to a zone with crystalline structure which is characteristic for a matrix material of structural steel. The obtained data can expand and complement some ideas about mechanisms for dynamic loading of solids and condensed matter, plastic deformation, physical mechanics of structurally inhomogeneous media at different levels, a number of effects arising from collision and ultra-deep penetration of microparticles into metals. It has been shown that wear resistance of high-speed steel subjected to dynamic alloying in the quenched state is increased by 1.2 times in comparison with wear resistance of steel alloyed in the annealing state.

Keywords: dynamic alloying, microstructure, nitriding, wear resistance

For citation: Kalinichenko A. S., Ovchinnikov V. I., Usherenko S. M., Yazdani-Cherati Javad F. (2019) Improving Properties of Tool Steels by Method of Dynamic Alloying. *Science and Technique*. 18 (5), 369–379. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-369-379>

Повышение свойств инструментальных сталей методом динамического легирования

Докт. техн. наук А. С. Калиниченко¹⁾, канд. техн. наук В. И. Овчинников²⁾,
докт. техн. наук, проф. С. М. Ушеренко¹⁾, асп. Джавад Ф. Яздани-Черати¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии», Обособленное хозяйственное структурное подразделение «Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В настоящее время достаточно широко изучаются вопросы влияния высокоскоростных потоков частиц на изменение структуры и свойств материалов. Эффект, который оказывают частицы, двигающиеся с очень высокой скоростью, может быть как негативный, например в космических аппаратах, так и положительный – при динамической

Адрес для переписки

Калиниченко Александр Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 190-64-90
akalinichenko@bntu.by

Address for correspondence

Kalinichenko Alexander S.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 190-64-90
akalinichenko@bntu.by

обработке инструментальных сталей. Поэтому была поставлена задача исследования воздействия высокоскоростных потоков частиц на изменение структуры инструментальных сталей и повышение их эксплуатационных свойств. В работе использовался взрывной метод создания высокоскоростного потока частиц SiC + Ni и Al₂O₃. Образцы после динамического легирования подвергались диффузионному азотированию. Микроструктура образцов из сталей X12M, P18, P6M5K5 изучалась с помощью оптической и электронной металлографии. Испытывалась и износостойкость образцов на машине трения. В ходе исследований получены теоретические и экспериментальные результаты по комплексному воздействию высокоскоростных потоков микрочастиц и азотирования на структуру и свойства инструментальных сталей. Установлено, что динамическое легирование частицами приводит к формированию специфической структуры композиционного материала, армированного каналами. Центральная волокнистая (канальная) зона с остатками частиц порошка окружена областями с аморфным строением, она сменяется зоной с нанокристаллической фрагментированной ячеистой структурой. Затем наблюдается зона с микроструктурой, которая переходит в зону кристаллического строения, характерного для матричного материала конструкционной стали. Полученные данные могут расширить и дополнить некоторые представления о механизмах динамического нагружения твердых тел и конденсированных сред, пластической деформации, физической механики структурно-неоднородных сред на различных уровнях, о ряде эффектов, возникающих при соударении и сверхглубоком проникании микрочастиц в металлы. Установлено, что износостойкость быстрорежущей стали, подвергнутой динамическому легированию в закаленном состоянии, увеличивается в 1,2 раза по сравнению с износостойкостью стали, легированной в состоянии отжига.

Ключевые слова: динамическое легирование, микроструктура, азотирование, износостойкость

Для цитирования: Повышение свойств инструментальных сталей методом динамического легирования / А. С. Калинин [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 369–379. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-369-379>

Introduction

Currently, the influence of high-speed particle flows on changes in the structure and properties of materials is widely studied. It is established that high-speed flows of dust particles due to the effect of super-deep penetration can cause failure of electronic devices at space stations. As a result, some special measures must be developed for protection of electronic units in space environment [1, 2].

One of the promising directions and methods of materials processing are high-energy pulse methods that provide dynamic restructuring of the structure and properties. At present, extensive scientific, theoretical and experimental data on the investigations of physical and mechanical properties of metals surface layers under pulsed loading are obtained. Much less results were published on the study of deep layers in condensed matters [3–5].

So far, the basic peculiarities of high-speed deformation of metals and changes in their properties in the zone of the shock wave penetration have been established [6]. But the mechanism of interaction of high-energy flows of powder particles with the matrix is not fully explained. There is practically no explanation for the formation of electromagnetic radiation and magnetic fields, the formation of which is fixed, as well as their effect on thermodynamic, chemical and electrical properties, structural and energy changes in condensed media.

Improving the operational stability of machine parts and mechanisms, tools are inextricably linked

to the increase in the physical and mechanical characteristics of the metal (wear resistance, toughness, bending strength), as many parts, including cutters for mining machines, operate in conditions of abrasive wear, sudden temperature changes and shock loads. The complex solution of questions dealing with the increase in durability of products is an important problem for machine-building branch in general and mining one in particular.

Increasing the wear resistance of working bodies' parts and tools is mainly achieved by alloying and deposition of wear-resistant protective coatings, chemical and thermal treatment, as well as the use of special materials.

A significant disadvantage of traditional hardening methods is that the increase in wear resistance is usually accompanied by a decrease in bending strength and toughness. In addition, scarce and expensive elements (tungsten, cobalt, molybdenum, etc.) are used for alloying and hardening.

Therefore, non-traditional technologies of metals and tools hardening are of interest. One of these methods is the use of explosive hardening of parts, including tools for the mining industry including the production of potassium salts. Earlier studies have been implemented dealing with the development of hardening technology of tool steel by the method of dynamic alloying with the application of the explosion energy to accelerate the flow of the alloying substances [7, 8].

The study of the processes accompanying the interaction of the high-speed particles flow with

a metal matrix contributes to the understanding of the dynamics of changes in the state of matter. Modes of dynamic action of the particle flow provide a change in the physical and mechanical properties of metals and non-metals, as well as the evolution of their structure [9, 10]. Features of particle penetration contribute to the formation of composite materials with an increased level of properties that is important for practical applications.

The main features of the technology of materials explosion treatment with high-speed flows of powder particles include: high concentration of energy introduced into the impact zone, locality and precision processing at significantly lower total energy consumption. Due to this, it is possible to reduce and combine certain types of processing, as well as to ensure a controlled process of forming the structure of materials. The use of cumulation of energy flows and powder particles allows solving one of the problems of obtaining composite materials, including structured ones and materials with new properties.

This work is devoted to the study of the processes of microstructure and properties formation in specimens, as well as the mechanism of the base material hardening due to complex processing of tool steels during the dynamic alloying of the metal matrix by powder particles and nitriding.

Materials and methods of research

The experiments were carried out on cylindrical samples with a diameter of 8 mm made of steel X12M, R18, R6M5K5 and processed by a high-speed flow of particles SiC + Ni and Al₂O₃ of fraction 50–100 μm. The background pressure was about 2 GPa, the exposure time was about 40 μs. Steel specimens after pulsed exposure to the powder particles flow were cut from the processing side to a depth of 1 mm. After that, the specimens were subjected to diffusion nitriding for 1 hour. The wear resistance of steel alloyed with SiC powder was evaluated by determining the wear rate of the samples in the machine AI-1 during the friction with the grinding wheel (GOST 2424–83). The specific pressure was maintained at 0.6 kg/cm². The speed of the circle rotation was 330 min⁻¹. Explosive matter “Ammonite 6ZV” was used in amount of 200 g. The microstructure of the samples before and after treatment was investigated using the microscope “Metam-21”, electronic microscope “Stereoscan-360”. Phase analysis of the

samples was performed on the X-ray diffractometer DRON-3 in Fek_α monochromatized radiation.

Results and discussion

Optimization of the scheme and modes of dynamic alloying of hardened tool steel. The fact that the impact and penetration of particles is inextricably linked to the loading of the barrier (sample) with dense high-speed particle flow, an important aspect is the optimization of the process and the correct choice of processing method. This feature causes necessitates of more detailed study of the structure of the particle flow formed by the explosive accelerator. Scheme of accelerator is depicted in fig. 1. It is necessary to establish the relations between the flow parameters and peculiarities of the particles penetration into the processed sample, as well as the degree of their influence on overall process. These parameters are an important condition for process control and ensuring required properties of the product.

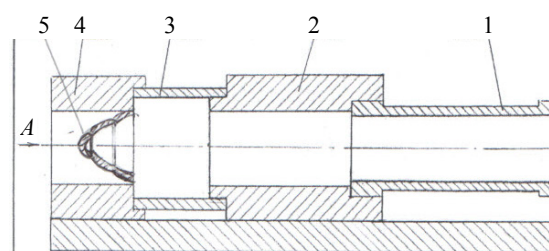


Fig. 1. Scheme of microparticles accelerator design:
1 – guide of the particles flow with the desired diameter;
2 – adjusting (focusing) support; 3 – chamber of the
of particles flow formation; 4 – body of the explosive device;
5 – cumulative funnel (lens)

The simplest means of controlling the flow parameters are the change of technological features of the accelerator, including the choice of the optimal geometric configuration of the accelerator for specific technical purposes, the design of its elements, the quantity and quality of the explosives used for this purpose. The main elements of the accelerator are the powder container and the adjusting support. The adjusting support is a thick-walled steel pipe and is used to set a predetermined distance from the powder container to the workpiece, as well as to focus the powder jet formed during the compression of the container with the powder by charge of the explosive. Fig. 2a shows a scheme of steel R6M5 treatment.

The shape of the container affects the speed of the jet and the uniformity of the powder particles distribution along its flow. Containers made of aluminum sheet 1.5 mm thick with the shape of a hemisphere, a hollow cylinder or three docked hemispheres of different diameters were used (fig. 2b). Non-uniformity of surface treatment of alloyed specimens was observed after using a container in the shape of a hemisphere. It was found for this case that zones of significant plastic deformation were observed along with shallow micro-craters (0.5–1.0 mm) which evenly distributed on the surface. The depth and diameter of plastic deformation zones reach 8–10 and 15–18 mm, respectively.

The presence of such heterogeneous in the degree of plastic deformation zones leads to stresses that adversely affect the properties of the product and contribute to the process of cracking during subsequent heat treatment.

The container in the form of three docked hemispheres of different diameters allows increasing the uniformity of processing. The maximum velocity of the powder particles jet can be obtained using a container in the form of a hollow cylinder, which follows from the basic ratio of the cumulation theory

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}},$$

where ω_1 – velocity of the jet, m/s; ω_0 – rate of collapse of the cladding elements, m/s; α – angle of collapse, deg.

The containers with the powder composition in the form of a cylinder with an inner diameter of 25 mm were used in experiments conducted. The higher particles speed (in the case for a container of cylindrical shape) contributes to the increase in the depth of their penetration into the material, but also increases the danger of crack formation and destruction of parts. Therefore, to obtain high-quality products, it is necessary to increase the distance between the explosive accelerator and parts made of quenched high-speed steel in comparison with the distance that provided high-quality hardening of the same steels parts in the annealed state. High hardness (61–66 HRC) of quenched high-speed steels dramatically increases the risk of cracking during dynamic alloying, which makes it necessary to study the structural state of the steel after quenching.

In high-speed steel parts the $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation and dissolution of some excess carbides in the resulting austenite occur during the process of heating for quenching. After quenching in the structure of steel part of austenite (residual) and excess carbides, as well as martensite, retained. During the explosive alloying of quenched steels a volume network of microchannels forms in their structure, and the processes of residual austenite peening take place.

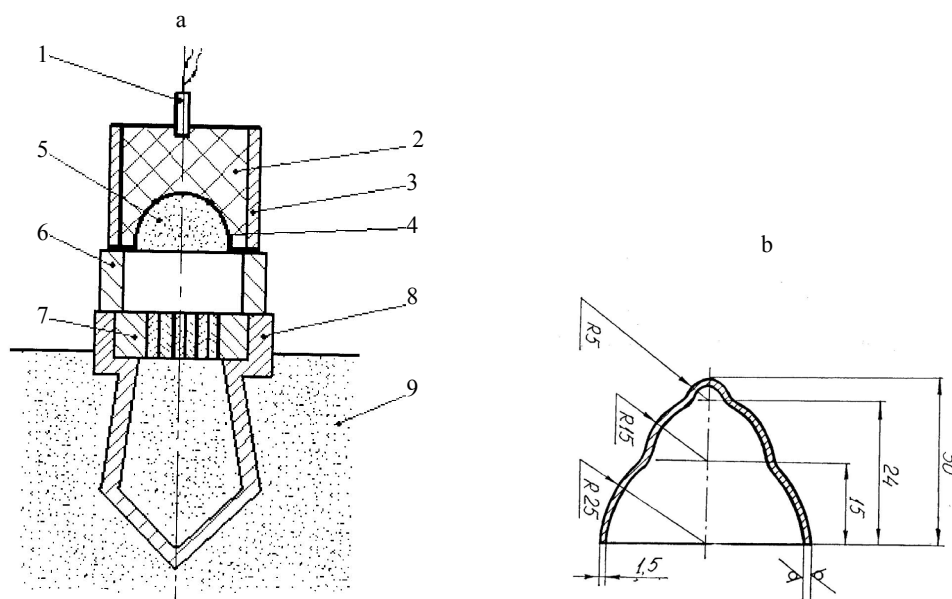


Fig. 2. Scheme of steel R6M5 specimen's treatment: 1 – electric detonator; 2 – explosive charge; 3 – casing of the explosive charge; 4 – lens; 5 – powder; 6 – adjusting support; 7 – set with specimens; 8 – container; 9 – sand

Dynamic alloying of quenched high-speed steel, which does not contain a certain amount of residual austenite in its structure, leads to cracking or destruction of products. It is caused by low plasticity of martensitic crystals. Cracking is also observed if a large amount of residual austenite (40–45 %) is retained in the structure of the steel. It associates with high structural stresses arising during quenching. The optimum amount of residual austenite at which dynamic processing becomes possible is approximately 20 % for tungsten-molybdenum steels and 25–30 % for tungsten-cobalt ones.

Thermal stresses arising in high-speed steel after quenching lead to cracking of the samples during dynamic processing. To reduce thermal stresses it is necessary to implement low-temperature tempering. Tempering, which is carried out at temperatures below 150 °C, does not lead to a decrease in hardness. Tempering at temperatures of (200–350) °C reduces hardness by 2–4 units of HRC.

Possible schemes of dynamic alloying of quenched high-speed steel were experimentally verified:

1. Repeated introduction of alloying particles with intermediate annealing. In this scheme, it is necessary to carry out annealing between the dynamic processing operations at a temperature above $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation ((900–950) °C) to remove high structural stresses formed during quenching and dynamic alloying. During this treatment the processes of steel softening are intensively taking place. The experiments carried out showed a low efficiency of hardening during processing according to this scheme.

2. Simultaneous introduction of alloying particles in three mutually perpendicular directions. When processing in this scheme of high-speed steel in the annealing state, it is possible to ensure a uniform distribution of microchannels in the volume of products. As a result, there is the increase in the level of mechanical properties and elimination of their anisotropy. However, treatment in a quenched state leads to the destruction of steel products and therefore cannot be recommended.

3. Single introduction of alloying particles in a given direction (usually from the end surface). When processing according to this scheme, parts are placed at a certain distance from the explosive

accelerator, and the explosive charge is detonated. This mode of particles introduction into the quenched high-speed steel is the most technologically advanced, because this scheme allows obtaining high-quality products and provides high manufacturability of the hardening process.

Complex processing of quenched steel. The combination of steel processing operations with high-speed particle flows and nitriding leads to the appearance of a surface layer with an unusual structure. Along with the solid nitrided layer of steel with a thickness of 40 to 60 microns, to a depth of 140 microns a layer of nitrided vertical columnar structures surrounded by areas of the original steel structure is formed (fig. 3).

The abrasive tests of samples with simultaneous impact loading showed that the samples hardened by complex technology have a wear resistance of 1.5–2.5 times higher than that of the original steel X12M and after diffusion nitriding.

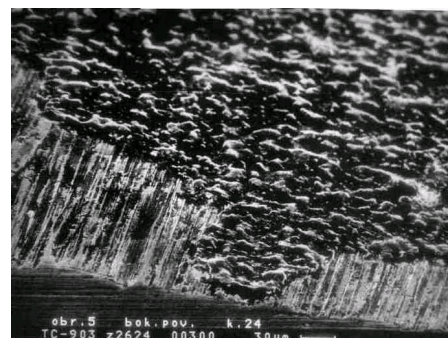


Fig. 3. Microstructure of the surface layer of steel X12M after treatment with a flow of particles and nitriding

Samples treated with a mixture of powders 50 % SiC + 25 % Al₂O₃ + 25 % Si₃N₄ showed the highest level of wear resistance (increase in 2–3 times). Their structure of nitrided zones was the most developed and the diffusion nitriding layer had depth up to 70–80 µm.

Dynamic alloying of materials by powder particles, in particular SiC, under the conditions of their penetration leads to the formation of a structure with many channels, different from the structure of the base material. The study of the fine structure by diffraction electron microscopy allowed us to establish that the channel zone consists of a central fiber zone with the remains of powder particles, which is surrounded by an amorphous zone of 8–10 µm wide. The amorphous zone passes into a nanocrystalline one with thickness

of 15–20 μm with further transition into a micro-crystalline zone with thickness of about 30 μm , followed by a transition to the crystalline state characteristic of the matrix material.

The formation of channel structures is accompanied by intense plastic deformation, both due to the penetration of particles and the compression of the channel walls behind the particle. As a result, even with a single exposure, the material acquires properties characteristic for a composite material with a pronounced anisotropy. Amorphous-like elements of the structure are formed in narrow local areas due to the accumulation of energy that are resistant to thermal effects. As a result of research it was established that after shock-wave loading there is a grain refining by 1.8–2.5 times compared to structure of initial steel in the area of microparticles penetration.

Thus, the analysis of the obtained results allows us to conclude that the wear resistance of the tool steel X12M strengthened by the complex technology increases by 1.5–2.5 times. One of the reasons for the increase in wear resistance is the formation of a layer with the structure of the composite material, reinforced by channel zones, which play the role of reinforcing elements. The combination of methods of volumetric dynamic alloying by powders particles and surface treatment of parts by diffusion nitriding can by 2.0–2.5 times increase the performance of the die tool.

Influence of particle flow treatment on the structure of tool steel. The structure of high-speed steel after quenching consists of martensite, excess carbides, insoluble during heating under quenching, and residual austenite. In the structure of steel after etching, there is the presence of pores, which, obviously, are formed during the braking out of the carbide phase. Tool steel R6M5 was used as the processed material, which was subsequently applied for the cutting insert of cutters RKS-1 type for mining combines used for the production of potassium ore. Steel R6M5 has high mechanical characteristics in the initial state, and complex heat treatment is applicable to it providing dispersion hardening (fig. 4).

It is obvious that the preliminary treatment by the powder particles flow should affect the processes of diffusion redistribution of alloying elements and carbon in the structure of R6M5 steel

during heat treatment and accordingly change its properties (fig. 5).

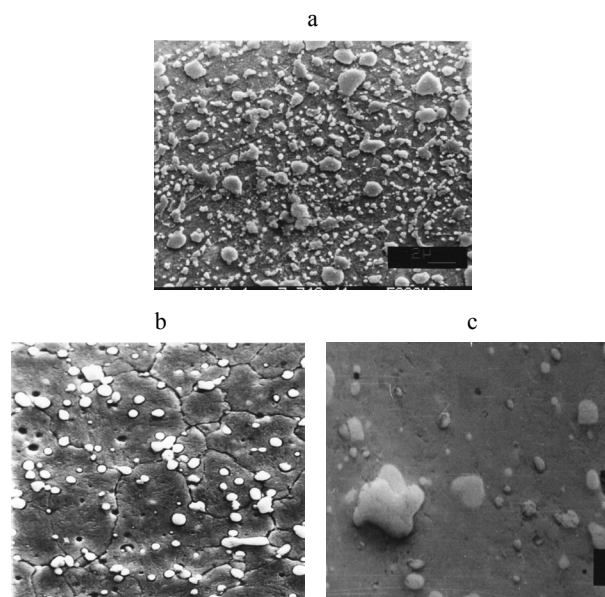


Fig. 4. Structure of the initial steel R6M5:
a – after annealing ($\times 5000$);
b – after quenching from 1220 $^{\circ}\text{C}$ ($\times 2500$);
c – after quenching from 1220 $^{\circ}\text{C}$
and triple tempering at 560 $^{\circ}\text{C}$ ($\times 2500$)

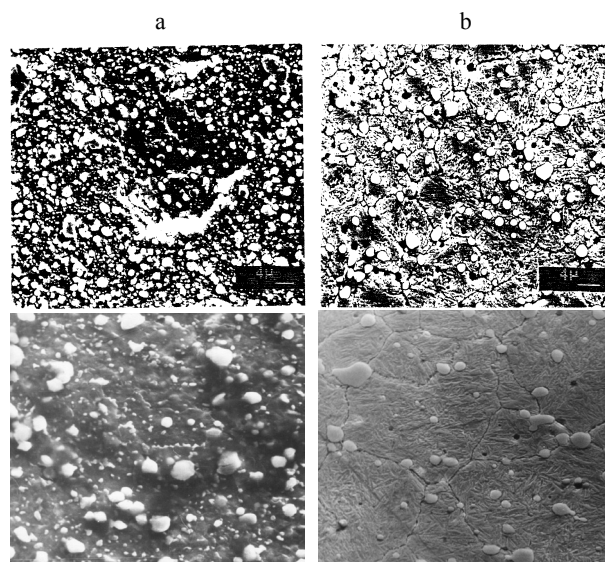


Fig. 5. The structure of steel R6M5 treated
by high-speed flow of Ni + SiC powders:
a – after annealing; b – after quenching from 1220 $^{\circ}\text{C}$ ($\times 2500$)

Dynamic micro-alloying of quenched steel does not lead to any noticeable changes in its structure. For example, the density and pore size do not increase, which emphasizes the complexity of the process of powder particles penetration into quen-

ched steel. Steel etchability slightly increases and therefore it becomes possible to identify martensite in the structure. After a single tempering (at 560 °C) for one hour the formation of zones, which differ in etching and chemical composition is observed in the structure of high-speed steel R6M5K5 in a quenched state, subjected to dynamic alloying using a powder mixture Ni + SiC (fig. 6).

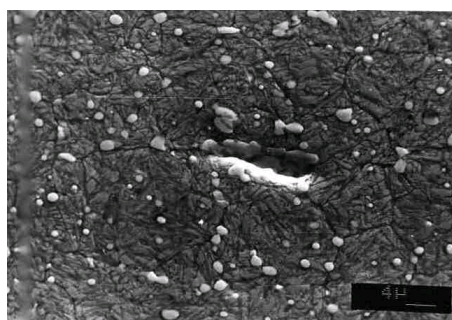


Fig. 6. Microstructure of steel R6M5K5 after a single tempering at $T = 560$ °C (etching in a 10 % solution of nitric acid) ($\times 2500$)

Studies conducted with a SEM “Stereo-scan-360” with micro-X-ray spectral analysis allowed to establish that these zones contain an increased content of W and V, obviously, in the

form of a carbide phase. At the same time, such alloying elements as Cr and Mo are evenly distributed between the matrix and the reinforcing zones (fig. 7).

The average size of the zones observed on the cross sections with respect to the direction of introduction of the alloying jet is 5–7 μm . With the increase in the duration of tempering the size of the reinforcing fibers increases and reaches 8–10 μm . Analysis of the steel structure in the hardening zone after a triple tempering at 560 °C (fig. 8) revealed the following.

In the center of the zone there is a significant amount of vanadium with the content ~ 45 % of all the studied elements, and there is no Nickel and Titanium. The presence of Nickel was recorded at some distance from the center, but the amount of vanadium (~ 3 %) was significantly reduced, and the content of the remaining alloying elements approached their average content in R6M5K5 steel. The formation of zones with a high content of vanadium carbide helps to increase the wear resistance of steel. Changes in the structure of the R6M5 tool steel occur because the particles flow impact and their penetration into the steel (fig. 9).

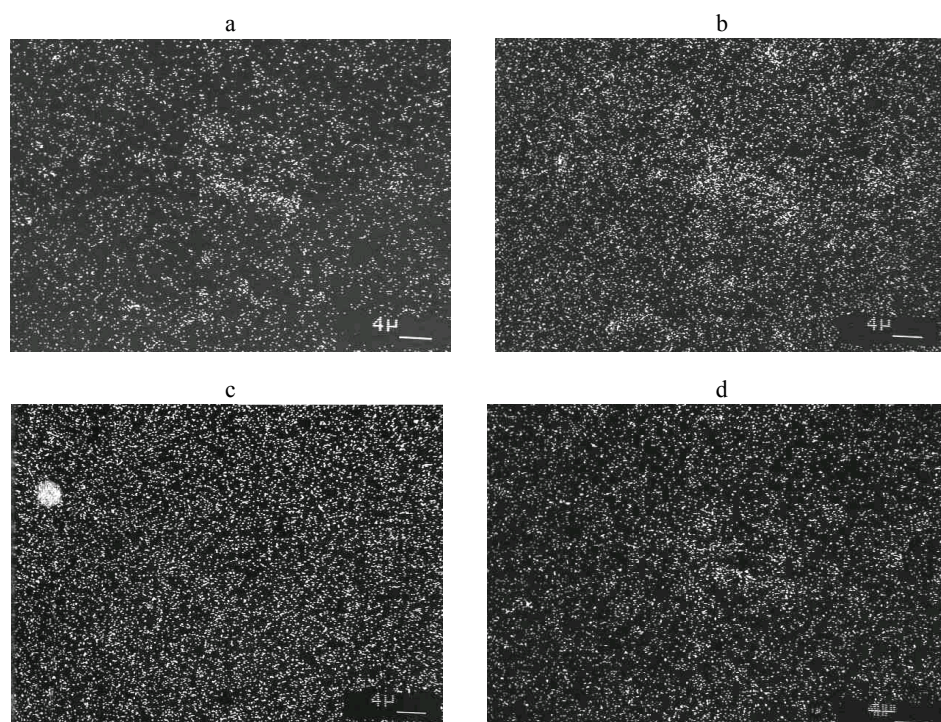


Fig. 7. Microstructure of steel R6M5K5 in characteristic radiation, ($\times 2500$): a – tungsten; b – vanadium; c – chromium; d – molybdenum

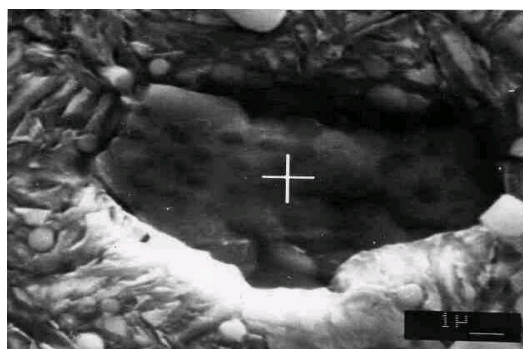


Fig. 8. Microstructure of steel R6M5K5 after triple tempering at $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\times 10000$)

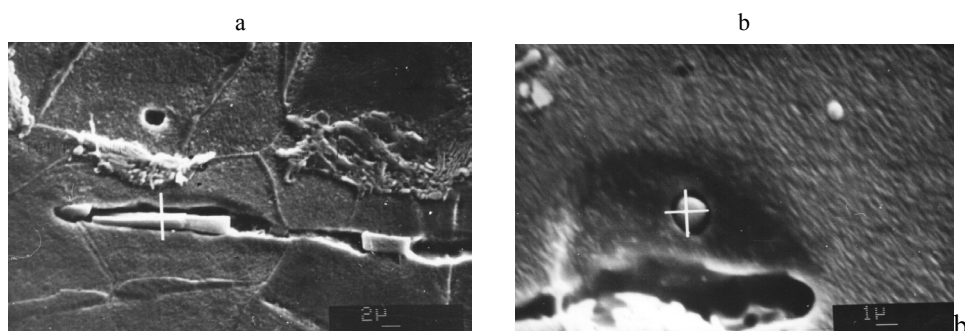


Fig. 9. Structural fragments of microparticles penetrated into the structure of steel R6M5 at a depth of 4 mm from the surface: a – longitudinal micro-section; b – transverse micro-section

Structures and properties of P6M5 steel in the initial quenched and non-quenched state are different. These features remain after processing by high-speed particle flow, as the influence of penetrating particles is different on structural components of steel. Penetrating particles form discrete fibers in the direction of penetration leading to anisotropy of properties. The treatment results in the increase in wear resistance in the transverse direction in 1.5–2.0 times.

Due to the shock-wave action there is a crushing and redistribution of carbide phases. As a result, the treated steel after standard heat treatment has a hardness of HRC = 58–64. Additional information about the influence of dynamic alloying on changes in the fine crystal structure of the tool steel was obtained by X-ray study. The data obtained are summarized in tab. 1.

Table 1

Data on X-ray analysis of R6M5K5 tool steel

№ specimen	Specimens studied	Lattice parameter, Å	Widening of lines, rad. $\times 10^{-3}$		Size of VCL, Å
			110	220	
1	Initial steel	2,8693	–	–	4000
2	Treated with aluminum oxide powder	2,8709	2,7	7,7	–
3	Treated with titanium carbide powder	2,8726	2,9	10,1	3827
4	Treated Ni + SiC powder mixture				
After quenching from 1220 °C and annealing at 560 °C					
5	Without treatment with explosion	2,8754	7,915	37,467	163
6	Treated with Al ₂ O ₃ powder	2,8771	8,716	40,885	154
7	Treated with TiC powder	2,8774	9,028	40,663	136
8	Treated with Ni + SiC powder mixture	2,8776	8,580	40,553	146

As can be seen from Table 1, the parameters of the fine crystal structure of the initial material are changed under the influence of the particle flow. The change in these parameters depends on the material used to form the jet of the working substance. The crystal structure changes dramatically after quenching from a temperature of 1220 °C and a triple tempering at 560 °C. There is a decrease in the size of the blocks (areas of coherent scattering) and an increase in the relative micro-distortions of the structure leading to the lines broadening. The smallest block size is observed in the case of titanium carbide application and the largest increase in the micro-distortion of the structure is observed for the use of a silicon carbide + Nickel mixture.

The influence of dynamic alloying on the hardness and wear resistance of quenched steel

Studies were carried out on samples made of R6M5K5 steel. Dynamic alloying was implemented using explosive accelerators with cylinder shape containers. Powders SiC + Ni, TiB₂ were used as alloying substance. The hardness of steel depends significantly on the modes of heat treatment and pulsed loading. The amount of residual austenite increases in the structure of high-speed tool steel with the growth in the heating temperature for quenching and, accordingly, the ability to harden increases. The average velocity of the particles in the jet is about 880 m/s for a cylindrical container with the powder (titanium diboride powder).

The hardness of the processed samples increases with the growth in the velocity of the particles in the powder jet, which is apparently due to an increase in the average pressure level of the shock waves arising from the collision with the surface of the processed specimens. The results of the hard-

ness measurements of the samples after quenching and dynamic alloying are shown in tab. 2.

As can be seen from the above data, the maximum of the hardness increment of the parts processed by the explosion is observed when using an explosive accelerator with a container in the form of a cylinder and equal to 2.5 units HRC at a quenching temperature of 1240 °C. However, the use of this accelerator, which provides an increase in the particle speed and the average pressure level of the shock waves, greatly increases the cracking of the treated samples. As a result, it requires the use of special methods to prevent its occurrence. Probably more appropriate is the use of an accelerator with a container in the form of three docked hemispheres. The maximum hardness increase for samples of R6M5K5 steel is 2.0 units HRC. The latter circumstance is due to the influence of cobalt, which enhances the ability to harden the solid solution. It is very important to compare the effect of dynamic alloying on the increase in both hardness and wear resistance of high-speed tool steel.

Influence of dynamic alloying of quenched steel on its wear resistance was carried out on R6M5K5 steel samples with a diameter of 14 and a length of 50 mm. Dynamic alloying was carried out using an accelerator with a container in the form of three docked hemispheres. A mixture of Nickel and silicon carbide powders were used for alloying. Wear resistance tests were performed applying AI-1 unit with the following parameters:

- rotation speed of the counterbody (abrasive wheel) – 2.6 m/s;
 - rotation speed of the test samples ~0.17 m/s;
 - the number of simultaneously tested samples – 6 PCs.;
 - specific pressure on the sample – $2 \cdot 10^5$ Pa.
- The results of the wear tests are shown in tab. 3.

Table 2

Data on specimens made of R6M5K5 steel

№ specimen	Steel type	Mode of treatment	Heating temperature under quenching, °C	Hardness, HRC ₀	
				Hardened steel	Non-hardened steel
1	P6M5K5	Quenching + Dynamic microalloying (SiC + Ni) with cylinder shape container	1200	65,0	64,0
2	P6M5K5	The same	1220	66,5	65,0
3	P6M5K5	The same	1240	68,0	66,0

Table 3

Wear resistance tests of R6M5K5 steel

№ specimen	Heating temperature under quenching, °C	Relative wear resistance	Remarks
1	1220	1,0	Non-hardened steel
2	1220	1,9	Hardened steel
3	1240	–	Cracks were seen

A comparison of the data in tab. 2 and 3 shows that there is no direct relationship between the hardness and wear resistance of the hardened steel. The maximum wear resistance is achieved by quenching from the temperature of 1220 °C, and the maximum hardness – by quenching from 1240 °C. This is probably because with an increase in the heating temperature under quenching the degree of martensite alloying and the amount of residual austenite increase, which is intensively riveted during shock wave processing. As a result, significant increase in hardness takes place. However, along with this, there is the formation of microcracks in the structure of steel after dynamic alloying, which determines the reduction of wear resistance. The wear resistance of steel hardened in the annealing state and subjected to further quenching from 1220 °C and tempering at 560 °C is 1.6 times higher than the wear resistance of non-hardened steel, but 20 % lower than the wear resistance of steel hardened in the quenched state.

The results of laboratory tests on the strength and wear resistance of high-speed steel R6M5 in the initial state and after treatment with high-speed flows of Ni + SiC particles are presented in tab. 4.

These tests of hardened R6M5 steel allowed to establish the optimal sequence of technological operations and to choose a hardening powder material in relation to the working conditions of the mining tool installed on the working bodies of the tunneling and purification potassium salt-mining combines. Cutting inserts (fig. 9) after the explosive processing were subjected to a triple tem-

pering at 560 °C and subsequent grinding using centerless-grinding machine to obtain a certain diameter.

The practical application of the method of dynamic alloying

Hardening of metals by the proposed method using explosives is a promising technology to improve the properties of parts made of tool steels and steels such as G13L. The hardness of the surface layer of parts made of G13L steel increases from HB 175–180 to HB 400. It is worth to note that the hardened by explosion steel has a greater ductility than after cold rolling. This is typical for other steels. For example, the impact strength of R6M5 steel after triple treatment increases by 20–30 %.

The service life of railroad arrow cross cores made of steel G13L increases in 2.0–2.5 times after treatment with the products of the explosion. As well, many parts for agricultural machinery are manufactured from the same steel. As an example, cutting parts for metalworking and for mining machines, the inserts made of tool R6M5 steel processed by dynamic alloying are shown in fig. 10. As a result of alloying, their wear resistance increased in 1.7 times.

Replacing the hard alloy with hardened R6M5 steel allows slightly change the size of the cutting tool. It is possible to reduce the insert diameter from 9.0 to 7.0 mm since the impact and bending strength of R6M5 steel are higher in comparison to the VK8 hard alloy. As a result, the energy consumption of the potash ore mining process becomes lower. The new material made it possible to abandon the traditional technology of fixing the insert and holder with soldering. The connection of the insert with the holder is carried out by pressing. Long length (26 mm) of insert allows increasing the number of tool regrinding during operation resulting in the reduction of maintenance cost.

Table 4

Testing results on strength and wear

Material	Heating temperature under quenching, °C	Tempering temperature, °C	σ_b , MPa	Wear, mm/km
Initial steel R6M5	1210–1215	535–555	3820–3940	0,35–0,45
Steel treated with SiC	1180–1185	540–555	3820–3830	0,28–0,30
Steel treated with Ni	1210–1220	535–555	4210–4310	–
Steel treated with SiC + Ni mixture	1210–1220	580–600	4410–4560	0,18–0,22



Fig. 10. Parts manufactured using the dynamic alloying method: a – metalworking cutters; b – cutters for mining machines; c – inserts

CONCLUSIONS

1. It is established that dynamic alloying with SiC and Al₂O₃ powders leads to the formation of a specific structure of the composite material reinforced with channels consisting of a central fiber zone with powder particle residues. These channels are surrounded by amorphous area (8–10 μm), nanocrystalline one with fragmented cellular structure (15–20 μm), microcrystalline regions with transition to the crystalline state, characteristic of the matrix material of structural steel. The formation of such a structure leads to the increase in the wear resistance of X12M steel in 1.5–2.5 times and R6M5 steel in 1.7 times.

2. It is established that the processes occurring in the material at the structural and substructural levels determine the effect of particles penetration into the material. Penetration of microparticles into the barrier is accompanied with the formation of microchannels in the barrier material. Such channels are visible by electron and optical metallography after cutting the specimens along the direction of particle movement.

3. It is established that in order to prevent cracking during the process of dynamic alloying of quenched steels it is necessary to conduct a preliminary low-temperature tempering after quenching.

4. Studies have shown that the wear resistance of high-speed steel subjected to dynamic alloying in the quenched state increases by 1.2 times compared to the wear resistance of steel alloyed in the annealing state (quenching and tempering modes are the same for these processing methods).

