

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

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv



Science and Technique V. 15, No 5 (2016)

**International
Scientific and Technical Journal**

Series 1. Mechanical Engineering

Published from January 2002
Publication frequency – bimonthly

Founder
Belarusian National
Technical University

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

- Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Девойно О. Г.,
Оковитый В. В., Асташинский В. М., Храмцов П. П.,
Черник М. Ю., Углов В. В., Соболевский С. Б.**
Формирование и исследование
многослойных композиционных плазменных
оксидных покрытий на элементах
экранной противометеорной защиты 357
- Kalinichenko A. S., Devoino O. G.,
Meshkova V. V.**
Development of Wear Resistant
Coatings Formed by Plasma Spraying
of Alloy Ni-Fe-Cr-Si-B-C System
Reinforced with Ceramics Al_2O_3
(Калиниченко А. С., Девойно О. Г.,
Мешкова В. В.)
Разработка износостойких покрытий,
сформированных плазменным напылением
сплава системы Ni-Fe-Cr-Si-B-C,
упрочненного керамикой Al_2O_3 365
- Кухаренко Г. М., Березун В. И.**
Оценка содержания дисперсных частиц
в отработавших газах дизельных двигателей 371
- Чигринова Н. М., Ловыгин С. И., Чигринов В. Е.**
Роль ультразвука в механизмах
анодно-катодных взаимодействий
при электроискровом легировании 380

CONTENTS

Mechanical Engineering

- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G.,
Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P.,
Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B.**
Formation and Research
of Multi-Layer Composite Plasma
Oxide Coatings Based on Elements
of Screen Meteoroid Protection 357
- Kalinichenko A. S., Devoino O. G.,
Meshkova V. V.**
Development of Wear Resistant
Coatings Formed by Plasma Spraying
of Alloy Ni-Fe-Cr-Si-B-C System
Reinforced with Ceramics Al_2O_3 365
- Kuharonak G. M., Berazun V. I.**
Evaluation of Dispersed Particle Content
in Exhaust Gas of Diesel Engine 371
- Chigrinova N. M., Lovygin S. I., Chigrinov V. E.**
Role of Ultrasound in Mechanisms
of Anode-Cathode Interactions
during Electrospark Alloying 380

Киселев М. Г., Есьман Г. А., Дроздов А. В., Богдан П. С.	
Влияние геометрических параметров лунки, полученной на металлической поверхности в результате воздействия электрического разряда, на ее режущую способность	391
Таяновский Г. А., Калина А. А.	
К обоснованию колесного шасси комбайна для работы с оборудованием уборки свеклы	397
Синькевич Ю. В.	
Концептуальная модель коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки в режиме электроимпульсного полирования.	407
Дьяченко О. В., Кардаполова М. А., Серякова О. В.	
К определению влияния варьирования режимов лазерной обработки на трибологические характеристики режущего инструмента	415
Авраменко А. Н.	
Методика расчетной оценки теплонапряженного состояния головки цилиндра дизельного двигателя с воздушным охлаждением.	420
Карпиевич Ю. Д., Баханович А. Г., Бондаренко И. И.	
Бортовой мониторинг технического состояния силовых агрегатов колесных и гусеничных машин	427
Чигринова Н. М., Воробьева Е. И., Чигринов В. Е.	
Как «научить» сплавы магния противостоять эксплуатационным рискам	435
Ивуть Р. Б., Попов П. В., Мирецкий И. Ю.	
Проектирование сети автотранспортных парков	442

Kiselev M. G., Yesman G. A., Drozdov A. V., Bohdan P. S.	
Effect of Dimple Geometric Parameters Obtained on Metal Surface by Electrical Discharge on its Cutting Ability	391
Tajanowskij G. A., Kalina A. A.	
To Substantiation of Combine Wheeled Chassis for Beet Harvesting Equipment	397
Sinkevitch Yu. V.	
Conceptual Model of Commutation Mechanism for Electric Conductivity of Vapor-Gas Envelope in Electro-Impulse Polishing Mode	407
Diachenko O. V., Kardapolova M. A., Seriakova O. V.	
To Determination of Influence for Variations in Laser Treatment Modes on Tribological Characteristics of Cutting Tool.	415
Avramenko A. N.	
Methodology for Estimation of Heat-Stressed State for Cylinder Head of Diesel Engine with Air Cooling	420
Karpievich Yu. D., Bakhanovich A. G., Bondarenko I. I.	
On-Board Monitoring of Technical State for Power Units of Wheeled and Tracked Vehicles	427
Chigrinova N. M., Vorobiova E. I., Chigrinov V. E.	
How to Make Magnesium Alloys Be Resistant to Operational Risks	435
Ivut R. B., Popov P. V., Miretskiy I. Yu.	
Designing of an Automobile Fleet Network	442

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),
Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
О. Г. ДЕВОЙНО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),

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),
Yu. V. VASILEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
O. G. DEVOINO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

- К. В. ДОБРЕГО* (Белорусский национальный технический университет, 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),
- 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),
- K. V. DOBREGO* (Belarusian National Technical University, 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),
- 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),

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 (Республиканский институт инновационных технологий Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь),
С. А. ЧИЖИК (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
А. Н. ЧИЧКО (Белорусский национальный технический университет, 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)

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 (Republic Institute of Innovative Technologies of the Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
S. A. CHIZHIK (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
A. N. CHICHKO (Belarusian National Technical University, 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

Executive Secretary of Editorial Staff

V. N. Guryanchyk

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

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 22.09.2016. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 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, 2016

Формирование и исследование многослойных композиционных плазменных оксидных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты

Канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾, докт. техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси Ф. И. Пантелеенко¹⁾, докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно¹⁾, асп. В. В. Оковитый¹⁾, докт. физ.-мат. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси В. М. Асташинский²⁾, докт. физ.-мат. наук П. П. Храмцов²⁾, канд. физ.-мат. наук М. Ю. Черник²⁾, докт. физ.-мат. наук, проф. В. В. Углов³⁾, канд. техн. наук С. Б. Соболевский⁴⁾

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

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь),

⁴⁾РУП «БелНИИТ «Транстехника» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Представлены результаты исследования влияния параметров плазменной струи (ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка и степени охлаждения сжатым воздухом на характеристики антиметеорных покрытий, режимы последующей обработки импульсной плазмой. Приведены свойства полученных покрытий и результаты баллистических испытаний. Предлагаемая методика основана на комплексных металлографических, рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследованиях антиметеорного покрытия на основе оксида алюминия. Осуществлена оптимизация параметров плазменного напыления на воздухе для материалов NiAl и Al₂O₃. Оптимизацию параметров напыления проводили на основании получения максимального коэффициента использования материала. Выполнена обработка поверхности модели элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием (вязкий металлический слой NiAl и слой из твердой оксидной керамики Al₂O₃) компрессионным плазменным потоком. В качестве рабочего газа использовали азот. Композиционное покрытие из твердой оксидной керамики Al₂O₃ представляет собой пористую структуру, состоящую из сплавленных частиц Al₂O₃ размером 10–15 мкм. В пространстве между частицами наблюдались металлические вкрапления, образовавшиеся в результате эрозии электродов плазмотрона. После обработки поверхности двухслойных композиционных покрытий компрессионным плазменным потоком на ней в результате нестационарных процессов плавления и перекристаллизации образовался высокопрочный поликристаллический слой. При этом те области поликристаллического слоя, где были

Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

Address for correspondence

Okovity Vyacheslav A.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

металлические вкрапления, оказались окрашенными в различные цвета в зависимости от химического состава вкрапления.