REFERENCES

1. Fletcher A. C., Close S., Mathias D. (2015) Simulating Plasma Production from Hypervelocity Impacts. *Physics of Plasmas*, (22), 093504. <https://doi.org/10.1063/1.4930281>.
2. Fletcher A. C., Close S. (2017) Particle-in-Cell Simulations of an RF Emission Mechanism Associated with Hypervelocity Impact Plasmas. *Physics of Plasmas*, (24), 053102. <https://doi.org/10.1063/1.4980833>.
3. Chengzhi Qi, Jianjie Chen (2014) Physical Mechanism of Super-Deep Penetration of Solid Microparticles into Solid Targets. *Journal of Mechanical Behavior of Materials*, 23 (1–2), 21–26. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2014-0003>.
4. Kozorezov K. I., Mirkin L. I. (1999) The Formation of Bulk Composites in Superdeep Penetration of Accelerated Solid Particles into Metals. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 33 (3), 254–257.
5. Buravova, S. (2014) Superdeep Penetration Revisited. *Technical Physics*, 59 (8), 1257–1259. <https://doi.org/10.1134/s106378421408009x>.
6. Simonenko V. A., Skorkin N. A., Bashurov V. V. (1991) Penetration of Individual Microparticles Into Rigid Barriers on Collision of Powder Streams with Them. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 27 (4), 433–437. <https://doi.org/10.1007/bf00789554>.
7. Ovchinnikov V. I., Lobachev V. A. (2017) *Unit for Alloying by Explosion*. Patent Republic Belarus No u20160267 (in Russian).
8. Ovchinnikov V. I., Ilyushchenko A. F. (2014) *Unit for the Deposition of Material's Layer Onto Metallic Parts*. Patent Republic Belarus No u10271 (in Russian).
9. Zvorykin L. O., Usherenko S. V. (1993) Structural Features of Steel 45 after Interaction with High Velocity Flows of Niobium Boride and Molybdenum Silicide Powders. *Metallaphysika = Physics of Metals*, 15 (1), 92–95 (in Russian).
10. Nozdrin V. F., Usherenko S. M., Gubenko S. I. (1991) Mechanism of Metals Strengthening During Super Deep Penetration of High Velocity Particles. *Physika i Khimiya Obrabotki Materialov = Physics and Chemistry of Treatment of Materials*, (6), 19–24 (in Russian).

Received: 30.05.2019

Accepted: 06.08.2019

Published online: 30.09.2019

Материалы для газотермического напыления, полученные методом диффузионного легирования из порошков на основе сталей аустенитного класса

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,
канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾, А. Ф. Пантелеенко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Представлены экспериментальные исследования композиционных порошковых материалов для плазменного напыления, полученных способом диффузионного легирования порошковых материалов на основе аустенитных сталей. Выявлено, что главными факторами, формирующими диффузионный слой на порошковом материале, являются состав необходимой насыщающей среды, температура обработки и длительность химико-термического воздействия. Создание однофазных слоев диффузии возможно только в случае минимального уровня температурно-временных характеристик при термической обработке. Этому также способствуют применение сред с небольшой концентрацией бора и введение в насыщающую смесь из порошка добавок, тормозящих процесс насыщения (таких как углерод, алюминий, кремний). С учетом проведенных с помощью микрорентгеноспектрального анализа исследований расположения элементов, способствующих легированию порошка, а также микродюрметрических характеристик подробно рассмотрены строение и состав порошков. С повышением степени легированности порошкового материала составляющая высокобористой фазы возрастает. Значительные изменения фазового состава, так же как и химического, заметны при диффузионной обработке следующих легированных порошковых материалов: ПР-Х18Н9, ПР-Х18Н10, ПР-Х18Н15. Вытесняемый боридом в переходную зону свободный углерод создает с хромом дисперсные комплексные карбидные соединения. Это подтверждается характером распределения карбидообразующих составляющих в порошковой частице. Все карбидообразующие элементы в отличие от некарбидообразующего кремния имеют характерные концентрационные пики-всплески. Кремний практически не присутствует в рассмотренной фазе FeB и обнаруживается лишь в очень незначительном количестве в исследуемой фазе Fe₂B; он оттесняется высокобористыми фазами к подслою. Изменение же микротвердости исследуемых фаз FeB и Fe₂B связано с растворением соответствующих легирующих элементов в них и искажением кристаллической решетки в бориде. Подобное явление характерно также для насыщения с применением бора или при проведении химико-термической обработки легированных сталей; оно отмечено в ряде исследований. Увеличение микротвердости ядра частицы при ее борировании вызвано оттеснением углерода и легирующих элементов растущим фронтом боридных фаз. При повышении температурного режима и увеличении времени проведения борирования и до реализации эффекта при встречной диффузии происходит перемещение зоны ядра с повышенной микротвердостью к сердцевине частицы.

Ключевые слова: композиционные материалы, диффузионное легирование, порошок на основе сталей аустенитного класса, микрорентгеноспектральный анализ, микродюрметрические исследования

Для цитирования: Пантелеенко, Ф. И. Материалы для газотермического напыления, полученные методом диффузионного легирования из порошков на основе сталей аустенитного класса / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 380–385. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-380-385>

Materials for Gas-Thermal Spraying Obtained by Diffusion Alloying from Powders Based on Austenitic Steels

F. I. Panteleenko¹⁾, V. A. Okovity¹⁾, A. F. Panteleenko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents experimental studies of composite powder materials for plasma spraying obtained by a method for diffusion alloying of powder materials based on austenitic steels. It has been revealed that main factors forming a diffusion

Адрес для переписки
Пантелеенко Федор Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-71
niil_svara@bntu.by

Address for correspondence
Panteleenko Fedor I.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-71
niil_svara@bntu.by

layer on a powder material are a composition of the required saturating medium, treatment temperature and duration of chemical and thermal exposure. Creation of single-phase diffusion layers is possible only in the case of a minimum level of temperature-time characteristics during heat treatment. This is also facilitated by the use of media with a low concentration of boron and introduction of additives inhibiting saturation process (such as carbon, aluminum, silicon) into a saturating mixture of powder. Structure and composition of powders have been thoroughly investigated with the help of X-ray microanalysis that has made it possible to study location of elements contributing to powder alloying and micro-durametric characteristics. A component of high-boride phase is increasing due to higher degree of powder material alloying. Significant changes in phase composition, as well as the chemical one, are noticeable in diffusion processing of the following alloyed powder materials: PR-X18N9, PR-X18N10, PR-X18N15. Free carbon being displaced by boride into a transition zone creates dispersed complex carbide compounds with chromium. This is confirmed by distribution nature of carbide-forming components in a powder particle. All carbide-forming elements have characteristic concentration peaks-bursts in contrast to non-carbide-forming silicon. Silicon is practically not present in the considered FeB phase and it is found only in a very small amount in the studied Fe₂B phase; it is pushed aside by high-boride phases to a sublayer. The change in microhardness of the FeB and Fe₂B phases under study is associated with dissolution of corresponding alloying elements in them and distortions of a crystal lattice in borides. A similar phenomenon is also characteristic for saturation while using boron or while making chemical and thermal treatment of alloyed steels, it has been noted in a number of studies. The increase in microhardness of a particle nucleus during its boriding is caused by displacement of carbon and alloying elements by growing front of boride phases. A core zone moves with an increased microhardness to a particle core while increasing temperature mode and time of boronization and up to realization of the effect with counter diffusion.

Keywords: composite materials, diffusion alloying, powder based on austenitic steels, X-ray microanalysis, microdurametric investigations

For citation: Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko A. F. (2019) Materials for Gas-Thermal Spraying Obtained by Diffusion Alloying from Powders Based on Austenitic Steels. *Science and Technique*. 18 (5), 380–385. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-380-385> (in Russian)

Введение

Базируясь на анализе порошковых материалов, применяемых для газотермического напыления, можно констатировать, что самофлюсы являются одним из самых важных порошковых материалов, применяемых для получения различного класса защитных покрытий. При этом самофлюсующиеся порошки на основе таких элементов, как никель и кобальт, имеют ряд недостатков. Они обладают высокой склонностью к трещинообразованию при процессе наплавки, довольно плохо подвергаются последующей механической обработке и имеют очень высокую стоимость, что затрудняет их использование при восстановлении изношенных деталей. В Республике Беларусь в наличии есть огромное количество отходов от обработки сталей, порошковых материалов аустенитных сталей очень крупных фракций [1–5]. Поэтому очевидна проблема разработки недорогих самофлюсующихся порошковых материалов на основе аустенитных сталей и создание на их основе защитных покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами.

Структура и фазовый состав композиционных материалов

Главными факторами, которые определяют строение диффузионного слоя на порошковом материале, являются температурные характеристики и длительность проводимой химико-термической обработки, а также состав насыщающей порошковой среды. Для получения

необходимых однофазных диффузионных слоев процесс проводят при минимальных уровнях температурных и временных режимов обработки [4–6]. При повышении степени легированности порошкового материала составляющая фазы с высоким содержанием бора при сохранении остальных параметров обработки увеличивается. Создание необходимых однофазных боридных слоев на аустенитных порошковых материалах до сих пор остается проблемой. Определяющим условием, способствующим получению таких однофазных диффузионных боридных слоев, является поддержание невысоких фиксированных температурных и временных характеристик химико-термической обработки. Этому также способствуют применение сред с малой концентрацией бора и ввод специальных «тормозящих» элементов (таких, как углерод, алюминий, кремний) в порошковую насыщающую смесь.

Микроструктура порошкового материала ПР-X18N15 после проведенной диффузионной обработки в порошковой смеси состава $3/8\text{SiC} + 3/8\text{B}_4\text{C} + 1/4\text{Fe}$ с однофазным (Fe₂B) и двухфазными слоями (FeB + Fe₂B) приведена на рис. 1. Результаты получены с помощью микрорентгеноспектрального анализа, а также характеристик микродюрметрических исследований.

При диффузионной обработке легированных порошковых материалов ПР-X18N9 (ПР-X18N10, ПР-X18N15) наблюдаются заметные изменения как фазового, так и химического состава порошка. Вытесняемый с помощью боридов в переходную зону материала углерод создает с хромом дисперсные комплексные карбидные соединения.

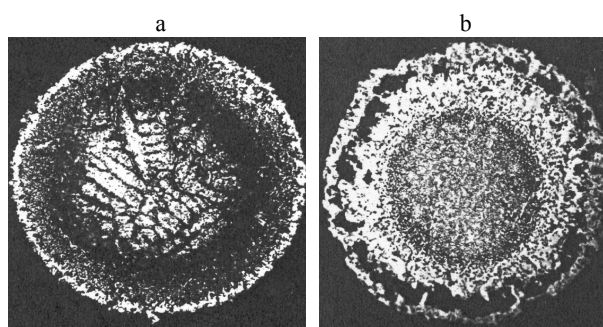


Рис. 1. Микроструктура порошкового материала ПР-X18N15 после проведенной диффузионной обработки в порошковой смеси состава $3/8\text{SiC} + 3/8\text{B}_4\text{C} + 1/4\text{Fe}$:
а – с однофазным слоем Fe_2B ($\tau = 1$ ч, $T = 840$ °C);
б – с двухфазными слоями $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ ($\tau = 3$ ч, $T = 1000$ °C) ($\times 500$)

Fig. 1. Microstructure of PR-X18N15-powder after diffusion treatment in powder mixture of $3/8\text{SiC} + 3/8\text{B}_4\text{C} + 1/4\text{Fe}$ composition:

а – with single-phase layer Fe_2B ($\tau = 1$ h, $T = 840$ °C);
б – with two-phase layers $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ ($\tau = 3$ h, $T = 1000$ °C) ($\times 500$)

Это подтверждает характер распределения карбидообразующих элементов в частице. Все карбидообразующие элементы сохраняют характерные для них пики-всплески по концентрации. Интересна характеристика распределения в материале кремния. Элемент практически не присутствует в фазе FeB , однако обнаруживается в небольшом количестве в фазе Fe_2B и вытесняется высокобористыми фазами к подслою.

В конце данной зоны содержание кремния максимально. Это видно как в характеристическом излучении, так и на концентрационной кривой материала. В сердцевине порошковой частицы кремний распределен довольно равномерно. Отсутствие же кремния в рассматриваемой фазе FeB , а также его основная роль в процессе самофлюсования материала говорят о желательности получения в оболочке материала фазы Fe_2B , слабо растворяющей кремний [7]. Необходимо обеспечение малого (до 0,5 %) количества кремния в исходном (до диффузионной обработки) порошке, а также введения в порошковый материал значительных количеств бора как основного флюсующего элемента.

На микротвердость боридных фаз и ядра частицы оказывают влияние легирующие элементы. Микротвердость фаз FeB и Fe_2B изменяется за счет растворения в них легирующих элементов и искажений, происходящих в кристалли-

ческих решетках боридов. Подобное явление сопутствует многокомпонентному насыщению с применением бора, а также имеет место при химико-термической обработке легированных материалов. Увеличение микротвердости ядра частицы в случае ее борирования вызвано отеснением углерода и легирующих элементов растущим фронтом боридных фаз [8]. При повышении температурного режима и увеличении времени борирования при встречной диффузии область ядра с высокой микротвердостью смещается к сердцевине порошковой частицы (рис. 2). Для порошковых материалов ПР-X18N9 (ПР-X18N10, ПР-X18N15) характерно вытеснение таких легирующих элементов, как хром и никель, в сердцевину порошковой частицы растущими боридами.

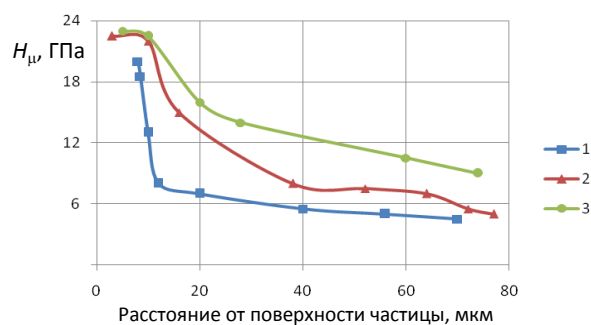


Рис. 2. Распределение микротвердости по порошковой частице в зависимости от материала порошка:

1, 2 – ПР-X18N10 (1 – $T = 900$ °C, $\tau = 2$ ч; 2 – $T = 1000$ °C, $\tau = 3$ ч); 3 – ПР-X18N15 ($T = 1000$ °C, $\tau = 4$ ч)

Fig. 2. Distribution of microhardness on powder particle depending on powder material:

1, 2 – PR-X18N10 (1 – $T = 900$ °C, $\tau = 2$ h; 2 – $T = 1000$ °C, $\tau = 3$ h); 3 – PR-X18N15 ($T = 1000$ °C, $\tau = 4$ h)

Зависимость интегральной микротвердости сердцевины порошковой частицы от температурных и временных параметров при обработке порошка приведена на рис. 3.

При легировании боридных фаз хромом их микротвердость увеличивается. Эти элементы в случае образования твердых растворов замещения в бориде железа влияют на прочность ковалентных связей в самих кристаллических решетках. При повышении донорной способности атомов металла увеличиваются связи соединения «бор – металл», соответственно будет больше микротвердость боридных фаз порошка. Химико-термическая обработка аустенитных материалов характеризуется целым рядом особенностей по сравнению с углеродистыми и низколегированными сталями [9].

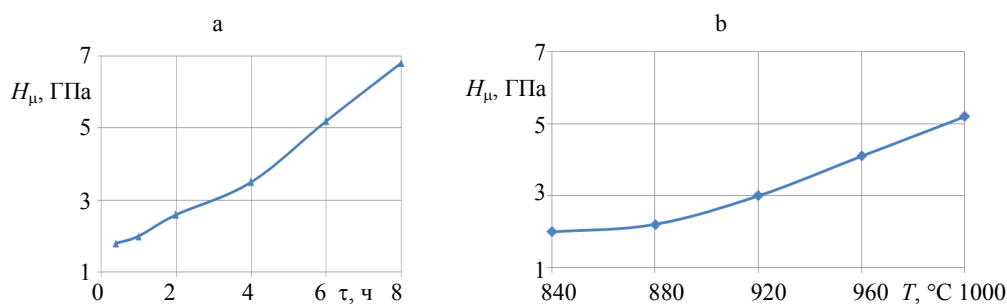


Рис. 3. Зависимость интегральной микротвердости сердцевины порошковой частицы ПР-Х18Н15 от: а – продолжительности диффузионной обработки ($T = 880\text{ }^{\circ}\text{C}$); б – величины температуры ($\tau = 2\text{ ч}$)

Fig. 3. Dependence of integrated core microhardness in powder particle PR-X18N15 on: а – duration of diffusion treatment ($T = 880\text{ }^{\circ}\text{C}$); б – temperature ($\tau = 2\text{ h}$)

В данном случае диффузионные боридные слои в порошковых материалах имеют ровное строение, игольчатое строение отсутствует; бориды обладают более высокой микротвердостью, предрасположены к появлению трещин и сколов. Причинами являются возникающие растягивающие остаточные напряжения на границе между фазами FeB и Fe₂B.

Для слоя боридов аустенитного материала эта граница фаз практически линейна, в отличие от углеродистых и низколегированных сталей с границей зубчатой (зигзагообразной) формы, поскольку концентрация напряжений существенно выше. Значение толщины боридного слоя у хромоникелевых аустенитных материалов в три раза меньше, чем у углеродистых. Боридный слой на аустенитных сталях состоит из боридов железа (FeB и Fe₂B) и хрома (Cr₅B₃, Cr₂B), а переходная зона – из карбида хрома Cr₂₃C₆ и твердого раствора бора в аустените. Масштабный фактор при процессе борирования мелких частиц порошкового материала ПР-Х18Н15 играет значительную роль.

Исследование структуры порошкового материала ПР-Х18Н15 после борирования в течение 10, 30 и 60 мин (рис. 4) показало, что только при малой временной выдержке (10 мин) структура материала соответствует классическому варианту, получаемому при борировании сталей аустенитного класса.

При увеличении длительности и температурных режимов обработки вместе с ростом диффузионного слоя происходят изменения в ядре частицы, об этом свидетельствует увеличение микротвердости ядра. Возрастает и микротвердость боридного слоя частицы с 1,4 до 2,1 МПа, происходит также охрупчиваемость слоя с повышением температурных режимов обработки с 880 до 1000 °C. Одна из причин этого – увеличение количества высокобористой

фазы материала FeB. В материале аустенитном ядро наблюдается только при малой продолжительности диффузионной обработки, а затем темная зона захватывает все ядро, порошок становится ферромагнитным. В результате из-за перераспределения легирующих элементов, вытесняемых растущими боридными фазами, в подслое происходит полиморфное ($\gamma \rightarrow \alpha$) превращение, что и объясняет переход порошкового материала из парамагнитного состояния в ферромагнитное.

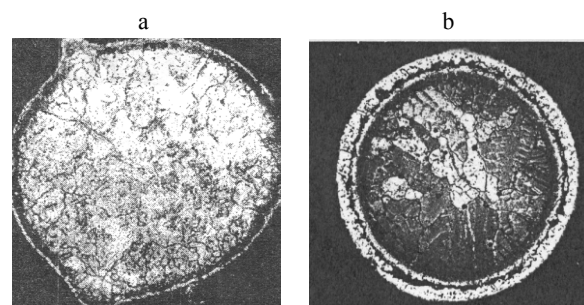


Рис. 4. Микроструктура порошкового материала ПР-0Х18Н9 при температуре борирования 880 °C с продолжительностью, мин: а – 10; б – 60 ($\times 500$)

Fig. 4. Microstructure of PR-X18N9-powder borated at temperature of 880 °C for, min: а – 10; б – 60 ($\times 500$)

Результаты фазового рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о присутствии в борированном порошковом материале γ -твердого и α -твердого растворов, фаз FeB, Fe₂B, небольших следов борида хрома Cr₅B₃. Структуру и химический состав порошковых частиц после операции борирования позволили уточнить исследования, осуществленные на СЭМ Nanolab-7. Анализ металлографических, микродюрметрических данных и результатов микрорентгено-спектрального анализа (табл. 1) дает возможность сделать следующее заключение. На порошковых материалах ПР-Х18Н9, ПР-Х18Н10,

ПР-X18H15 боридный слой (одно- или двух-фазный) формируется в зависимости от условий диффузионной обработки. Двухфазный слой (Fe_2B , Fe_3B) показан на рис. 4б. Элементы никель, углерод, хром вытесняются в переходную зону растущими боридами [10].

Таблица 1

Микротвердость и химический состав структурных компонентов борированного порошкового материала ПР-X18H15 (смесь $\text{B}_4\text{C} + 1\% \text{AlF}_3$, $T = 1000^\circ\text{C}$, $\tau = 30$ мин)
Microhardness and chemical composition of structural components in borated PR-X18H15-powder material (mixture of $\text{B}_4\text{C} + 1\% \text{AlF}_3$, $T = 1000^\circ\text{C}$, $\tau = 30$ min)

Структурная составляющая	H_{μ} , МПа	Содержание, % по массе		
		Cr	Ni	Fe
Зерно в центре порошковой частицы	240	7		8
Выделение по границам зерен (сетка) в центре порошковой частицы	7150	6		0
Дисперсные включения в виде палочек в переходной зоне	100	1		7
Матричная фаза переходной зоны	—	2		0

Как и в случае с $\gamma\text{-Fe}$, в $\alpha\text{-Fe}$ скорость диффузии элементов никеля, железа и хрома, образующих в материале растворы замещения, на несколько порядков ниже, чем скорость диффузии в материале углерода. Коэффициент диффузии углерода в материале при 1000°C — около $2,6 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$, а хрома в $\gamma\text{-Fe}$ при 1050°C — $58 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$. Принимая во внимание, что скорость зернограницной диффузии в материале гораздо больше, чем в объеме зерна, вытесняемый в ядро углерод начинает диффундировать по границам зерен и при достижении требуемой концентрации образует в материале сетку карбидов хрома. Подтверждением служат данные табл. 1. Элемент углерод после образования карбидов (связанный в них) теряет свое значение как основной аустенизатор. Вытесняемый боридами в подслой хром создает дополнительное ферритизирующее воздействие. В сталях, содержащих более 15 % хрома (хромоникелевых), при нагреве абсолютно чистой γ -фазы не образуется и может существовать только смесь фаз $\gamma + \alpha$.

В интервале температур (600–900) $^\circ\text{C}$ при продолжительной выдержке на таких участках стали с повышенным содержанием хрома образуется σ -фаза. Она формируется в основном из α -фазы, это подтверждает концентрация ее включений в виде палочек в подслое, возможно выделение ее из γ -фазы. Химический же со-

став и микротвердость этих включений-палочек (табл. 1) характерны для σ -фазы.

Количество хрома в матричной фазе переходной зоны (зона повышенной травимости) в подслое оказывается незначительным в результате образования σ -фазы. Перечисленные процессы наиболее свойственны подслою и наименее активно протекают в центре частицы. При этом по мере движения боридов к сердцевине частицы в ней также происходит активация обозначенных явлений, о чем свидетельствуют приведенные в табл. 1 данные. Растворению карбидов и фиксации углерода в γ -растворе способствуют высокие температуры при диффузионной обработке (более 900°C), они также не позволяют образоваться σ -фазе. Поэтому при увеличении температуры процесса борирования степень ферритизации порошкового материала уменьшается, что и подтверждается проведенными экспериментами по оценке ферромагнитных характеристик порошкового материала [11].

ВЫВОДЫ

1. С учетом экспериментальных значений построена диаграмма фазового состава полученных диффузионных боридных слоев для порошков на основе сталей аустенитного класса, позволяющая обеспечивать создание необходимого фазового состава диффузионных слоев.

2. Проведены исследования кинетики процесса диффузионной обработки ряда порошковых материалов. Показано, что при увеличении содержания легирующих элементов или углерода в порошке ПР-X18H9 происходит уменьшение толщины диффузионного слоя. Данные согласуются с другими результатами химико-термической обработки компактных порошковых материалов и подтверждают главенствующую роль углерода и легирующих элементов в торможении диффузии бора и кремния.

3. Найдены температурные и временные параметры диффузионной обработки, гарантирующие образование однофазного (Fe_2B) покрытия на порошковых материалах на основе сталей аустенитного класса. Показано, что с повышением температуры, продолжительности диффузионной обработки и степени легирования обрабатываемого порошка растет доля высокобористой фазы Fe_2B . При диффузионной обработке порошковых материалов изучено распределение легирующих элементов. Выявлено, что хром в наибольшей степени растворяется в фазе Fe_2B и незначительно — в фазе FeB .

ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко, Ф. И. Особенности диффузионного массопереноса при получении самофлюсующихся порошков на железной основе для наплавки и напыления / Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов, И. Б. Сороговец // Реофизика и теплофизика неравновесных систем: материалы Междунар. школы-сем., май 1991 г. Минск: АНК Ин-т тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова АН БССР, 1991. Ч. 2: Кинетические процессы в конденсированных средах. С. 89–93.
2. Пантелеенко, Ф. И. Самофлюсующиеся порошки и износостойкие покрытия из них / Ф. И. Пантелеенко, С. Н. Любецкий. Минск: БелНИИТИ, 1991. 59 с.
3. О росте борированного слоя на сферическом порошке железа / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Весті АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1991. № 1. С. 22–24.
4. Пантелеенко, Ф. И. Самофлюсующиеся порошки на железной основе для защитных покрытий / Ф. И. Пантелеенко, С. Н. Любецкий // Весті АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1991. № 3. С. 22–27.
5. Пантелеенко, Ф. И. Получение порошков из аустенитных сталей методом диффузионного легирования / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // Вестник Белорусского национального технического университета. 2010. Вып. 6. С. 18–23.
6. Способ получения самофлюсующегося порошка: пат. 17321 Респ. Беларусь, МПК В 22F 1/02; С 23С 8/70 / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко, В. В. Оковитый. Опубл. 27.03.2013.
7. Состав для газотермического напыления износостойких покрытий: пат. 15833 Респ. Беларусь, МПК В 22F 1/00; С 23С 4/06 / В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко, В. В. Оковитый. Опубл. 30.04.2012.
8. Методика разработки комбинированных упрочняющих технологических процессов / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 10. С. 36–42.
9. Пантелеенко, Ф. И. Исследование структуры износостойких покрытий / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // Сварка и родственные технологии: сб. докл. Междунар. симпоз. Минск, 2012. С. 150–152.
10. Пантелеенко, Ф. И. Разработка технологического процесса плазменного напыления покрытий на детали коробок передач энергонасыщенных тракторов / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 110, ч. 2. С. 19–22.
11. Пантелеенко, Ф. И. Исследование и разработка процессов получения композиционных материалов на основе оксидной керамики с включениями твердой смазки для газотермического напыления с последующей обработкой высококонцентрированными источниками энергии / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // Современные перспективные материалы / под ред. В. В. Клубовича. Витебск: ВГТУ, 2011. С. 185–203.

Поступила 25.06.2018

Подписана в печать 29.08.2018

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Panteleenko F. I., Konstantinov V. M., Sorogovets I. B. (1991) Peculiarities of Diffusion Mass Transfer while Preparing Self-Fluxing Powders on Iron Basis for Deposition and Sputtering. *Reofizika i Teplofizika Neravnovesnykh Sistem: Materialy Mezhdunar. Shkoly-Sem., Mai 1991 g. Ch. 2. Kineticheskie Protssy v Kondensirovannykh Sredakh* [Rheophysics and Thermophysics of Nonequilibrium Systems: Proceedings of International School Seminar, May 1991. Part 2. Kinetic Processes in Condensed Media]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the Academy of Sciences of Belarus, 89–93 (in Russian).
2. Panteleenko F. I., Lyubetsky S. N. (1991) *Self-Fluxing Powders and Wear-Resistant Coatings from them*. Minsk, Belarusian Research Institute of Scientific and Technical Information. 59 (in Russian).
3. Panteleenko F. I., Khusid B. M., Voroshnin L. G., Sorogovets I. B. (1991) On the Growth of a Borated Layer on a Spherical Iron Powder. *Vesti Akademii Navuk BSSR. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk* [Proceedings of the Academy of Sciences of the BSSR. Physical-Technical Series], (1), 22–24 (in Russian).
4. Panteleenko F. I., Lyubetsky S. N. (1991) Self-Fluxing Powders on the Iron Base for Protective Coatings. *Vesti Akademii Navuk BSSR. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk* [Proceedings of the Academy of Sciences of the BSSR. Physical-Technical Series], (3), 22–27 (in Russian).
5. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko A. F. (2010) Obtaining of Powders From Austenitic Steel by Diffusion Alloying. *Vestnik Belorusskogo Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Vestnik BNTU], (6), 18–23 (in Russian).
6. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoyno O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V. (2013) *Method for Obtaining Self-Fluxing Powder*. Patent of the Republic of Belarus No 17321 (in Russian).
7. Okovity V. A., Devoyno O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V. *Composition for Gas-Thermal Spraying of Wear-Resistant Coatings*. Patent of the Republic of Belarus No 15833 (in Russian).
8. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoyno O. G., Panteleenko A. F., Shevtsov A. I., Blyumenshtein V. Yu. (2010) Technique for Development of Combined Reinforcing Technological Processes. *Uprochnyayushchiye Tekhnologii i Pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], (10), 36–42 (in Russian).
9. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko A. F. (2012) Investigations on Structure of Wear-Resistant Coatings. *Svarka i Rodstvennye Tekhnologii: Sb. Dokl. Mezhdunar. simpoz.* [Welding and Related Technologies: Collected Papers of International Symposium]. Minsk, 150–152 (in Russian).
10. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko A. F. (2012) Development of Technological Process for Plasma Spraying of Coatings on Transmission Parts in Energy-Saturated Tractors. *Trudy GOSNITI* [Proceedings of GOSNITI], 110 (2), 19–22 (in Russian).
11. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko A. F. (2011) Investigations and Development of Processes for Preparation of Composite Materials Based on Oxide Ceramics with Solid Lubricant Inclusions for Gas-Thermal Spraying Followed by Treatment with Highly Concentrated Energy Sources. *Modern Promising Materials*. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 185–203 (in Russian).

Received: 25.06.2018

Accepted: 29.08.2018

Published online: 30.09.2019

Электрохимическая прошивка микроотверстий в трубчатом ступенчатом концентраторе-волноводе медицинского назначения

Канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев¹⁾, канд. техн. наук А. Ю. Королёв¹⁾,
асп. А. С. Будницкий¹⁾, асп. Дай Вэньци¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Развитию ультразвуковых технологий лечения сосудов в последнее время уделяют большое внимание во всем мире. Авторами статьи совместно с кардиологами из БелМАПО и РНПЦ «Кардиология» разработаны новый эффективный метод лечения и ультразвуковое оборудование, позволяющие выполнять разрушение внутрисосудистых образований с одновременным повышением эластичности сосудистой стенки. Преимуществами метода являются отсутствие оперативного вмешательства, низкая вероятность осложнений, небольшая стоимость лечения. Основным компонентом разработанного ультразвукового оборудования – ступенчатый концентратор-волновод трубчатого типа, имеющий на дистальном конце сферический наконечник с одним осевым отверстием диаметром 0,5 мм и тремя радиальными отверстиями диаметрами 0,3 мм, расположенными под углом 120° друг относительно друга. Основным эффектом применения концентратора-волновода достигается за счет ультразвукового вибромеханического воздействия сферическим наконечником на внутрисосудистое образование с последующим удалением продуктов разрушения путем их аспирации из сосудистого русла. Дополнительный эффект обеспечивается за счет кавитационного воздействия на сосудистое образование и стенки сосуда через отверстия в сферическом наконечнике потоками жидкости, подаваемой по внутренней полости ступенчатого концентратора-волновода, что способствует значительному улучшению эластических свойств сосудистой стенки при атеросклерозе и сахарном диабете. Для достижения максимальной эффективности воздействия кавитирующей струей на внутрисосудистые образования и на сосудистую стенку необходимо обеспечить высокие точность и качество поверхностей формируемых микроотверстий. По результатам анализа особенностей существующих методов формообразования отверстий малого диаметра предложен метод электрохимической прошивки, позволяющий получать точные микроотверстия диаметром 0,3 мм с высоким качеством поверхности на деталях малого сечения и жесткости. В статье представлены результаты исследования влияния параметров процесса электрохимической прошивки (напряжения, концентрации и расхода электролита) на размеры и форму получаемых микроотверстий. Разработаны основные режимы процесса электрохимической прошивки, позволяющие сформировать микроотверстия в сферическом наконечнике трубчатого концентратора-волновода требуемых точности, размеров и формы.

Ключевые слова: концентратор-волновод, сферический наконечник, микроотверстие, электрохимическая прошивка, электролит, напряжение, расход, концентрация

Для цитирования: Электрохимическая прошивка микроотверстий в трубчатом ступенчатом концентраторе-волноводе медицинского назначения / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 386–394. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-386-394>

Electrochemical Cutting of Micro-Holes in Tubular Stepped Concentrator-Waveguide for Medical Purposes

Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, A. Yu. Korolyov¹⁾, A. S. Budnitskiy¹⁾, Dai Wenqi¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A great attention has been recently paid to development of ultrasound technologies for treatment of blood vessels throughout the world. Authors of the paper have developed a new effective treatment method and ultrasound equipment that

Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

Address for correspondence

Korolyov Aleksandr Yu.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

allow to carry out destruction of intravascular formations with simultaneous increase in elasticity of a vascular wall together with cardiologists from Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education and Republican Scientific and Practical Center "Cardiology". Advantages of the method are absence of necessity in surgical intervention, low probability of complications, low cost of treatment. The main component of the developed ultrasonic equipment is a tube-type stepped concentrator-waveguide having a spherical tip at a distal end with a single axial hole of 0.5 mm-diameter and three radial holes of 0.3 mm-diameter located at an angle of 120° relative to each other. The main effect for application of the concentrator-waveguide is achieved by ultrasonic vibromechanical action of a spherical tip on intravascular formation with subsequent removal of destruction products by their aspiration from a vascular bed. An additional effect is provided due to cavitation action on vascular formation and vessel walls by flow of fluid supplied via an internal cavity of the stepped concentrator-waveguide through the holes in the spherical tip. This contributes to a significant improvement in elastic properties of a vascular wall in atherosclerosis and diabetes. It is necessary to ensure high accuracy and quality of surfaces for the formed micro-holes in order to achieve maximum efficiency of the cavitation jet impact on intravascular formations and on the vascular wall. According to the analysis results on specific features of existing methods for small-diameter hole shaping, an electrochemical hole cutting method has been proposed which allows to obtain accurate micro-holes with a diameter of 0.3 mm and high surface quality in parts of small cross section and rigidity. The paper presents results of study on effect of electrochemical holes cutting parameters (voltage, concentration and consumption of electrolyte) on size and shape of the formed micro-holes. Main modes of electrochemical holes cutting process have been developed which allow to form micro-holes in a spherical tip of a tubular concentrator-waveguide with required accuracy, dimensions and shape.

Keywords: concentrator-waveguide, spherical tip, micro-hole, electrochemical hole cutting, electrolyte, voltage, consumption, concentration

For citation: Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Budnitskiy A. S., Wenqi Dai (2019) Electrochemical Cutting of Micro-Holes in Tubular Stepped Concentrator-Waveguide for Medical Purposes. *Science and Technique*. 18 (5), 386–394. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-386-394> (in Russian)

Введение

В качестве альтернативы существующим дорогостоящим и травматическим процедурам устранения непроходимости магистральных артерий нижних конечностей разработан метод разрушения внутрисосудистых образований – ультразвуковая реканализация [1]. Метод основан на применении ультразвукового оборудования, главным компонентом которого является ступенчатый концентратор-волновод. Ранее разработаны конструкции и процессы получения стержневых ступенчатых концентраторов-волноводов длиной до 1200 мм с минимальным диаметром дистальной ступени 0,5 мм. Для формообразования сложных поверхностей стержневых концентраторов-волноводов создана оригинальная технология, основанная на электролитно-плазменной обработке, которая использовалась до этого в промышленности только для финишной отделки поверхности и удаления заусенцев на изделиях из различных металлических материалов [2–6]. Применение размерной электролитно-плазменной обработки позволило достигнуть высоких прочностных и акустических показателей получаемых изделий.

Для обеспечения возможности подачи жидкости в зону дислокации внутрисосудистого образования с целью дополнительного кавитационного воздействия разработана новая конструкция – ступенчатый концентратор-волновод трубчатого типа с полым сферическим

наконечником, наличие которого позволяет максимально эффективно разрушать внутрисосудистые образования за счет виброударного воздействия [7, 8]. В сферическом наконечнике имеются осевое ($0,50 \pm 0,05$ мм) и боковые ($0,30 \pm 0,05$ мм) микроотверстия, предназначенные для воздействия образующейся кавитирующей струей как на внутрисосудистое образование, так и на пораженный участок сосудистой стенки, что позволяет восстанавливать проходимость сосуда с одновременным повышением эластичности сосудистой стенки (рис. 1).

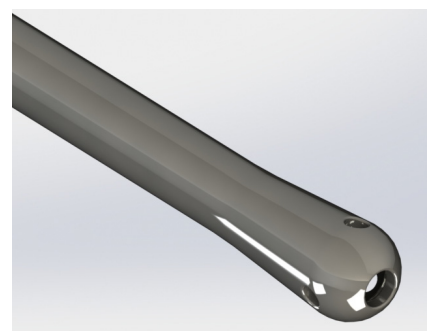


Рис. 1. Сферический наконечник ступенчатого концентратора-волновода трубчатого типа

Fig. 1. Spherical tip of tube-type stepped concentrator-waveguide

Эффективность кавитационных процессов во многом определяется качеством поверхностей, с которыми соприкасается рабочая

жидкость [9]. Элементы микрорельефа, выступающие из ламинарного подслоя при турбулентном течении жидкости, вызывают вихреобразование с понижением давления в месте образования вихрей. Таким образом, высокая шероховатость поверхности внутри микроотверстия приводит к более раннему возникновению кавитационных процессов. Поэтому для максимально эффективного воздействия кавитирующей струей на внутрисосудистые образования и сосудистую стенку необходимо обеспечить высокие точность и качество поверхностей формируемых микроотверстий.

Осевое отверстие, оказывающее основное кавитационное воздействие при разрушении внутрисосудистых образований, формируется в процессе получения сферического наконечника раздачей и завальцовкой. Формирование боковых микроотверстий в сферическом наконечнике с высокой точностью является сложной технической задачей в связи с особенностями конструкции концентратора-волновода, обладающего низкой жесткостью, тонкой стенкой, малыми размерами рабочей части.