Ключевые слова: плазменное покрытие, оксид алюминия, импульсная плазма, оптимизация процесса, структура покрытия, фазовый состав, баллистическая стойкость

Для цитирования: Формирование и исследование многослойных композиционных плазменных оксидных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 357–364

Formation and Research of Multi-Layer Composite Plasma Oxide Coatings Based on Elements of Screen Meteoroid Protection

V. A. Okovity¹, F. I. Panteleenko¹, O. G. Devoino¹, V. V. Okovity¹, V. M. Astashinsky², P. P. Hramtsov², M. Yu. Chernik², V. V. Uglov³, S. B. Sobolevsky⁴

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

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

³Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),

⁴Republican Unitary Enterprise, Belarusian Research Institute of Transport “Transtekhnika” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents results of research for influence of plasma jet parameters (current, spraying distance, plasma-supporting nitrogen gas consumption), fractional composition of an initial powder and cooling degree by compressed air on characteristics of anti-meteorite coatings, subsequent processing modes by pulsed plasma. Properties of the obtained coatings and results of ballistic tests have been given in the paper. The proposed methodology has been based on complex metallographic, X-ray diffraction and electron microscopic investigations of anti-meteorite aluminum oxide coating. Optimization of air plasma spraying parameters for NiAl and Al₂O₃ materials has been carried out in the paper. The spraying parameters optimization has been executed on the basis of obtaining maximum materials utilization factor. Surface treatment of model screen elements with a double-layer composite coating (adhesive metal NiAl layer and hard ceramic oxide Al₂O₃ layer) has been fulfilled while using compression plasma stream. Nitrogen has been used as working gas. Composite hard ceramic oxide Al₂O₃ coating is represented by porous structure consisting of 10–15 μm-size fused Al₂O₃ particles. Metallic inclusions formed due to erosion of plasmatron electrodes have been observed in the space between the particles. Surface of bilayer composite coatings has been processed by a compression plasma stream and due to nonsteady processes of melting and recrystallization high strength polycrystalline layer has been formed on their surface. In this context, those areas of the polycrystalline layer which had metal inclusions have appeared to be painted in various colors depending on chemical composition of the inclusions.

Keywords: plasma coating, aluminum oxide, pulsed plasma, process optimization, coating structure, phase composition, ballistic resistance

For citation: Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevsky S. B. (2016) Formation and Research of Multi-Layer Composite Plasma Oxide Coatings Based on Elements of Screen Meteoroid Protection. *Science & Technique*. 15 (5), 357–364 (in Russian)

Введение

Эффективность защиты объектов от повреждений при высокоэнергетическом воздействии определяется противоударной стойкостью используемых материалов. Применительно к противометеорной защите космических аппаратов высокопрочные гомогенные и гетерогенные металлы и сплавы, металлокомпози́ты, пористо-волоконистые и другие материалы должны удовлетворять основным требованиям (минимальная плотность, высокие вязкопластичные свойства, твердость) [1–5].

Из общих физических характеристик следует, что эффективность защиты определяется уровнем поглощения кинетической энергии метеорных частиц материалом покрытия.

Не касаясь всех механизмов поглощения энергии, отметим, что значительная ее часть расходуется на упругую и пластическую деформацию материала покрытий. Высокие пластичность и вязкость являются существенным фактором увеличения стойкости. Повышение твердости резко снижает пластичность и вязкость, приводит к хрупкому разрушению. Типичные конструкционные материалы для противометеорных экранов – алюминиевые сплавы, титан, сталь. Еще большей противоударной стойкостью обладают многослойные структуры с твердым керамическим лицевым слоем и подслоем из вязкого металлического материала.

Во многих агрессивных средах, особенно при высоких температурах, оксиды значительно более стойки по сравнению с карбидами,

боридами и нитридами [6–8]. К специфическим свойствам оксидов следует отнести их низкие тепло- и электропроводность. Большинство оксидов, применяемых для напыления покрытий, имеют высокую температуру плавления. Многие из них обладают большой твердостью и износостойкостью. Оксиды, особенно высшие, являясь конечными продуктами окисления, инертны к окислительным средам. Оксидные покрытия наиболее универсальны в условиях эксплуатации и могут быть использованы как коррозионно-стойкие и жаростойкие, теплозащитные, электроизоляционные и износостойкие. Благодаря невысокой стоимости ряда промышленных оксидов и их универсальным эксплуатационным свойствам оксидная группа материалов получила особенно широкое применение в напыленных плазменных покрытиях [9–11]. Цель данной работы – разработка принципов формирования композиционных многослойных покрытий на моделях элементов экранов противометеорной защиты из порошков различного состава, высокотемпературная обработка образцов, исследование свойств покрытий и баллистические испытания полученных моделей.

Оптимизация процесса напыления покрытий на основе оксидной керамики

В процессе плазменного напыления действует большое число факторов, оказывающих влияние на свойства получаемых покрытий. Важнейшими из них, при прочих равных условиях, являются: расход плазмообразующего и транспортирующего газов, расход распыляемого порошка, ток электрической дуги (подводимая мощность), дистанция напыления, скорость перемещения подложки [11]. В качестве примера на рис. 1–6 представлены зависимости эффективности плазменного напыления при атмосферном давлении, характеризовать которые можно с помощью коэффициента использования порошка (распыляемого материала) (КИП), от перечисленных условий напыления. Предварительно выполненные эксперименты показали, что целесообразнее для наглядного анализа влияния технологических параметров использовать два порошка: NiAl – как наиболее типичный представитель металлических сплавов и Al_2O_3 – как представитель оксидных порошков (с различным фракционным составом).

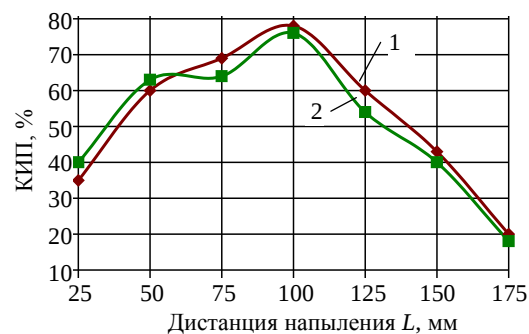


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления L для порошков NiAl: 1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $I = 500$ А; $R_N = 45$ л/мин; $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч

Fig. 1. Powder utilization factor dependence on spraying distance L for NiAl powder:

1 – with fraction of 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; $I = 500$ A; $R_N = 45$ l/min; $R_{\text{powder}} = 4.5$ kg/h

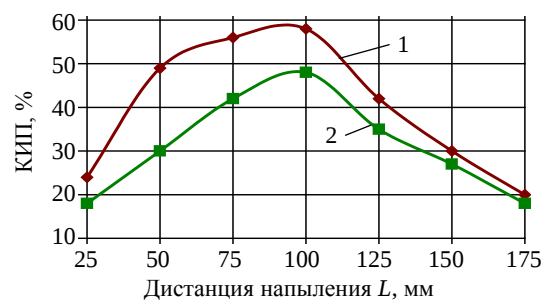


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления L для порошков Al_2O_3 :

1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $I = 500$ А; $R_N = 45$ л/мин; $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч

Fig. 2. Powder utilization factor dependence on spraying distance L for Al_2O_3 powder:

1 – with fraction of 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; $I = 500$ A; $R_N = 45$ l/min; $R_{\text{powder}} = 4.5$ kg/h

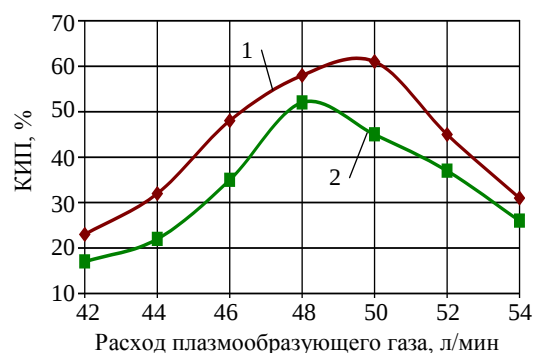


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования порошка от расхода плазмообразующего газа N_2 для порошков Al_2O_3 :

1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $L = 90$ мм; $I = 500$ А; $R_{\text{пор}} = 4,5$ кг/ч

Fig. 3. Powder utilization factor dependence on consumption of N_2 -plasma-forming gas for Al_2O_3 powder: 1 – with fraction of 40–63 μm ; 2 – 63–100 μm ; $L = 90$ mm; $I = 500$ A; $R_{\text{powder}} = 4.5$ kg/h

Сравнительный анализ зависимости КИП данных материалов от дистанции напыления показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения КИП больше для порошка NiAl, что можно объяснить более высокой пластичностью последнего и соответственно меньшим отскоком соударяющихся с подложкой частиц.

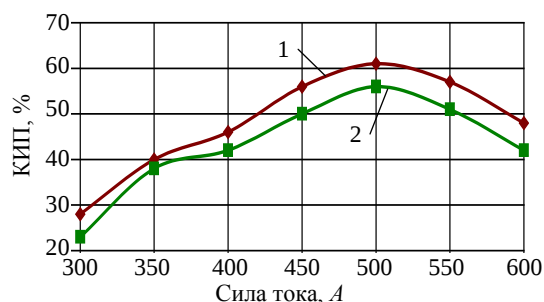


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования порошка от силы тока электрической дуги I для порошков Al_2O_3 : 1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $L = 90$ мм; $R_N = 50$ л/мин; $R_{пор} = 4,5$ кг/ч

Fig. 4. Powder utilization factor dependence on current strength of electric arc I for Al_2O_3 powder: 1 – with fraction of 40–63 μm; 2 – 63–100 μm; $L = 90$ mm; $R_N = 50$ l/min; $R_{powder} = 4.5$ kg/h

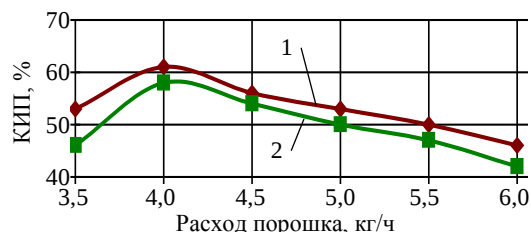


Рис. 5. Зависимость коэффициента использования порошка от расхода порошка $R_{пор}$ для порошков Al_2O_3 : 1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $L = 90$ мм; $I = 500$ А; $R_N = 50$ л/мин

Fig. 5. Powder utilization factor dependence on powder consumption R_{powder} for Al_2O_3 powder: 1 – with fraction of 40–63 μm; 2 – 63–100 μm; $L = 90$ mm; $I = 500$ A; $R_N = 50$ l/min

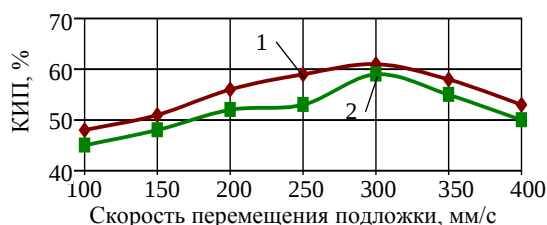


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования порошка от относительной скорости перемещения подложки v_n для порошков Al_2O_3 : 1 – с фракцией 40–63 мкм; 2 – 63–100 мкм; $L = 90$ мм; $I = 500$ А; $R_N = 45$ л/мин

Fig. 6. Powder utilization factor dependence on relative speed of subsurface motion v_n for Al_2O_3 powder: 1 – with fraction of 40–63 μm; 2 – 63–100 μm; $L = 90$ mm; $I = 500$ A; $R_N = 45$ l/min

Обработка поверхности напыленного композиционного покрытия компрессионным плазменным потоком

Обработку поверхности модели элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием (вязкий металлический слой NiAl и слой из твердой оксидной керамики Al_2O_3) компрессионным плазменным потоком производили, во-первых, для того чтобы вызвать в поверхностном слое оксидной керамики нестационарные процессы плавления и перекристаллизации, приводящие к формированию высокопрочного поликристаллического слоя, во-вторых, чтобы в результате теплового импульсного воздействия улучшить характеристики сцепления вязкого металлического слоя NiAl и слоя из твердой оксидной керамики Al_2O_3 . С целью достижения достаточно высокой однородности воздействия компрессионного плазменного потока на технологическую поверхность выбирали оптимальное расстояние между установкой магнитоплазменного компрессора (МПК) и элементом противометеорной защиты в теплоотводящей оправке. В качестве рабочего газа использовали азот. Обработку поверхности модели элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием проводили на установке, представленной на рис. 7, при давлении остаточных газов в вакуумной камере 0,5 торр, емкость батареи конденсаторов МПК 600 мкФ. Напряжение на батарее конденсаторов МПК 7,3 кВ. Результаты фоторегистрации процесса взаимодействия компрессионного плазменного потока с поверхностью элемента противометеорной защиты показаны на рис. 8. Общий вид элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием – вязкий металлический слой NiAl и слой из твердой оксидной керамики Al_2O_3 – приведен на рис. 9, микрофотографии поверхности двухслойных композиционных покрытий – на рис. 10.

Как видно из рис. 10а, композиционное покрытие из твердой оксидной керамики Al_2O_3 представляет собой пористую структуру, состоящую из сплавленных частиц Al_2O_3 размерами 10–15 мкм. В пространстве между частицами наблюдаются металлические вкрапления, образовавшиеся в результате эрозии электродов плазмотрона.