В настоящее время в промышленности существует множество способов получения микроотверстий диаметрами 0,2–0,3 мм, включающих механическое сверление, сверление лазером, электроэрозионное и химическое сверление, гидроабразивную обработку, а также их различные сочетания, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Одним из традиционных методов является механическое сверление микроотверстий, получившее широкое распространение при производстве печатных плат для электроприборов [10]. На печатных платах, которые, как правило, изготавливаются из легко поддающихся механической обработке полимерных материалов, возможно получение микроотверстий диаметром до 0,1 мм [11]. Основным недостатком механического метода, в том числе применительно к процессу получения отверстий в сферическом наконечнике, является невозможность сверления микроотверстий в нежестких и тонкостенных деталях.

Лазерное сверление позволяет получать отверстия диаметром, соизмеримым с длиной волны излучения с достаточно высокой точностью позиционирования. Существует множе-

ство работ по исследованию режимов и способов лазерного сверления микроотверстий в коррозионностойких сталях, подтверждающих целесообразность использования лазерной технологии для получения изделий малого размера, обработка которых должна удовлетворять высоким параметрам по точности и качеству [12–17]. Среди недостатков лазерного метода сверления – низкое качество поверхности, ограничение по толщине материала, зависимость характеристик обработки от типа лазера и сложность формирования глухих отверстий.

Гидроабразивное сверление особенно эффективно при очистке или обработке многих труднообрабатываемых материалов: титановых сплавов [18], различных видов высокопрочных керамик [19] и сталей [20], а также композитных материалов [21]. При гидроабразивной резке не создается разрывов в структуре материала, который таким образом сохраняет свои первоначальные свойства. Однако, как и при лазерном сверлении, гидроабразивная обработка не дает возможности сверления глухих отверстий.

Альтернативой перечисленным методам получения отверстий малых диаметров является электрохимическая прошивка с прокачкой электролита между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью. В [22] выполнялась сравнительная оценка методов механического, лазерного и электрохимического сверления при разработке наиболее оптимального процесса получения микроотверстий в тонкостенных пластинах (0,5 мм) из титанового сплава. Установлено, что механическое и лазерное сверление не обеспечивают требуемой точности размеров микроотверстий и качества поверхности. Электрохимическая прошивка, в свою очередь, позволила получить точные отверстия по форме и размерам с высоким качеством поверхности. Таким образом, метод электрохимической прошивки может быть использован для формирования точных боковых микроотверстий в сферическом наконечнике трубчатого концентратора-волновода с достижением высокого качества их поверхности для эффективного воздействия кавитирующей струей на внутрисосудистые образования и сосудистую стенку.

Цель данной работы – разработка и исследование режимов электрохимической прошив-

ки, обеспечивающих формирование микроотверстий требуемой точности в тонкостенных деталях малой жесткости и размеров из коррозионностойкой стали, применяемых в медицинской технике.

Материалы, оборудование и методы исследований

Исследование режимов электрохимической прошивки микроотверстий проводили на образцах сферических наконечников трубчатого концентратора-волновода с толщиной стенки 0,15 мм из коррозионностойкой стали 12Х8Н10Т. Для прошивки использовалась традиционная схема сплошного стержневого медного электрода-инструмента, направляемого по определенным координатам, с одновременной прокачкой рабочей жидкости между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью. В качестве электролита применяли водный раствор NaNO_3 [23].

Экспериментальное оборудование, разработанное для выполнения исследований режимов электрохимической прошивки, представлено на рис. 2. Медный электрод-инструмент с помощью цангового зажима закрепляется на двухкоординатном микрометрическом столике. Микрометрический столик позволяет точно позиционировать электрод-инструмент относительно продольной оси трубчатой заготовки, а также обеспечивает плавную подачу электрода-инструмента в зону обработки. Позиционирование по вертикальной оси осуществляется с помощью направляющей пары с соединением «ласточкин хвост», которая приводится в движение винтовой передачей.

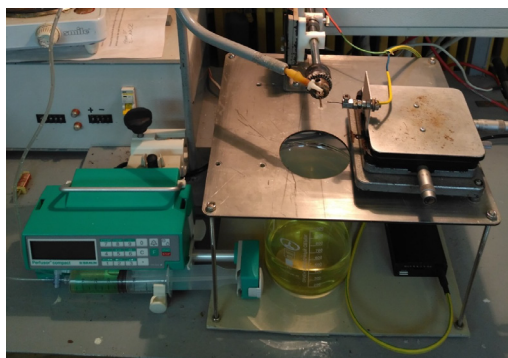


Рис. 2. Экспериментальное оборудование для электрохимической прошивки микроотверстий

Fig. 2. Experimental equipment for electrochemical broaching of micro-holes

Образец зажимается в кулачковый патрон, который закреплен на валу. Вал установлен в диэлектрических кронштейнах из фторопласта. Вращением вала вокруг оси устанавливается требуемый угловой шаг взаимного расположения прошиваемых боковых отверстий в сферическом наконечнике. При этом осевое перемещение вала относительно диэлектрических кронштейнов ограничено двумя фиксируемыми кольцами.

Для работы оборудования использовался источник питания с регулировкой рабочего напряжения от 12 до 20 В и силой тока до 8 А. Положительный полюс источника питания подключался к образцу, отрицательный – к медному электроду-инструменту. Дозированная подача электролита в межэлектродное пространство и расход электролита контролировались и изменялись в широком диапазоне с помощью шприцевого дозатора Perfusor Compact S. Концентрация электролита изменялась в пределах 20–30 % с шагом 5 %; расход электролита 40–80 мл/мин с шагом 20 мл/мин; рабочее напряжение 12–18 В с шагом 3 В. Предварительно установлено, что для получения отверстий диаметром 0,30 мм при толщине стенки 0,15 мм диаметр электрода-инструмента должен составлять 0,05–0,09 мм. Для выполнения исследований был принят медный электрод-инструмент с диаметром активной части 0,07 мм.

Оценка размеров и состояния поверхностей формируемых микроотверстий производилась с помощью электронного микроскопа Tescan Vega.

Результаты исследований и их обсуждение

В качестве примера на рис. 3 представлены фотографии микроотверстий для некоторых режимов обработки.

Как видно из фотографий микроотверстий, режимы электрохимической прошивки существенно влияют не только на точность размеров и форму прошитых микроотверстий, но и на качество прилегающей к прошитому микроотверстию поверхности. В частности, на рис. 3а показан кратер с большим радиусом прилегающей области травления, образующийся при низкой концентрации электролита и высоких значениях напряжения и расхода электролита.

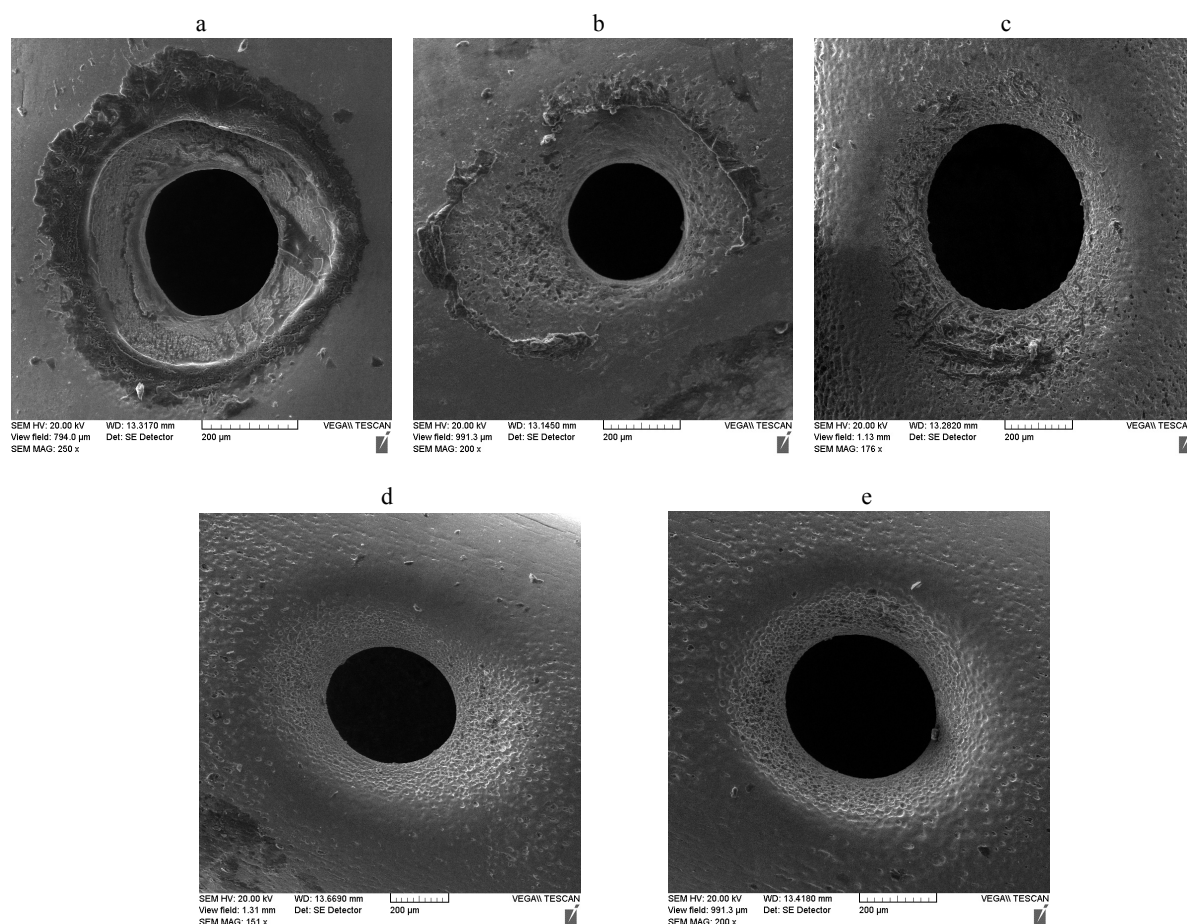


Рис. 3. Фотографии микроотверстий: а – 20 %, 18 В, 80 мл/мин; б – 20 %, 15 В, 60 мл/мин; с – 30 %, 18 В, 60 мл/мин; д – 25 %, 12 В, 60 мл/мин; е – 25 %, 15 В, 60 мл/мин

Fig. 3. Photos of micro-holes: а – 20 %, 18 V, 80 ml/min; б – 20 %, 15 V, 60 ml/min; с – 30 %, 18 V, 60 ml/min; д – 25 %, 12 V, 60 ml/min; е – 25 %, 15 V, 60 ml/min

Снижение значений рабочего напряжения и расхода электролита (рис. 3б) не ведет к уменьшению радиуса кратера, однако способствует заметному уменьшению интенсивности травления прилегающей области. На рис. 3с показано отверстие, прошитое при повышенных значениях концентрации электролита и рабочего напряжения. Увеличение концентрации позволяет получить гладкую скругленную поверхность без образования кратера, однако при высоком рабочем напряжении скорость электрохимической прошивки очень велика, вследствие чего наблюдается образование отверстия большого диаметра, превышающего требуемое значение на 42 %. Режим электрохимической прошивки с концентрацией электролита 25 %, рабочим напряжением 15 В и расходом электролита 60 мл/мин позволяет

получить отверстие с гладкой внутренней поверхностью и минимальным радиусом закругления (рис. 3е).

Рассмотрим влияние характеристик процесса электрохимической прошивки на диаметр формируемого микроотверстия более подробно. На рис. 4 представлена трехмерная зависимость изменения диаметра прошиваемого отверстия от рабочего напряжения и расхода электролита для концентрации 25 %. Повышение рабочего напряжения с 12 до 18 В приводит к увеличению диаметра прошитого отверстия. При значениях напряжения 12 В происходит заметное уменьшение кратера, образующегося вокруг отверстия в процессе электрохимической прошивки (рис. 3б). Однако при низком значении рабочего напряжения уменьшается производительность процесса прошивки и повыша-

ется вероятность замыкания электрода на образец из-за малой величины межэлектродного промежутка. Увеличение рабочего напряжения до 18 В существенно повышает производительность обработки. Однако при этом диаметр прошеного отверстия больше номинального значения на 32–38 %, что превышает требуемые допуски. Соответственно прошивку целесообразно выполнять при напряжении около 15 В.

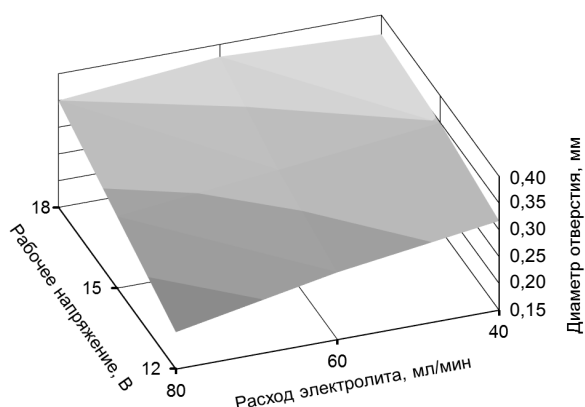


Рис. 4. Зависимость диаметра прошиваемого микроотверстия от рабочего напряжения при различных значениях расхода для концентрации электролита 25 %

Fig. 4. Dependence of broached micro-hole diameter on operating voltage at different flow rates for electrolyte concentration of 25 %

На рис. 5 представлена зависимость диаметра прошеного отверстия от расхода электролита для концентраций 20, 25 и 30 % при напряжении 12 В. Из полученной зависимости видно, что с увеличением расхода электролита через межэлектродный промежуток уменьшается размер формируемого в результате прошивки микроотверстия. Это связано с изменением проводимости электролита в межэлектродном промежутке в зависимости от содержания в нем продуктов электрохимического растворения. Недостаточная скорость потока электролита в межэлектродном зазоре не обеспечивает своевременного и достаточного удаления продуктов анодного растворения и водорода, выделяющегося на катоде, и, как следствие, увеличивается сопротивление в межэлектродном зазоре и снижается плотность тока [24]. Так, в ходе экспериментов при значениях расхода электролита менее 40 мл/мин наблюдалось частое замыкание образца с электродом-инструментом.

Повышение расхода электролита (от 40 до 60 мл/мин) приводит к более интенсивному удалению продуктов электрохимического растворения из межэлектродного промежутка и стабилизации процесса электрохимической прошивки. При таком расходе обеспечивалось формирование микроотверстий правильной формы со сглаженными краями. Чрезмерные значения расхода электролита (более 60 мл/мин) приводили к нарушению стабильности процесса прошивки, что выражалось в частом замыкании и оплавлении электрода-инструмента. Это может быть связано с возникновением кавитационных явлений, что наиболее характерно при обработке нежестким электродом [24], каким и является используемый электрод-инструмент диаметром 0,07 мм.

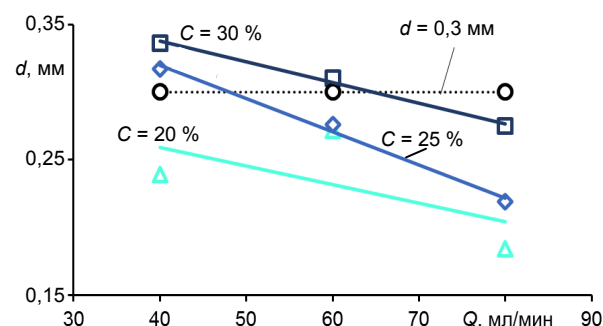


Рис. 5. Зависимость диаметра прошеного микроотверстия от расхода электролита при различных значениях концентрации электролита для рабочего напряжения 12 В

Fig. 5. Dependence of broached micro-hole diameter on electrolyte consumption at different concentrations of electrolyte for operating voltage of 12 V

Повышение концентрации электролита в электрохимических процессах приводит к увеличению проводимости и соответственно к повышению плотности тока. Зависимость диаметра прошиваемого отверстия от концентрации электролита представлена на рис. 6. При малой концентрации электролита не обеспечиваются условия, необходимые для электрохимического растворения прошиваемого материала. Так, в процессе прошивки отверстий с применением электролита концентрацией 20 % наблюдалось частое приваривание и обрыв электрода-инструмента. Однако при этом обеспечивалась наиболее точная геометрия прошиваемого отверстия (± 20 мкм) без образования

кратера (рис. 7а). В случае чрезмерно высокой концентрации (30 %) снижалась точность прошиваемого отверстия (± 150 мкм), а на входе в отверстие формировался кратер (рис. 7с) достаточно большого размера (диаметром до 0,65 мм и глубиной до 0,15 мм). Наиболее приемлемые результаты были достигнуты на режимах прошивки с применением электролита концентрацией 25 % (рис. 7б), при которых обеспечивались стабильность электрохимического процесса, достижение требуемой точности и качества поверхности формируемых микроотверстий, а также минимальные размеры кратера на входе в отверстие.

Фотография образца со сферическим наконечником трубчатого концентратора-волновода с прошитыми микроотверстиями, полученными с использованием установленных по результатам исследования параметров процесса, обеспечивающих высокую точность получаемых

микроотверстий и качество прилегающей к ним поверхности, стабильность процесса (напряжение 15 В, расход электролита 60 мл/мин, концентрация электролита 25 %), представлена на рис. 8.

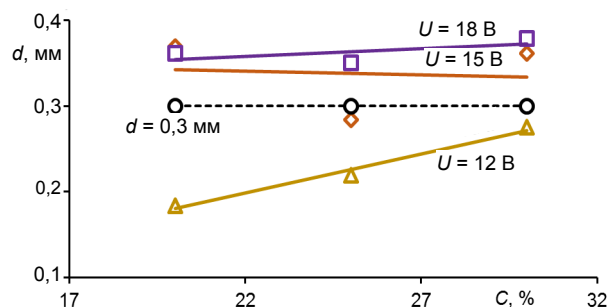


Рис. 6. Зависимость диаметра прошитого микроотверстия от концентрации электролита при различных значениях рабочего напряжения для расхода электролита 80 мл/мин

Fig. 6. Dependence of broached micro-hole diameter on electrolyte concentration at different operating voltages for electrolyte consumption of 80 ml/min

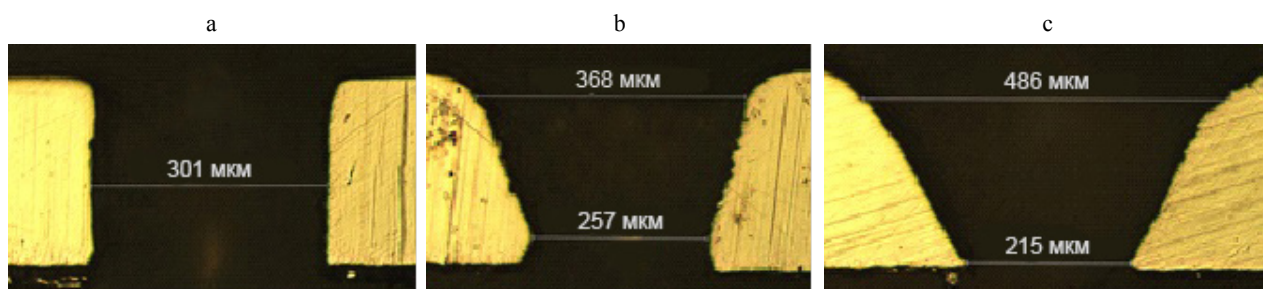


Рис. 7. Фотографии шлифов прошитых микроотверстий: а – 20 %, 15 В, 60 мл/мин; б – 25 %, 15 В, 60 мл/мин; с – 30 %, 18 В, 60 мл/мин

Fig. 7. Photos of metallographic sections in broached micro-holes: а – 20 %, 15 V, 60 ml/min; б – 25 %, 15 V, 60 ml/min; с – 30 %, 18 V, 60 ml/min



Рис. 8. Фотография наконечника с прошитыми микроотверстиями

Fig. 8. Photo of tip with broached micro-holes

ВЫВОДЫ

1. Результаты анализа методов формирования микроотверстий в тонкостенных деталях малой жесткости и размеров с помощью механического, лазерного, гидроабразивного и электрохимического сверления, а также результаты экспериментальных исследований электрохимической технологии показали, что с учетом требований, предъявляемых к микроотверстиям в сферических наконечниках ультразвуковых ступенчатых концентраторов-волноводов медицинского назначения, наиболее приемлемым методом их получения является электрохимическая прошивка, позволяющая формировать точные микроотверстия с высоким качеством внутренней поверхности с отклонением по диаметру не более 0,05 мм.

2. В результате экспериментальных исследований влияния напряжения, концентрации и расхода электролита в процессе электрохимической прошивки на точность размеров и формы получаемых микроотверстий установлено, что для обеспечения допустимого отклонения диаметра микроотверстий, высокого качества и геометрии прилегающей к ним поверхности, а также стабильности процесса необходимо выполнять обработку со следующими параметрами: напряжение 15 В, расход электролита 60 мл/мин, концентрация электролита 25 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: БНТУ, 2015. 203 с.
2. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т / И. В. Фомихина [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 3. С. 24–29.
3. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2012. № 3. С. 3–6.
4. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 5. С. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
5. Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 3. С. 211–219. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219>.
6. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 61–68. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68>.
7. Минченя, В. Т. Применение ультразвуковых концентраторов-волноводов трубчатого типа для устранения непроходимости кровеносных сосудов / В. Т. Минченя, И. Э. Адзериho, А. Ю. Королёв // Доклады БГУИР. 2016. Т. 101, № 7. С. 300–303.
8. Минченя, В. Т. Исследование процесса формообразования волочением ступенчатых поверхностей ультразвуковых концентраторов-волноводов трубчатого типа для устранения непроходимости кровеносных сосудов / В. Т. Минченя, А. Ю. Королёв, Дай Вэньци // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26–27 апр. 2018 г. / редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. Могилев: Белор.-Рос. ун-т, 2018. С. 41–42.
9. Юрьев, А. С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / А. С. Юрьев. СПб.: Мир и семья, 2001. 1154 с.
10. A review on Drilling Printed Circuit Boards / L. J. Zheng [et al.] // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 188. P. 441–449.
11. I Interaction of Cemented Carbide Micro-Drills and Printed Circuit Boards During Micro-Drilling / L. J. Zheng [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 77, No 5–8. P. 1305–1314. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6520-1>.
12. Ultrashort Pulsed Laser Drilling and Surface Structuring of Microholes in Stainless Steels / L. Romoli [et al.] // CIRP Annals. 2014. Vol. 63, No 1. P. 229–232. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.053>.
13. Laser Drilling of Stainless Steel with Nanosecond Double-Pulse / X. D. Wang [et al.] // Optics & Laser Technology. 2009. Vol. 63, No 2. P. 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.05.021>.
14. Jiang Jing. Research on Microporous Machining Technology of Metal Materials by Picosecond Laser / Jing Jiang // Beijing University of Technology Master Thesis. Beijing, 2014. 61 p.
15. Research on Femtosecond Laser Efficient Parallel Micro-Hole Machining Technology / Luo Zhang [et al.] // Journal of Hubei University of Technology. 2018. Vol. 33, No 4. P. 19–21.
16. Ultrashort Pulse Laser Micropore Processing / W. Zhao [et al.] // Infrared and Laser Engineering. 2018. Vol. 10. P. 1–9.
17. Experimental Study on Picosecond Laser Processing of Stainless Steel Micropores / L. Y. Liu [et al.] // Applied Laser. 2015. Vol. 35, No 4. P. 472–478.
18. Kong, M. C. Aspects of Material Removal Mechanism in Plain Waterjet Milling on Gamma Titanium Aluminium / M. C. Kong, D. Axinte, W. Voice // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. P. 573–584.
19. Wang, J. The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics / J. Wang, D. M. Guo // Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 133. P. 371–377.
20. Improving Surface Hardness of Austenitic Stainless Steel Using Waterjet Peening Process / A. Azhari [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 63. P. 1035–1046.
21. Azmir, M. A. A Study of Abrasive Water Jet Machining Process on Glass/Epoxy Composite Laminate / M. A. Az-

- mir, A. K. Ahsan // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. P. 6168–6173.
22. Grachev, M. V. Comparison of Technological Methods for Small Diameter Hole Perforation in Titanium Alloys / M. V. Grachev // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7, No 3.19. P. 105–107.
23. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г. Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В. А. Волосатова. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 719 с.
24. Мороз, И. И. Электрохимическая размерная обработка металлов / И. И. Мороз. М.: Машиностроение, 2009. С. 279.

Поступила 15.05.2019

Подписана в печать 23.07.2019

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

- Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Minchenya V. T., Niss V. S., Parshuto A. E., Khrustalev B. M. (2015) *Combined Technology for Manufacturing of Flexible Ultrasonic Concentrators-Instruments*. Minsk, Belarusian National Technical University. 203 (in Russian).
- Fomikhina I. V., Litovskaya Yu. O., Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Niss V. S. (2008) Influence of Electrolytic-Plasma Treatment on Structure and Properties in Surface Layer of Authentic Stainless 12X18H10T – Steel. *Vestsi Natsionalnoy Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fiz. Tekhn. Navuk = Bulletin of National Academy of Science of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*, (3), 24–29 (in Russian).
- Alekseev Yu., Korolev A., Parshuta A., Niss V. (2012) Model for Metal Removal in Electrolyte-Plasma Treatment of Cylindrical Surfaces. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
- Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Y., Parshuto A. E., Niss V. S. (2017) Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Mode in a High-Gradient Electric Field. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (5), 391–399 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391399>.
- Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Y., Niss V. S., Parshuto A. E., Budnitskiy A. S. (2018) Electrolyte-Plasma Polishing of Titanium and Niobium Alloys. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (3), 211–219 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219>.
- Alekseev Y. G., Korolyov A. Y., Niss V. S., Parshuta A. E. (2016) Electrolytic-Plasma Treatment of Internal Surface in Tubular Products. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (1), 61–68 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68>.
- Minchenya V. T., Adzerikho I. E., Korolev A. Yu. (2016) The Use of Ultrasonic Concentrators-Waveguides of Tubular Type to Eliminate the Obstruction of Blood Vessels. *Doklady Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Informatiki i Radioelektroniki = Doklady BGUIR*, 101 (7), 300–303 (in Russian).
- Minchenya V. T., Korolev A. Yu., Dai Wenqi (2018) Investigations on Forming Process while Using Drawing Method for Stepped Surfaces of Ultrasonic Concentrators-Waveguides of Tubular Type to Eliminate Obstruction of Blood Vessels. *Materialy, Oborudovanie i Resursoberegayushchie Tekhnologii: Materialy Mezhdunar. Nauch. Tekhn. Konf., 26–27 apr. 2018 g.* [Materials, Equipment and Resource Saving Technologies: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Apr. 26–27, 2018]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 41–42 (in Russian).
- Yuriev A. S. (2001) *Handbook for Calculation of Hydraulic and Ventilation Systems*. Saint Petersburg, Mir i Semya Publ. 1154 (in Russian).
- Cheng Yong Wang, Yue Xian Song, Yang L. P., Qu Y. P., Ping Ma, Fu L. Y. (2011) A review on Drilling Printed Circuit Boards. *Advanced Materials Research*, 188, 441–449. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.188.441>.
- Li Juan Zheng, Cheng Yong Wang, Yun Peng Qu, Yue Xian Song, Lian Yu Fu (2014) Interaction of Cemented Carbide Micro-Drills and Printed Circuit Boards During Micro-Drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77 (5–8), 1305–1314. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6520-1>.
- Romoli L., Rashed C. A. A., Lovicu G., Dini G., Tantussi F., Fuso F., Fiaschi M. (2014) Ultrashort Pulsed Laser Drilling and Surface Structuring of Microholes in Stainless Steels. *CIRP Annals*, 63 (1), 229–232. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.053>.
- Wang X. D., Michalowski A., Walter D., Sommer S., Kraus M., Liu J. S., Dausinger F. (2009) Laser Drilling of Stainless Steel with Nanosecond Double-Pulse. *Optics & Laser Technology*, 63 (2), 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.05.021>.
- Jiang Jing (2014) *Research on Microporous Machining Technology of Metal Materials by Picosecond Laser*. Beijing, Beijing University of Technology Master Thesis. 61.
- Luo Zhang [et al.] (2018) Research on Femtosecond Laser Efficient Parallel Micro-Hole Machining Technology. *Journal of Hubei University of Technology*, 33 (4), 19–21 (in China).
- Zhao W. [et al.] (2018) Ultrashort Pulse Laser Micropore Processing. *Infrared and Laser Engineering*, 10, 1–9.
- Liu L. Y. [et al.] (2015) Experimental Study on Picosecond Laser Processing of Stainless Steel Micropores. *Applied Laser*, 35 (4), P. 472–478.
- Kong M. C., Axinte D., Voice W. (2010) Aspects of Material Removal Mechanism in Plain Waterjet Milling on Gamma Titanium Aluminide. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 573–584. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.009>.
- Wang J., Guo D. M. (2003) The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 133, 371–377. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01125-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01125-1).
- Azhari A., Schindler C., Kerscher E., Grad P. (2012) Improving Surface Hardness of Austenitic Stainless Steel Using Waterjet Peening Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63, 1035–1046. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3962-1>.
- Azmir M. A., Ahsan A. K. (2009) A Study of Abrasive Water Jet Machining Process on Glass/Epoxy Composite Laminate. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 6168–6173. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.011>.
- Grachev M. V. (2018) Comparison of Technological Methods for Small Diameter Hole Perforation in Titanium Alloys. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3), 105–107. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.1916995>.
- Amitan G. L., Baisupov I. A., Baron Yu. M., Volosatov V. A. (1988) *Handbook on Electrochemical and Electrophysical Processing Methods*. Leningrad, Mashinistroyenie Publ. 719 (in Russian).
- Moroz I. I. (2009) *Electrochemical Dimensional Processing of Metals*. Moscow, Mashinistroyenie Publ. 279 (in Russian).

Received: 15.05.2019

Accepted: 23.07.2019

Published online: 30.09.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-395-400>

УДК 621.43

Влияние величины запальной порции дизельного топлива газодизельного двигателя на параметры его рабочего процесса

Канд. техн. наук, доц. Г. А. Вершина¹⁾, асп. О. С. Быстренков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. С течением времени к двигателям внутреннего сгорания предъявляется все больше требований, вызванных необходимостью экономии топлива, снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, повышения надежности работы, уменьшения габаритов и затрачиваемых материалов, массы, уровня шума, упрощения изготовления и эксплуатации. В городах, где количество двигателей очень велико, использование газа в качестве топлива позволяет значительно снизить загрязнение окружающей среды. В некоторых странах есть отдельные экологические программы, стимулирующие перевод двигателей с бензина на газ. Однако в настоящее время применение газовых двигателей на автомобильном транспорте ограничено, что связано с рядом проблем технического и эксплуатационного характера. С целью решения данной задачи и предотвращения возможных проблем на уже готовом двигателе прибегают к математическим расчетам и моделированию. В рамках исследования по установлению влияния величины запальной порции дизельного топлива газодизельного двигателя на параметры его рабочего процесса необходимо разработать соответствующую методику расчета. В связи с этим проведен анализ методик и программ расчета рабочего процесса двигателя, разработана методика расчета рабочего процесса газодизельного двигателя. Проведено расчетное исследование по разработанной методике. Установлено влияние величины запальной порции дизельного топлива на эффективные и экологические показатели работы двигателя. Расчет проводился для номинального режима работы двигателя, газовое топливо – пропан-бутан. В качестве исходных данных для расчета приняты конструктивные параметры двигателя ГД-243. Установлены следующие зависимости: по мере увеличения запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) наблюдается некоторое снижение мощности двигателя, а также при принятых условиях – рост CO_2 при снижении CO и NO .

Ключевые слова: топливная экономичность, экологические требования, методика, исследование, уравнение, разработка, мощность, крутящий момент, расход топлива

Для цитирования: Вершина, Г. А. Влияние величины запальной порции дизельного топлива газодизельного двигателя на параметры его рабочего процесса / Г. А. Вершина, О. С. Быстренков // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 395–400. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-395-400>

Influence of Diesel Fuel Ignition Portion Value on Working Process Parameters of Gas-Diesel Engine

G. A. Vershina¹⁾, O. S. Bystrenkov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. More and more requirements are imposed to engines of internal combustion due to the passage of time. These requirements are caused by the necessity to save fuel, to reduce emissions of pollutants into the atmosphere, to improve operational reliability, to reduce size and cost of spent materials, weight, noise level, to simplify manufacturing and operational processes. Use of gas as a fuel in the cities where number of engines is extremely large can significantly reduce environmental pollution. Some countries have separate environmental programs that encourage transfer of engines from gasoline to gas.

Адрес для переписки

Вершина Георгий Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-64
oup@bntu.by

Address for correspondence

Vershina Georgy A.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-64
oup@bntu.by

At present, however, the use of gas engines in road transport is limited due to a number of technical and operational problems. Mathematical calculations and simulations are applied in order to solve this task and prevent possible problems in a manufactured. As part of the research to establish an influence of the diesel fuel ignition portion value in a gas-diesel engine on parameters of its operational process, it is necessary to develop an appropriate calculation method. In this regard, an analysis of methods and programs for calculation of the operational engine process has been carried out, and a method for calculation of an operational process for a gas-diesel engine has been developed in the paper. A computational study has been made in accordance with the developed methodology. The paper has revealed an influence of the diesel fuel ignition portion value on effective and environmental performance of an engine operation. The calculation has been performed for a nominal mode of the engine operation, gas fuel – propane-butane. Design parameters of a ГД-243-engine have been taken as initial data for the calculation. The following dependences have been established: as a diesel fuel ignition portion is increasing (replacement proportion of gas fuel with diesel), there is some decrease in engine power, and under the accepted conditions, there is an increase in CO₂ with a decrease in CO and NO.

Keywords: fuel efficiency, environmental requirements, methodology, research, equation, development, power, torque, fuel consumption

For citation: Vershina G. A., Bystrenkov O. S. (2019) Influence of Diesel Fuel Ignition Portion Value on Working Process Parameters of Gas-Diesel Engine. *Science and Technology*, 18 (5), 395–400. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-395-400> (in Russian)

Введение

Научно-исследовательскими и конструкторскими организациями в области машиностроения накоплен большой опыт конструирования, доведения и введения двигателей в эксплуатацию. Найдены специальные методы расчета агрегатов, систем и элементов двигателей, способы подбора основных конструктивных корреляций, схем компоновки как всего двигателя, так и его узлов [1–4].

С ужесточением норм, предъявляемых к двигателям внутреннего сгорания, внедрялись каталитические системы доочистки, современные топливные системы, устройства для регулирования фаз газораспределения и систем турбонаддува, способы изменения степени сжатия двигателя, которые в совокупности дают двигателям возможность соответствовать данным нормам и современному уровню. Однако такое глубокое регулирование и управление двигателем сделали его конструкцию гораздо сложнее. Соответственно для ускорения процесса конструирования двигателя организации совершенствуют развитие этого процесса. С этой целью прибегают к развитию компьютерного моделирования:

- оно предоставляет данные, которые могут быть получены только при полном натурном исследовании двигателя с применением, в том числе, современных технологий лазерной диагностики;

- данная информация становится доступна на начальных стадиях конструирования, тогда как будущий двигатель изображен только на чертежах;

- комплексную информацию от сложной модели можно использовать на более мелких при

разработке алгоритмов регулирования и управления двигателем.

На современном этапе развития к двигателю предъявляются различные требования: необходимы высокая экономия топлива, соответствие экологическим стандартам, таким как снижение токсичности газов, выбрасываемых в атмосферу; повышение уровня безотказности в работе, компактность; уменьшение объема применяемых материалов, массы, уровня шума; упрощение изготовления и эксплуатации.

Цель исследований – составление методики расчета рабочего процесса газодизельного двигателя. Проведены расчеты по разработанной методике, которая применена в совокупности с методом расчета равновесного состава продуктов сгорания, определено влияние величины запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) на эффективные, экономические и экологические показатели работы двигателя.

Основная часть

В настоящее время для решения столь широкого круга задач принято выделять две основные группы моделей, реализуемых в различных программных средах [5]: построение моделей ДВС, которые подходят к рассмотрению двигателя как к совокупности термодинамических систем; модели, основанные на задачах гидродинамики (известная в зарубежных источниках как Computational Fluid Dynamic, или CFD). При использовании последних весь двигатель разбивается на отдельные трехмерные элементы (рис. 1). Для каждого из элементов моделируется система уравнений сохранения энергии, массы, импульса и состояния.

Термодинамические модели ДВС развиваются и совершенствуются на протяжении более ста лет.



Рис. 1. Сетка для расчета

Fig. 1. Calculation grid

Наиболее известной и применяемой моделью является методика теплового расчета двигателя, разработанная еще в 1907 г. профессором В. И. Гриневецким. Метод основан на рассмотрении расчетного цикла, который отличается от действительного рядом допущений и упрощений. Берутся за основу положения термодинамики и термохимии. Следует отметить, что методика очень последовательна, достаточно полно и наглядно демонстрирует сущность происходящих в двигателе явлений. Дает возможность для проведения расчетных исследований, дополнения и совершенствования методики для решения более обширного круга задач. Надо сказать, что впоследствии над улучшением данной методики работали Н. Р. Брилинг, Е. Г. Мазинг, А. С. Кулешов, Н. Ф. Разлейцев, А. С. Орлин, Б. С. Стечкин и др.

В настоящее время крупнейшими научными организациями интенсивно разрабатываются программы по улучшению рабочих процессов ДВС на основе алгоритмов решения вопросов гидродинамики с применением моделей с движущейся стенкой. В данной модели может имитироваться подача топлива в цилиндры и коллекторы ДВС с последующим движением газовых потоков в объемной постановке. В различных отраслях наибольшее распространение получили такие программы, как STAR-CD (CD Adapco); FIRE (AVL); VECTIS (Ricardo); Fluent (FluentInc.) и KIVA (LosAlamosNationalLaboratory). Данное программное обеспечение может моделировать развитие течения газа и распыливаемого топлива в камере сгорания двигателя, движение топливных пленок, температурные поля и концентрацию рабочего тела в рабочем объеме (рис. 2). Развивается моделирование эмиссии сажи, NO_x и CO . Однако эти

задачи окончательно не решены применительно к саже и CO . Достоверность результатов расчета не всегда на высоком уровне. Существенную трудность при использовании CFD сегодня вызывают трудоемкость расчетов и необходимость применения суперкомпьютеров.

Каждая из данных групп моделей направлена на решение определенного круга задач.