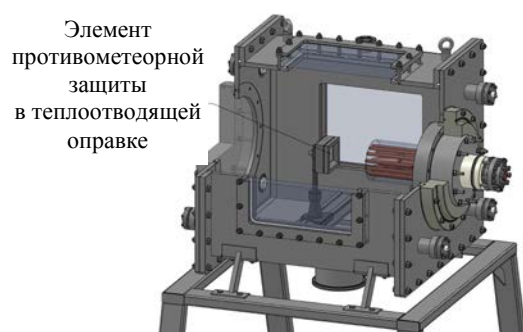


Рис. 7. Общий вид взаимного расположения установки магнитоплазменного компрессора и элемента противометеорной защиты в теплоотводящей оправке

Fig. 7. General view of plant with relative position of magnetic-plasma compressor and meteoroid protection element in heat-eliminating mandrel

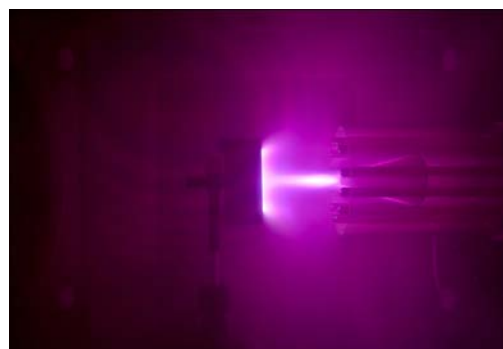


Рис. 8. Взаимодействие компрессионного плазменного потока с поверхностью элемента противометеорной защиты

Fig. 8. Interaction of compression plasma flow with surface of meteoroid protection element

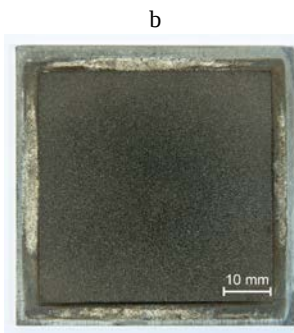
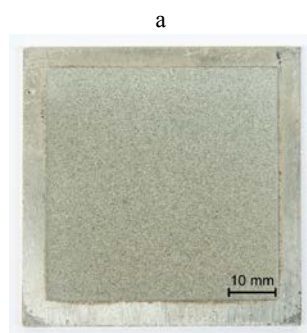


Рис. 9. Образцы элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием: а – до обработки; б – после обработки магнитоплазменным компрессором

Fig. 9. Specimens of elements for screens with bi-layer composite coating: a – prior to processing; b – after processing while using magnetic-plasma compressor

После обработки поверхности двухслойных композиционных покрытий компрессионным плазменным потоком на ней в результате нестационарных процессов плавления и перекристаллизации образуется высокопрочный поликристаллический слой. При этом те области поликристаллического слоя, где были металлические включения, оказались окрашенными в различные цвета в зависимости от химического состава вкрапления.

Результаты исследования микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, проведенные с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ), представлены на рис. 11а. Для увеличения площади поверхности анализируемого изображения шлиф поперечного сечения исходного образца был сделан под углом $\sim 60^\circ$ к нормали поверхности.

Толщина покрытий (с учетом наклона образца) составляет около 375 мкм. При этом внутри

самого покрытия присутствуют области, представляющие собой частицы оксида алюминия Al_2O_3 , а также светлые участки, в которых зафиксировано повышенное содержание металлических включений. Между сформированным покрытием на основе оксида алюминия и подложкой на поперечном сечении обнаружено присутствие подслоя, содержащего алюминий и никель. Сформированные покрытия подвергались воздействию компрессионных плазменных потоков. На рис. 11б представлены РЭМ-изображения участков центральной части покрытия на основе оксида алюминия после воздействия компрессионными плазменными потоками. Анализ поперечного сечения покрытий, подвергнутых воздействию компрессионных плазменных потоков, показал формирование проплавленного слоя толщиной около 6–7 мкм, в котором присутствуют частицы металлов, нерастворенные в расплаве оксида (рис. 12).

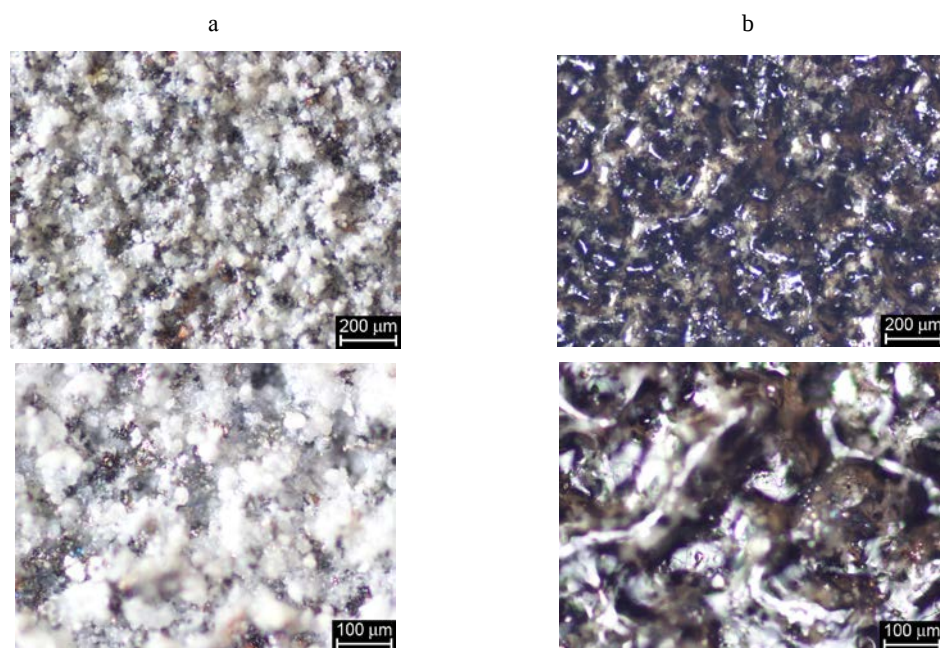


Рис. 10. Микрофотографии поверхности двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический слой NiAl и слой из твердой оксидной керамики Al_2O_3) на моделях элементов защитных экранов:

а – до технологической обработки поверхности элемента компрессионным плазменным потоком; б – после

Fig. 10. Microphotographies of bi-layer composite coating surface (adhesive metal layer NiAl and hard ceramic oxide Al_2O_3 layer) in prototypes of protective screen elements:

а – prior to technological processing of element surface by compression plasma flow; б – the same after processing

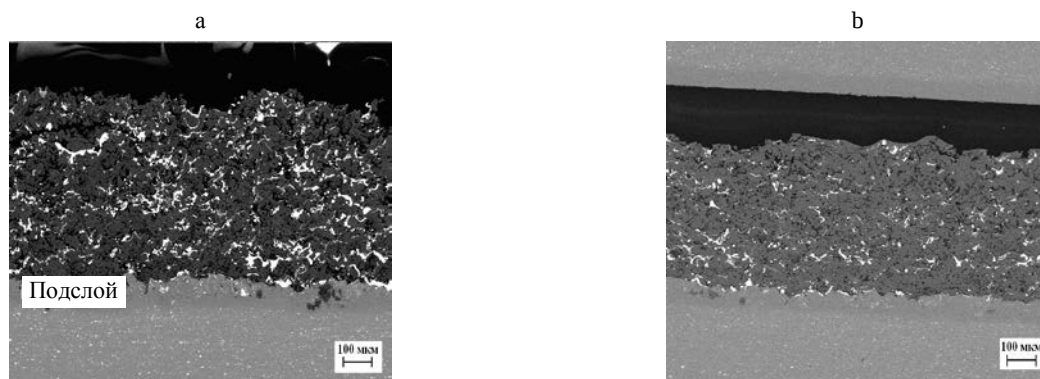


Рис. 11. Растровое электронное микроскопическое изображение поперечного сечения покрытия: а – до воздействия компрессионных плазменных потоков; б – после

Fig. 11. Scanning electronic microscope image of coating cross-section:

а – prior to exposure to compression plasma flows; б – the same after exposure

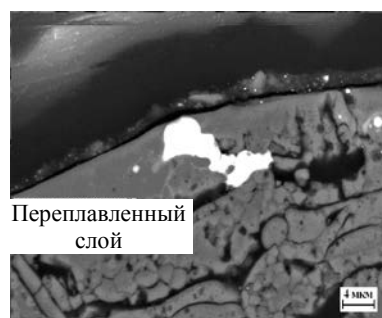


Рис. 12. Растровое электронное микроскопическое изображение поперечного сечения покрытия после воздействия компрессионных плазменных потоков при увеличении $\times 5000$

Fig. 12. Scanning electronic microscope image of coating cross-section after exposure to compression plasma flows with the following increasing $\times 5000$

Баллистические испытания образцов элемента экранной противометеорной защиты

Баллистические испытания описанного выше образца элемента экранной противометеорной защиты проводили на комбинированной легкогазовой установке МПК-7, принцип работы и параметры которой описаны в [12]. Результат воздействия ударника из пирогرافита на образец противометеорной защиты повышенной стойкости (после воздействия МПК) представлен на рис. 13. В качестве метаемой частицы использовался графитовый шарик диаметром 2,5 мм, скорость которого составляла 4,8 км/с.

В результате воздействия ударника на поверхности образца образовался кратер ($d \sim 4$ мм), при этом часть композиционного покрытия в окрестности кратера отслоилась.



Рис. 13. Фотографии элемента экранной противометеорной защиты повышенной стойкости после пробивания

Fig. 13. Photographies of screen meteoroid protection element of high resistance after punching

ВЫВОДЫ

1. Эффективность защиты объектов от повреждений при высокоэнергетическом воздействии определяется противоударной стойкостью используемых материалов. Применительно к противометеорной защите космических аппаратов высокопрочные материалы должны удовлетворять основным требованиям (минимальная плотность, высокие вязкопластичные свойства, твердость). Таким характеристикам соответствуют керамические плазменные покрытия.

2. Проведена оптимизация параметров APS (плазменного напыления на воздухе) процесса

для материалов NiAl и Al_2O_3 . Оптимизацию проводили на основании получения максимального коэффициента использования материала. На оптимальных режимах для NiAl (расход плазмообразующего газа азота $R_N = 45$ л/мин, ток $I = 500$ А, дистанция напыления $L = 100$ мм, фракция порошка 40–63 мкм, расход порошка $R_{пор} = 4,5$ кг/ч) получены покрытия с коэффициентом использования порошка 78 %. На оптимальных режимах для Al_2O_3 (расход плазмообразующего газа азота $R_N = 50$ л/мин, ток $I = 500$ А, дистанция напыления $L = 90$ мм, фракция порошка – 40–63 мкм, расход порошка $R_{пор} = 4,0$ кг/ч, относительная скорость перемещения подложки $v_n = 300$ мм/с) получены покрытия с коэффициентом использования порошка 61 %.

3. Проведена обработка поверхности модели элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием (вязкий металлический слой NiAl и слой из твердой оксидной керамики Al_2O_3) компрессионным плазменным потоком. В качестве рабочего газа использовали азот. Выполнены баллистические испытания образца элемента экранной противометеорной защиты с обработанным композиционным плазменным покрытием из твердой оксидной керамики Al_2O_3 на комбинированной легкогазовой установке МПК-7. В результате воздействия ударника на поверхности образца образовался кратер ($d \sim 4$ мм), при этом часть композиционного покрытия в окрестности кратера отслоилась.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акишин, А. И. Космическое материаловедение / А. И. Акишин. М.: НИИЯФ МГУ, 2007. 209 с.
2. Новые наукоемкие технологии в технике: энцикл.: в 24 т. / под ред. К. С. Касаева. Т. 16, 17: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: ЭНЦИТЕХ, 2001.
3. Akishin, A. I. Effects of Space Conditions on Materials / A. I. Akishin. New York: Nova Science Publ., 2001. 199 p.
4. Кудинов, В. В. Плазменные покрытия / В. В. Кудинов. М.: Наука, 1997. С. 184.
5. Кулик, А. Я. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин. Минск: Машиностроение, 1995. С. 200.
6. Кудинов, В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В. В. Кудинов. М.: Машиностроение, 1981. С. 192.

7. Хасуй, А. Техника напыления / А. Хасуй. М.: Машиностроение, 1975. С. 286.
8. Вяльцев, А. М. Синтез керамических материалов для высокоплотных покрытий / А. М. Вяльцев // Получение и исследование свойств новых материалов. Киев: ИПМ, 1988. С. 149–153.
9. Бузовкина, Т. Б. Исследование теплопроводности и физико-химических характеристик высокотемпературных напыленных покрытий на основе окиси алюминия / Т. Б. Бузовкина. Л., 1973. 21 с.
10. Ильющенко, А. Ф. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. Минск: Беспринт, 2005. С. 253.
11. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В. А. Оковитый [и др.] // Порошковая металлургия. 2008. Вып. 31. С. 156–162.
12. Физические принципы работы двухстадийной легкогазовой магнитоплазменной метательной установки для баллистических испытаний в условиях глубокого вакуума / П. П. Храмцов [и др.] // ИФЖ. 2015. Т. 88, № 5. С. 1118–1126.

Поступила 03.12.2015

Подписана в печать 05.02.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Akishin A. I. (2007) *Space Materials Science*. Moscow, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University. 209 (in Russian).
2. Kasaev K. S. [ed.] (2001) *State-of-the Art High Technologies in Engineering. Encyclopedia Vol. 16, 17. Impact of Space Environment on Materials and Equipment of Spacecrafts*. Moscow, Publishing House "ENTsITEKh". (in Russian).