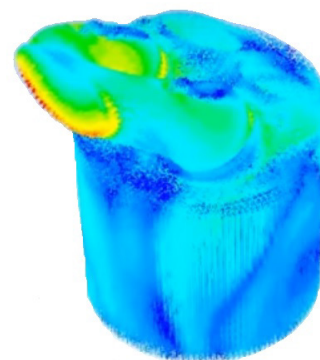


Рис. 2. Газодинамические процессы в цилиндре двигателя

Fig. 2. Gas-dynamic processes in engine cylinder

При разработке модели рабочего процесса газодизельного двигателя за основу была взята модель Гриневецкого – Мазинга [6]. Величина запальной порции дизельного топлива учитывалась при расчете теоретически необходимого количества воздуха (кмоль) для сгорания 1 кг смеси жидкого и газового топлива

$$L_0 = qL_0^{\text{ж}} + (1-q)L_0^{\text{г}},$$

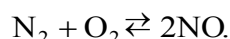
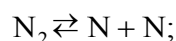
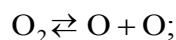
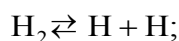
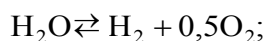
где q – величина запальной порции дизельного топлива, %; L_0 , $L_0^{\text{ж}}$, $L_0^{\text{г}}$ – теоретически необходимое количество воздуха (кмоль) для сгорания 1 кг смеси жидкого и газового топлива, жидкого топлива, газового топлива соответственно.

Методика расчета равновесного состава продуктов сгорания

При использовании данной методики возможно рассчитать концентрации 11 равновесных продуктов сгорания для смеси паров топлива с воздухом. Для проведения расчета должны быть известны значения коэффициента избытка воздуха, температуры и давления [7–9]. Данная модель позволяет достаточно точно рассчитать параметры процесса сгорания. Наиболее достоверные результаты получаются при выполнении расчетов по выявлению концентраций основных токсичных компонентов отработавших газов, таких как CO и NO .

Основные допущения в модели: продукты сгорания считаются идеальными газами, в системе процесс горения полностью завершен и установлено химическое равновесие между компонентами. В таком случае система определяется законами сохранения вещества, действующих масс и Дальтона.

После завершения процесса химическое равновесие между образующимися компонентами сгорания устанавливается по следующим реакциям:



В данных уравнениях можно видеть 11 компонентов, которые в наибольшей степени образуются после сгорания топлива и завершения всех реакций: CO_2 , CO , H_2O , H_2 , H , OH , O_2 , O , NO , N_2 и N . Для определения их концентраций требуется составить 11 уравнений. С этой целью используют четыре уравнения материального баланса и семь уравнений равновесия.

Уравнения материального баланса составляют по каждому элементу исходной смеси на основе неизменности числа атомов этих элементов в ходе реакции:

$$M_{\text{CO}_2} + M_{\text{CO}} = \frac{C}{12}(1 + \gamma_r);$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{H}_2} + \frac{1}{2}M_{\text{H}} + \frac{1}{2}M_{\text{OH}} = \frac{H}{2}(1 + \gamma_r);$$

$$M_{\text{N}_2} + \frac{1}{2}M_{\text{NO}} + \frac{1}{2}M_{\text{N}} = 0,79\alpha L_0(1 + \gamma_r);$$

$$M_{\text{CO}_2} + M_{\text{O}_2} + \frac{1}{2}M_{\text{CO}} + \frac{1}{2}M_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{1}{2}M_{\text{O}} + \frac{1}{2}M_{\text{OH}} + \frac{1}{2}M_{\text{NO}} = \left(\frac{O}{32} + 0,21\alpha L_0\right)(1 + \gamma_r),$$

где C , H , O – массовые доли углерода, водорода и кислорода в 1 кг топлива; L_0 – теоретически

необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива; γ_r – коэффициент остаточных газов; M_x – число молей соответствующих компонентов.

Уравнения равновесия, вытекающие из закона действующих масс, составляют по каждой реакции системы в следующем виде:

$$K_1 = \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}}\sqrt{M_{\text{O}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{-0,5};$$

$$K_2 = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2}\sqrt{M_{\text{O}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{-0,5};$$

$$K_3 = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{OH}}\sqrt{M_{\text{H}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{-0,5};$$

$$K_4 = \frac{M_{\text{H}}}{\sqrt{M_{\text{H}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{0,5};$$

$$K_5 = \frac{M_{\text{O}}}{\sqrt{M_{\text{O}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{0,5};$$

$$K_6 = \frac{M_{\text{NO}}}{\sqrt{M_{\text{O}_2}M_{\text{N}_2}}};$$

$$K_7 = \frac{M_{\text{N}}}{\sqrt{M_{\text{N}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{0,5},$$

где K_x – константы равновесия химических реакций; M_Σ – общее число молей компонентов продуктов сгорания.

Константы равновесия можно рассчитать по следующим аппроксимирующим уравнениям в зависимости от температуры:

$$K_1 = 3,4447 \cdot 10^{-7} T_z^{0,6885} \exp\left(\frac{289322}{RT_z}\right);$$

$$K_2 = 24,142 \cdot 10^{-3} T_z^{-0,2421} \exp\left(\frac{247410}{RT_z}\right);$$

$$K_3 = 15,088 \cdot 10^{-4} T_z^{-0,1118} \exp\left(\frac{288568}{RT_z}\right);$$

$$K_4 = 13,1792 T_z^{0,4056} \exp\left(\frac{-218561}{RT_z}\right);$$

$$K_5 = 156,6265 T_z^{0,2126} \exp\left(\frac{-249964}{RT_z}\right);$$

$$K_6 = 6,0469 T_z^{-0,0322} \exp\left(\frac{-91235}{RT_z}\right);$$

$$K_7 = 79,8151 T_z^{0,2920} \exp\left(\frac{-475224}{RT_z}\right).$$

При математическом моделировании ДВС ставится задача не только расчета соответствующих процессов, но и применения данной модели для изучения и усовершенствования исследуемого объекта методами численных экспериментов. Таким образом, совместное использование методики расчета Гриневецкого – Мазинга в совокупности с методикой расчета равновесной концентрации продуктов сгорания позволяет определить влияние различных конструктивных параметров двигателя на эффективные, экономические и экологические показатели.

На основании данных методик было проведено моделирование рабочего процесса газодизельного двигателя, установлено влияние величины запальной порции дизельного топлива на эффективные и экологические показатели. В качестве исходных данных для расчета приняты конструктивные параметры двигателя ГД-243 [10].

Расчет проводился для номинального режима работы двигателя, газовое топливо – пропан-бутан. Принималось, что коэффициент избытка воздуха оставался неизменным и равным 1 при изменении порции дизельного топлива. При этом по мере увеличения порции дизельного топлива уменьшалась доля газового топлива, а диапазон парциальной доли дизельного топлива варьировался в пределах от 5 до 30 %.

Как показали исследования, по мере увеличения запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) наблюдается некоторое снижение мощности двигателя (рис. 3).

Происходит это вследствие того, что дизельное топливо обладает меньшим значением нижней теплоты сгорания, чем газовое, при

увеличении подачи дизельного топлива суммарная теплота сгорания смеси падает, что, в свою очередь, приводит к снижению температуры T_z и давления p_z .

Разумеется, пропорционально уменьшится часовой расход газового топлива и увеличится часовой расход дизельного топлива. В свою очередь, это приведет к изменению токсичных составляющих отработавших газов.

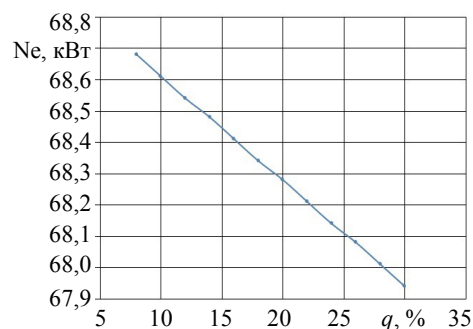


Рис. 3. Зависимость эффективной мощности газодизельного двигателя от величины запальной порции дизельного топлива

Fig. 3. Dependence of effective power for gas diesel engine on values of diesel fuel ignition portion

Зависимость концентраций основных токсичных компонентов отработавших газов (CO , NO и CO_2) от величины запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) приведена на рис. 4. Можно отметить, что вследствие снижения температуры с ростом величины запальной порции дизельного топлива наблюдается рост CO_2 и снижение CO и NO .

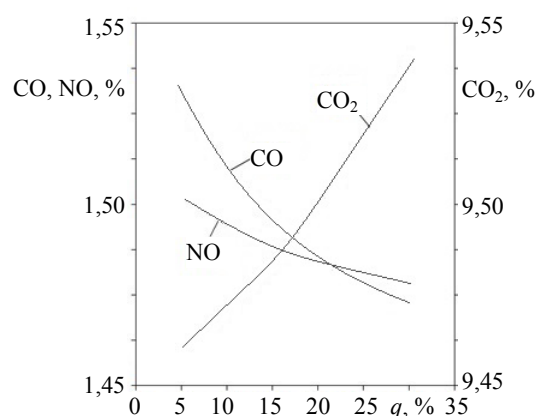


Рис. 4. Зависимость выбросов CO , CO_2 , NO от величины запальной порции дизельного топлива

Fig. 4. Dependence of CO , CO_2 , NO -emissions on values of diesel fuel ignition portion

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика расчета рабочего процесса газодизельного двигателя с учетом параметров равновесного состава продуктов сгорания отработавших газов, что позволяет определить эффективные показатели работы двигателя, а также величину выбросов вредных веществ отработавших газов.

2. Проведены расчетные исследования по влиянию величины запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) на эффективные и экологические показатели работы двигателя. По мере увеличения запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) при принятых условиях наблюдается некоторое снижение мощности двигателя, а также рост CO_2 при снижении CO и NO .

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернецов, Д. А. Анализ процесса образования токсичных компонентов в камере сгорания дизельных двигателей / Д. А. Чернецов, В. П. Капустин // Вопросы современной науки и практики. 2011. № 1. С. 54–58.
2. Гиринович, М. П. Исследование процессов образования оксидов азота при сгорании топлив в перспективных дизелях / М. П. Гиринович. М.: Центр науч.-исслед. автомоб. и автотранспорт. ин-т, 2006. 17 с.
3. Сакулин, Р. Ю. Снижение эмиссии оксидов азота в ДВС с унифицированным рабочим процессом при работе на обводненном этаноле / Р. Ю. Сакулин. Уфа: Уфим. гос. авиац.-техн. ун-т, 2010. 17 с.
4. Салова, Т. Ю. Улучшение эксплуатационных показателей дизельных энергоустановок путем совершенствования смесеобразования и нейтрализации отработавших газов / Т. Ю. Салова. СПб., 1999. 397 с.
5. Кулешов, А. С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС / А. С. Кулешов. М., 2011. 235 с.
6. Расчет рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания: справ. пособие / под общ. ред. А. С. Орлина. 2-е изд., доп. М.: МАШГИЗ, 1958. 160 с.
7. Мехтиев, М. И. Методика, алгоритм и программа расчета равновесного состава продуктов сгорания топливовоздушной смеси на ЭВМ / М. И. Мехтиев, Х. Б. Багиров. Баку: Изд. АзПИ имени Ч. Ильдрыма, 1984. 31 с.
8. Звонов, В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1981. 160 с.
9. Warnatz, J. Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation / J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble. Berlin: Springer, 2006. 378 p.

10. Вершина, Г. А. Способы организации рабочего процесса газодизельного двигателя / Г. А. Вершина, О. С. Быстренков // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 5. С. 383–390. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-383-390>.

Поступила 27.11.2018

Подписана в печать 31.07.2019

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Tchernetsov D. A., Kapustin V. P. (2011) Analysis of Process on Formation of Toxic Components in Combustion Chamber of Diesel Engine. *Voprosy Sovremennoy Nauki i Praktiki = Problems of Contemporary Science and Practice*, (1), 54–58 (in Russian).
2. Girinovich M. P. (2006) *Investigations on formation Process of nitrogen Oxide During Fuel Combustion in Prospective Diesel Engines*. Moscow, Centre of Automobile Scientific Research and Automotive Engine Institute. 17 (in Russian).
3. Sakulin R. Yu. (2010) *Reduction in Nitrogen Oxide Emission in Internal Combustion Engine with Unified Operational Process while Using Watered Ethanol*. Ufa, Ufa State Aviation Technical University. 17 (in Russian).
4. Salova T. Yu. (1999) *Improvement of Operational Indices in Diesel Power Plants while Modernizing Mixture Formation and Neutralization of Waste Gas*. Saint-Petersburg. 397 (in Russian).
5. Kuleshov A. S. (2011) *Development of Methods for Calculation and Optimization of Operational Processes in Internal Combustion Engine*. Moscow. 235 (in Russian).
6. Orlin A. S., Kruglov M. G. (eds.) (1958) *Calculation of Operational Processes in Internal Combustion Engines*. 2nd ed. Moscow, MASHGIZ Publ. 160 (in Russian).
7. Mekhtiev M. I., Bagirov Kh. B. (1984) *Methodology, Algorithm and Calculation Program for Equilibrium Composition of Fuel-Air Mixture Combustion Products while Using Computing Machine*. Baku, Publishing House of Azerbaijan Technical University named after Ch. Ildrym. 31 (in Russian).
8. Zvonov V. A. (1981) *Toxicity of Internal Combustion Engines*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 160 (in Russian).
9. Warnatz J., Maas U., Dibble R. W. (2006) *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. Berlin, Springer. 378.
10. Vershina G. A., Bystrenkov O. S. (2017) Methods for Organization of Operational Process in Gas and Diesel Engine. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (5), 383–390. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-383-390>.

Received: 27.11.2018

Accepted: 31.07.2019

Published online: 30.09.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-401-408>

UDC 629.3.017.5:681.523.5

About Application the Tyre-Road Adhesion Determination of a Vehicle Equipped with an Automated System of Brake Proportioning

D. N. Leontiev¹⁾, I. N. Nikitchenko¹⁾, L. A. Ryzhyh¹⁾, S. I. Lomaka¹⁾, O. I. Voronkov¹⁾, I. V. Hritsuk²⁾, S. V. Pylshchyk³⁾, O. V. Kuripka¹⁾

¹⁾Kharkov National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine),

²⁾Kherson State Maritime Academy (Kherson, Ukraine),

³⁾Kherson State University (Kherson, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Abstract. The paper considers a method for calculation and evaluation of an automated brake proportioning system and it also describes assessment of efficiency while using cohesion forces of an automated system during vehicle braking process (MAZ 256200 taken as an example). A method for efficiency estimation of the vehicle braking equipped with an automated brake proportioning system is graphically presented in the paper. A comparable analysis has been made in order to evaluate vehicle braking efficiency in three various conditions of its wheel motion during braking process. The paper contains description of braking processes for a vehicle at its idealized braking, at braking with an operating automated system and at braking with blocked wheels. Mathematical dependences have been proposed and they make it possible to calculate a coefficient of cohesion forces used by an automated brake proportioning system on the basis of time parameters for vehicle braking process. The proposed mathematical dependences take into account design peculiarities of the automated system, i.e. a diagram of modulator arrangement on axes of the vehicle. The executed analysis for calculation accuracy of the coefficient pertaining to use of cohesion forces of the automated system with and without taking into account rolling force resistance of the vehicle wheels has demonstrated a possibility to apply the proposed calculation methods for carrying out auto-technical expertise while investigating road-traffic accidents involving transport facilities equipped with such systems as ABS. The paper proposes a dependence for identification of a vehicle braking distance on the basis of the coefficient on use of cohesion forces by the automated brake proportioning system. The executed experimental investigations on both test and serial models of the automated brake proportioning system have allowed to justify theoretical discussions concerning application of tyre-road adhesion in the operational process of the vehicle brake proportioning system. The investigation results have shown high efficiency of the test automated brake proportioning system developed by Chair of Automobiles in the name of A. B. Hredescul at Kharkiv National Automobile and Road University under the following braking conditions: dry road surface and compacted snow cover.

Keywords: automated brake proportioning systems, ABS, braking system, brake control, realised adhesion, synergy of wheel and bearing surface, coefficient of used cohesion forces, braking distance, stopping distance, vehicle

For citation: Leontiev D. N., Nikitchenko I. N., Ryzhyh L. A., Lomaka S. I., Voronkov O. I., Hritsuk I. V., Pylshchyk S. V., Kuripka O. V. (2019) About Application the Tyre-Road Adhesion Determination of a Vehicle Equipped with an Automated System of Brake Proportioning. *Science and Technique*. 18 (5), 401–408. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-401-408>

Об использовании сил сцепления колес транспортного средства, оборудованного автоматизированной системой регулирования тормозного усилия

Кандидаты техн. наук, доценты Д. Н. Леонтьев¹⁾, И. Н. Никитченко¹⁾, кандидаты техн. наук, профессора Л. А. Рыжих¹⁾, С. И. Ломака¹⁾, доктора техн. наук, доценты А. И. Воронков¹⁾, И. В. Грицук²⁾, преподаватель С. В. Пильщик³⁾, магистр А. В. Курипка¹⁾

¹⁾Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (Харьков, Украина),

²⁾Херсонская государственная морская академия (Херсон, Украина),

³⁾Херсонский государственный университет (Херсон, Украина)

Реферат. В статье рассмотрен метод расчета и оценки автоматизированной системы регулирования тормозного усилия, а также выполнена оценка эффективности использования силы сцепления автоматизированной системой в процессе

Адрес для переписки

Леонтьев Дмитрий Николаевич
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
ул. Ярослава Мудрого, 25,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 057 707-37-69
dima.a3alij@gmail.com

Address for correspondence

Leontiev Dmitry N.
Kharkov National Automobile and Highway University
25 Yaroslava Mudrogo str.,
61002, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +38 057 707-37-69
dima.a3alij@gmail.com

торможения колесного транспортного средства (на примере автобуса МАЗ 256200). Графически представлен и обоснован способ оценки эффективности торможения транспортного средства, оборудованного автоматизированной системой регулирования тормозного усилия. Проведен сравнительный анализ эффективности торможения транспортного средства в трех разных условиях движения его колес при торможении. Описаны процессы торможения при идеализированном торможении, торможении при работе автоматизированной системы, а также при торможении транспортного средства с заблокированными колесами. Предложены математические зависимости, позволяющие рассчитать коэффициент использования силы сцепления автоматизированной системой регулирования тормозного усилия на основе временных параметров процесса торможения транспортного средства. Предложенные математические зависимости учитывают особенности конструкции автоматизированной системы, т. е. схему расположения модуляторов на осях колесного транспортного средства. Выполненный анализ точности расчетов коэффициента использования силы сцепления автоматизированной системой с учетом и без учета сил сопротивления качению колес транспортного средства показал возможность использования предложенных методов расчета в практике автотехнических экспертиз при расследовании дорожно-транспортных происшествий с участием транспортных средств, оборудованных такими системами, как ABS. Предложена зависимость определения тормозного пути колесного транспортного средства на основе коэффициента использования силы сцепления автоматизированной системой регулирования тормозного усилия. Выполненные экспериментальные исследования опытного и серийного образцов автоматизированной системы позволили подтвердить теоретические рассуждения в отношении использования сил сцепления в процессе работы автоматизированной системы регулирования тормозного усилия колесного транспортного средства. Результаты исследований показали высокую эффективность работы экспериментальной автоматизированной системы, разработанной на кафедре автомобилей имени А. Б. Гредескула Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, в условиях торможения транспортного средства на сухом асфальтовом и укатанном снежном покрытиях.

Ключевые слова: автоматизированные системы регулирования тормозного усилия, ABS, тормозная система, тормозное управление, реализуемое сцепление, взаимодействие колеса с опорной поверхностью, коэффициент использования силы сцепления, тормозной путь, остановочный путь, транспортное средство

Для цитирования: Об использовании сил сцепления колес транспортного средства, оборудованного автоматизированной системой регулирования тормозного усилия / Д. Н. Леонтьев [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 401–408. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-401-408>

Introduction

The modern society actively utilises vehicles in everyday life, and this fact influences the traffic safety. To enhance the latter automated systems of brake proportioning were installed since the middle of the 20th century. Although electronic devices appeared, the rate of road accidents remains on the high level. In this regard there appear issues connected with the definition of objective parameters of a vehicle motion.

Sources analysis

As far as we know from forensic science, the good condition of the brake control contributes greatly to the safe driving a vehicle. According to UN/ECE R13–09: 2002 brake control of a modern vehicle is equipped with at least three braking systems such as the service, the emergency and the parking one.

Increase of the efficiency of the mentioned braking systems is provided by automated (ABS, ESB, EBL, EBD) or automatic (source stability) systems. But in spite of the automated devices installed on the braking systems, we still need some

time to brake the vehicle. The braking distance depends on the initial braking speed, reaction of a driver and the speed at which braking finishes (fig. 1).

If the trace of the tyre protector remained on the road, the braking distance can be quite accurately calculated by means of the following relation (1) [1].

$$S_{stopped}^{bl} \approx \frac{v_b - v_e}{3,6} \left(t_r + t_p + \frac{t_s}{2} \right) + S_{adh}^{bl}, \quad (1)$$

where v_b, v_e – speed at the beginning and the end of the braking process, km/hour; t_r – time of reaction of a driver, s; t_p – time of pressure increase in the drive of the braking system of a vehicle, s; t_s – time of the vehicle slowdown increase, s; S_{adh}^{bl} – length of the tyre protector trace, m

$$S_{adh}^{bl} \approx \frac{(v_b - v_e)^2}{25.92 g f_{bl}}; \quad (2)$$

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ – acceleration of freefall; f_{bl} – coefficient of adhesion that is calculated while dragging the blocked wheel on the road surface.

Applying relation (1) it is not difficult to identify the initial speed of the vehicle braking before an accident takes place. It should be noted that the result of calculation by means of relation (1) is based on the so-called blocked wheel adhesion coefficient, that is calculated through the special methodology [1], the essence of which is presented mathematically by the following relation:

$$f_{bl} = \frac{P_b}{G_a}, \quad (3)$$

where P_b – force of pulling the blocked wheel, N; G_a – weight with which the wheel presses on the road surface, N.

Owing to the fact, that most vehicles are equipped with automated or automatic systems preventing wheels blockage, application of relation (1) which includes relation (2) does not allow objective evaluating an accident outbreak. That is because automatic systems may apply properties of tyre-road adhesion in different ways, depending on the mode of a vehicle movement. [1–10].

Objective and problem statement

The objective of the following research work is to define the braking distance of a vehicle equipped with an automated system of brake proportioning. The task of this work is to develop a methodology for calculation the stopping distance of a vehicle using the coefficient of application the tyre-road adhesion phenomenon by an automated or automatic system of brake proportioning.

Theoretical basis of methodology for calculating the braking and the stopping distance of a vehicle

It is known that when wheels are rolling, the tyre adhesion coefficient does not coincide with the coefficient of a blocked wheel [1, 5]. Therefore, application of relation (2) for calculating the stopping distance by means of relation (1) is impossible. So instead of relation (2) we use relation (4) to calculate the stopping distance in case the wheels of a vehicle are rotating. This relation (4) respects the influence of the automated brake proportioning system on the process of braking a vehicle

$$S_{adh}^{with\ ABS} \approx \frac{(v_b - v_e)^2}{25.92 \varepsilon j_m}, \quad (4)$$

where ε – dimensionless coefficient of application of the tyre-road adhesion by an automated brake proportioning system; j_m – average deceleration of the vehicle, m/s^2 .

Coefficient of application the tyreroad adhesion is calculated experimentally for every series of vehicles equipped with automated systems. Experiments are carried out on certified testing grounds. According to European standards [6] vehicle equipped with ABS are allowed to be exploited provided that the coefficient of wheel traction application while operating this system does not exceed the range of 0.75, in any climate and weather related conditions. The upper range may be increased by 10 % that is connected with accuracy of calculating of the coefficient of application of the wheel traction.

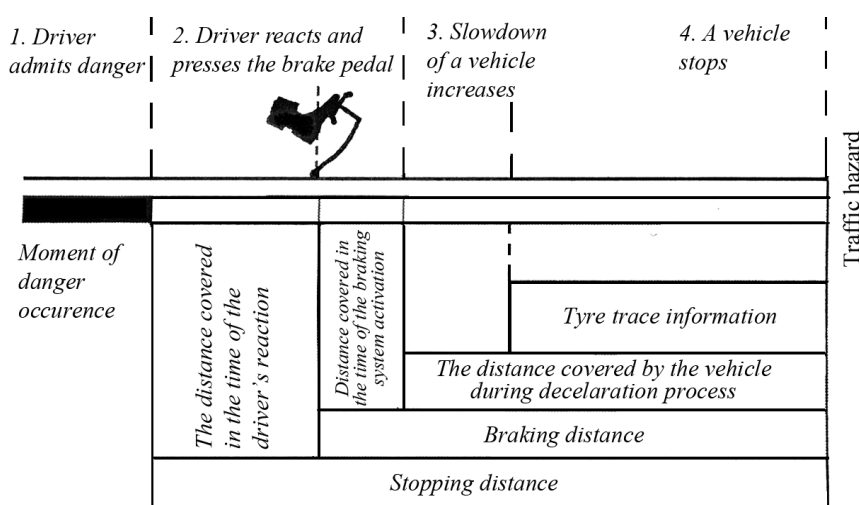


Fig. 1. Illustration of stages of breaking a vehicle

Certifying a modern vehicle on the basis of application the tyre-road adhesion and conditions of compliance with the requirements of the vehicle resistance, there are defined the following categories of ABS: I category, II category or III category [6].

To understand the physical nature of the coefficient of application the tyre-road adhesion by an automated system, we must investigate various processes of braking the vehicle with the same initial speed (fig. 2).

In the (fig. 2) there are presented processes of braking a vehicle in 3 different modes: braking with blocked wheels, idealised braking and braking of a vehicle under the influence of ABS.

In the (fig. 2) there are the following symbols: v_a^{bl} and v_w^{bl} denote the speed of a vehicle and one of the wheels in the mode of braking with blocked wheels; v_a^{id} and v_w^{id} denote the speed of a vehicle and one of the wheels in case of idealised braking; $v_a^{with ABS}$ and $v_w^{with ABS}$ – mean speed of the vehicle and one of the wheels when braking is done by the ABS.

Analysing processes of braking presented in (fig. 2) we can make several conclusions: firstly, using automated brake systems deteriorates the quality of braking in comparison to the idealised process of braking, secondary the automated systems improves properties of braking compared to braking with blocked wheels. However comparing the mentioned processes is not quite proper, since there are different grip processes between the vehicle and the road surface. Thirdly the maximum value of slowing down the vehicle that is forced to brake by means of the automated brake proportioning systems is a bit lower than slowing down the vehicle by means of grip properties between the tyre and the road surface. The third conclusion lies in the fact that that, the automated systems grip brake proportioning spends some time for brake release of the wheels and, thus deteriorates the effectiveness of braking compared to idealised braking.

Is is obvious from the graphic of deceleration (fig. 2b) that relation $j_{with ABS}$ to j_{id} is the coefficient of application the tyre adhesion (ε). It can be presented mathematically in the following way:

$$\varepsilon = \frac{j_{with ABS}}{j_{id}}. \quad (5)$$

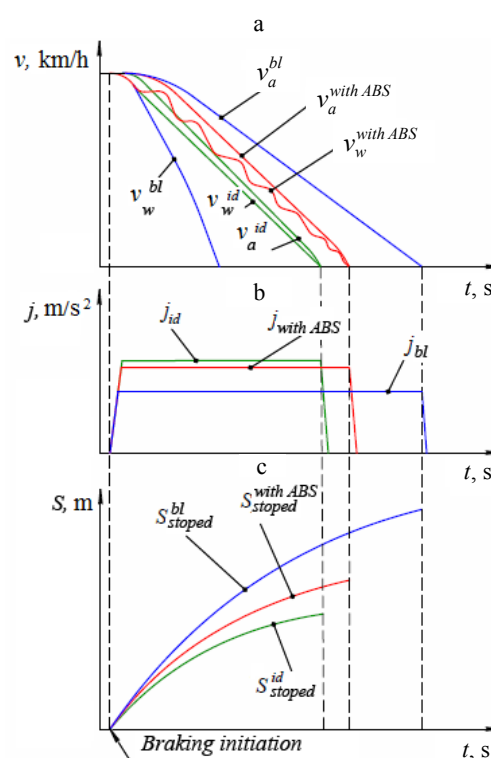


Fig. 2. Graphical presentation of various processes of braking a vehicle

If to assume theoretically that slowing down of the vehicle with the working automated brake proportioning system started at the same speed as slowing down under idealised conditions, we can record the following:

$$\varepsilon = \frac{t_{id}}{t_{with ABS}}, \quad (6)$$

where t_{id} – time interval of braking the vehicle under the speed reduction 40 km/hour to 20 km/hour at the edge of the adhesion property of all the wheels of a vehicle and the road surface. This is done without application the automated brake proportioning system; $t_{with ABS}$ – time interval of braking the vehicle under the speed reduction 40 km/hour to 20 km/hour with operating the brake proportioning system.

However it is necessary to mention that reconstruction of the braking process conditions (especially the ideal ones) is a difficult task, that can be influenced by a number of facts. Therefore international standards [6] suggest calculating the coefficient of application the tyre-road adhesion by means of relation (7) taking into account the influ-

ence of the resistance value of the front and back wheels and operational features of the brake proportional system as well

$$\varepsilon = \frac{j_s}{gk_M}, \quad (7)$$

where j_s – average slowing down of the vehicle that had been made to brake by means of the automated brake proportioning system; k_M – means the average value of the maximally realised wheel traction of the vehicle when the latter is made to brake in the proper operational conditions (k -factor of the power-driven vehicle [6, 11–15])

$$k_M = \frac{f_1 F_1^{dyn} + f_2 F_2^{dyn}}{G_a}; \quad (8)$$

f_1, f_2 – maximally realised adhesion between wheels and the road surface on the corresponding axes of the vehicle [6]:

$$f_1 = \frac{z_{id(1)}L - 0.015a}{b + hz_{id(1)}}; \quad (9)$$

$$f_2 = \frac{z_{id(2)}L - 0.010b}{a - hz_{id(2)}}; \quad (10)$$

F_1^{dyn}, F_2^{dyn} – dynamical loads on the corresponding axes of the vehicle which is made to brake under the influence of the brake proportioning system:

$$F_1^{dyn} = \frac{G_a}{L}(b + hz_s); \quad (11)$$

$$F_2^{dyn} = \frac{G_a}{L}(a - hz_s). \quad (12)$$

In relations (9)–(12) we use such parameter as the coefficient of braking (z), that allows evaluating the intensity of stopping a vehicle ideal braking and when applying the brake proportioning systems as well.

It should be noticed that when calculating the maximum realised adhesion, the coefficient of braking should be applied ($z_{id(i)}$) which is obtained when the wheels are rolling on the edge of adhesive properties between tyres and the road surface [6]. Also, when calculating dynamic loads on an

axis of a vehicle, the coefficient of braking (z_s) should be applied [6].

Coefficient of braking in idealised conditions and braking with the automated system can be calculated by means of the corresponding relations [6]:

$$z_{id(i)} = \frac{0.566}{t_{id(i)}}; \quad (13)$$

$$z_s = \frac{0.849}{t_s}, \quad (14)$$

where $t_{id(i)}$ – time interval of braking the vehicle under deceleration of 40 km/hour to 20 km/hour on the edge of grip features between the wheels of the axes and the road surface without application the automated systems of brake proportioning; t_s – time interval of braking the vehicle under deceleration of 45 km/hour to 15 km/hour with application the brake proportioning system.

In the (fig. 3) there is displayed the difference between the time of braking the vehicle with the brake proportioning system and the time of braking the vehicle in case of idealised braking.

It is known from technical and scientific sources [1–6] that a brake proportioning system can be installed only on certain axes of a vehicle. That is why we should admit that relation (7) at this rate turns into relations (15) and (16).

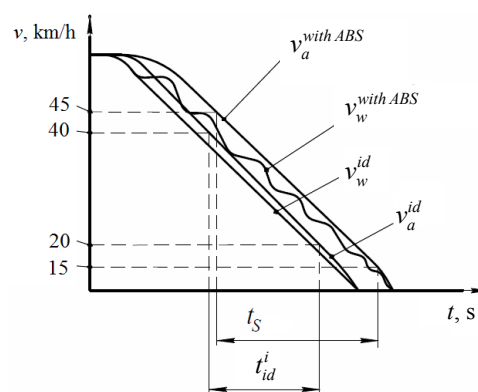


Fig. 3. Comparison of idealised braking and braking with application a brake proportioning system

When calculating the coefficient of application of traction by the automated brake proportioning system that is installed on the front axes of a vehicle, we should consider influence of the back wheels rolling resistance on the front axes as well

as dynamic load applied and maximum realised adhesion. So, in this case the coefficient of application the tyre-road adhesion can be calculated by means of relation [1, 6]

$$\varepsilon_{front} = \frac{z_s G_a - 0.015 G_2}{f_1 F_1^{dyn}}. \quad (15)$$

In case the automated system is installed only on the rear axis, the coefficient of application the tyre-road adhesion is defined by means of relation [1, 6]

$$\varepsilon_{rear} = \frac{z_s G_a - 0.01 G_1}{f_2 F_2^{dyn}}, \quad (16)$$

where G_1 , G_2 – normal reactions of the road surface under static conditions, on certain axes of a vehicle.

If relations (7), (15) and (16) are expressed by means of relations (13) and (14), and also considering that $j_s = z_s g$, then we can record expressions for calculating the coefficient of application the tyre-road adhesion by an automated system installed on both axes of a vehicle or on the front or rear axis only:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{0.849L}{\frac{(t_s b + 0.849h)(0.566L - 0.015at_{id(1)})}{t_{id(1)}b + 0.566h} +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{0.849L}{\frac{(t_s a - 0.849h)(0.566L - 0.01bt_{id(2)})}{t_{id(2)}a - 0.566h}}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{front} = \frac{(0.849L - 0.015at_s)(bt_{id(1)} + 0.566h)}{(0.566L - 0.015at_{id(1)})(bt_s + 0.849h)}; \quad (18)$$

$$\varepsilon_{rear} = \frac{(0.849L - 0.010bt_s)(t_{id(2)}a - 0.566h)}{(0.566L - 0.010bt_{id(2)})(t_s a - 0.849h)}. \quad (19)$$

But if the wheels rolling resistance is not considered, relations (17)–(19) will be as follows:

$$\varepsilon = \frac{1.5}{\frac{t_s b + 0.849h}{t_{id(1)}b + 0.566h} + \frac{t_s a - 0.849h}{t_{id(2)}a - 0.566h}}; \quad (20)$$

$$\varepsilon_{front} = \frac{1.5t_{id(1)} \cdot \frac{t_{id(1)}b + 0.566h}{t_s b + 0.849h}}{t_s}; \quad (21)$$

$$\varepsilon_{rear} = \frac{1.5t_{id(2)} \cdot \frac{t_{id(2)}a - 0.566h}{t_s a - 0.849h}}{t_s}. \quad (22)$$

To prove the theoretical assumptions there were carried out calculations of applications the wheel traction while operation of the ABS produced by OS (Ekran) “Belarus” and the ABS designed at Kharkiv National Automobile and Highway University (KNAHU), installed on the bus MAZ 256200 on methods controlled by the UN Regulations [6].

The ABS produced by (“Ekran”) [5] has an individual principle of pneumatic pressure modulators that respects peculiarities of axial driving and driving with an unstable wheel. The ABS designed at Kharkiv National Automobile and Highway University has an individual principle of control of the back axis and an axial principle of control of the front one, that, after all, ensures drivability of a vehicle. Experimental investigations were carried out under the conditions of series of braking on the dry road surface, the temperature of the environment being 30 °C, and on the compacted snow cover, the temperature of the environment being –5 °C.

During the experimental investigations there was used measuring equipment designed at the Chair of Automobiles in the name of A. B. Hredescul. The measuring equipment has 27 channels of information recording from pressure, movement, wheel rolling and acceleration gauges which were spanned on specialised spanning boards.

The results of the carried out experimental investigations of braking a bus MAZ 256200 equipped with a serial ABS (produced by “Ekran”) and a trial model of an ABS (designed at Kharkiv National Automobile and Highway University) are presented in the tab. 1. Results of calculations by means of relations (6), (17) and (20) are presented in tab. 2. Comparison results of calculations by means of relations (6) and (20) with results of calculations by means of relation (16) we can find out the average bias of calculations. The latter is not more than 4.5% and 7.5 %. The corresponding biases Δ_1 and Δ_2 are presented in the tab. 2.

Table 1

**Results of experimental investigations of the braking process of a bus MAZ 256200
equipped with different automated systems ABS**

Marking		L	b	a	h	t_s	$t_{id(1)}$	$t_{id(2)}$	$t_{with\ ABS}$	t_{id}
Equipped (ABS OS "Ekran")	Dry road surface	4,2	1,93	2,27	0,90	1,11	1,23	0,80	1,63	0,79
	Compacted snow					3,85	4,10	2,39	3,57	1,98
Loaded (ABS OS "Ekran")	Dry road surface		1,59	2,61	0,98	1,86	1,83	1,14	1,93	0,91
	Compacted snow					3,59	3,92	2,29	3,3	1,80
Equipped (ABS designed at KNAHU)	Dry road surface		1,93	2,27	0,90	1,10	1,23	0,795	1,63	0,79
	Compacted snow					3,76	4,10	2,20	3,57	1,98
Loaded (ABS designed at KNAHU)	Dry road surface		1,59	2,61	0,98	1,82	1,83	1,09	1,93	0,91
	Compacted snow					3,56	3,92	2,19	3,30	1,80

Table 2

**Results of calculation the coefficient of application the tyre-road adhesion with an automated system ABS
when braking a bus MAZ 256200 in the conditions of dry road surface and compacted snow cover**

Marking		Relation number			Bias of calculations, %	
		(17)	(6)	(20)	Δ_1	Δ_2
Equipped (ABS OS "Ekran")	Dry road surface	0,978	0,988	0,962	1,0	2,6
	Compacted snow	0,775	0,828	0,741	6,4	10,5
Loaded (ABS OS "Ekran")	Dry road surface	0,771	0,798	0,753	3,4	5,6
	Compacted snow	0,774	0,786	0,741	1,5	5,7
Equipped (ABS designed at KNAHU)	Dry road surface	0,987	0,994	0,971	0,7	2,3
	Compacted snow	0,794	0,900	0,759	11,8	15,7
Loaded (ABS designed at KNAHU)	Dry road surface	0,787	0,835	0,769	5,7	7,9
	Compacted snow	0,781	0,822	0,748	5,0	9,0

Biases of calculations Δ_1 and Δ_2 were defined by means of the relation

$$\Delta_i = \frac{\max(\varepsilon_{17}; \varepsilon_j) - \min(\varepsilon_{17}; \varepsilon_j)}{\max(\varepsilon_{17}; \varepsilon_j)} \cdot 100 \%, \quad (23)$$

where ε_{17} – value of the coefficient of application the wheel traction with operating the automated systems, that is defined by rotation (17); ε_j – value if the coefficient of application the wheel traction (6), (17) and (20).