3. Akishin A. I. (2001) *Effects of Space Conditions on Materials*. New York, Nova Science Publ. 199.
4. Kudinov V. V. (1997) *Plasma Coatings*. Moscow, Nauka. 184 (in Russian).
5. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnukhin A. S. (1995) *Gas Thermal Spraying of Composite Powders*. Minsk, Mashinostroyeniye. 200 (in Russian).
6. Kudinov V. V. (1981) *Plasma-Deposited Refractory Coatings*. Moscow, Mashinostroyeniye. 192 (in Russian).
7. Khasuy A. (1975) *Spray Coating Technology*. Moscow, Mashinostroyeniye. 286 (in Russian).
8. Vialtsev A. M. (1988) Synthesis of Ceramic Materials for High-Density Coatings. *Preparation and Property Investigation of New Materials*. Kiev: Institute for Problems in Materials Science [IPMS], 149–153 (in Russian).
9. Buzovkina T. B. (1973) *Investigation of Thermal Conductivity, Chemical and Physical Characteristics of High-Temperature Sprayed Coatings Based on Aluminum Oxide*. Leningrad. 21 (in Russian).
10. Ilyushchenko A. F., Okovity V. A., Shevtsov A. I. (2005) *Formation of Wear-Resistant Plasma Coatings Based on Composite Self-Lubricating Materials*. Minsk: Publishing House "Besprint". 253 (in Russian).
11. Okovity V. A. [et al.] (2008) Preparation of Composite Ceramic Material for Wear-Resistant Coatings. *Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdovedomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers], 31, 156–162 (in Russian).
12. Khrantsov P. P., Penyazkov O. G., Vasetskii V. A., Grishchenko V. M., Makhnach A. I., Shikh I. A. (2015). Physical Principles of Operation of a Two-Stage Light Gas Magnetoplasma Launcher for High-Vacuum Ballistic Tests. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 88 (5), 1154–1162. DOI: 10.1007/s10891-015-1295-2.

Received: 03.12.2015

Accepted: 05.02.2016

Published online: 26.09.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-365-370

UDC 621.791

Development of Wear Resistant Coatings Formed by Plasma Spraying of Alloy Ni–Fe–Cr–Si–B–C System Reinforced with Ceramics Al_2O_3

A. S. Kalinichenko¹⁾, O. G. Devoino¹⁾, V. V. Meshkova¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Abstract. Creating a functionally oriented, including nanostructured, anti-friction materials and coatings with qualitatively new complex of service properties is an important scientific and practical problem. In particular, for the cable industry it is urgent task of ensuring the high performance properties of fast deteriorating stretching and supporting rollers. Working surfaces of these parts operate under practically dry friction conditions with constantly updated material of stretching wire. Plasma spraying is one of the widely used methods of surface engineering to create wear resistant coatings and which is characterized with process flexibility and the ability to create coatings using various materials and alloys including composite ones. The installation UPU-3D with the PP-25 plasma torch was used for plasma spraying. The thickness of the sprayed layer was 0.8–1.1 mm. As a material for the deposition of composite coatings a powder mixture of self-fluxing nickel alloy PG-HN80SR4 (system Ni–Fe–Cr–Si–B–C) and a neutral oxide ceramics Al_2O_3 was used. The amount of ceramics varied from 15 to 33 %. This ceramic oxide was selected due to the desire to reduce coatings' costs while providing high durability. Carried out phase and microstructural studies have shown when ceramics was added in an amount more than 20 % a formation of conglomerates formed by not melted alumina particles often was observed. These conglomerates serve as crack formation centers in the coating. The phase composition of the coatings practically does not depend on the content of ceramics compounds. Tribological tests have shown that the best results were obtained when the content of the oxide ceramic in the coating was in the range from 15 to 20 %.

Keywords: plasma wear-resistant coatings, oxide ceramics, microstructure, phase composition, tribological properties

For citation: Kalinichenko A. S., Devoino O. G., Meshkova V. V. (2016) Development of Wear Resistant Coatings Formed by Plasma Spraying of Alloy Ni–Fe–Cr–Si–B–C System Reinforced with Ceramics Al_2O_3 . *Science & Technique*. 15 (5), 365–370 (in Russian)

Разработка износостойких покрытий, сформированных плазменным напылением сплава системы Ni–Fe–Cr–Si–B–C, упрочненного керамикой Al_2O_3

Доктора техн. наук, профессора А. С. Калиниченко¹⁾, О. Г. Девойно¹⁾, асп. В. В. Мешкова¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Создание функционально ориентированных, в том числе наноструктурированных, антифрикционных материалов и покрытий, обладающих качественно новым комплексом служебных свойств, является важной научной и практической задачей. В частности, для кабельного производства актуальна задача обеспечения высоких эксплуатационных свойств быстроизнашивающихся протягивающих и поддерживающих роликов кабельного производства. Рабочие поверхности этих деталей работают в условиях практически сухого трения при постоянно обновляющемся материале протягиваемой проволоки. Один из широко применяемых методов инженерии поверхности для создания износостойких покрытий – плазменное напыление, которое характеризуется гибкостью процесса и возможностью создавать покрытия из различных материалов и сплавов, включая композиционные покрытия. Для плазменного напыления использовали установку УПУ-3Д с плазмотроном ПП-25. Толщина напыленного слоя составила 0,8–1,1 мм. В качестве материала для создания композиционных покрытий применяли смесь порошков самофлюсующегося нике-

Адрес для переписки

Калиниченко Александр Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 296-66-86
akalinichenko@bntu.by

Address for correspondence

Kalinichenko Alexander S.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 296-66-86
akalinichenko@bntu.by

левого сплава ПГ-ХН80СР4 (системы Ni-Fe-Cr-Si-B-C) и нейтральной оксидной керамики Al_2O_3 . Количество вводимой керамики изменялось от 15 до 33 %. Выбор данной оксидной керамики обусловлен стремлением снизить стоимость покрытия при обеспечении высокой износостойкости. Проведенные микроструктурные и фазовые исследования показали, что при вводе керамики в количестве более 20 % чаще наблюдается образование конгломератов из непроплавившихся частиц оксида алюминия, которые служат центрами образования трещин в покрытии. Фазовый состав покрытий практически не зависел от содержания керамики. Триботехнические испытания показали, что лучшие результаты получаются при содержании оксидной керамики в покрытии 15 и 20 %.

Ключевые слова: плазменные износостойкие покрытия, оксидная керамика, микроструктура, фазовый состав, триботехнические свойства

Для цитирования: Калиниченко, А. С. Разработка износостойких покрытий, сформированных плазменным напылением сплава системы Ni-Fe-Cr-Si-B-C, упрочненного керамикой Al_2O_3 / А. С. Калиниченко, О. Г. Девойно, В. В. Мешкова // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 365–370

Introduction

In modern mechanical engineering scientific and applied studies in the field of developing functionally oriented, including nanostructured, anti-friction materials and coatings with qualitatively new service complex of properties are intensively carried out. This is especially true for new technical applications.

In this regard, the achievements of surface engineering can provide the creation of new high-quality materials in a much shorter development time. Depending on the technological methods and processing modes, different kinds of surface properties, such as optical properties and mechanical properties can be locally improved while maintaining the properties such as the strength of the base material. The application of these developments in friction pairs can significantly expand the range of operation modes, load capacity and service life of friction units [1].

Currently, plasma spraying process is rather widespread both for surface hardening and restoration of worn-out surfaces. Advantages of this process are flexibility and possibility to deposit different materials including ceramics onto surface of substrate [2].

From the standpoint of practical realization plasma spraying could be divided into three groups depending on the feedstock and its state within the plasma: plasma spraying CVD, plasma spraying PVD and plasma spraying of powder [3, 4]. New methods of plasma spraying process occur on a regular basis and, as a result, there are new scientific questions should be solved. For example, there is a spraying the liquid raw material in the form of particles of submicron size or chemicals in a solvent when coating is formed by condensa-

tion of these materials on the substrate. This relatively new technology makes possible the production of thinner coatings compared to air plasma spraying with the formation of ultrafine or nano-size microstructures [5]. The new process of tunnel gas plasma spraying can provide high quality ceramic coatings based on Al_2O_3 and ZrO_2 on steel SUS304 substrate as compared with other plasma method. In particular, coating based on the ZrO_2 has high surface hardness and a gradient distribution of hardness within the deposited layer [6].

Coatings made of self-fluxing alloys are recommended for the protection of surfaces from wear under the simultaneous action of corrosive environment and high temperatures with moderate shock loads. These alloys have high performance properties, but their use is limited by high cost. Self-fluxing powder materials based on Ni-Cr-B-Si-C system are rather attractive as they can also be the basis for deposition of coatings with composite structure [7]. Classical technology for production of composite wear-resistant coatings based on self-fluxing alloy is the addition of tungsten carbide powder resulting in an additional increase in the cost of technology. So, it is more attractive to use materials that can reduce cost of coating while maintaining a high level of physical, mechanical and service properties. In particular, alumina powder could be considered as an addition to self-fluxing alloy to form a composite structure. Thus, the problems can be solved concerning the technology cost and improvement of the tribological properties of coatings. Moreover, the adhesion component of friction force can be reduced as alumina is chemically neutral to the material of stretching wire.

This approach to the development of wear-resistant composite coatings has been applied to

solve the problem of increasing service life of stretching rollers used in the cable production. Working surfaces of these rollers are operated under practically dry friction conditions with constantly updated material of stretching wire. Under these conditions there is exposure of juvenile surfaces which leads to the growth of the adhesive component of friction force and increased wear of working surfaces of the rollers resulting in deterioration of rolling wire.

The purpose of this work was to develop a composition of wear-resistant coatings for spraying on a working surface of stretching rollers for cable production, as well as the analysis of their structure and tribological properties.

Experimental Procedures

Plasma spraying technology for the formation of wear-resistant coatings was used. A powder mixture of self-fluxing nickel-basis alloy PG-HN80SR4 (system Ni–Fe–Cr–Si–B–C) and a neutral oxide ceramics Al_2O_3 was applied as a coating material. Selection of ceramics based on $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ was due to its considerable practical interest [8], as well as aiming lowering the processing costs and reduce the interaction between copper wire and self-fluxing nickel matrix coating. Powder of neutral oxide ceramics Al_2O_3 was added in an amount from 15 to 33 %.

The installation UPU-3D with the PP-25 plasma torch was used for plasma spraying deposition. As plasma and carrier gas nitrogen was used. Arc voltage – 80 V, current was 410 A; volumetric flow rate of plasma gas (N_2) $G = 40\text{--}50$ l/min. The thickness of the sprayed layer was in the range from 0.8 to 1.1 mm. To improve the adhesion be-

tween the coating and base material samples were preliminary coated with a thin layer of self-fluxing alloy. The coating was formed in cladding mode with melting (specimens were preheated to 800 °C).

To analyze the coating microstructure investigations were performed using optical and electron microscopy. X-ray studies were carried out with an automated X-ray complex on the basis of diffractometer DRON-3M in scan mode with step 0.1° and using Cu- K_α -radiation according to conventional methods [9]. Micro-hardness of the sprayed layers was determined using PMT-3 unit.

Results and Discussion

Studies have shown that it is inappropriate to increase the content of aluminum oxide powder above 25 % due to danger of conglomerates formation, porosity and deterioration of the coating quality [10].

For not optimal conditions of plasma spraying one can observe in a coating along with dispersed aluminum oxide particles conglomerates of aluminum oxide serving as a source of crack development during solidification due to different values of thermal expansion coefficients (Fig. 1 and Tabl. 1). Furthermore, in the coating tungsten compounds are observed due to erosion of the plasma torch.

There was a danger of “floating” Al_2O_3 particles towards the outer surface of the coating due to significant difference in the specific density of the oxide ceramics and self-fluxing nickel matrix. However, studies of the material structure under optimized spraying conditions showed that Al_2O_3 particles were evenly distributed over the volume of the coating for various ceramics content (Fig. 2, 3).

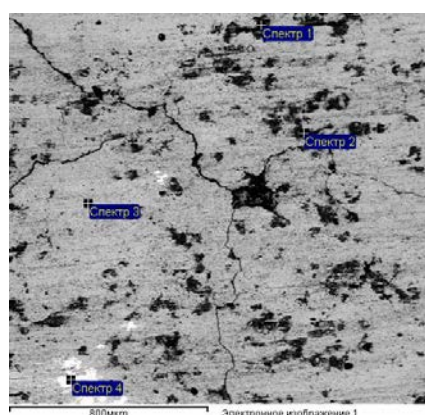


Fig. 1. Microstructure of coating and X-ray data for non-optimal plasma spraying conditions

Results of X-ray analysis

Spectrum	For stat.	Al	Si	Cr	Fe	Ni	W	Sum
Spectr. 1	Yes	40.84	3.95	11.16	2.67	41.38		100.00
Spectr. 2	Yes	73.26	8.81	8.74	2.60	6.59		100.00
Spectr. 3	Yes		4.71	7.29	3.76	84.23		100.00
Spectr. 4	Yes			4.43	1.54	20.97	73.07	100.00
Max.		73.26	8.81	11.16	3.76	84.23	73.07	
Min.		40.84	3.95	4.43	1.54	6.59	73.07	

Table 1

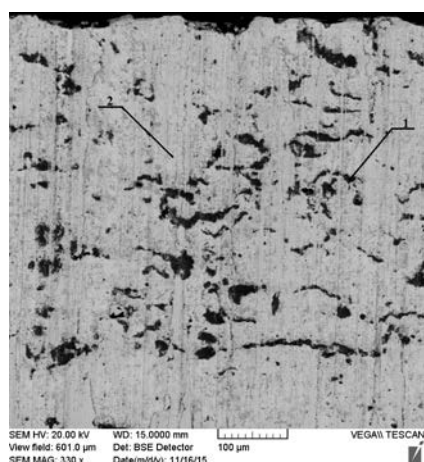


Fig. 2. Microstructure of coating with 15 % Al_2O_3 :
1 – particle of Al_2O_3 ; 2 – matrix

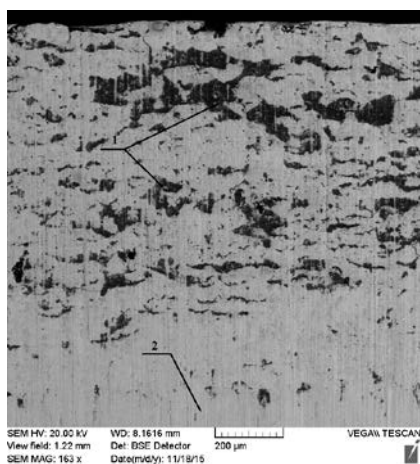


Fig. 3. Microstructure of coating with 25 % Al_2O_3 :
1 – particles of Al_2O_3 ; 2 – matrix

Analysis of the microstructures showed that all coatings, regardless of the Al_2O_3 concentration, had a similar structure: base – Nickel eutectic with distributed fine particles of chromium compounds and rather big particles of aluminium oxide, often having a lamellar form (a consequence of particles melting in the plasma jet). Sometimes there were non-melted Al_2O_3 particles having a spherical shape as well as conglomerates of the oxide particles. Chemical interaction of aluminum oxide with components of self-fluxing alloy was not observed.