Analysis of calculation biases of the coefficient of application the wheel traction allowed finding out that calculations based on relation (6) are more accurate than the ones based on relation (20) which is does not respect the wheels rolling resistance

during braking the vehicle. The biases of calculating by means of (6) is twice different from the ones based on relation on the accident.

Hence, it is possible to state that in proper to get an efficient evaluation of the accident outbreak to calculate the braking way of the vehicle by means of relation (4) we should use relations (17)–(19), which respect the rolling wheels resistance influence driving operation the automated brake proportioning system. Also relation (6) can be used, though it gives a worse result since the calculation bias in this case in up to 5 %.

CONCLUSIONS

1. Release of braking the wheels of a vehicle by means of the automated brake proportioning sys-

tem results in increasing the time of braking the vehicle (itself), and, thus increasing the breaking way of a vehicle compared to the idealised process of braking the vehicle.

2. The suggested relations (6), (20)–(22) allow evaluating the influence of the automated system of brake proportioning on the process of braking a vehicle with an average bias that does not exceed 7.5 %.

3. Calculations based on relation (6) have a less bias than the ones based on relations (20)–(22), since the latter do not respect the influence of the rolling wheels resistance, on the effectiveness of braking.

4. Provided that there is no criminological councils and forensic teams do not possess the information about the time of braking the vehicle, the average value of the coefficient of application the tyre-road adhesion determination can be used. This value is 0,8 applicable for an equipped and loaded vehicle regardless of the weather and climate conditions, available in the circumstances of the vehicle operation.

REFERENCES

1. Turenko A. N., Mikhalyevych N. G., Leontiev D. N. (2015) *Implementation of Intelligence Functions in Electronic-pneumatic Brake Control of Vehicles*. Kharkov, KhNADU Publ. 450 (in Russian).
2. Ryzhikh L. A., Klimenko V. I., Krasnyuk A. N., Leont'ev D. N. (2009) Modern Anti-Lock Braking Systems and Realization of their Operational Algorithms. *Izvestiya Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta MAMI = Izvestiya MGTU "MAMI"*, (1), 34–37 (in Russian).
3. Renski A. (2017) Analysis of the Influence of the Drive Force Distribution Between Axles on an Automobile Stability in Its Curvilinear Motion. *Conat 2016: International Congress of Automotive and Transport Engineering*. Springer International Publishing, Switzerland, 55–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45447-4_6.
4. Leont'ev D. N. (2010) Advanced Performance Algorithm for Controlling Anti-Lock Braking Systems (ABS). *Avto-mobil'naya Promyshlennost'* [Automotive Industry], (9), 25–28 (in Russian).
5. *Operational Manual for Anti-Lock Braking Systems and ABS-T Brakes*. Borisov, 2008. 35 (in Russian).
6. United Nations Economic Commission for Europe (2010) Regulation No 13 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) – Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles of Categories M, N and O with Regard to Braking [2016/194]. *Official Journal of the European Union – UN/ECE*, L 42. 257.
7. Bode O. (2001) Possibilities and Limits of a Simple Tire-road Adhesion Determination – Represented at the Example of Brake Testing in Accordance with ECE-R 13. *Hannover Conference on Tires, Chassis, Roads*. Hannover, Germany, 69–86.
8. Hakan Koylu, Ali Cinar (2018) Development of Control Algorithm for ABS-Suspension Integration to Reduce Rotational Acceleration Oscillations of Wheel. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40 (3), 1018–1034. <https://doi.org/10.1177/0142331216677318>.
9. Jazar R. N. (2008) Tire Dynamics. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. Berlin, Springer, 95–163. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74244-1_3.
10. Guo K, Lu D. (2007) UniTire: Unified tire model for Vehicle Dynamic simulation. *Vehicle System Dynamics*, 45, 79–99. <https://doi.org/10.1080/00423110701816742>.
11. Villagra J., D'Andréa-Novet B., Fliess M., Mounier H. (2011) A Diagnosis-Based Approach for Tire-Road Forces and Maximum Friction Estimation. *Control Engineering Practice*, 19 (2), 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.11.005>.
12. Pacejka H. B. (2012) *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier Ltd. 672. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-68548-8>.
13. Braun O. M., Persson B. N., Steenwyk B., Warhadpande A. (2016) On the Dependency of Friction on Load: Theory and Experiment. *EPL (Europhysics Letters)*, 113 (5), <https://doi.org/10.1209/0295-5075/113/56002>.
14. Miao Yu, Guoxiong Wu, Lingyun Kong, Yu Tang (2017) Tire-Pavement Friction Characteristics with Elastic Properties of Asphalt Pavements. *Applied Sciences*, 7 (11), <https://doi.org/10.3390/app7111123>.
15. Acosta M., Kanarachos S., Blundell M. (2017) Road Friction Virtual Sensing: A Review of Estimation Techniques with Emphasis on Low Excitation Approaches. *Applied Sciences*, 7 (12), <https://doi.org/10.3390/app7121230>.

Received: 11.01.2019

Accepted: 19.03.2019

Published online: 30.09.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-409-415>

УДК 621.798.142

Экспериментальные исследования по определению состава полимерных упаковочных материалов с биоцидными добавками

Докт. техн. наук, проф. В. В. Кузьмич¹⁾, докт. хим. наук, доц. Н. Г. Козлов²⁾,
докт. техн. наук, проф. И. И. Карпунин¹⁾, канд. мед. наук, доц. О. В. Балабанова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В статье показано, что создание материалов с антимикробным и антигрибковым действием предполагает введение в них специальных добавок. Одним из направлений борьбы с плесневыми грибами является включение добавок биоцидов растительного происхождения в структуру полимерных материалов, используемых для изготовления упаковки. Основная задача антимикробных добавок – снижение количества микробов в массе изделия и на его поверхности. Активность антимикробных соединений зависит от таких параметров, как концентрация активного компонента, pH, температура, тип полимера, метод ввода (с пластификатором или в расплаве) и время их контакта с полимером. Кроме того, следует учитывать такой немаловажный фактор, как чувствительность микроорганизмов. Современные пленочные полимерные материалы обеспечивают лишь определенный уровень защиты продукции. Они не могут направленно воздействовать на биохимические и микробиологические изменения в упакованном продукте. Необходимо производить новые упаковочные материалы с избирательной проницаемостью, создающие барьер на пути излишне интенсивного газо- и влагообмена, поступления микрофлоры извне, препятствующие развитию нежелательных микроорганизмов на упаковываемых изделиях. В качестве основы для бактерицидного упаковочного материала были выбраны полимеры. Исследованиями установлено, что достаточно хорошо ингибировала (тормозила) рост плесневых грибов композиция ПЭВД 98 % + ДЖК + ДЭТА (ПЭВД – полиэтилен высокого давления; ДЖК – диспропорционированная живичная канифоль; ДЭТА – диэтилентриамин), а также, что композиция ПЭВД с добавками таллового пека и полиэтиленполиамины показали резкое ухудшение прочностных характеристик, а с увеличением добавки предполагаемой смеси сосновой живичной канифоли (СЖК) с ДЭТА (более 2 %) и ДЖК резко ухудшались прочностные характеристики материала.

Ключевые слова: упаковка, нанотехнологии, антимикробная активность, полимерные материалы, микрофлора, избирательная проницаемость, микроорганизмы, газообмен, влагообмен

Для цитирования: Экспериментальные исследования по определению состава полимерных упаковочных материалов с биоцидными добавками / В. В. Кузьмич [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 409–415. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-409-415>

Experimental Investigations on Determination of Polymer Packing Material Composition with Biocide Additives

V. V. Kuzmich¹⁾, N. G. Kozlov²⁾, I. I. Karpunin¹⁾, O. V. Balabanova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Institute of Physical Organic Chemistry National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper shows that creation of materials with antibacterial and antifungal action presupposes an introduction of additives in them. One of the directions concerning fight against mold fungi is an inclusion of biocide additives having vegetable origin in structure of polymer materials used for manufacturing packing products. The main mission of anti-microbial

Адрес для переписки

Кузьмич Василий Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 14,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-48
oup@bntu.by

Address for correspondence

Kuzmich Vasilii V.
Belarusian National Technical University
14 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-48
oup@bntu.by

additives is reduction of microbe amount in product mass and on its surface. Activity of anti-microbial compounds depends on the following parameters: concentration of active component, pH, temperature, polymer type, introduction method (with plasticizer or in melting state) and time period of their contact with polymer. In addition it is necessary to take into account such not unimportant factor as sensitivity of micro-organisms. Modern film polymer materials ensure only a certain level of product protection. They can not targetedly affect biochemical and microbiological changes in a packing product. It is necessary to develop new packing materials with selective permeability that create a barrier on the way of extremely intensive gas- and moisture exchange, outside microflora flow, and prevent an evolution of undesired micro-organisms on packing products. Polymers have been selected as a basis for a bactericide packing material. Investigations have shown that composition including PEHP 98% (polyethylene of high pressure) + DGR (disproportionate gum rosin) + DETA (diethylenetriamine) has inhibited (hindered) sufficiently in a good way growth of mold fungi and PEHP composition with additives of tallow pitch and polyethylenepolyamine has demonstrated a rapid deterioration of strength characteristics and an increase in additive of the supposed mixture including pine oleoresin (POR) with DETA and DGR (with DETA more than 2%) hinders rapidly strength material characteristics.

Keywords: packing, nano-technology, anti-microbial activity, polymer materials, microflora, selective permeability, micro-organisms, gas-exchange, moisture exchange

For citation: Kuzmich V. V., Kozlov N. G., Karpunin I. I., Balabanova O. V. (2019) Experimental Investigations on Determination of Polymer Packing Material Composition with Biocide Additives. *Science and Technology*, 18 (5), 409–415. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-409-415> (in Russian)

Введение

Проблема защиты материалов, изделий и сооружений от биологического повреждения актуальна, так как только учтенные потери от биоповреждений составляют 5–7 % стоимости мировой промышленной продукции и имеют тенденцию к росту. Из неорганических веществ фунгицидной активностью обладают сера (в тонкодисперсном виде) и ее соединения (полисульфиды кальция и бария, окисление SO_2), соли металлов, особенно меди, ртути и кадмия (однако последние два токсичны и для человека, поэтому на практике используются только соединения меди – сульфат, геммоксид, хлороксид) [1, 2]. Из органических веществ фунгицидными свойствами обладают соли и различные производные дитиокарбамидных кислот, в частности тетраметилтиурамдисульфид. Высокую фунгицидную и бактерицидную активность проявляют производные фенолов, но из-за фитотоксичности они применяются в основном как антисептики. В качестве системных фунгицидов используют некоторые эфиры и амиды фосфорных и тиофосфорных кислот (китацин, О-этил-8,8-дифенилдитиофосфат (эдиленфос, хиносан) и О-бутил-8-этил-8-бензилдитио-фосфат (конен). Фунгицидной активностью обладают некоторые антибиотики: циклогексимид, стрептомицин, гризеофульвин, бластицидин, полиоксин и касугамицин [3, 4].

Механизм действия большинства фунгицидов известен лишь в общих чертах. Чаще всего

фунгициды действуют на грибы непосредственно, вмешиваясь в биохимические реакции, происходящие в грибных клетках, либо блокируя ферменты, управляющие этими реакциями. Фунгициды из групп триазолов, морфолинов, пиримидинов, имидазолов, пиперазинов ингибируют биосинтез эргостерина – одного из важнейших компонентов клеточных мембран. Фосфорорганические фунгициды подавляют синтез липидов, входящих в состав этих мембран, в частности фосфатидилхолина. Гидроксипиримидины (этиримол и др.) и производные аланина ингибируют синтез нуклеиновых кислот, а антибиотики (циклогексимид, бластицидин, касугамицин) – синтез белка. Антибиотик полиоксин, действуя на соответствующие ферменты, подавляет процесс образования хитина у грибов.

Создание материалов с антимикробным и антигрибковым действием предполагает введение в них специальных добавок [3–5]. Одним из направлений борьбы с плесневыми грибами является включение добавок биоцидов растительного происхождения в структуру полимерных материалов, используемых для изготовления упаковки. Основная задача антимикробных добавок – снижение количества микробов в массе изделия и на его поверхности. Активность антимикробных соединений зависит от таких параметров, как концентрация активного компонента, pH, температура, тип полимера, метод ввода (с пластификатором или в распла-

ве) и время их контакта с полимером. Кроме того, следует учитывать такой немаловажный фактор, как чувствительность микроорганизмов. Современные пленочные полимерные материалы обеспечивают лишь определенный уровень защиты продукции. Они не могут направленно воздействовать на биохимические и микробиологические изменения в упакованном продукте. Необходимо создавать новые упаковочные материалы с избирательной проницаемостью, создающие барьер на пути излишне интенсивного газо- и влагообмена, поступления микрофлоры извне, препятствующие развитию нежелательных микроорганизмов на упаковываемых изделиях. [6, 7]. В качестве основы для бактерицидного упаковочного материала выбраны полимеры.

Анализ современных технологий изготовления бактерицидных полимерных упаковочных материалов предлагает основные пленкообразующие полимерные материалы, активные антимикробные добавки. Наиболее распространенными являются антисептики, полученные на основе канифоли, скипидара и таллового масла [3, 8, 9]. Фунгицидные свойства канифолей и таллового пека, модифицированные диаминами, позволяют получать антисептики, которые обладают высокой активностью и подавляют рост плесневых грибов *Aspergillus niger*, *Alternaria sp.*, *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium sp.*, *Aureobasidium sp.*, *Paecilomyces variotii*.

Высокие физико-химические свойства и возможность производства терпеноидных продуктов на химических предприятиях Беларуси открывают широкие перспективы для разработки и производства на их основе новых антисептических составов с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Испытание полимерных пленок на наличие фунгицидных свойств

Оценку фунгицидных свойств пленок проводили согласно [10–13], а также оценивали с данными, приведенными в [14, 15]. В соответствии со стандартом метод 3 устанавливает наличие фунгицидных и фунгистатических свойств и грибостойкость материалов и их компонентов в условиях, имитирующих минеральные и органические загрязнения. Продолжительность испытания не менее 14 сут.

Для определения фунгицидных и фунгистатических свойств полимерных пленок готовили среду Чапека-Докса с агаром, разливали в чашки Петри в количестве 20–30 см³ и давали застыть. Полимерные пленки очищали от внешних загрязнений протиранием бязевым тампоном, смоченным этиловым спиртом.

Для исследования одного вида пленки готовили пять чашек Петри с агаром, в которые помещали по одному образцы пленок размерами 50×50 мм и заражали суспензией спор грибов (*Aspergillus niger*, *Alternaria sp.*, *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium sp.*, *Aureobasidium sp.*, *Paecilomyces variotii*) в среде Чапека-Докса с сахарозой путем равномерного нанесения ее с помощью пульверизатора. Зараженные образцы выдерживали в боксе при температуре (25 ± 10) °С и относительной влажности воздуха до 80 % до высыхания капель в течение 1 ч (рис. 1). Параллельно были поставлены контрольные чашки Петри для оценки жизнеспособности спор грибов.

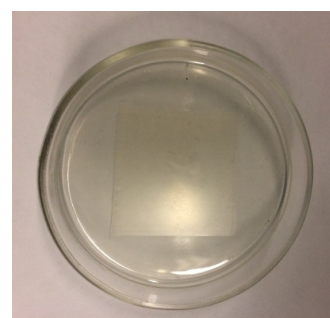


Рис. 1. Зараженный образец пленки перед испытанием

Fig. 1. Contaminated sample of film prior to testing

Чашки Петри помещали в камеру и проводили испытания при температуре (29 ± 10) °С и относительной влажности воздуха более 90 %. Оценку степени обрастания проводили на 7 и 14 сут.

В соответствии с ГОСТ 9.049 по методу 3 оценка грибостойкости материала осуществлялась по степени развития плесневых грибов (табл. 1).

Фунгистатическое действие для продуктов жизнедеятельности микроорганизмов и химических веществ проявляется в задержке и остановке роста грибов. После удаления фунгиста-

тического агента рост снова возобновляется. Фунгицидное действие – это когда грибы полностью уничтожаются.

Таблица 1

Оценка грибостойкости материала
Evaluation of material resistance to fungi

Степень развития плесневых грибов, балл	Оценка материала
0	Сильный фунгистатический эффект
0 (образец + зона ингибирования, мм)	Сильное влияние фунгицидного эффекта из-за диффундирования вещества в питательную среду
1	Слабая фунгицидность
2–5	Фунгицидный эффект отсутствует

Степень развития плесневых грибов на материале по шестибалльной шкале согласно ГОСТ 9.048 приведена в табл. 2.

Таблица 2

Степень развития плесневых грибов
Degree of mold fungus development

Балл	Характеристика балла
0	Под микроскопом прорастание спор и конидий не обнаружено
1	Под микроскопом видны проросшие споры и незначительно развитый мицелий
2	Под микроскопом виден развитый мицелий, возможно спороношение
3	Невооруженным взглядом мицелий и (или) спороношение едва видны, но отчетливо видны под микроскопом
4	Невооруженным взглядом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих менее 25 % испытываемой поверхности
5	Невооруженным взглядом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих более 25 % испытываемой поверхности

Образец 1, композиция 1
(пленка без добавки)

7-е сут.: невооруженным взглядом мицелий и спороношение едва видны, но отчетливо видны под микроскопом – 3 балла.

14-е сут.: невооруженным взглядом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих более 90 % испытываемой поверхности, – 5 баллов (рис. 2).

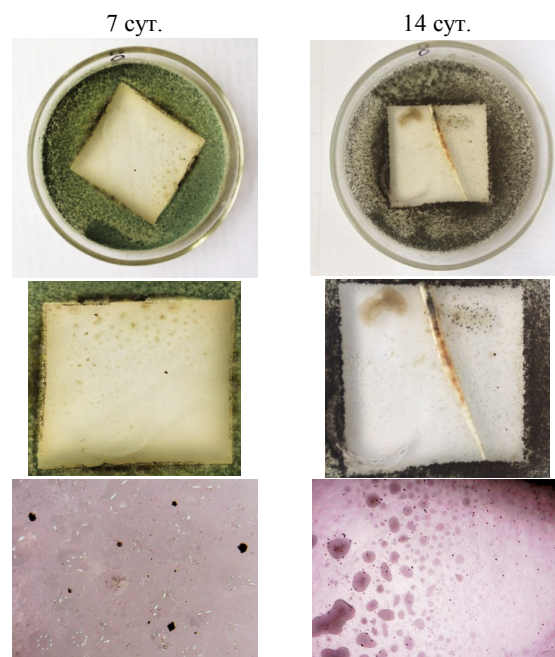


Рис. 2. Фото образца 1 после 7 и 14 сут. испытания
Fig. 2. Photo of sample 1 after 7 days and 14 days of testing

Образец 2, композиция 2

7-е сут.: невооруженным взглядом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих менее 25 % испытываемой поверхности, – 4 балла.

14-е сут.: невооруженным взглядом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих около 70 % испытываемой поверхности, – 5 баллов (рис. 3).

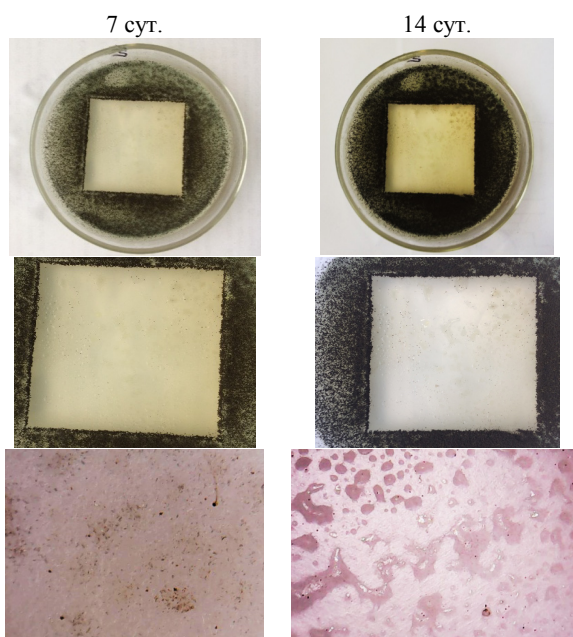


Рис. 3. Фото образца 2 после 7 и 14 сут. испытания
Fig. 3. Photo of sample 2 after 7 days and 14 days of testing

По сравнению с образцом 1 (без добавки), образец 2 показал меньшую грибостойкость спустя 7 сут. Это может быть связано с тем, что фунгицидные добавки на минимально ингибирующих концентрациях могут стимулировать рост плесневых грибов. Спустя 14 сут. степень обрастания микромицетами образца 2 была меньше, чем образца 1.

Образец 3, композиция 3

7-е сут.: под микроскопом виден развитый мицелий, возможно спороношение – 2 балла.

14-е сут.: невооруженным взглядом мицелий и (или) спороношение едва видны, но отчетливо видны под микроскопом – 3 балла (рис. 4).

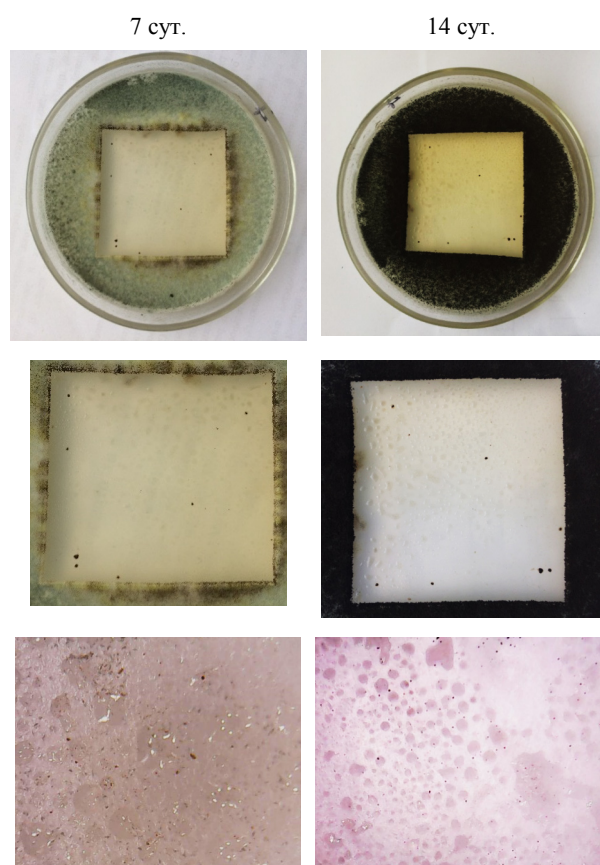


Рис. 4. Фото образца 3 после 7 и 14 сут. испытания
Fig. 4. Photo of sample 3 after 7 days and 14 days of testing

На протяжении 14 дней отмечено ингибирование роста плесневых грибов во всех чашках Петри на поверхности образца 4 по сравнению с образцом 1.

Образец 4, композиция 4

7-е сут.: невооруженным взглядом мицелий и (или) спороношение едва видны, но отчетливо видны под микроскопом – 3 балла.

14-е сут.: невооруженным взглядом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих около 60 % испытываемой поверхности, – 5 баллов (рис. 5).

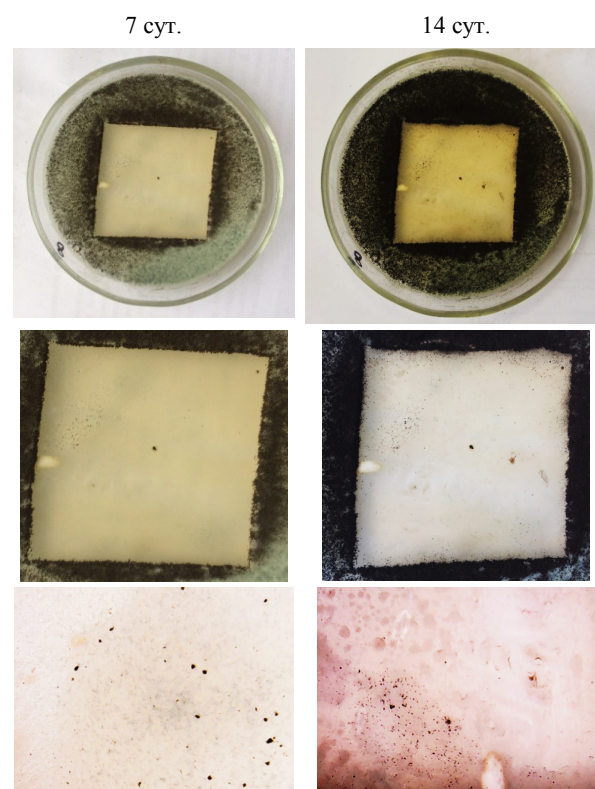


Рис. 5. Фото образца 4 после 7 и 14 сут. испытания
Fig. 5. Photo of sample 4 after 7 days and 14 days of testing

Образец 5, композиция 5

7-е сут.: невооруженным взглядом мицелий и (или) спороношение едва видны, но отчетливо видны под микроскопом – 3 балла.

14-е сут.: невооруженным взглядом отчетливо видно развитие грибов, покрывающих 10 % испытываемой поверхности, – 4 балла (рис. 6).

Таким образом, во всех пленках фунгицидные свойства отсутствуют, однако наблюдается фунгистатический эффект в образце 3. Образец 5 ингибировал (тормозил) рост плесневых грибов, спустя 14 сут. наблюдалось обрастание около 10 % поверхности образцов.

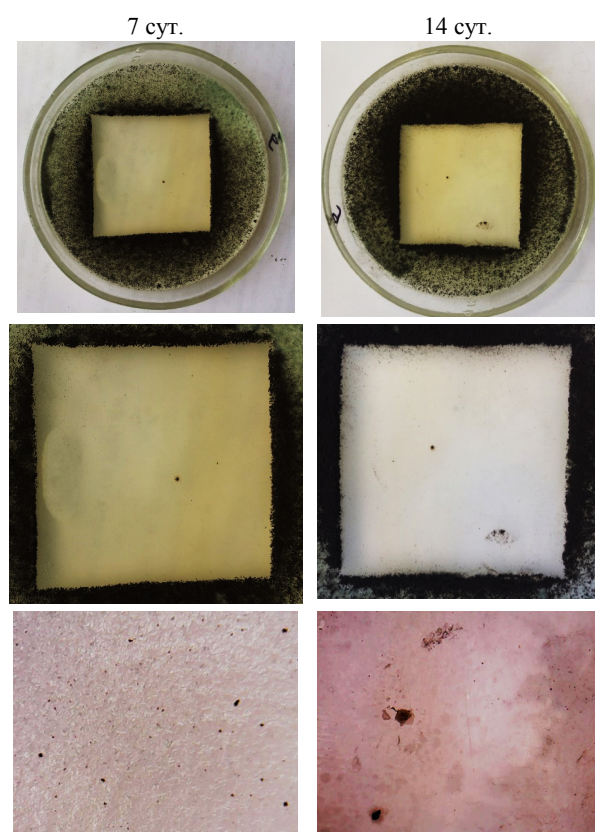


Рис. 6. Фото образца 5 после 7 и 14 сут. испытания
Fig. 6. Photo of sample 5 after 7 days and 14 days of testing

ВЫВОДЫ

1. Изучена методика, которая заключается в том, что материал заражают спорами плесневых грибов в воде. Плесневые грибы растут только на питательных веществах, содержащихся в материале.

2. Проведена экспресс-оценка способности вакуумного дистиллята ВД-2 с растворенными в нем фунгицидными добавками противостоять поражению образцов плесневыми грибами, по которой определялась стадия развития грибов по шестибалльной шкале.

3. В результате проведенных исследований выбраны в качестве бактерицидных средств для полимерных материалов следующие составы: смесь сосновой живичной канифоли (СЖК) и диэтилентриамина (ДЭТА) (30 %), смесь диспропорционированной живичной канифоли (ДЖК) и диэтилентриамина (ДЭТА) (30 %), смесь таллового пека и полиэтиленполиамин (30 %). В качестве полимерного связующего

был использован полиэтилен высокого давления (ПЭВД).

4. В результате исследований получили, что наиболее высокий фунгистатический эффект достигнут в композиции: полиэтилен высокого давления (98 %) и смесь сосновой живичной канифоли с диэтилентриамином (2 %).

5. Исследованиями установлено, что достаточно хорошо ингибировала (тормозила) рост плесневых грибов композиция: ПЭВД (98 %) + ДЖК + ДЭТА. Композиция ПЭВД с добавками таллового пека и полиэтиленполиамин показала резкое ухудшение прочностных характеристик, а с увеличением добавки предполагаемой смеси сосновой живичной канифоли с ДЭТА и ДЖК с ДЭТА более 2 % резко ухудшаются прочностные характеристики материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ получения антимикробной композиции: пат. Рос. Федерации № 2210386 / Летартр Бертран. Оpubл. 20.08.2003.
2. Фунгицидный состав для пропитки древесины: пат. № 16154 Респ. Беларусь / В. Е. Агабеков, А. Ю. Клюев, Ю. В. Дуко, В. В. Мулярчик, В. Н. Данишевский, Н. В. Пучкова, Ю. Н. Жидков. Оpubл. 30.08.2012.
3. Антисептики на основе терпиноидных соединений: получение, свойства и применение / А. Ю. Клюев [и др.] // Труды БГТУ. Химия, технология органических веществ, биотехнология. 2014. № 4. С. 48–54.
4. Способ получения фунгицидной добавки: пат. 15028 Респ. Беларусь / Ю. Н. Жидков, В. В. Мулярчик, В. Н. Данишевский, А. Ю. Клюев, В. Е. Агабеков, Ю. В. Дуко, Н. В. Пучкова. Оpubл. 30.10.2011.
5. Получение и исследование свойств антисептических составов на основе канифоли / А. Ю. Клюев [и др.] // Журнал прикладной химии. 2014. Т. 87, № 2. С. 48–54.
6. Полимерные композиционные материалы с биоцидной функциональностью: пат. Рос. Федерации № 2480986 / Р. Дюжарден, Р. К. Беккер, М. Тоапанта, А. Шмук, А. Штрайтенбергер. Оpubл. 10.05.2013
7. Бактерицидный сорбционный материал: пат. Украины 35287 / Т. І. Денисова, Д. І. Швець, В. В. Стрелко. Оpubл. 15.03.2001.
8. Багатошарова поліетиленова плівка для палетування вантажів на піддонах і спосіб її отримання: пат. України 86517 / М. С. Розенвассер, А. Ківовіц. Оpubл. 27.04.2009.
9. Пономарева, В. Т. Использование пластмассовых отходов за рубежом / В. Т. Пономарева, Н. Н. Лихаче-

- ва, З. А. Ткачик // Пластические массы. 2002. № 5. С. 44–48.
10. Покрyтия лакокрасочные. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов: ГОСТ 9.050–75. Введен в действие 01.07.1976. М.: Госстандарт, 1975. 8 с.
 11. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов: ГОСТ 9.048–89. Введен в действие 26.06.1989. М.: Госстандарт, 1989. 23 с.
 12. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов: ГОСТ 9.049–91. Введен в действие 01.07.1992. М.: Госстандарт, 1991. 15 с.
 13. Средства защитные для древесины. Экспресс-метод оценки эффективности против деревоокрашивающих и плесневых грибов: ГОСТ 30028.4–2006. М.: Стандартинформ, 2007. 9 с.
 14. Получение бактерицидных пленок полиэтилентерефталата, модифицированных наночастицами серебра / Ю. А. Крутяков [и др.] // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3, № 11–12. С. 171–176.
 15. Фотоиндуцированная бактерицидная активность TiO₂-пленок / С. Н. Плескова [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. Т. 47, № 1. С. 28–32.
- Поступила 12.12.2018
Подписана в печать 19.02.2019
Опубликована онлайн 30.09.2019
- ### REFERENCES
1. Bertran L. (2003) *A method of Obtaining an Antimicrobial Composition*: Patent of Russian Federation No 2210386 (in Russian).
 2. Agabekov V. E., Klyuev A. Yu., Duko Yu. V., Mulyarchik V. V., Danishevskii V. N., Puchkova N. V., Zhidkov Yu. N. (2012) *Fungicide Composition for Wood Impregnation*. Patent Republic of Belarus No 16154 (in Russian).
 3. Klyuev A. Yu., Kozlov N. G., Prokopchuk N. R., Rozhkova E. I., Gorshcharik N. D., Puchkova N. V. (2014) Antiseptics Based on Terpenoid Compounds: Obtainment, Properties and Application. *Trudy BGTU. Khimiya, Tekhnologiya Organicheskikh Veshchestv, Biotekhnologiya = Proceedings of BSTU. Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*, (4), 48–54 (in Russian).
 4. Zhidkov Yu. N., Mulyarchik V. V., Danishevskii V. N., Klyuev A. Yu., Agabekov V. E., Duko Yu. V., Puchkova N. V. (2011) *Method for Obtaining Fungicide Additive*: Patent Republic of Belarus No 15028 (in Russian).
 5. Klyuev A. Yu., Skakovskii E. D., Rozhkova E. I., Kozlov N. G. (2014) Obtainment and Investigations of Properties for Antiseptic Compositions Based on Pine Resin. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 87 (2), 230–233. <https://doi.org/10.1134/s1070427214020189>.
 6. Dyuzharden R., Bekker R. K., Toapanta M., Shmuk A., Shtraitenberger A. (2013) *Polymer Composition Materials with Biocidal Functionality*: Patent of Russian Federation No 2480986 (in Russian).
 7. Denisova T. I., Shvets' D. I., Strelko V. V. (2002) *Bactericidal Sorbic Material*: Patent of Ukraine No 35287 (in Ukrainian).
 8. Rozenvasser M. S., Kivovits A. (2009) *Multilayer Polyethylene Film for Palletizing of Goods on Pallets and Method for its Production*. Patent of Ukraine No 86517 (in Ukrainian).
 9. Ponomareva V. T., Likhacheva N. N., Tkachik Z. A. (2002) Use of Plastic Wastes Abroad. *Plasticheskie Massy = Plastics Masses*, (5), 44–48 (in Russian).
 10. State Standard 9.050–75. *Lacquer Coatings. Laboratory Test Methods for Resistance to Attack of Mycelial Fungi*. Moscow, Publishing House “Gosstandart”, 1975. 8 (in Russian).
 11. State Standard 9.048–89. *Engineering Products. Laboratory Test Methods for Resistance to Attack of Mycelial Fungi*. Moscow, Publishing House “Gosstandart”, 1989. 23 (in Russian).
 12. State Standard 9.049–91. *Polymer Materials and their Components. Laboratory Test Methods for Resistance to Attack of Mycelial Fungi*. Moscow, Publishing House “Gosstandart”, 1991. 15 (in Russian).
 13. State Standard 30028.4–2006. *Wood Preservation Products. Rapid Method for Efficiency Evaluation Against Wood-Disfiguring and Mycelial Fungi*. Moscow, Publishing House “Standartinform”, 2007. 9 (in Russian).
 14. Krutyakov Yu. A., Rukhlya E. G., Artemov A. V., Olein A. Yu., Ivanov M. N., Shelyakov O. V. (2008) Obtainment of Bactericidal Polyethylene Terephthalate Films Modified by Argentum Nano-Particles. *Nanotechnologies in Russia*, 3 (11–12), 756–762. <https://doi.org/10.1134/s1995078008110141>.
 15. Pleskova S. N., Golubeva I. S., Verevkin Yu. K., Pershin E. A., Burenina V. N., Korolikhin V. V. (2011) Photoinduced Bactericidal Activity of TiO₂-films. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 47 (1), 23–26. <https://doi.org/10.1134/s0003683811010091>.

Received: 12.12.2018

Accepted: 19.02.2019

Published online: 30.09.2019

Исследование напряжений в оптических деталях со сферическими поверхностями

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук¹⁾, асп. Д. Л. Мальпика^{1, 2)},
кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова¹⁾, В. О. Кузнечик¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Университет Якамбу (Баркисимето, Венесуэла)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Обоснована целесообразность крепления линз с тонким центром (двоояковогнутых, плосковогнутых и отрицательных менисков) за нерабочую цилиндрическую поверхность. Это исключает их температурную деформацию на стадии блокировки, являющуюся причиной появления неустраняемых микро- и макропогрешностей на исполнительных поверхностях детали после ее разблокировки, и вызывает астигматизм в изображении, формируемом оптико-электронным прибором. Рассмотрен эластичный метод крепления линзы за ее боковую поверхность и описана конструкция устройства для механического крепления деталей рассматриваемого типа при их одновременной двусторонней абразивной обработке в условиях свободного притирания. Изложена методика определения напряженного состояния линз, в основу которой положена математическая модель однородного упругого изотропного деформирования твердого тела, учитывающая метод конечных элементов, заключающийся в аппроксимации исследуемого тела моделью, представляющей собой совокупность взаимосвязанных между собой в узловых точках элементов с конечным числом степеней свободы. Выполнены исследования характера распределения деформаций в линзе, позволившие установить прямо пропорциональную зависимость перемещений в центре детали от величины усилий зажима. Выявлено незначительное влияние величины силы зажима и упругих характеристик линзы на оптимальное положение плоскости приложения усилий ее зажима. Предложен бесконтактный метод контроля погрешностей на полированной поверхности линзы посредством интерферометра с эталонной фронтальной поверхностью.

Ключевые слова: оптическая деталь, напряженное состояние, наклеечное вещество, упругая деформация, одновременная двусторонняя обработка, локальная погрешность

Для цитирования: Исследование напряжений в оптических деталях со сферическими поверхностями / А. С. Козерук [и др.] // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 5. С. 416–421. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-416-421>

Investigations on Stresses in Optical Components with Spherical Surfaces

A. S. Kozeruk¹⁾, Y. L. Malpica^{1, 2)}, M. I. Filonova¹⁾, V. O. Kuznechik¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾University Yacambu (Barquisimeto, Venezuela)

Abstract. The paper has substantiated an expediency to fix lenses with a thin center (biconcave, flat concave and negative meniscus) to a non-operational cylindrical surface. This avoids their temperature distortion at the blocking stage which is a reason for occurrence of irremovable micro and macro errors on executive surfaces of a component after its unblocking and it causes astigmatism in an image which is formed by an optical-electronic device. The paper considers a method for attachment of a lens to its side surface and it contains a design description of the device for mechanical attachment of the studied lenses during their simultaneous double-sided abrasive processing under free-grinding conditions. The paper presents a methodology for determination of a stressed state in lenses, which is based on a mathematical model of a uniform elastic isotropic deformation of a solid body. This approach takes into account a finite element method which consists in an approximation

Адрес для переписки

Козерук Альбин Степанович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-91
kipp@bntu.by

Address for correspondence

Kozeruk Albin S.
Belarusian National Technical University
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-91
kipp@bntu.by

of a body under study with the help of a model presenting a set of elements with a finite number of freedom degrees which are interrelated at node points. The investigations have been executed with the purpose to study a nature of deformation distribution in a lens which made it possible to establish a directly proportional dependence of displacements in the center of the part on the magnitude of clamping forces. The paper reveals an insignificant influence of a clamping force magnitude and elastic characteristics of a lens on an optimum position of an application plane of its clamping forces. A non-contact method for monitoring errors on a polished lens surface using an interferometer with a reference front surface has been proposed in the paper.

Keywords: optical component, stress state, adhesive substance, elastic deformation, simultaneous double-sided processing, local error

For citation: Kozeruk A. S., Malpica Y. L., Filonova M. I., Kuznechik V. O. (2019) Investigations on Stresses in Optical Components with Spherical Surfaces. *Science and Technology*, 18 (5), 416–421. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-416-421> (in Russian)

Введение

В настоящее время при изготовлении оптических деталей в виде линз используют технологию их односторонней обработки [1]. Технология трудоемкая и приводит к загрязнению окружающей среды [2]. Кроме того, при нагреве стекла, смолы и планшайбы (металла) вследствие неодинаковых значений ТКЛР происходит упругая деформация деталей [3], на рабочей поверхности которых после разблокировки возникают локальные погрешности [4]. Этих затруднений можно избежать, если использовать технологию двустороннего формообразования линз [5] при их креплении за цилиндрическую поверхность. Однако для ее реализации на практике требуется методика определения оптимального положения зажимного кольца на боковой поверхности линзы в процессе шлифования и полирования [6] и на этапе закрепления в оправе [7].

Методика определения напряжений в оптических деталях со сферическими поверхностями

Для анализа напряженного состояния линз при креплении их за боковую цилиндрическую поверхность использовалась математическая модель упругого деформирования твердого тела [8].

Апробация рассматриваемой модели, пригодной для всех типов линз (двояковыпуклой, двояковогнутой, плосковыпуклой, плосковогнутой, положительного и отрицательного менисков), проводилась для двояковогнутых линз диаметром 64 мм.

При выполнении численных исследований принимали во внимание, что закрепление линз в цанге осуществляется через разрезное кольцо

малой ширины (не более 1 мм), которое располагается на боковой поверхности линзы и передает на нее равномерное усилие зажима от лепестков цанги. Расчеты проводились для линз с радиусами кривизны выпуклых поверхностей $R_1 = 61,38$ мм и $R_2 = 81,44$ мм из оптического стекла марок ЛК7 и К108, имеющих разные значения упругих характеристик.

Поставленная задача решалась в последовательности: создание области, соответствующей четвертой части линзы с учетом ее геометрических параметров с разделением этой области на конечное число элементов; определение граничных условий по смещениям стекла на периферии участков.

Если применить декартову систему координат $OXYZ$ с началом в точке пересечения оси детали с ее верхней поверхностью, то на нормалях к плоскостям XOY и ZOY деформации стекла будут отсутствовать (симметричная задача).

Проведение исследований

С использованием вышеупомянутой математической модели выполнены численные исследования, цель которых – определение деформации стекла на оси детали в зависимости от координаты Y_k положения кольца на ее цилиндрической поверхности и величины усилия зажима.

Полученные результаты расчета для линзы из стекла марки К108, приведенные на рис. 1, показывают прямо пропорциональную зависимость между величиной деформации u стекла на оси линзы и усилием ее зажима p . Последующие расчеты выполняли для усилий зажима $2,5E5$ и $4,5E5$ Па.

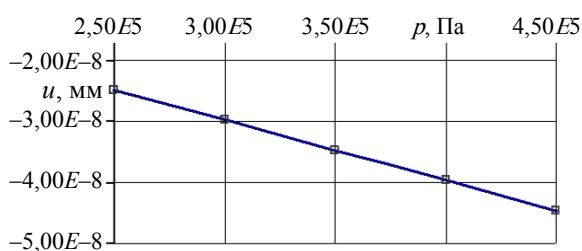


Рис. 1. Зависимость перемещений u стекла марки K108 на оси линзы от усилия зажима p

Fig. 1. Dependence of K108-grade glass displacements along lens axis u on clamping force p

Результаты расчета перемещений в стекле марок K108 и ТФ105 для различных значений Y_k и p представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значения максимальной деформации u , мм, в стекле марки K108 для различных координат Y_k и усилий зажима p

Values of maximum deformation u , mm, in K108-grade glass for various values of coordinate Y_k and clamping force p

$p, \text{Па} \backslash Y_k, \text{м}$	$-0,5E-3$	$-0,15E-2$	$-0,25E-2$	$-0,35E-2$	$-0,45E-2$
$2,5E5$	$-0,211E-7$	$-0,838E-8$	$0,504E-8$	$0,179E-7$	$0,305E-7$
$4,5E5$	$-0,379E-7$	$-0,151E-7$	$0,906E-8$	$0,323E-7$	$0,548E-7$

Таблица 2

Значения максимальной деформации u , мм, в стекле марки ТФ105 для различных координат Y_k и усилий зажима p

Values of maximum deformation u , mm, in TF105-grade glass for various values of coordinate Y_k and clamping force p

$p, \text{Па} \backslash Y_k, \text{м}$	$-0,5E-3$	$-0,15E-2$	$-0,25E-2$	$-0,35E-2$	$-0,45E-2$
$2,5E5$	$-0,313E-7$	$-0,127E-8$	$0,731E-8$	$0,263E-7$	$0,448E-7$
$4,5E5$	$-0,564E-7$	$-0,229E-7$	$0,131E-8$	$0,473E-7$	$0,806E-7$

Значения, приведенные в таблицах, свидетельствуют о том, что при зажимном усилии $2,5 \cdot 10^5 - 4,5 \cdot 10^5$ Па и положении сил зажима на расстоянии 1,5 мм от среднего на цилиндрической поверхности детали прогиб ее исполнительной поверхности увеличивается, а при дальнейшем смещении плоскости приложения сил зажима — уменьшается. Это значит, что наиболее выгодное положение плоскости зажима линзы находится между данными значениями и не зависит от усилия зажима.

Для проверки результатов расчета проведены экспериментальные исследования по выявлению зависимости величины местной (локальной) погрешности ΔN интерференционного кольца на полированной рабочей поверхности детали с прежними параметрами от положения плоскости ее зажима на цилиндрической поверхности. При этом использовалось устройство для закрепления детали посредством жесткого кольца (механический метод крепления), показанное на рис. 2.

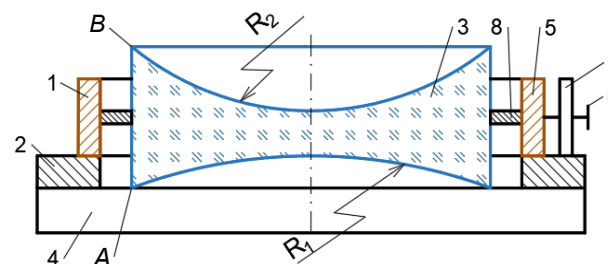


Рис. 2. Схема устройства для крепления линзы за боковую поверхность

Fig. 2. Diagram of device for attaching lens to side surface

В данном устройстве два упорных сектора 1 с углами раскрытия по 119° и соответствующими радиусами кривизны неподвижно смонтированы на основании 2 концентричной оси линзы 3. При этом основание расположено на базовой поверхности стола 4. Третий зажимной сектор 5 аналогичной конструкции установлен с возможностью смещения в плоскости, перпендикулярной оси линзы. Смещение сектора 5 осуществляется с помощью винта 6 в стойке 7. На упорных 1 и зажимном 5 секторах закреплены узкие секторы-кольца 8, внутренняя поверхность которых выполняет функцию базирующей.

Если к боковой поверхности, например двояковогнутой линзы, приложить радиальные сжимающие усилия в плоскости, перпендикулярной ее оси и находящейся вблизи линии A пересечения ее боковой и нижней исполнительной поверхностей с радиусом кривизны R_1 , то значение последнего уменьшится, т. е. появится локальная погрешность в виде «ям». По мере смещения плоскости действия сжимающих усилий в направлении к поверхности с радиусом кривизны R_2 «яма» будет уменьшаться и в конечном итоге станет незаметной.

Плоскость, в которой радиальные силы сжатия не приводят к деформации линзы, называется граничной плоскостью действия сжимающих усилий.

Аналогичные закономерности происходят при смещении плоскости действия сжимающих усилий от линии B пересечения боковой и верхней исполнительной поверхностей линзы.

Плоскость, перпендикулярная оси линзы и расположенная между граничными плоскостями действия сжимающих усилий, называется срединной плоскостью деформаций.

При каждом закреплении детали сила зажима была постоянной и составляла 0,1 Н, что обеспечивалось с помощью тарированного ключа.

Величину смещения кольца Y_k по цилиндрической поверхности линзы отсчитывали от плоскости, касательной к вершине первой сферической поверхности с радиусом кривизны R_1 .

Контроль погрешности ΔN проводили бесконтактным методом посредством интерферометра с эталонной фронтальной поверхностью [9]. Схема интерферометра показана на рис. 3. При его использовании необходимо обеспечить интерференцию лучей, отраженных от эталонной поверхности A элемента 7 и контролируемой поверхности B линзы 8. Для этого в пространстве между объективом 6 и элементом должно произойти наложение упомянутых лучей, что возможно в случае, когда они идут по одному и тому же следу. Данное требование реализуется только для лучей, падающих на поверхности A и B по нормальным. Следовательно, требуется определенное расположение элемента 7 относительно объектива 6 и контролируемой детали 8 относительно элемента 7. Для выяснения этого расположения проанализируем схему интерферометра.

Пучок лучей от источника 1 после конденсора 2 проходит точечную диафрагму 3 и параллельным пучком выходит из объектива 4 коллиматора. Отразившись от полупрозрачной грани призмы-куба 5, излучение направляется в объектив 6 и собирается в его фокусе, с которым совмещен центр кривизны эталонной сферической поверхности радиусом R_A элемента 7. При этом деталь 8 устанавливают так, чтобы

центр кривизны контролируемой ее сферической поверхности B радиусом R_B совпадал с точкой O_7 фокусирования лучей стеклом 7. Лучи, отраженные от эталонной поверхности A элемента 7 и от поверхности B контролируемой детали 8, интерферируют между собой. Объективом 9 эта интерференционная картина проецируется в плоскость сетки 10 зрительной трубы 12 и рассматривается через ее окуляр 11.

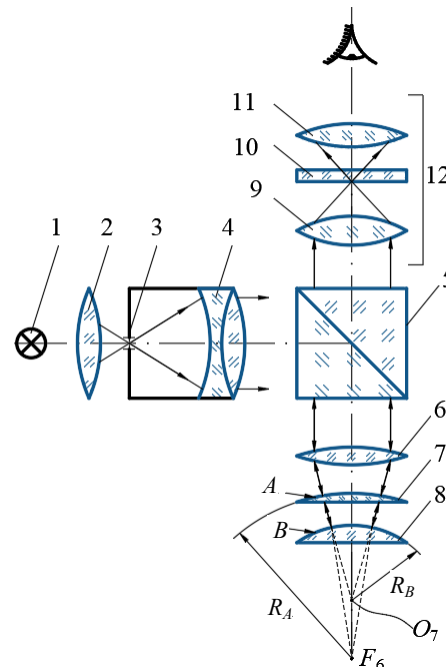


Рис. 3. Оптическая схема интерферометра с эталонной фронтальной поверхностью

Fig. 3. Optical scheme of interferometer with reference front surface

Результаты измерений локальной погрешности ΔN на первой 1 и второй 2 поверхностях детали продемонстрированы на рис. 4. Анализ рисунка показывает, что при $Y_k = 2,6$ мм величина деформации интерференционного кольца на обеих поверхностях линзы принимает равные значения, что согласуется с результатами теоретических исследований.

Исследовали также метод крепления линзы за ее нерабочую цилиндрическую поверхность с помощью клеящего вещества (эластичный метод крепления [10]). При этом использовали приспособление, состоящее из оправки 4 (рис. 5) с центральным отверстием 5, диаметр которого на 4 мм больше диаметра линзы 1, и подставки 3 с базирующей кольцевой канавкой 2.

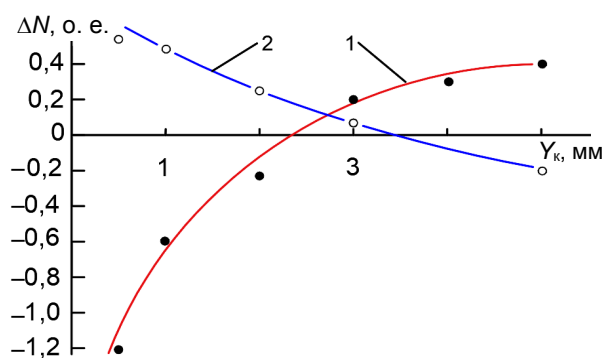


Рис. 4. Закономерность изменения величины деформации интерференционного кольца ΔN на исполнительных поверхностях линзы в зависимости от положения сжимающих усилий

Fig. 4. Regularities in changes of deformation value for interference ring ΔN on executive lens surface depending on position of clamping forces

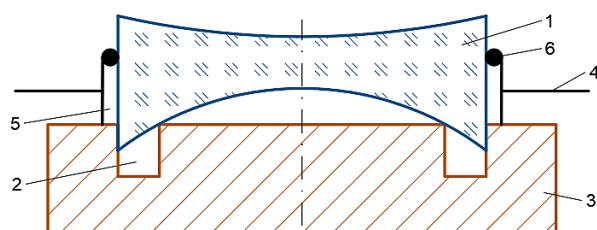


Рис. 5. Схема крепления линзы с тонким центром (эластичный метод)

Fig. 5. Scheme for attaching lenses with thin center (elastic method)

Подставку вместе с линзой и оправкой нагревали до температуры плавления наклеечной смолы, которую в виде шариков 6 (8–10 шт.) диаметром 3–5 мм помещали в зазор между линзой и оправкой. После расплавления смоляных шариков подставку с линзой и оправкой охлаждали.

Измерение формы интерференционных колец Ньютона на полированной поверхности линзы проводили бесконтактным методом на интерферометре с эталонной фронтальной поверхностью до и после ее эластичного крепления за цилиндрическую поверхность. Измерения показали отсутствие деформации детали, в то время как крепление этой же линзы по классическому способу (за одну из исполнительных сферических поверхностей) привело к появлению локальной погрешности на второй сферической поверхности в виде деформации интерференционной картины до $\Delta N = 0,3$ ширины интерференционного кольца.

Для практической реализации механического метода крепления линз за боковую поверхность предлагается устройство (рис. 6), содержащее основание 1, на котором с возможностью вращения установлены лепестки 2 с жестко закрепленными в них осью 3 и толкателем 4, зажимную оправу 5, несущую зажим 6 с винтом 7 и снабженную пазом 8, зажимное кольцо 9 с круговым пазом 10 на его внешней боковой поверхности, а также листовую резину 11, охватывающую линзу 12, при этом зажимное кольцо удерживается зажимными лепестками, входящими в круговой паз зажимного кольца.

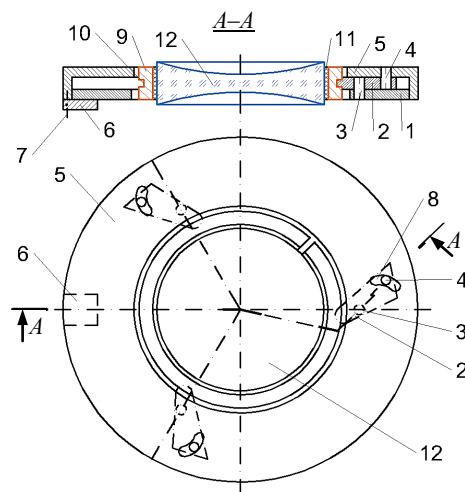


Рис. 6. Устройство для механического крепления линз

Fig. 6. Device for mechanical attachment of lenses

При использовании устройства выполняют следующие действия. В зажимное кольцо 9 с листовой резиной устанавливают линзу 12, помещают их между лепестками и поворачивают зажимную оправу по часовой стрелке на основании. При этом зажимная оправка своим пазом 8 воздействует на рычаги 4, которые, вращаясь вокруг оси, входят в продольный паз 10 на внешней боковой поверхности зажимного кольца и фиксируют линзу в устройстве. После этого винтом 7 прижимают зажим 6 к зажимной оправе и основанию, предохраняя тем самым ослабление крепления линзы в устройстве.

ВЫВОДЫ

1. Выявлена незначительная корреляция оптимального положения плоскости приложения усилий зажима линзы по ее цилиндриче-

ской поверхности от величины этих усилий и независимость данного положения для деталей из разных материалов. Это позволяет выбирать отмеченную плоскость по результатам расчета напряженного состояния объекта исследования от одного усилия его зажима для любого отдельно взятого оптического стекла.

2. Разработанное устройство для механического крепления линз дает возможность механизировать их блокировку и тем самым создает предпосылки для увеличения производительности изготовления деталей, снижения их себестоимости и уменьшения загрязнения окружающей среды канцерогенными веществами фенольной группы, которые выделяются нагреваемой наклеочной смолой в традиционном технологическом процессе оптического приборостроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель. М.: Машиностроение, 1985. 365 с.
2. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
3. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
4. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.
5. Технологические особенности процесса одновременной двусторонней обработки высокоточных линз малой жесткости / А. С. Козерук [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 215–234. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-234>.
6. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 303 с.
7. Ельников Н. Т. Сборка и юстировка оптико-механических приборов / Н. Т. Ельников, А. Ф. Дитев, И. К. Юрусов. М.: Машиностроение, 1974. 351 с.
8. Чигарев А. В. ANSYS для инженеров: справочное пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчун, А. Ф. Смалюк. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
9. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов [и др.]. М.: Машиностроение, 1978. 415 с.

10. Исследование влияния наладочных параметров станка на производительность и качество процесса одновременной двусторонней обработки линз / А. С. Козерук [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 5. С. 390–400. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-390-400>.

Поступила 28.02.2019

Подписана в печать 30.04.2019

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 365 (in Russian).
2. Kozeruk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, VUZ-UNITI Publ. 176 (in Russian).
3. Bardin A. N. (1963) *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
4. Kozeruk A. S. (1997) *Controlling Shaping of Precision Surfaces in Machine Parts and Devices Based on Mathematical Modeling*. Minsk. 317 (in Russian).
5. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Filonova M. I., Vlasovets N. S., Malpika D. L. (2017) Technological Distinctive Features Pertaining to Process of Simultaneous Two-Sided Machining of High-Precision Lenses Having Low Stiffness. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (3), 215–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224>.
6. Sulim A. V. (1969) *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 303 (in Russian).
7. Elnikov N. T., Ditev A. F., Yurusov I. K. (1974) *Assembly and Adjustment of Optical-Mechanical Devices*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 351 (in Russian).
8. Chigarev A. V., Kravchun A. S., Smalyuk A. F. (2004) *ANSYS for Engineers: Reference Guide*. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ. 512 (in Russian).
9. Semibratov M. N., Zubakov V. G., Shtandel' S. K., Kuznetsov S. M. (1978) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 415 (in Russian).
10. Kozeruk A. S., Malpika Y. L., Sukhotzkiy A. A., Filonova M. I., Kuznechik V. O. (2018) Investigation of Machine Tool Developed Settings Influence on Productivity and Quality of Simultaneous Double-Sided Lens Processing. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (5), 390–400 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-390-400>.

Received: 28.02.2019

Accepted: 30.04.2019

Published online: 30.09.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-422-426>

УДК 621.671

Классификация гидравлических систем для перекачивания высоковязких жидкостей

И. С. Луговая¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Гидравлические системы, применяемые в механизмах и машинах, предназначены для осуществления механических перемещений: подъема грузов, прессования материалов, перемещения рабочих органов и пр. В качестве рабочих жидкостей в них используются минеральные масла, обладающие малой вязкостью. К таким жидкостям следует отнести пищевые продукты (мед, патоку, смолу, фарш, тесто, пасту, кремы, крахмалы), строительные материалы (глину, цемент, герметик), нефтепродукты и т. д., которые встречаются в химической и текстильной, винной и хлебопекарной, косметической и кондитерской, молочной и лакокрасочной, строительной промышленности, а также в других сферах деятельности. Вместе с тем в различных отраслях народного хозяйства используются гидравлические системы, предназначенные для перекачивания или транспортирования рабочей жидкости, обладающей высокой вязкостью. Однако описанию подобных гидравлических систем, их классификации, особенностей устройств, из которых они состоят, уделено недостаточное внимание. В связи с этим в статье приведена классификация гидравлических систем для перекачивания и транспортирования высоковязких жидкостей, дано описание их состава, приведены основные разновидности насосов и устройств для управления и выполнения технологических задач, широко используемых в различных отраслях промышленности. Показано, что все насосы, применяемые для этих целей, можно разделить на две группы: динамические и объемные. Представлены схемы устройств, краткое описание и принцип действия насосов, используемых для этих целей. Проведенный анализ показал, что эксплуатация гидравлических систем для перекачки высоковязких жидкостей вызывает необходимость дальнейшего исследования их характеристик, а также разработки методики расчетов и проектирования.

Ключевые слова: высоковязкие жидкости, транспортирование, устройства гидравлических систем, классификация

Для цитирования: Луговая, И. С. Классификация гидравлических систем для перекачивания высоковязких жидкостей / И. С. Луговая // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 422–426. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-422-426>

Classification of Hydraulic Systems for Pumping Highly Viscous Liquids

I. S. Lugovaja¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Hydraulic systems used in mechanisms and machines are intended for mechanical movements: load lifting, material pressing, moving of working bodies, etc. Mineral oils with low viscosity are used in them as working fluids. Such liquids include food products (honey, molasses, tar, minced meat, dough, pasta, creams, starches), construction materials (clay, cement, sealant), petroleum products, etc. which are found in chemical and textile, wine and bakery, cosmetic and confectionery, dairy and paintwork, construction industry and many other areas of activity. At the same time, hydraulic systems are used in various sectors of the national economy, which are designed for pumping or transporting a high-viscosity working fluid. However, description of such hydraulic systems, their classification, specific features of the devices of which they consist, has yet received insufficient attention. In this regard, this paper provides a classification of hydraulic systems for pumping and transporting highly viscous liquids, a description of their composition, main types of pumps and devices for controlling and performing technological tasks widely used in various industries. It is shown that all pumps used for these purposes can

Адрес для переписки

Луговая Инна Станиславовна
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-84-37
gpa_atf@bntu.by

Address for correspondence

Lugovaja Inna S.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel: +375 17 292-84-37
gpa_atf@bntu.by

be divided into two groups: dynamic and volumetric. The paper presents schemes of devices, a brief description and operational principle of pumps used for these purposes. The executed analysis has shown that an operation of hydraulic systems for pumping highly viscous liquids necessitates further study of their characteristics, as well as development of methods for calculation and design.

Keywords: highly viscous liquids, transportation, devices of hydraulic systems, classification

For citation: Lugovaja I. S. (2019) Classification of Hydraulic Systems for Pumping Highly Viscous Liquids. *Science and Technology*, 18 (5), 422–426. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-422-426> (in Russian)

Введение

Гидравлические системы широко применяются в различных агрегатах технологического назначения: транспортных машинах, металло-режущих и прессовых станках и т. д. В качестве рабочих жидкостей в них используются минеральные масла, обладающие невысокой вязкостью. Вместе с тем существуют разные механизмы и машины, предназначенные для подачи и транспортирования жидкостей с высокой вязкостью [1, 2]. Однако анализ литературных источников показывает, что данному вопросу уделено недостаточно внимания. В частности, нет сведений о классификации гидравлических систем и устройств, из которых они состоят. В связи с этим в статье предложена классификация используемых гидравлических схем для перекачки высоковязких жидкостей, насосов и других устройств, применяемых для этих целей.

Все жидкости делят на два класса: ньютоновские и неньютоновские. К первым относятся вода, нефтепродукты с низким содержанием парафина, растительные масла и пр. Неньютоновские жидкости делятся на:

- вязкопластичные (или бингамовские);
- псевдопластичные;
- дилатантные.

Перекачивание высоковязких жидкостей и жидкостей, не обладающих текучестью, представляет определенные трудности из-за высокого внутреннего трения слоев жидкости и потерь производительности в трубопроводе [3, 4]. К таким жидкостям следует отнести пищевые продукты (мед, патоку, смолу, фарш, тесто, пасту, кремы, крахмалы), строительные материалы (глину, цемент, герметик), нефтепродукты и т. д., которые встречаются в химической и текстильной, винной и хлебопекарной, косметической и кондитерской, молочной и лакокрасочной, строительной промышленности, а также в других сферах деятельности.

Классификация и состав гидравлических систем

Для перекачки и транспортирования высоковязких жидкостей применяют гидравличе-

ские системы, отличающиеся от типовых гидравлических схем составом, конструктивными особенностями и свойствами перекачиваемых высоковязких жидкостей.

Главная отличительная особенность – назначение рабочей жидкости в сравниваемых системах. Если в традиционных гидравлических системах рабочая жидкость является средством для преобразования одного вида энергии в другой с целью выполнения механической работы механизмом, устройством или машиной, то в рассматриваемых гидравлических системах высоковязкие жидкости – это материальное тело, которое необходимо перекачать из одной емкости в другую, либо для выполнения определенных технологических задач (распыления, слива, нанесения на поверхность и пр.). Их состав и расположение элементов определяются функциональным назначением и видом, содержанием твердых включений в транспортируемой жидкости, консистенцией, молекулярным изменением, возможностью потери целостности (рис. 1).

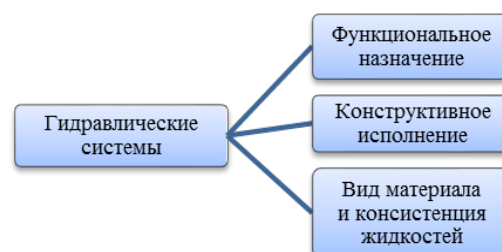


Рис. 1. Классификация гидравлических систем для высоковязких жидкостей

Fig. 1. Classification of hydraulic systems for highly viscous liquids

Состав этих гидравлических систем зависит от области применения, назначения, вязкости жидкости и может включать в себя различные устройства, основные из которых – насосы (рис. 2).

Перекачивание высоковязких жидкостей требует больших затрат мощности привода, и по этой причине насосы, применяемые в традиционных гидросхемах, не могут быть использованы в полной мере. Тип насоса зависит от свойств высоковязких магнитно-реологических жидкостей.



Рис. 2. Устройства гидравлических систем для перекачивания высоковязких жидкостей

Fig. 2. Devices of hydraulic systems for pumping highly viscous liquids

Для этой цели применяют преимущественно насосы, которые можно разделить на две группы: динамические и объемные. К динамическим относятся лопастные (центробежные и осевые), а к объемным – такие разновидности, как винтовой, шестеренный, мембранный, перистальтический, кулачковый, импеллерный. Классификация этих насосов приведена на рис. 3.

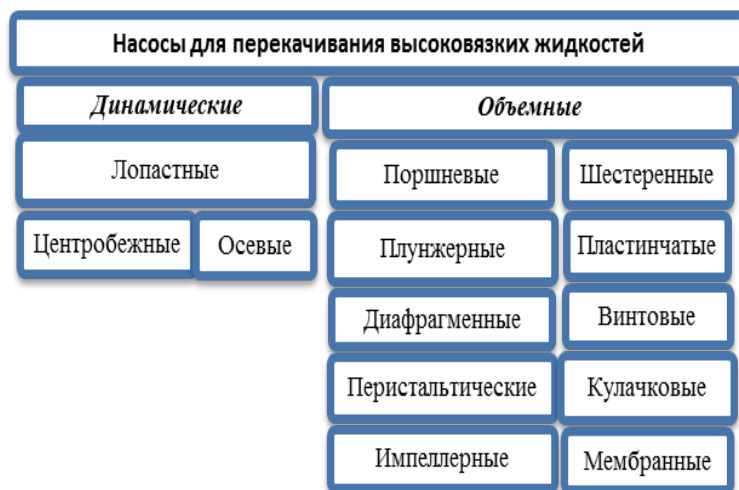


Рис. 3. Классификация насосов для высоковязких жидкостей

Fig. 3. Classification of pumps for highly viscous liquids

Каждый из перечисленных насосов обеспечивает передачу энергии для осуществления движения рабочего органа технологической машины или механического устройства и потому конструктивно отличается от насосов, предназначенных для нагнетания маловязких жидкостей.

Наиболее распространенным вариантом для перекачивания высоковязких и нелетучих жидкостей вязкостью до $1 \cdot 10^6$ сСт является винтовой насос (рис. 4). Принцип его работы подобен действию шнека. Перекачивание жидкости происходит перемещением ее вдоль оси винта 1 в камере, образованной винтовыми канавками и поверхностью корпуса 2.

Распространенными для перекачивания вязких жидкостей в промышленности являются насосы шестеренного типа, рабочим органом

в которых является шестерня 1. При вращении шестерни на стороне всасывания насоса 2 создается разрежение, вызывающее перепад давления, приводящий к заполнению межзубного пространства вязкой среды и ее перемещению в зону нагнетания 3, а затем – в патрубок напорной магистрали (рис. 5).

Импеллерный насос предназначен для перекачивания разнообразных жидкостей вязкостью до 6000 сСт, мягких, чувствительных, вспенивающихся сред, а также суспензий с твердыми включениями. Он работает в диапазоне температур до 90 °С и при низких скоростях, содержит гибкую крыльчатку из нержавеющей стали 1 (рис. 6).

Широкое применение в медицине для перекачивания крови пациентов и пастообразных веществ нашли перистальтические насосы [5–10]. Конструкции перистальтических (шланговых) насосов делятся на трубочные, в которых деформируемым элементом является однородная трубка, и шланговые, где деформируемым элементом служит многослойный шланг, усиленный кордом. Принцип действия объемных насосов перистальтического типа основан на передавливании трубки 1 вращающимися роликами 2, которые проталкивают жидкость вперед (рис. 7).

Для условий работы в режиме сухого хода и перекачивания загрязненных жидкостей и сред, содержащих до 90 % твердых частиц диаметром около 3,5 см, перекачивания агрессивных химических сред, включая кислоты, щелочи, спирты, эфиры и другие, могут быть использованы мембранные насосы (рис. 8). Мембранный насос содержит гибкую диафрагму (мембрану), закрепленную по краям, которая, изгибаясь, выполняет функцию поршня поршневого насоса в результате изменения давления воздуха в пневматическом приводе или жидкости в гидравлическом приводе. Принцип действия мембранного насоса заключается в создании разности давления на входе и выходе системы с пневмоприводом.

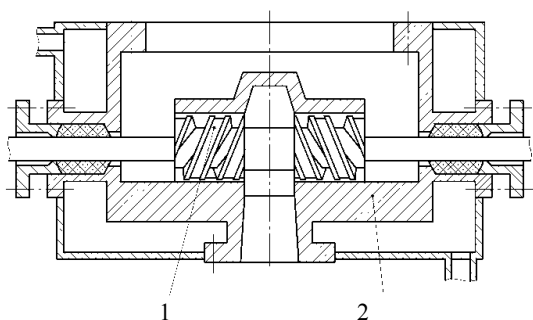


Рис. 4. Винтовой насос
Fig. 4. Screw-type pump

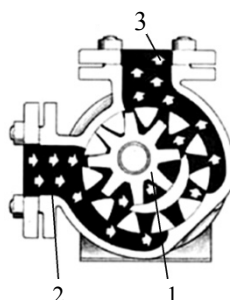


Рис. 5. Шестеренный насос
Fig. 5. Gear-type pump

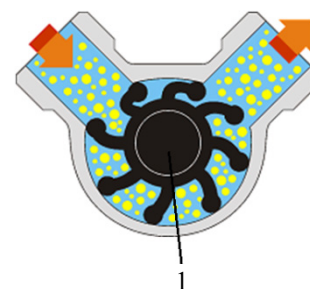


Рис. 6. Схема работы
импеллерного насоса
Fig. 6. Operational scheme
of impeller pump

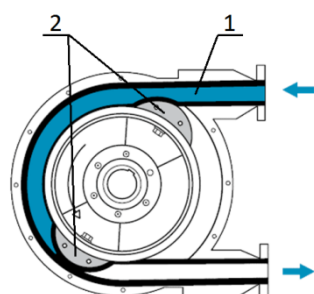


Рис. 7. Схема работы перистальтического насоса
Fig. 7. Operational scheme of peristaltic pump

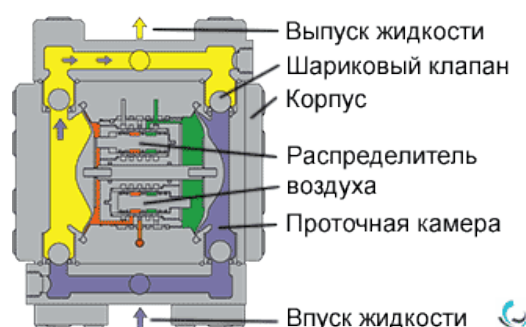


Рис. 8. Устройство мембранного насоса
Fig. 8. Design of membrane pump

Кулачковые насосы относятся к роторным и являются одними из самых надежных типов насосного оборудования. Их отличают также надежность конструкции, высокая износостойкость, низкая пульсация, низкий уровень вибрации и шума. Принцип работы основан на перекачивании жидкости в полости, образованной между роторами и корпусом насоса. Роторы могут быть одно-, двух-, трех-, пяти- и мультилепестковыми, а также эксклюзивными винтообразными (рис. 9) – в зависимости от типа перекачиваемой жидкости.

Поршневые насосы отличаются простотой и надежностью в работе (рис. 10). Их применяют для перекачивания жидкостей высокой вязкости и пониженной влажности любой консистенции (влажностью не менее 78 %) на большую дальность транспортировки. Они содержат поршень 1, совершающий возвратно-поступательное движение от кривошипно-шатунного механизма 2; два клапана 3 и 4 обеспечивают движение жидкости в одном направлении.

Кроме того, гидравлические системы для перекачивания вязких жидкостей включают в себя устройства для выполнения различных технологических задач в зависимости от их назначения. К ним относятся устройства для нанесения высоковязких жидкостей на поверхность изделий; для перемешивания, заполнения шприцев, распыления, слива, фильтрации, отпуска жидкости, дегазации, дозирования и т. д.

В состав жидкостей могут входить измельченные фракции, торф и другие материалы. Однако они отличаются более низкой производительностью по сравнению с центробежными насосами. Гидравлические системы для высоковязких жидкостей могут содержать различные устройства для подготовки высоковязких жидкостей, контроля и отбора проб, обработки транспортируемых жидкостей, измерения и изменения вязкости, аппараты для дегазации жидкости и пр. К их числу следует отнести также устройства для смешивания многокомпонентных высоковязких жидкостей в виде мешалок различного типа, грануляторов и устройств для измельчения наполнителей.

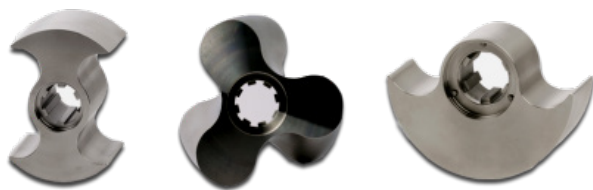


Рис. 9. Роторы кулачковых насосов

Fig. 9. Rotors of cam-driven pumps

К устройствам и механизмам технологического назначения относятся устройства для нанесения на поверхность высоковязкого материала для защиты от коррозии, для распыления. К устройствам вспомогательного назначения – устройства для дозирующей подачи материала, емкости и накопители жидкости, трубопроводы, фильтры.

Проведенный анализ показал, что вопрос, связанный с эксплуатацией гидравлических схем с высоковязкими жидкостями, требует дальнейшего изучения и разработки методики их расчетов и проектирования.

ВЫВОДЫ

1. Дана классификация устройств и представлен состав гидравлических систем для транспортирования высоковязких жидкостей на основе анализа их функционального назначения, вязкости и консистенции жидкостей и ряда.

2. Приведены классификация насосов, предназначенных для перекачивания высоковязких жидкостей, и краткое описание принципа их действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудкин, А. М. Реологические исследования вязкопластичных дисперсных систем / А. М. Гудкин; Ин-т физ. химии Акад. наук СССР. М.: МЭИ, 1963. 24 с.
2. Дятлов, В. А. Реологические и адгезионные свойства теста сдобных и булочных изделий / В. А. Дятлов. Воронеж, 1982. 24 с.
3. Фуks, Г. И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов / Г. И. Фуks. М.; Ижевск: Ин-т компьют. исслед., 2003. 328 с.
4. Ляпков, П. Д. О влиянии вязкости на характеристику погружных центробежных насосов / П. Д. Ляпков // Труды ВНИИ. Вып. 41. М.: Недра, 1964. С. 71–107.
5. Михеев, А. Ю. Исследование характеристики и повышение надежности насосов перистальтического принципа действия / А. Ю. Михеев. Уфа, 2004, 168 с.

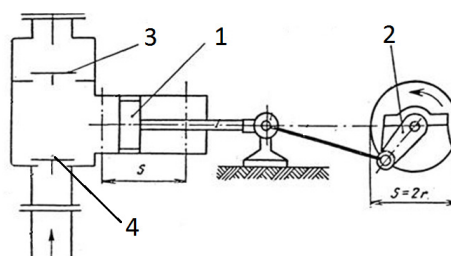


Рис. 10. Схема однопоршневого насоса одностороннего действия

Fig. 10. Scheme of single-cylinder single-action pump

6. Перистальтический насос: пат. Рос. Федерации № 2028509. МКИ F04B43/12 / Г. И. Пузанов, М. Д. Солodкий; опубл. 09.02.1995.
7. Перистальтический насос: а. с. 531927 СССР / В. Т. Чемерис, А. Т. Чемерис; опубл. 1976, Б. И. № 38.
8. Перистальтический насос: а. с. 739255 СССР / С. Ф. Поплавский, А. Ф. Ткаченко; опубл. 1980, Б. И. № 21.
9. Перистальтический насос: а. с. 931959 СССР / В. Е. Банелов [и др.]; опубл. 1982, Б. И. № 20.
10. Перистальтический насос: а. с. 937768 СССР / В. С. Богатырев, И. Е. Новиков; опубл. 1982, Б. И. № 23.

Поступила 31.01.2019

Подписана в печать 02.04.2019

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Gudkin A. M. (1963) *Rheogoniometry of Viscoplastic Disperse Systems*. Moscow, Moscow Power Engineering Institute. 24 (in Russian).
2. Dyatlov V. A. (1982) *Rheological and Adhesive Properties of Dough for Rich Fermented and Bun Goods*. Voronezh. 24 (in Russian).
3. Fuks G. I. (2003) *Viscosity and Plasticity of Petroleum Products*. Moscow-Izhevsk, Institute of Computer Research. 328 (in Russian).
4. Lyapkov P. D. (1964) About Effect of Viscosity on Characteristics of Submersible Centrifugal Pumps. *Trudy VNI. Вып. 41. Tekhnika Dobychi Nefti* [Proceedings of All-Union Research Institute. Is. 41 Oil Engineering]. Moscow, Nedra Publ., 71–107 (in Russian).
5. Mikheev A. Yu. (2004) *Study of Characteristics and Improvement of Reliability in Peristaltic Pumps*. Ufa. 168 (in Russian).
6. Puzanov G. I., Solodky M. D. (1995) *Peristaltic Pump*. Patent of Russian Federation No 2028509 (in Russian).
7. Tchemeris V. T., Tchemeris A. T. (1976) *Peristaltic Pump*. Inventor's Certificate No 531927 USSR (in Russian).
8. Poplavsky S. F., Tkachenko A. F. (1980) *Peristaltic Pump*. Inventor's Certificate No 739255 USSR (in Russian).
9. Bakalov V. E., Zenin A. B., Yaremenko V. I., Krutofalov E. B., Barzhin V. Ya. (1982) *Peristaltic Pump*. Inventor's Certificate No 931959 USSR (in Russian).
10. Bogatyrev V. S., Novikov I. E. (1982) *Peristaltic Pump*. Inventor's Certificate No 937768 USSR (in Russian).

Received: 31.01.2019

Accepted: 02.04.2019

Published online: 30.09.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-427-435>

УДК 539.4.013.3:669

Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов

Канд. техн. наук, доц. В. В. Мыльников¹⁾

¹⁾Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (Нижний Новгород, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Выполнены испытания на усталость конструкционных сталей и титанового сплава при различных частотах циклического нагружения, в результате которых выявлены закономерности изменения показателей сопротивления усталости и стабильности поведения испытанных материалов. Изменение частоты циклического нагружения влияет на продолжительность разового (в течение одного цикла) пребывания материала в нагруженном состоянии, что сказывается на его долговечности. Помимо этого, с ростом частоты циклов нагрузки скорость деформирования возрастает, а время нарастания напряжения уменьшается, одновременно увеличиваются искажения кристаллической решетки за счет сокращения времени развития процесса разупрочнения. Данный процесс сопровождается ростом интенсивности дробления зерен на фрагменты и блоки и их разориентировкой. Испытания на циклическую прочность образцов исследуемых материалов проводили при различных частотах и комнатной температуре по следующим схемам нагружения: консольный циклический поперечный изгиб плоского образца; консольный изгиб с вращением цилиндрического образца; осевое растяжение по пульсирующему циклу. Для анализа и оценки работоспособности и стабильности испытанных материалов применяли количественные оценки показателя сопротивления усталости в виде тангенса наклона левой ветви кривой усталости к оси циклов. Для обработки полученных результатов воспользовались методами математической статистики. Графические зависимости кривых усталости строили в логарифмических координатах, что позволило получить спрямление аппроксимирующих линий экспериментальных данных. В ходе исследований установлено: частота нагружения имеет неоднозначное влияние на сопротивление усталости из-за различий материалов в своей реакции на изменение спектра нагрузок в разных зонах усталостного процесса, но при этом обнаружено, что повышение усталостной прочности приводит к уменьшению наклона кривой усталости независимо от снижения или увеличения частоты нагрузки. Предложен новый подход к оценке циклической прочности и долговечности материалов, который включает в себя систему параметров из относительного коэффициента ограниченной выносливости, коэффициента корреляции и тангенса наклона кривой усталости. Обозначена динамика поведения реальных деталей машин и конструкций, изготовленных из этих сплавов, в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: частота циклов нагружения, сопротивление усталости, прочность, долговечность, стабильность поведения, конструкционная сталь, титановый сплав

Для цитирования: Мыльников, В. В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов / В. В. Мыльников // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 427–435. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-427-435>

Influence of Loading Frequency on Fatigue of Construction Materials

V. V. Mylnikov¹⁾

¹⁾Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (Nizhny Novgorod, Russian Federation)

Abstract. Investigations have been carried out in respect of structural steel and titanium alloy fatigue at various cyclic loading frequencies and these investigations have made it possible to reveal regularities in changes of parameters pertaining to fatigue resistance and stability behaviour of the tested materials. A change in cyclic loading frequency affects duration of a single (during one cycle) stay of the material in the loaded state and it has an impact on its durability. In addition, with an increase in frequency of load cycles, deformation rate becomes higher, and stress build-up time is decreasing, while distortion of a crystal lattice is increasing due to reduction of time for development of a weakening process. This process is accompanied by an increase in intensity of grain crushing into fragments and blocks, and their disorientation. Tests on cyclic strength of the studied material samples have been carried out at various frequencies and at a room temperature according to the following loading schemes: cantilever cyclic transverse bending of a flat sample; cantilever bending with rotation of a cylindrical sample;

Адрес для переписки

Мыльников Владимир Викторович
Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет
ул. Ильинская, 65,
603950, г. Нижний Новгород, Российская Федерация
Тел.: +7 831 430-17-74
mrmylnikov@mail.ru

Address for correspondence

Mylnikov Vladimir V.
Nizhny Novgorod State University
of Architecture and Civil Engineering
65 Il'inskaya str.,
603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation
Tel.: +7 831 430-17-74
mrmylnikov@mail.ru

axial tension on a pulsating cycle. Quantitative estimates of a fatigue resistance index in the form of slope tangent in a left branch of the fatigue curve to a cycle axis have been used in order to analyze and evaluate performance and stability of the tested materials. Methods for mathematical statistics have been applied to process the obtained results. Graphic dependences of fatigue curves have been plotted in logarithmic coordinates that allowed to obtain straightening of approximating lines for experimental data. The investigations have revealed that loading frequency has an ambiguous effect on fatigue resistance due to some differences in materials in respect of their reaction to changes in a load spectrum within different areas of the fatigue process, but at the same time it has been found that an increase in fatigue strength leads to a slope decrease in the fatigue curve regardless of a decrease or an increase in a load frequency. The paper proposes a new approach to assess a cyclic strength and durability of materials, and it comprises a system of parameters including a relative coefficient of limited endurance, a correlation coefficient and a slope tangent of the fatigue curve. Behavior dynamics for real machine parts and structures made of these alloys under operating conditions has been indicated in the paper.

Keywords: frequency of loading cycles, fatigue resistance, strength, durability, stability of behavior, structural steel, titanium alloy

For citation: Mylnikov V. V. (2019) Influence of Loading Frequency on Fatigue of Construction Materials. *Science and Technology*, 18 (5), 427–435. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-427-435> (in Russian)

Введение

Изучение закономерностей сопротивления усталости конструкционных материалов имеет первостепенное значение при прогнозировании прочности, долговечности и остаточного ресурса деталей машин и конструкций. На прочностные параметры сплавов при усталостных испытаниях влияют многие факторы, такие как температура, асимметрия нагружения, масштабный эффект, частота, шероховатость поверхности, концентрация напряжений и т. д. При этом каждый фактор может испытывать комплексное взаимодействие действующих одновременно с ним других факторов, которые могут как усиливать его действие, так и ослаблять или вообще исключать его влияние на развитие процесса повреждений. При тщательном изучении характеристик изменения показателей сопротивления усталости с одновременным учетом всех факторов и различных схем нагружений возникают значительные трудности, поэтому данный процесс удобнее разбить на экспериментально-теоретическое изучение отдельных факторов. В статье исследовался фактор частоты циклического нагружения на прочность и долговечность широко используемых конструкционных материалов.

Распространено мнение некоторых исследователей, что частота циклов нагрузки при нормальных условиях не оказывает существенного влияния на сопротивление усталости металлов и сплавов [1, 2]. Другая группа ученых придерживается мнения, что увеличение частоты нагружения неизменно приводит к повышению циклической прочности [3–5]. Кроме того, изменение частоты циклического нагружения влияет на продолжительность разового (в течение одного цикла) пребывания материала в нагруженном состоянии, что отражается на долговечности [6]. Возрастание частоты нагрузки приводит к росту скорости деформирования

материала, при этом время нарастания напряжения уменьшается, одновременно возрастают искажения кристаллической решетки за счет сокращения времени развития процесса разупрочнения. Данный процесс сопровождается ростом интенсивности дробления зерен на фрагменты и блоки и их разориентировкой. Парис [7], исследовавший некоторые частоты в интервале между 4 и 100 Гц, сделал заключение, что скорость циклического нагружения имеет незначительное влияние на рост усталостной трещины в умеренных условиях внешней среды, но другие исследования (Schijve), наоборот, указывают на ускорение роста при уменьшении частоты. Из этого следует, что частота нагружения имеет неоднозначное влияние на сопротивление усталости из-за различий материалов в своей реакции на изменение спектра нагрузок в разных зонах усталостного процесса [8–10].

Таким образом, анализ российских и иностранных публикаций показывает, что однозначного понимания особенностей влияния фактора частоты циклов на усталость на данный момент не существует [10].

Результаты исследований на усталость, изданные в виде научных статей и монографий, касаются в большей степени высокочастотных спектров нагружения и чаще всего тех частот, при которых проявляются вибрации узлов и деталей различных машин. Однако очень часто детали машин и элементы конструкций, например предохранительные мембраны, колонная и теплообменная аппаратура, прокатные станы, преимущественно используемые в металлургическом и химическом машиностроении, работают длительное время с весьма низкой частотой нагружения – до 5,0 Гц. Этот спектр нагружения является малоизученным ввиду большой продолжительности испытания. Так, для достижения наработки одного образца сравнительной базы 10^6 циклов при частоте 2 Гц уходит 139 ч непрерывной работы установки.

Обычно при расчетах действительных запасов циклической прочности пределы выносливости сплавов выбирают по значениям из металлургических справочников, полученных в основном при вращении с изгибом образцов на стандартной базе испытаний при частотах 50,0 Гц и более (до 166,7 Гц). Поэтому для расчета действительных запасов усталостной прочности в условиях низкочастотных диапазонов эксплуатации деталей необходимо вводить поправочный коэффициент на влияние частоты циклов. Изложенное доказывает потребность в проведении исследований усталостной прочности конструкционных материалов в пределах от долей герц до 5,0 Гц, что и явилось мотивацией для проведения настоящего исследования с целью определения влияния частоты нагружения и схемы нагрузки на динамику изменения показателей сопротивления усталости и стабильности поведения конструкционных материалов в сопоставлении с данными, полученными при испытаниях из стандартного диапазона частот.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для исследований были выбраны используемые в машино- и авиационном строительстве сплавы, представленные в табл. 1. Так, например, стали 40 и 40X нашли широкое применение для изготовления валов и шестерен в узлах машин и аппаратов, работающих с низкой частотой циклов, с учетом чего был выбран спектр нагружения в представленном исследовании. Титановый сплав ОТ-4-1 и сталь

30ХГСН2А часто используются в авиационном строительстве. В частности, на авиационных предприятиях Нижнего Новгорода изготавливают рычаги шасси самолета из стали 30ХГСН2А, работающие при частотах нагружения от 0,17 Гц.

Таблица 1

Исследуемые сплавы и виды нагружения
Investigated alloys and types of loading

Сплав	Частота циклов ω , Гц	Предел прочности σ_b , МПа	Вид испытания
Сталь 40X	2,00	920	КИВЦО
	2,70	920	
	100,00	920	
Сталь 40	2,00	780	
	2,70	780	
	46,70	780	
ОТ-4-1	1,00	722	ОРПЦ
	37,00	722	
Сталь 30ХГСН2А	0,17	1800	
	0,17	1280	
	40,00	1800	
	40,00	1280	
	3,33	1500	КЦПИПО
	50,00	1500	

Примечание. КИВЦО – консольный изгиб вращающегося цилиндрического образца; ОРПЦ – осевое растяжение по пульсирующему циклу; КЦПИПО – консольный циклический поперечный изгиб плоского образца.

Испытания образцов на усталость проводили при комнатной температуре 20 °С по режимам нагружения, показанным на рис. 1.

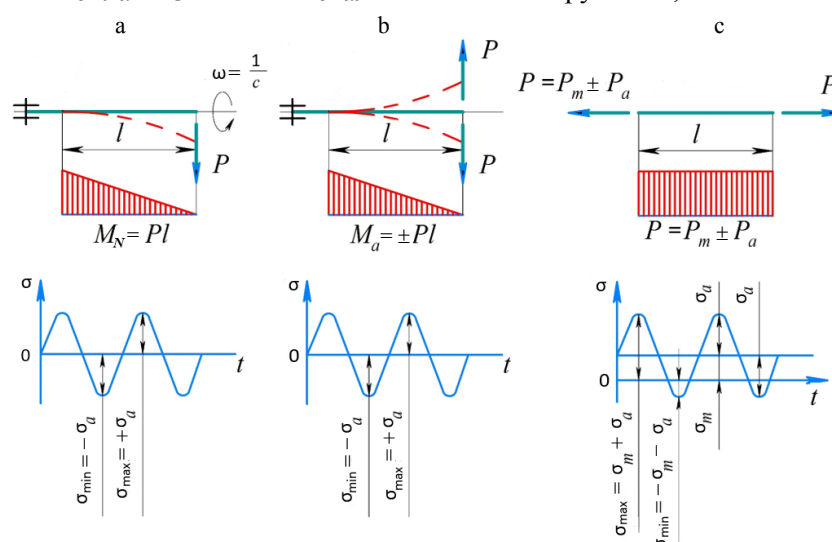


Рис. 1. Схематическое изображение видов нагружения образцов при усталостных испытаниях:

- a – консольный изгиб вращающегося цилиндрического образца;
b – консольный циклический поперечный изгиб плоского образца; c – осевое растяжение по пульсирующему циклу

Fig. 1. Schematic representation of loading types for specimens during fatigue tests:

- a – cantilever bending of rotating cylindrical specimen;
b – cantilever cyclic transverse bending of flat specimen; c – axial extension in pulsating cycle

С целью анализа и оценки работоспособности и стабильности испытанных материалов применяли параметры, приведенные ниже.

Для количественной оценки использовали значения показателя сопротивления усталости в виде наклона кривой усталости $\text{tg}\alpha_w$ к оси количества циклов N

$$\text{tg}\alpha_w = \frac{d \lg \sigma}{d \lg N}, \quad (1)$$

где σ – циклическое напряжение; N – количество циклов.

В [11] отмечено, что чем больше повреждаемость материала в условиях циклического нагружения, тем круче график зависимости количества циклов от прикладываемого напряжения. Показателем подобных изменений принят тангенс угла между осью абсцисс и аппроксимационной линией усталости – $\text{tg}\alpha_w$. Физический смысл $\text{tg}\alpha_w$ раскрывается в том, что величина противолежащего катета в рассматриваемом случае представляет собой напряжение, при котором работал материал, а прилежащего – количество циклов, которое выдержали образцы под нагрузкой до разрушения. Зная частоту нагружения, несложно определить время нахождения под нагрузкой (наработку). Таким образом, наклон $\text{tg}\alpha_w$ показывает динамику накопления количества циклов нагружения при изменении нагрузки, т. е. чем больше наклон кривой усталости – меньше $\text{tg}\alpha_w$, тем дольше работает материал (долговечность увеличивается) при незначительном снижении напряжения. И наоборот, чем круче наклон кривой усталости, тем больше значение $\text{tg}\alpha_w$ и меньше долговечность образца или детали.

Поскольку $\text{tg}\alpha_w$ напрямую связан с динамикой накопления повреждений в процессе циклического нагружения и с последующим разрушением образца, в данной статье этот параметр использовался в качестве прочностной характеристики исследуемого материала.

Для обработки полученных результатов применяли методы математической статистики. С целью спрямления аппроксимирующих линий экспериментальных данных для построения кривой усталости использовали логарифмические координаты в уравнении [11]

$$\lg \sigma = (\lg \sigma)_0 - \text{tg}\alpha_w \lg N, \quad (2)$$

где σ – напряжение при достижении соответствующего N ; σ_0 – напряжение при $N = 1$, отсекаемое линией кривой усталости; N – количество циклов нагружения до разрушения (долговечность).

Значение $(\lg \sigma)_0$ вычисляли по формуле

$$(\lg \sigma)_0 = \overline{\lg \sigma} - \kappa_\beta \overline{\lg N}, \quad (3)$$

где $\overline{\lg \sigma}$, $\overline{\lg N}$ – средние значения по логарифмам напряжения и количества циклов, которые определяли следующим образом:

$$\overline{\lg \sigma} = \frac{\sum \lg \sigma}{n}; \quad \lg N = \frac{\sum \lg N}{n}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получим:

$$(\lg \sigma)_0 = \frac{\sum \lg \sigma - \kappa_\beta \sum \lg N}{n}. \quad (5)$$

Дисперсию по $\lg \sigma$ и $\lg N$ определяли по выражениям:

$$S_{\lg N} = \frac{1}{n-1} \left[\sum \lg^2 N - \frac{(\sum \lg N)^2}{n} \right]; \quad (6)$$

$$S_{\lg \sigma} = \frac{1}{n-1} \left[\sum \lg^2 \sigma - \frac{(\sum \lg \sigma)^2}{n} \right], \quad (7)$$

где $S_{\lg N}$, $S_{\lg \sigma}$ – дисперсия по количеству циклов и по напряжению; n – число экспериментальных данных.

Для определения коэффициента корреляции использовали уравнение

$$K_{\text{кор}} = \frac{\kappa_\beta S_{\lg N}}{S_{\lg \sigma}}, \quad (8)$$

где κ_β – коэффициент регрессии, который определяет наклон кривой усталости, $\kappa_\beta = \text{tg}\alpha_w$.

Коэффициент корреляции $K_{\text{кор}}$ отображает степень сходимости построенного графика кривой усталости с полученными результатами эксперимента, который применили как показатель степени стабильности поведения исследованных сплавов.

Для сравнительной оценки прочностных характеристик на требуемой базе испытаний ($N = 10^6$ циклов) был введен относительный коэффициент ограниченной выносливости χ , вычисляемый по формуле

$$\chi = \frac{\sigma_{N=10^6}}{\sigma_B}, \quad (9)$$

где $\sigma_{N=10^6}$ – напряжение, соответствующее долговечности $N = 10^6$ циклов, МПа.

Принятый коэффициент ограниченной выносливости χ позволяет производить сравнительную оценку относительно максимальных прочностных характеристик (предел прочности σ_B) как одного материала при разных спектрах нагружения, так и сравнивать различные материалы без каких-либо сложных расчетов. Чем он ближе к единице, тем выше усталостные характеристики исследуемого материала – повреждаемость меньше и выше работоспособность этого материала при приближении к предельным нагрузкам (σ_B).

Учитывая конструкционные особенности используемых установок для испытаний на усталость и рекомендации ГОСТ 25.502–79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость», для исследований были изготовлены плоские и цилиндрические образцы небольших размеров, изображенные на рис. 2.

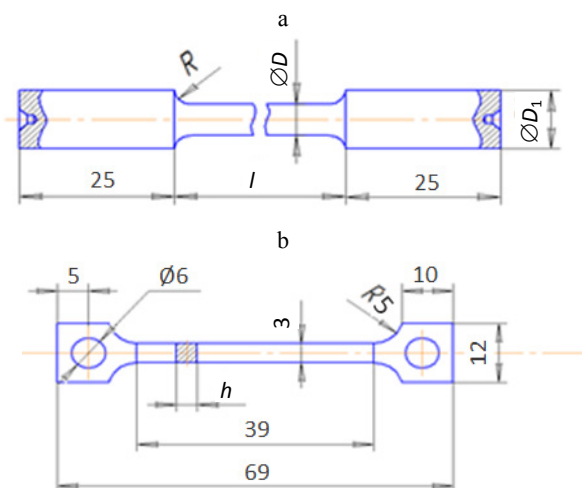


Рис. 2. Эскизы образцов: а – цилиндрический образец: $\varnothing D = 5$ мм; $\varnothing D_1 = 8$ мм; $R = 5$ мм; $l = 30$ мм; б – плоский образец: $h = 3$ мм

Fig. 2. Specimen sketches: а – cylindrical specimen: $\varnothing D = 5$ mm; $\varnothing D_1 = 8$ mm; $R = 5$ mm; $l = 30$ mm; б – flat sample: $h = 3$ mm

Результаты исследований

Сталь марки 40X, подвергнутая испытаниям при трех частотах знакопеременного нагружения (ω), показала рост усталостной прочности с увеличением ω (рис. 3). Здесь необходимо отметить, что при $\omega = 2,7$ Гц (рис. 3, кривая 2) в зоне низких величин долговечности N эта сталь показывает увеличенную циклическую прочность по сравнению с экспериментами, полученными при $\omega = 2,0$ Гц (рис. 3, кривая 1).

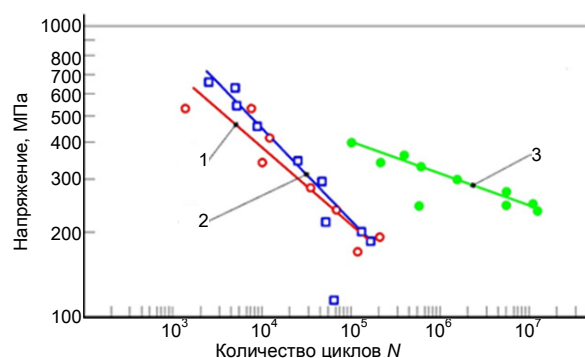


Рис. 3. Кривые усталости стали 40X для ω , Гц: 1 – 2,0; 2 – 2,7; 3 – 100,0

Fig. 3. Fatigue curves of 40X-steel for ω , Hz: 1 – 2,0; 2 – 2,7; 3 – 100,0

Однако за счет увеличения угла наклона кривая усталости опускается ниже, и на базе $N = 10^6$ циклов наблюдаются меньшие значения величин ограниченных долговечностей ($N_{\omega = 2,7 \text{ Гц}} < N_{\omega = 2,0 \text{ Гц}}$). Работоспособность стали 40X значительно возрастает при $\omega = 100,0$ Гц (рис. 3, кривая 3), что выражается в существенном наращивании количества циклов до разрушения при незначительных снижениях напряжений и проявляется в уменьшении наклона $\text{tg} \alpha_w$ до 0,1337. Такое поведение материала позволяет характеризовать заданные условия циклической работы стали 40X как наиболее оптимальные из сопоставленных на рис. 3 (для них уравнения кривых усталости: 1 – $\lg \sigma = 2,65 - 0,2655 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,901$; 2 – $\lg \sigma = 2,97 - 0,3293 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,8956$; 3 – $\lg \sigma = 2,297 - 0,1337 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9411$). Таким образом, можно предполагать, что в условиях эксплуатации реальных деталей машин и конструкций, изготовленных из стали 40X, снижение частоты циклического нагружения, сопровождаемое увеличением длительности их пребывания в нагруженном состоянии, будет уменьшать их остаточный ресурс.

Результаты экспериментов стали марки 40, проиллюстрированные на рис. 4 (для них уравнения кривых усталости: 1 – $\lg \sigma = 2,244 - 0,0877 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,779$; 2 – $\lg \sigma = 2,4275 - 0,1311 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9977$; 3 – $\lg \sigma = 2,353 - 0,16 \lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,98$), показывают противоположную тенденцию изменения циклической прочности в сравнении со сталью 40X – рост частоты циклов нагружения (ω) снижает усталостную прочность.

При низких частотах нагружения ω 2,0 и 2,7 Гц (рис. 4, кривые 1, 2) в малоцикловой области наблюдаем равные величины усталостной прочности при одинаковой наработке.

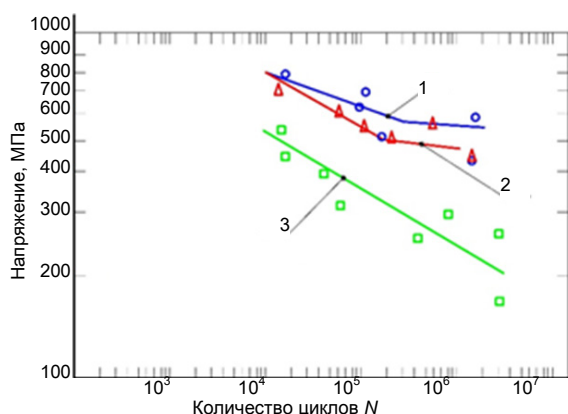


Рис. 4. Кривые усталости стали 40 для ω , Гц:
1 – 2,0; 2 – 2,7; 3 – 46,7

Fig. 4. Fatigue curves of 40-steel for ω , Hz:
1 – 2,0; 2 – 2,7; 3 – 46,7

Снижение нагрузки при испытаниях последующих образцов показывает различие в наклонах кривых усталости при разных частотах нагружения и, соответственно, имеют значения $\text{tg}\alpha_w = 0,0877$ при $\omega = 2,0$ Гц и $\text{tg}\alpha_w = 0,1311$ при $\omega = 2,7$ Гц, что приводит к разнице в 50 МПа выдерживаемой нагрузки на базе $N = 10^6$ циклов. Работоспособность стали марки 40 падает с увеличением частоты циклического нагружения до 46,7 Гц (рис. 4, кривая 3), при этом не наблюдается существенного изменения тангенса угла наклона кривой усталости $\text{tg}\alpha_w$. Приращение долговечности N при уменьшении напряжений носит похожий характер с результатами, полученными при $\omega = 2,7$ Гц; различие наблюдается в приложении меньших изгибных моментов в ходе эксперимента при частоте 46,7 Гц. Для стали 40 можно предположить, что снижение частоты нагружения реального объекта, сопровождаемое увеличением длительности его единовременного пребывания под нагрузкой, будет увеличивать его остаточный ресурс.

Экспериментальные результаты образцов из высококачественной стали 30ХГСН2А с разной прочностью, подвергнутых испытаниям по различным схемам циклического нагружения, представлены на рис. 5 (для них уравнения кривых усталости: 1 – $\lg\sigma = 4,0779 - 0,3010\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9890$; 2 – $\lg\sigma = 3,9821 - 0,3010\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9795$; 3 – $\lg\sigma = 3,9239 - 0,2552\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9900$; 4 – $\lg\sigma = 3,7682 - 0,2466\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9834$; 5 – $\lg\sigma = 3,3432 - 0,08723\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,8404$).

Испытания стали 30ХГСН2А выявили, что при частоте циклов как 0,17 Гц, так и 40,0 Гц сопротивление усталости стали с пределом проч-

ности $\sigma_b = 1800$ МПа выше, чем у образцов с пониженным пределом $\sigma_b = 1280$ МПа. Вместе с тем частота циклов нагружения в интервале от 0,17 до 40,0 Гц оказывает более сильное влияние на показатели сопротивления усталости стали 30ХГСН2А с $\sigma_b = 1800$ МПа.

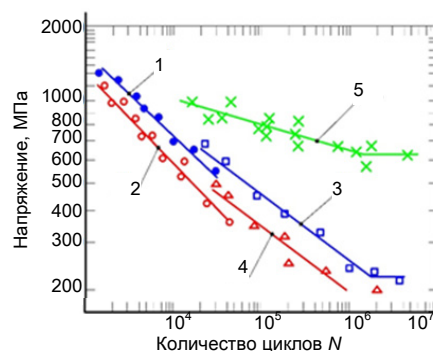


Рис. 5. Кривые усталости образцов из стали 30ХГСН2А:
 $\omega = 0,17$ Гц (1, 2) и 40,0 Гц (3, 4) и соответствующие
им пределы прочности $\sigma_b = 1800$ (1, 3) и 1280 (2, 4) МПа;
5 – $\omega = 50,0$ Гц, $\sigma_b = 1500$ МПа

Fig. 5. Fatigue curves of specimens made of 30XGCH2A-steel:
 $\omega = 0,17$ Hz (1, 2) and 40,0 Hz (3, 4) and corresponding
tensile strengths $\sigma_b = 1800$ (1, 3) and 1280 (2, 4) МПа;
5 – $\omega = 50,0$ Hz, $\sigma_b = 1500$ МПа

В целом существенных отличий в сопротивлении усталости данной стали, подверженной испытаниям при осевом растяжении по пульсирующему циклу, не наблюдается. Так, при частоте нагружения $\omega = 40,0$ Гц углы $\text{tg}\alpha_w$ показывают незначительное расхождение: $\text{tg}\alpha_w = 0,2552$ для стали с пределом прочности $\sigma_b = 1800$ МПа и $\text{tg}\alpha_w = 0,2466$ с $\sigma_b = 1280$ МПа, а при $\omega = 0,17$ Гц вообще наблюдается равенство, что характеризует материал определенной устойчивостью к восприятию циклических нагрузок по жесткой схеме нагружения. Существенные отличия от рассмотренных экспериментов обнаруживаются при смене вида испытаний на испытания по схеме деформации поперечного изгиба плоских образцов, термообработанных на категорию прочности $\sigma_b = 1500$ МПа. Наблюдается значительное уменьшение наклона кривых усталости с $\text{tg}\alpha_w = 0,301$ при $\omega = 0,17$ Гц для образцов с $\sigma_b = 1800$ МПа и $\sigma_b = 1280$ МПа (рис. 5) до $\text{tg}\alpha_w = 0,15051$ при $\omega = 3,33$ Гц с $\sigma_b = 1500$ МПа (рис. 6, кривая 3). Аналогичная динамика изменения показателей сопротивления усталости прослеживается и при более высоких частотах циклического нагружения (40,0 и 50,0 Гц), при этом обнаружен рост циклической прочности на базе $N = 10^6$ циклов в 1,5–2 раза. Необходимо отме-

тить, что независимо от вида испытаний сталь 30ХГСН2А показывает увеличение циклической прочности с ростом ω (рис. 5, 6, кривая 3) и в этом плане она ведет себя аналогично стали марки 40Х, поэтому предположение об условиях эксплуатации реальных деталей машин и конструкций, изложенное выше в отношении стали 40Х, применимо и для высокопрочной стали 30ХГСН2А.

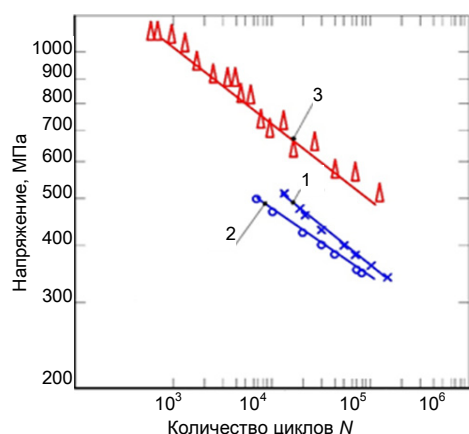


Рис. 6. Кривые усталости образцов для ω , Гц: из титанового сплава ОТ-4-1:

1 – 37,0; 2 – 1,0 и стали 30ХГСН2А: 3 – 3,33

Fig. 6. Fatigue curves of specimens for ω , Hz: from OT-4-1-titanium alloy:

1 – 37.0; 2 – 1.0 and 30ХГСН2А-steel: 3 – 3.33

С ростом частоты нагрузки при испытаниях образцов из титанового сплава ОТ-4-1 наблюдалось ухудшение сопротивления усталости, показатель $\text{tg}\alpha_\omega$ количественно возрастает (рис. 6: уравнения кривых усталости: 1 – $\lg\sigma = 3,5866 - 0,2219\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9799$; 2 – $\lg\sigma = 3,2607 - 0,1461\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9899$; 3 – $\lg\sigma = 3,4446 - 0,1505\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9994$). Однако более крутой наклон кривой усталости при $\omega = 37,0$ Гц не сказывается на величинах ограниченных циклов усталости на базе $N = 10^6$ циклов – циклическая прочность одинакова. Подобное поведение сплава ОТ-4-1 сравнимо с результатами испытаний стали 40Х в области низких частот нагружения (рис. 3, кривые 1, 2) в зеркальном отображении. Фактически мы наблюдаем противоположную картину изменения показателя сопротивления усталости в сравнении с рис. 3.

Таким образом, исследования представленной группы широкоиспользуемых конструкционных материалов показали, что все испытанные конструкционные стали и сплавы также попадают в две группы, определенные нами ранее: в одном случае с ростом частоты циклов нагружения ω улучшается сопротивление уста-

лости сплавов – показатель $\text{tg}\alpha_\omega$ количественно снижается (стали 40Х, 30ХГСН2А, титановый сплав ОТ 4-1), в другом – наоборот, ухудшается (сталь 40, титановый сплав ОТ 4-1).

Закономерности прочностных характеристик и стабильности поведения сплавов

В рамках представленного подхода предполагается аттестовывать исследованные материалы по динамике эволюции показателей $\text{tg}\alpha_\omega$, $K_{\text{кор}}$ и χ . Схема названных параметров в сопоставлении с экспериментальными данными и прочностными показателями представлена на рис. 7.

Данная система параметров позволяет обстоятельно отображать функциональные связи и закономерности поведения материалов при испытаниях на усталость с учетом изменения частот нагружения (с увеличением частоты нагружения время пребывания под нагрузкой уменьшается, что показано на рис. 7). По мнению автора, система дает возможность обеспечить целостность описания совокупности процессов упрочнения-разупрочнения, не углубляясь в рассмотрение таких существенных параметров, как дисторсия кристаллической решетки, разориентировка блоков и зерен и других, которые в той или иной мере сказываются на значениях используемых показателей.

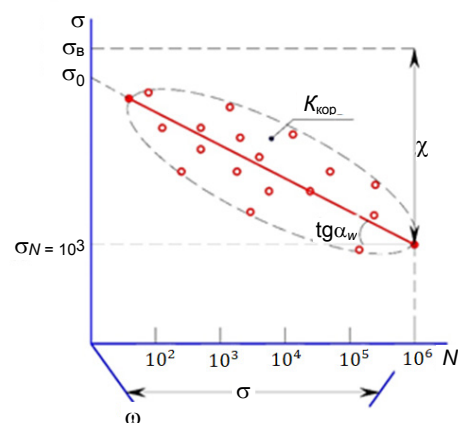


Рис. 7. Схематическое изображение системы показателей оценки поведения материалов при испытаниях на усталость

Fig. 7. Schematic representation of indicator system for assessing behavior of materials in fatigue tests

Результаты вычислений указанных параметров по полученным экспериментальным данным представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели сплавов при разных частотах нагружения
Parameters of alloys at different loading frequencies

Материал	ω , Гц	$\text{tg}\alpha_w$	$\sigma_{N=10^6}$, МПа	$K_{\text{кор}}$	χ
Сталь 40X	2,0	0,2655	115	0,901	0,125
	2,7	0,3293	105	0,8956	0,114
	100,0	0,1337	310	0,411	0,337
Сталь 40	2,0	0,0877	540	0,779	0,700
	2,7	0,1311	480	0,9977	0,610
	46,7	0,16	250	0,98	0,320
ОТ-4-1	1,0	0,1461	240	0,9899	0,230
	37,0	0,2219	240	0,9799	0,230
Сталь ($\sigma_B = 1280$ МПа) 30XГСН2А	0,17	0,3010	235	0,9795	0,180
Сталь ($\sigma_B = 1800$ МПа) 30XГСН2А	0,17	0,3010	275	0,9890	0,153
Сталь ($\sigma_B = 1280$ МПа) 30XГСН2А	40,0	0,2466	200	0,9834	0,156
Сталь ($\sigma_B = 1800$ МПа) 30XГСН2А	40,0	0,2552	265	0,9900	0,147
Сталь 30XГСН2А	3,33	0,15051	360	0,9940	0,210
	50,0	0,08723	635	0,8404	0,420

Максимальная циклическая прочность стали 40X обнаруживается при частоте 100 Гц, что количественно выражено в увеличении значений $K_{\text{кор}}$ и χ , при этом $\text{tg}\alpha_w$ заметно уменьшается по отношению к результатам при испытаниях в диапазоне низких частот 2,0 и 2,7 Гц и характеризуется повышением долговечности и стойкости этой стали под действием циклических напряжений. Наблюдается увеличение стабильности поведения стали марки 40X в области повышения скорости деформирования, что подтверждается уменьшением разброса экспериментальных данных и численно выражено коэффициентом корреляции $K_{\text{кор}} = 0,9411$.

Испытания при низких частотах циклического нагружения показывают неоднозначное распределение прочности и долговечности. При $\omega = 2,7$ Гц материал выдерживает существенно большие напряжения, чем при $\omega = 2,0$ Гц при одинаковой наработке в 10^3 циклов, но на базе долговечности 10^6 коэффициент χ оказывается ниже и сопровождается высоким значением $\text{tg}\alpha_w$, что говорит о большем разупрочнении стали 40X при частоте нагружения 2,7 Гц. Для этих частот наблюдается средняя стабильность поведения материала, которая

идентифицируется относительным постоянством разброса экспериментальных данных и выражена практически одинаковым коэффициентом корреляции.

Представленные численные значения по стали 40 в табл. 2 при $\omega = 2$ Гц демонстрируют высокое значение χ и очень низкую величину наклона кривой усталости $\text{tg}\alpha_w$, но малый показатель стабильности поведения материала $K_{\text{кор}} = -0,779$ указывает на непредсказуемость работы материала. То есть при одном и том же значении напряжений при этой частоте разрушение может произойти достаточно быстро, а может не произойти вовсе. С возрастанием частоты нагружения $\text{tg}\alpha_w$ численно растет, коэффициент χ снижается – циклическая прочность падает, но при этом нужно отметить очень большие значения коэффициентов корреляции при частотах нагружения 2,7 и 46,7 Гц, что показывает постоянство работы стали во всем диапазоне долговечности.

Анализ полученных результатов по титановому сплаву ОТ-4-1 выявляет одинаковые значения χ при различных частотах, однако существенно меньшее значение $\text{tg}\alpha_w$ при $\omega = 1$ Гц показывает более высокую прочность за весь период циклов нагрузки, в то время как стабильность титанового сплава очень высока, что подтверждается $K_{\text{кор}}$.

У стали 30XГСН2А максимальные значения прочности и долговечности выявлены при $\omega = 3,33$ и 50,00 Гц, что в основном связано со смягчением схемы нагружения и подтверждается значениями параметров из табл. 2. Стабильность стали при разных видах испытаний очень высока, что и отражается в широком ее применении в авиастроении для высоконагруженных деталей, правда, при $\omega = 50$ Гц замечен некоторый ее спад.

ВЫВОДЫ

1. На основании экспериментальных данных установлено, что у сталей 40X, 30XГСН2А с повышением частоты циклического нагружения усталостная прочность и долговечность возрастают, наблюдается увеличение стабильности поведения в области повышения скорости деформирования, а у сталей 40, 30XГСН2А и титанового сплава ОТ-4-1 снижаются, при этом выявлена высокая стабильность работы во всем диапазоне долговечности, за исключением стали 40 при $\omega = 2$ Гц.

2. Повышение усталостной прочности приводит к уменьшению наклона кривой усталости.

сти $\text{tg}\alpha_w$ независимо от уменьшения или увеличения частоты нагрузки ω .

3. Предложен новый подход для аттестации материалов, который включает в себя систему параметров из относительного коэффициента ограниченной выносливости, коэффициента корреляции и тангенса наклона кривой усталости, что позволяет обстоятельно отображать функциональные связи и закономерности поведения материалов при испытаниях на усталость.

4. С учетом проведенных исследований можно предполагать, что в условиях эксплуатации реальных деталей машин и конструкций, изготовленных из стали 40X, 30ХГСН2А снижение частоты циклического нагружения, сопровождаемое увеличением длительности их пребывания в нагруженном состоянии, будет уменьшать их остаточный ресурс, а изготовленных из стали 40, и титанового сплава ОТ-4-1, – увеличивать. Таким образом, при изготовлении валов, работающих при очень низких частотах нагружения, при выборе материала для их изготовления между сталями 40 и 40X при прочих равных условиях (стоимость этих сталей существенно не различается, и прочностные характеристики близки при определенных методах обработки) рекомендуется брать сталь 40, а при частотах 50 Гц и более – сталь 40X.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбовец, М. А. Влияние температуры, коэффициента асимметрии и частоты на скорость роста трещины усталости в сплаве ВТ8 / М. А. Горбовец, Н. А. Ночовная // Вопросы материаловедения. 2015. Т. 82, № 2. С. 216–220.
2. Терентьев, В. Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева. М.: Наука, 2015. 479 с.
3. Школьник, Л. М. Методика усталостных испытаний: справ. / Л. М. Школьник. М.: Металлургия, 1978. 304 с.
4. Трошенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В. Т. Трошенко, Л. А. Сосновский. Киев: Наукова думка, 1987. 1303 с.
5. Structural Analysis of Cyclic-loaded Nickel-Titanium Rotary Instruments by Using Resonance Frequency as a Parameter / Haw-Ming Huang [et al.] // JOE. 2011. Vol. 37, No 7. P. 993–996.
6. Yasniy, P. V. Effect of Temperature, Frequency and Loading Waveform on Fatigue Crack Growth in Bimaterial of the Roll for Continuous Casting Machines / P. V. Yasniy, P. O. Maruschak, V. B. Hlado // Proc. Int. Conf. "Progressive Technologies and Materials in Engineering", 28–30 June 2005, Rzeszow-Bezmiechowa, Poland. Rzeszow: RUT, 2005. P. 117–124.
7. Ирвин, Дж., Парис, П. Основы теории роста трещин и разрушения // Разрушение. Т. 3 / под общ. ред. Г. Либовица. М.: Мир, 1976. С. 17–66.
8. Honeycombe, R. W. K. The Plastic Deformation of Metals / R. W. K. Honeycombe. London: Edward Arnold Ltd., 1984. 483 p.

9. Мыльников, В. В. О влиянии частоты приложения нагрузки на сопротивление усталости материалов / В. В. Мыльников // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. Т. 2, № 6. С. 202–205.
10. Mylnikov, V. V. On Evaluation of Durability Criteria in Carbon Steels / V. V. Mylnikov, D. I. Shetulov, E. A. Chernyshev // Metals Technology. 2010. No 2. P. 19–22.
11. Шетулов, Д. И. К оценке сопротивления усталости материалов по повреждению поверхностных аномальных слоев / Д. И. Шетулов // Физико-химическая механика материалов. 1984. № 6. С. 117.

Поступила 04.05.2018

Подписана в печать 10.07.2018

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Gorbovets M. A. Nochovnaya N. A. (2015) Influence of Temperature, Asymmetry Ratio and Frequency on Fatigue Crack Propagation Rate in Alloy BT8. *Voprosy Materialovedeniya*, 82 (2), 216–220 (in Russian).
2. Terentiev V. F., Korableva S. A. (2015) *Fatigue of Metals*. Moscow, Nauka Publ. 479 (in Russian).
3. Shkolnik L. M. (1978) *Methodology of Fatigue Tests*. Moscow, Metallurgiya Publ. 304 (in Russian).
4. Troshchenko V. T., Sosnovskii L. A. (1987) Resistance to Fatigue of Metals and Alloys. Kiev, Navukova Dumka Publ. 1303 (in Russian).p.
5. Haw-Ming Huang, Wei-Jen Chang, Nai-Chia Teng, Hung-Lung Lin, Sung-Chih Hsieh (2011) Structural Analysis of Cyclic-Loaded Nickel-Titanium Rotary Instruments by Using Resonance Frequency as a Parameter. *Journal of Endodontics*, 37 (7), 993–996. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.03.022>.
6. Yasniy P. V., Maruschak P. O., Hlado V. B. (2005) Effect of Temperature, Frequency and Loading Waveform on Fatigue Crack Growth in Bimaterial of the Roll for Continuous Casting Machines. *Proc. Int. Conf. "Progressive Technologies and Materials in Engineering"*, 28–30 June 2005, Rzeszow-Bezmiechowa, Poland. Rzeszow, RUT, 117–124.
7. Irwin G., Paris P. *Fundamentals of Aspects of Crack Growth and Fracture* // Fracture. Vol. 3 / Under General Editorship of H. Leibovitz. M. [Moscow]: Publishing House "Mir" [World], 1976, 17–66.
8. Honeycombe R. W. K. *The Plastic Deformation of Metals*. London, Edward Arnold Ltd., 1984. 483.
9. Mylnikov V. V. (2016) About Influence of Load Rate on Resistance to Material Fatigue. *Mezhdunarodny Zhurnal Prikladnykh i Fundamentalnykh Issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Investigations], 2 (6), 202–205 (in Russian).
10. Mylnikov V. V., Shetulov D. I., Chernyshev E. A. (2010) On Evaluation of Durability Criteria in Carbon Steels. *Metals Technology*, (2), 19–22.
11. Shetulov D. I. (1984) For Assessment of Material Fatigue According to Damage of Surface Anomalous Layers. *Phiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov* [Physico-Chemical Mechanics of Materials], (6), 117 (in Russian).

Received: 04.05.2018

Accepted: 10.07.2018

Published online: 30.09.2019

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-436-442>

УДК 628.31:004

Оптимизация процесса очистки сточных вод постов мойки автотракторной техники по энергетическим затратам

Кандидаты техн. наук, доценты А. В. Крутов¹⁾, М. М. Дечко¹⁾,
инж. М. А. Бойко¹⁾

¹⁾Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

©Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Рассмотрен процесс очистки нефтесодержащих стоков с применением электрокоагуляции, электрофлотации и электромагнитного гидроциклона, реализованный на лабораторной установке (патент Республики Беларусь на изобретение № 21229). Исследования проводились с целью оптимизации удельных энергозатрат процесса очистки стоков от топливно-смазочных веществ. Методами исследования являлись обзор литературы, сравнительный анализ, эксперимент, математическое моделирование. Содержание нефтепродуктов в сточных водах до и после очистки оценивалось в аналитической лаборатории Белорусского государственного аграрного технического университета по стандартным методикам. Выполнена очистка нефтесодержащих стоков на лабораторной установке с помощью метода электрофлотокоагуляции с удалением всплывшего шлама в электромагнитном гидроциклоне. Данный способ очистки позволяет повысить степень обеззараживания воды, обеспечивает замкнутое водоснабжение, рациональное использование водных ресурсов, снижение вредного воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду. Проведено планирование эксперимента. Реализован трехуровневый план Бокса – Бенкена. Решена задача оптимизации процесса очистки по энергетическим затратам, не ухудшая требуемых показателей концентрации нефтепродуктов в воде после очистки. Получены математические модели и определены оптимальные режимы очистки при наименьших удельных энергетических затратах и достаточно высокой степени очистки. Значимость коэффициентов регрессии оценивалась по критерию Стьюдента. Установлено, что на предложенной установке степень очистки стоков постов мойки автотракторной техники можно достичь при ее производительности $G = 0,7$ л/с, плотности тока $j = 150$ А/м². Степень очистки, определяемая отношением концентраций загрязнителя до и после очистки, составляет 99,9 %. Результаты могут быть использованы при реализации микропроцессорного управления режимом очистки, приняв в качестве управляющего воздействия такие факторы, как исходная концентрация загрязнений, производительность установки, плотность тока электрофлотокоагулятора.

Ключевые слова: электрокоагуляция, электрофлотация, электромагнитный гидроциклон, контроллер, планирование эксперимента, оптимизация

Для цитирования: Крутов, А. В. Оптимизация процесса очистки сточных вод постов мойки автотракторной техники по энергетическим затратам / А. В. Крутов, М. М. Дечко, М. А. Бойко // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 436–442. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-436-442>

Optimization of Wastewater Treatment Process on Energy Costs at Truck and Tractor Washing Posts

A. V. Krutau¹⁾, M. M. Dechko¹⁾, M. A. Boika¹⁾

¹⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers a process pertaining to purification of oily effluents while using electrocoagulation, electro-flotation and an electromagnetic hydro-cyclone, implemented with the help of a laboratory unit (Patent of the Republic of Belarus

Адрес для переписки
Крутов Анатолий Викторович
Белорусский государственный аграрный
технический университет
просп. Независимости, 99
220023, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 373-11-53
an8737@yandex.ru

Address for correspondence
Krutau Anatoli V.
Belarusian State Agrarian
Technical University
99 Nezavisimosty Ave.,
220023, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 373-11-53
an8737@yandex.ru

for the invention No 21229). The investigations have been carried out with the purpose to optimize specific energy consumption for the process of cleaning fuel and lubricants effluents. The following investigation methods have been applied – a literature review, a comparative analysis, an experiment execution, a mathematical modeling. Content of oil products in wastewater before and after treatment has been evaluated in the analytical laboratory of the Belarusian State Agrarian Technical University in accordance with standard methods. Purification of the oily effluents has been made with the help of a laboratory unit while using electroflotocoagulation method with removal of floated sludge in an electromagnetic hydrocyclone. This cleaning method makes it possible to increase a degree of water disinfection, provides a closed water supply, rational use of water resources, reduction of harmful effects of pollutants on the environment. An experimental design technique has been worked out and a three-level Box – Behnken design has been implemented in the paper. The problem concerning optimization of the purification process on energy costs has been solved without worsening the required concentration indices of petroleum products in water after treatment. Mathematical models have been obtained and optimal purification modes have been determined at the lowest specific energy costs and with sufficiently high degree of purification. Significance of regression coefficients has been estimated by Student criterion. It has been established that while using the proposed unit it is possible to obtain a degree of wastewater purification at automotive equipment washing stations with its performance $G = 0.7$ l/s, current density $j = 150$ A/m². The degree of purification, determined by ratio of pollutant concentrations before and after purification, is up to 99.9 %. The results can be used in implementation of microprocessor control of cleaning mode while taking an initial concentration of pollution, unit capability, current density of an electroflotocoagulator as control action factors.

Keywords: electrocoagulation, electroflotation, electromagnetic hydrocyclone, controller, experimental design technique, optimization

For citation: Krutau A. V., Dechko M. M., Boika M. A. (2019) Optimization of Wastewater Treatment Process on Energy Costs at Truck and Tractor Washing Posts. *Science and Technology*, 18 (5), 436–442. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-436-442> (in Russian)

Введение

В сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь на мойку автотракторной техники и различных сельхозмашин затрачиваются значительные объемы воды. Кроме того, образованные при этом сточные воды содержат различные минеральные загрязнения и особенно нефтепродукты в дозах, превышающих предельно допустимые показатели, а также синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ).

В стоках постов мойки автотракторной техники и сельскохозяйственных машин присутствуют нефтепродукты, поверхностно-активные вещества и другие загрязнители, относящиеся к числу наиболее опасных для окружающей среды. Исследованиями, проведенными ранее на кафедре электротехники БГАТУ [1, 2], а также в литературных источниках [3–6] установлено, что процесс очистки сточных вод от нефтепродуктов и СПАВ может быть эффективно реализован электрохимическим воздействием, управляемым рядом факторов: физико-химическими, электрическими и гидродинамическими. Одним из возможных технических решений, реализующих процесс очистки нефтесодержащих стоков, является электрофлотокоагуляция с удалением всплывшего шлама в электромагнитном гидроциклоне. Этот метод очистки позволяет повысить степень обеззараживания воды и обеспечить замкнутое водоснабжение, рациональное использование водных ресурсов, снижение вредного воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду.

Очистка путем электрокоагуляции и электрофлотации хорошо исследована в ряде работ, например в [5, 6]. Однако в них не рассматривается расход энергоресурсов. Авторы статьи ставили задачу добиться меньших энергозатрат при очистке, не снижая качества процесса.

Основная часть

Задача оптимизации процесса очистки сточных вод включает построение физической и математической моделей процесса и определение оптимальных значений управляющих факторов, обеспечивающих минимальные энергетические затраты на единицу объема очистки сточных вод при требуемом уровне качества очистки [7–9].

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке (рис. 1а), состоящей из насоса, выпрямительного блока, электрокоагулятора, электрофлотатора, электромагнитного гидроциклона, емкости для модельного состава загрязненных и очищенных вод, соединительных шлангов, средства контроля технологического процесса очистки. Для контроля и управления процессом очистки использовались следующие приборы: вольтметры универсальные В7-65, В7-58/2, шунты, кондуктометр КП-202, мультиметр цифровой УТВ 1818, прошедшие в установленном порядке государственную поверку, программируемый контроллер Simatic S7-1200, состоящий из центрального процессора, блока питания, модуля ввода-вывода дискретных сигналов, модуля

ввода-вывода аналоговых сигналов, сенсорной панели оператора КТР700 Basic PN (рис. 1б). Схему составляли согласно [3–6]. В качестве сточных вод использовались модельные водные стоки с содержанием нефтепродуктов в них от 1800 до 2200 мг/л.

Технический уровень процесса очистки сточных вод определяется двумя важнейшими параметрами: качеством очистки (C , мг/л), характеризуемым остаточным содержанием нефтепродуктов в сточных водах, и удельными энергозатратами (Θ_s , Дж/м³). В используемой для мойки грузовых автомобилей осветленной производственной сточной воде концентрация механических примесей не должна превышать 70 мг/л, для мойки легковых автомобилей и автобусов – 40 мг/л, концентрация нефтепродуктов – соответственно 20 и 15 мг/л [7].

Содержание нефтепродуктов в сточных водах до и после очистки оценивалось в аналитической лаборатории университета по стандартным методикам (руководство по химическому анализу вод). Результаты проведенных исследований отобранных проб оформлялись протоколами.

Полная удельная энергоемкость очистки состоит из прямых и овеществленных затрат, отнесенных к годовому объему очистки стоков

$$\Theta_s = \frac{1}{Q} \sum (\Theta_{pri} + \Theta_{ови}),$$

где Q – годовой объем очистки стоков, м³; Θ_{pri} , $\Theta_{ови}$ – удельные прямые и овеществленные затраты i -го вида, МДж (кВт·ч).

Известно определение удельных прямых и овеществленных энергозатрат по методике [10]. К прямым энергозатратам относятся затраты, связанные с потреблением установкой электроэнергии на очистку стоков. К овеществленным – затраты на изготовление, хранение, обслуживание установки, сбор и подачу стоков на очистку, которые определяются с учетом энергетических эквивалентов.

Однако возможности энергетического анализа по указанной выше методике ограничиваются тем, что в области очистки стоков сельскохозяйственного производства, во-первых, отсутствует региональный или общенациональный банк данных, позволяющий автоматизировать поиск и накопление информации по энергоресурсосбережению, особенно овеществленных энергозатрат. Во-вторых, затраты энергии и ресурсов частично или полностью окупаются снижением рисков нанесения ущерба гидросфере.

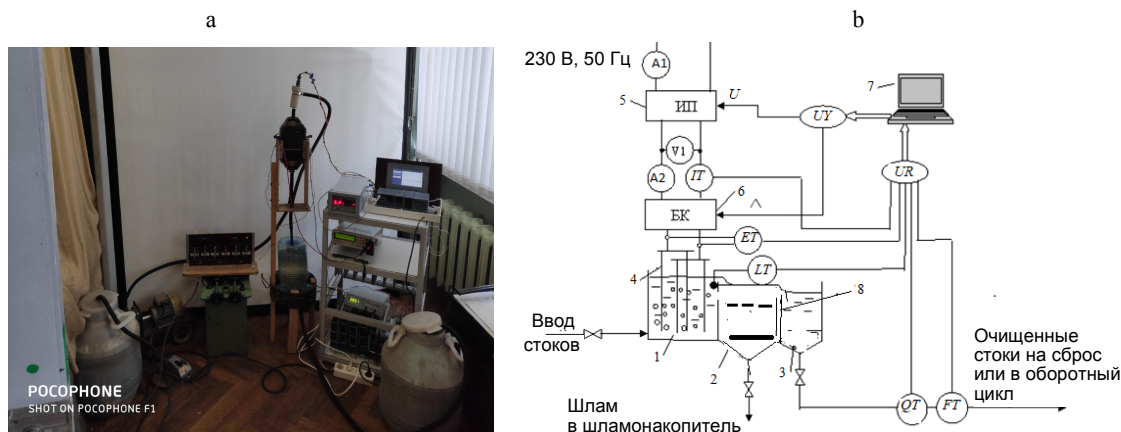


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) экспериментальной установки: 1 – электрокоагулятор; 2 – электрофлотатор со шламонакопителем; 3 – электромагнитный гидроциклон; 4 – электрод; 5 – источник питания (ИП); 6 – блок контроллера (БК); 7 – компьютер; 8 – канал для отвода всплывающего шлама; А1, А2 – амперметр; V1 – вольтметр; IT – датчик тока; ET – делитель напряжения; LT – датчик уровня; QT – датчик электропроводности (кондуктометр); FT – расходомер; UR – многоканальный аналого-цифровой преобразователь; UY – многоканальный цифроаналоговый преобразователь; U – сигнал управления; Λ – логический сигнал управления БК

Fig. 1. Appearance (a) and scheme (b) of experimental unit: 1 – electro-coagulator; 2 – electroflotator with sludge collector; 3 – electromagnetic hydrocyclone; 4 – electrodes; 5 – power source (PS); 6 – controller unit (CU); 7 – computer; 8 – channel for removal of floated sludge; A1, A2 – ammeters; V1 – voltmeter; IT – current sensor; ET – voltage divider; LT – level sensor; QT – conductivity sensor (conductivity meter); FT – flow meter; UR – multi-channel analog-to-digital converter; UY – multi-channel digital-to-analog converter; U – control signal; Λ – logic control signal CU

Поэтому для оптимизации энергозатрат на очистку использовали статистическую обработку полученных в ходе экспериментов данных качества обезвреживания стоков и прямых удельных затрат электроэнергии [11]. С учетом того, что материалоемкость установки относительно небольшая и применяется для решения экологических проблем и снижения расхода водных ресурсов (замкнутая технология подачи воды на мойку), оцеществленными затратами пренебрегли.

На прямые удельные энергозатраты будут влиять следующие факторы:

- исходная загрязненность сточных вод нефтепродуктами и СПАВ, г/м³ (от этого зависит продолжительность очистки);
- производительность установки по очистке стоков, м³/ч;
- напряженность электрического поля в электрофлотокоагуляторе, В/м;
- плотность тока электрокоагулятора, А/м²;
- напряженность магнитного поля в электромагнитном циклоне, А/м, и др.

Рассчитать приведенные удельные затраты (Вт·ч/м³) можно по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = \left(jE + \frac{BH}{2} \right) t = \left(jE + \frac{\mu_a H^2}{2} \right) t,$$

где j – плотность тока электрофлотокоагулятора, А/м²; E – напряженность электрического поля в электрофлотокоагуляторе, В/м; H – напряженность магнитного поля в электромагнитном циклоне, А/м; B – величина магнитной индукции в гидроциклоне, Тл; μ_a – магнитная проницаемость сердечника, Гн/м; t – продолжительность очистки, ч.

Процесс очистки, физическая модель которого реализована на лабораторной установке, зависит от следующих факторов:

- исходной концентрации загрязнений X_1 , г/л;
- производительности процесса X_2 , л/с;
- плотности тока электрокоагулятора X_3 , А/м²;
- напряженности электрического поля в электрокоагуляторе X_4 , В/м;
- напряженности магнитного поля в электромагнитном гидроциклоне X_5 , А/м.

В целях снижения размерности факторного пространства на основе экспертных оценок проведено ранжирование названных факторов

по степени их влияния на качество очистки. С учетом ранжирования и с целью упрощения математической модели факторы X_4 и X_5 не варьировали и зафиксировали на уровнях: напряженность электрического поля в электрокоагуляторе $X_4 = 60$ В/м; напряженность магнитного поля электрогидроциклона $X_5 = 10$ А/м. Интервалы варьирования управляющих факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни варьирования управляющих факторов

Variation levels of control factors

Уровень варьирования	Фактор		
	Исходная концентрация загрязнений, мг/л	Производительность процесса, л/с	Плотность тока, А/м ²
	X_1	X_2	X_3
Основной	2000	0,5	100
Верхний (+1)	2200	0,7	150
Нижний (–1)	1800	0,3	50
Интервал варьирования	200	0,2	50

В качестве математической модели, описывающей зависимость параметров оптимизации от управляющих факторов, выбрано уравнение регрессии в виде полинома 2-го порядка

$$Y_{1,2} = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ j>i}}^3 b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2.$$

Для изучения зависимости степени очистки и удельной энергоемкости процесса от трех управляющих факторов реализован трехуровневый план Бокса – Бенкена. Матрица плана и результаты опытов приведены в табл. 2. Значимость коэффициентов регрессии оценивалась по критерию Стьюдента. План не ортогонален для квадратичных эффектов, поэтому незначимые коэффициенты исключались пошагово (табл. 3).

В результате получены адекватные по критерию Фишера регрессионные модели со статистически значимыми коэффициентами:

$$Y_1 = 2,574 + 0,065 X_1 - 0,123 X_3^2;$$

$$Y_2 = 2,191 + 0,109 X_1 + 0,083 X_1 X_2 - 0,085 X_3^2.$$

Таблица 2

Матрица плана и результаты опытов
Design matrix and results of experiments

Нормированное значение фактора			Число дублей	Среднее значение удельной энергоёмкости, кВт·ч/м ³	Дисперсия	Среднее значение удельной энергоёмкости, кВт·ч/м ³	Дисперсия	Конечная концентрация загрязнений, мг/л	Дисперсия	Конечная концентрация загрязнений, мг/л	Дисперсия
X_1	X_2	X_3	n	$\bar{Y}_1$	S_1^2	$\bar{Y}_1$	RSS_1	Y_2^p	S_2^2	Y_2^p	RSS_2
1	1	0	4	2,56	0,0257	2,29	0,0182	2,64	0,0063	2,38	0,0086
1	-1	0	4	2,66	0,0195	2,15	0,0156	2,64	0,0004	2,22	0,0046
-1	1	0	4	2,58	0,0363	2,04	0,0089	2,51	0,0050	2,00	0,0016
-1	-1	0	4	2,57	0,0435	2,23	0,0663	2,51	0,0037	2,17	0,0042
1	0	1	4	2,53	0,0460	2,40	0,0689	2,52	0,0002	2,21	0,0342
1	0	-1	4	2,52	0,0157	2,28	0,0011	2,52	0,0000	2,21	0,0042
-1	0	1	4	2,36	0,0236	1,94	0,0020	2,39	0,0021	2,00	0,0033
-1	0	-1	4	2,26	0,0609	2,04	0,0050	2,39	0,0159	2,00	0,0018
0	1	1	4	2,46	0,0008	2,18	0,0714	2,45	0,0001	2,11	0,0054
0	1	-1	4	2,75	0,0008	2,00	0,0054	2,45	0,0893	2,11	0,0113
0	-1	1	4	2,36	0,0179	1,98	0,0320	2,45	0,0083	2,11	0,0159
0	-1	-1	4	2,39	0,0065	2,03	0,0630	2,45	0,0038	2,11	0,0058
0	0	0	12	2,55	0,0309	2,21	0,0858	2,57	0,0006	2,19	0,0003

Таблица 3

Коэффициенты регрессии и их абсолютные погрешности
Regression coefficients and their absolute errors

Обозначение	Удельная энергоёмкость Y_1		Степень очистки Y_2	
	Значение, кВт·ч/м ³	Абсолютная погрешность	Значение, мг/л	Абсолютная погрешность
b_0	2,5500	0,0947	2,2100	0,0936
b_1	0,0650	0,0580	0,1087	0,0573
b_2	0,0463	0,0580	0,0150	0,0573
b_3	-0,0288	0,0580	0,0188	0,0573
b_{12}	-0,0275	0,0820	0,0825	0,0811
b_{13}	-0,0175	0,0820	0,0550	0,0811
b_{23}	-0,0650	0,0820	0,0575	0,0811
b_{11}	-0,0175	0,0854	0,0425	0,0844
b_{22}	0,0600	0,0854	-0,0750	0,0844
b_{33}	-0,1200	0,0854	-0,0875	0,0844

Полученные уравнения регрессии показывают, что производительность процесса в исследованном диапазоне варьирования не оказывает существенного влияния на степень очистки, но влияет на удельную энергоёмкость во взаимодействии с исходной концентрацией загрязнений. При этом удельная энергоёмкость

снижается при уменьшении исходной концентрации загрязнений и одновременном увеличении производительности (рис. 2).

Влияние плотности тока электрокоагулятора на оба параметра оптимизации проявляется через квадратичные эффекты, которые указывают, что оптимальные значения этого фактора

находятся на границах интервала варьирования. При этом степень влияния плотности тока на уровень удельных энергозатрат увеличивается при уменьшении производительности процесса очистки (рис. 2а).

Зависимость уровней концентрации загрязнителя от исходной концентрации после очистки подобна зависимости уровней энергозатрат от этих же факторов (рис. 3а). Поэтому параметры оптимизации не являются конфликтующими, и оптимальный по обоим параметрам режим очистки реализуется на границах исследованного интервала варьирования плотности тока электрокоагулятора.

При этом и удельные энергозатраты, и остаточная концентрация загрязнителя после очистки снижаются при уменьшении его исходной концентрации и производительности процесса. Степень очистки, определяемая отношением концентраций загрязнителя до и после очистки, составляет до 99,9 % (рис. 3б).

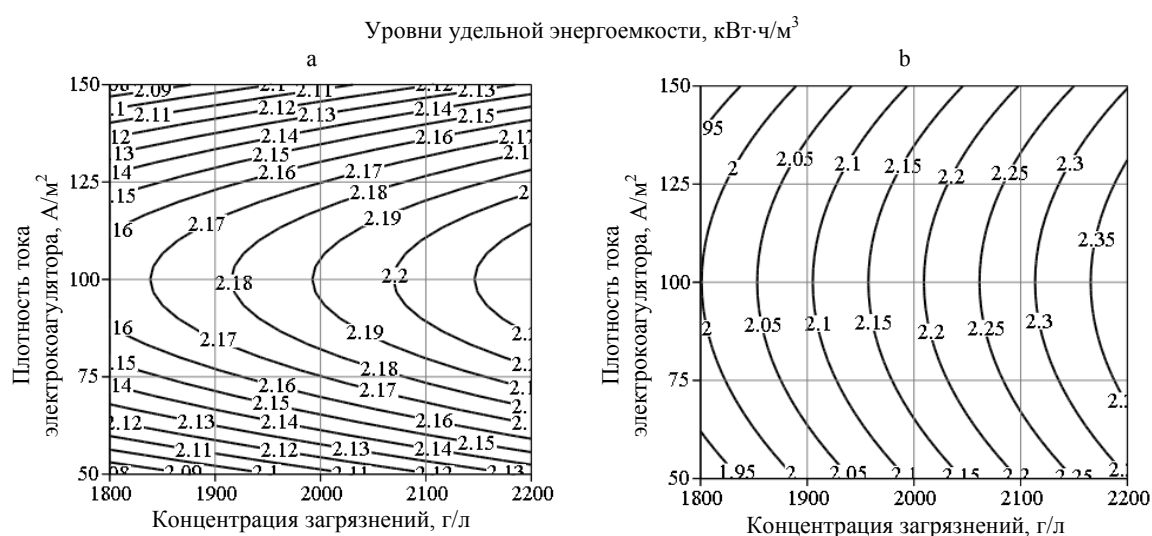


Рис. 2. Уровни удельной энергоёмкости в зависимости от исходной концентрации загрязнений, плотности тока электрокоагулятора при различной производительности процесса очистки: а – 0,3 л/с; б – 0,7 л/с

Fig. 2. Levels of specific energy consumption depending on initial concentration of pollution, current density of electric coagulator at different performance of cleaning process: а – 0.3 l/s; б – 0.7 l/s

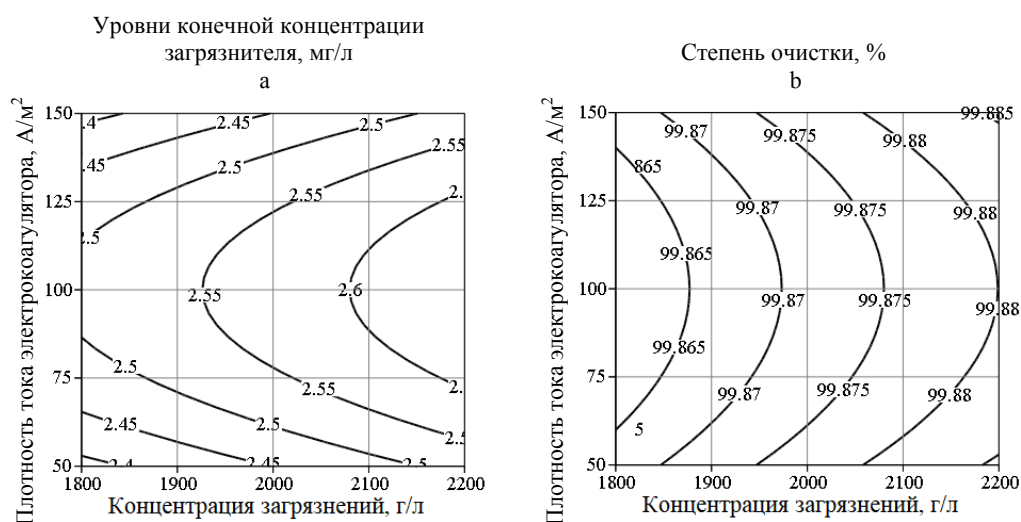


Рис. 3. Уровни концентрации загрязнителя (а) и степень очистки (б) в зависимости от исходной концентрации загрязнений и плотности тока электрокоагулятора

Fig. 3. Pollutant concentration levels (а) and degree of purification (б) depending on initial contaminant concentration and current density of electric coagulator

ВЫВОДЫ

1. Выполнено моделирование оптимизации процесса очистки стоков постов мойки авто-тракторной техники. Получены математические модели и определены оптимальные режимы очистки при наименьших удельных энергетических затратах и достаточно высоком качестве очистки (до 99,9 %).

2. Результаты проведенных исследований показали, что степень очистки стоков постов мойки автотракторной техники на предложенной установке можно достичь при ее производительности $G = 0,7$ л/с, плотности тока $j = 150$ А/м². Полученные значения будут использованы при реализации микропроцессорного управления режимом очистки в качестве управляющего воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крутов, А. В. Очистка сточных вод постов мойки сельскохозяйственной техники с использованием электрических и магнитных полей / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф., 16–17 мая 2006 г., г. Москва: в 5 ч. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. Ч. 2. Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике. С. 230–233.
2. Крутов, А. В. Удаление взвешенных частиц в очистном электромагнитном гидроциклоне / А. В. Крутов, М. А. Бойко // Агропанорама. 2016. № 2. С. 13–18.
3. Мосин, О. В. Технологический расчет установок электрокоагуляции воды / О. В. Мосин // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2014. № 4. С. 62–85.
4. Моделирование промышленных электрофлотаторов с учетом структуры потоков / А. Б. Голованчиков [и др.] // Известия ВолгГТУ. 2007. № 9. С. 15–17.
5. Авдеев, Б. А. Анализ воздействия магнитного поля на процесс сепарации в гидроциклонах / Б. А. Авдеев // Технический аудит и резервы производства. 2013. Т. 13, № 5/4. С. 45–47.
6. Разин, В. М. Математическая модель процесса движения заряженной частицы в веществе при наличии магнитного поля / В. М. Разин // Известия ТПУ. 2003. № 7. С. 44–47.
7. Ксенофонов, Б. С. Флотационная очистка сточных вод / Б. С. Ксенофонов. М.: Новые технологии, 2003. 160 с.
8. Костин, В. Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики / В. Н. Костин. СПб.: Недра, 2003. 120 с.
9. Шантарин, В. Д. Оптимизация процессов электрокоагуляционной доочистки питьевых вод / В. Д. Шантарин, В. В. Завьялов // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды: сб. обзорной информации. 2003. № 5. С. 62–85.
10. Севернев, М. М. Энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве / М. М. Севернев. Минск: Ураджай, 1994. 221 с.

11. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. Л.: Колос, 1980. 168 с.

Поступила 29.07.2019

Подписана в печать 26.09.2019

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Krutau A. V., Boika M. A. (2006) Wastewater Treatment of Agricultural Machinery Washing Stations Using Electric and Magnetic Fields. *Energoobespechenie i Energo-sberezhenie v Sel'skom Khozyaistve: Tr. 5-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., 16–17 maya 2006 g. Ch. 2. Energo-sberegayushchie Tekhnologii v Rastenievodstve i Mobil'noi Energetike* [Power Supply and Energy Saving in Agriculture: Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference, May 16–17, 2006]. Moscow, State Scientific Institution "The All-Russian Scientific–Research Institute for Agriculture Electrification, 230–233 (in Russian).
2. Krutau A. V., Boika M. A. (2016) Removal of Suspended Particles in Treatment Electromagnetic Hydrocyclone. *Agropanorama*, (2), 13–18 (in Russian).
3. Mosin O. V. (2014) Technological Calculation of Water Electrocoagulation Units. *Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie* [Sanitary Engineering, Heating, Air Conditioning], (4), 62–85 (in Russian).
4. Golovanchikov A. B., Vladimtseva I. V., Germasheva Yu. S., Dul'kina N. A. (2007) Modeling of Industrial Electric Flotation Units with Due Account of Flow Structure. *Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Izvestia VSTU*, (9), 15–17 (in Russian).
5. Avdeev B. A. (2013) Analysis of Magnetic Field Effect on Separation Process in Hydrocyclones. *Technicheskii Audit i Rezervy Proizvodstva = Technology Audit and Production Reserves*, 13 (5/4), 45–47 (in Russian).
6. Razin V. M. (2003) Mathematical Model of Charged Particle Motion in Substance in Presence of Magnetic Field. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, (7), 44–47 (in Russian).
7. Ksenofonov B. S. (2003) *Flotation Wastewater Treatment*. Moscow, Novye Tekhnologii Publ. 160 (in Russian).
8. Kostin V. N. (2003) *Optimization Problems of Electric Power Industry*. Saint-Petersburg, Nedra Publ. 120 (in Russian).
9. Shantarin V. D., Zavyalov V. V. (2003) Optimization of Electrocoagulation Post-Treatment of Drinking Water. *Nauchnye i Tekhnicheskiye Aspekty Okhrany Okruzhayushchey Sredy [Scientific and Technical Aspects of Environmental Protection]*, (5), 62–85 (in Russian).
10. Severnev M. M. (1994) *Energy-Saving Technologies in Agricultural Production*. Minsk, Uradzhay Publ. 221 (in Russian).
11. Melnikov S. V., Aleshkin V. R., Roshchin P. M. (1980) *Planning of Experiment in Researches of Agricultural Processes*. Leningrad, Kolos Publ. 168 (in Russian).

Received: 29.07.2019

Accepted: 26.09.2019

Published online: 30.09.2019