Analysis of phase composition showed that all coatings observed had following phases: a Nickel matrix, intermetallic compounds Cr_7Ni_3 and (Fe, Ni) , nickel borides Ni_3B , Ni_2B , Ni_3B ; nickel silicide Ni_3Si , chromium borides CrB , Cr_2B ; chromium

carbides Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 . All these phases are classical in plasma coatings made of self-fluxing alloys on nickel-chromium basis.

The next research step was devoted to tribological tests. Counter body was made of tool steel U8 ($H_v = 810\text{--}820 \text{ kg/mm}^2$). The tests were performed at a load $P = 1.5 \text{ MPa}$ for dry friction mode during 15.360 cycles, which corresponds to the testing distance 921.6 m.

Weight loss of samples at the end of the tests was in the range from 3.80 mg to 14.75 mg. Moreover, it was found that the amount of weight loss depended on the surface roughness, especially for the running-in stage. Analysis of weight loss dependence on the number of cycles shows that after the running-in process (2048 cycles for coatings containing 15; 25 and 33 % of ceramics and 5120 – for one with 25 % of ceramics) this relation can be described as linearly dependence with different inclination (Fig. 4). One can see when ceramic content is 20 % the tangent of the line is significantly higher than for other samples. In our opinion this was due to greater surface roughness of the coating containing 20 % ceramic.

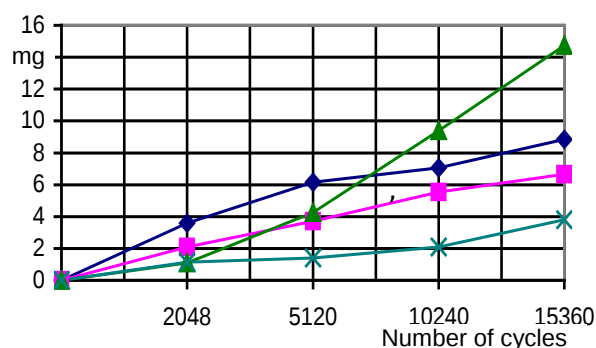


Fig. 4. Dependence of coatings' weight loss on number of cycles for different content of ceramic powder:
—♦— 25 %; —■— 15%; —▲— 20%; —×— 33 %

Since the tribological tests require long time then to estimate expected future behavior of coatings it is important to analyze the rate of specific weight loss (Fig. 5).

Analysis of the specific mass loss defined as $\Delta m_i / (l_i - l_{i-1})$ shows that when the content of ceramics is 15 % after running-in stage the rate significantly reduces for all remaining friction distance. For coatings with 20 % of oxide powder stabilization of weight loss rate is also observed.

For coatings containing 25 % ceramics, there is a high mass loss rate during running-in stage and then it sharply decreases. High mass loss rate during running-in stage can be explained by low ceramics concentration in upper layer of coating (Fig. 3). Further reduction of mass loss rate is due to influence of oxide particles. Due to high volumetric content oxide particles are not covered with matrix material and can be mechanically removed out from layer during service. As a result the tendency shows again the rise of mass loss rate.

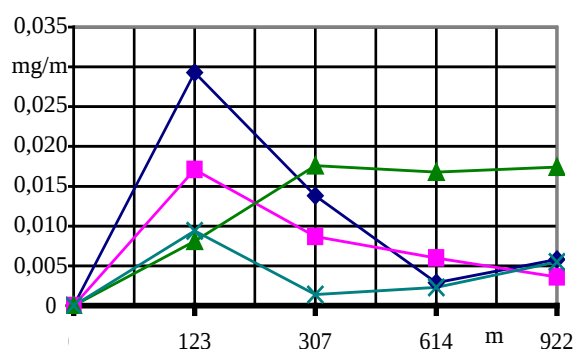


Fig. 5. Dependence of specific weight loss on friction distance for different content of ceramic powder:

—◆— 25 %; —■— 15%; —▲— 20%; —×— 33 %

Coatings with 33 % of alumina are characterized with similar mass loss behavior but at smaller rate value during running-in stage. Rate values become practically equal after 2/3 of friction distance both for coating with 25 % of ceramics and one with 33 % of oxide powders with tendency for growth.

Changes in the coefficient of friction during the tests for different content of ceramics were determined aiming obtaining additional information on the tribological properties of composite coatings (Fig. 6). For comparison, the changes of the friction coefficient for coatings without ceramic additions were determined during tests at load of 1.0 MPa.

The nature of the changes of friction coefficients shows that all coatings containing ceramics are characterized with running-in period. Duration of this period varies from 15 % (coating with 20 % of ceramics) to 65 % (coating with 33 % of ceramics) of total test cycles. At the end of the test coatings containing above 20 % of ceramics are characterized with higher coefficient of friction

than the non-modified coatings (without oxide ceramics). Coatings containing up to 20 % of alumina are characterized with lower coefficient of friction as compared to coatings of pure self-fluxing alloy and coatings containing 25 and 33 % of ceramics after 10300 cycles. The best combination of the tribological properties was obtained for coating with 15 % of oxide ceramics (Fig. 5, 6).

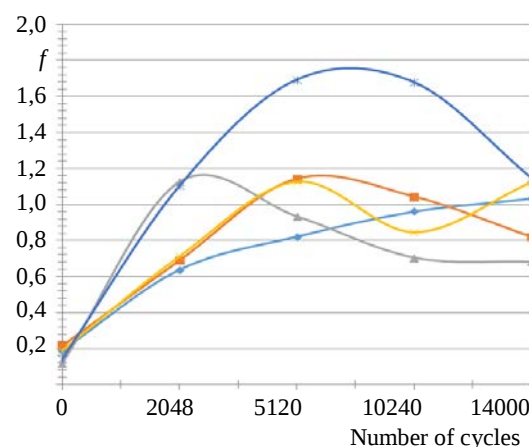


Fig. 6. Dependence of friction coefficient on number of cycles for coatings with different content of ceramic powder:

—◆— clean SR4; —■— 15 %; —▲— 20%; —×— 25%; —*— 33 %

CONCLUSIONS

1. Investigations have established the positive influence of adding oxide ceramics Al_2O_3 into spraying mixture on the tribological properties of the coatings made of self-fluxing alloys due to formation of composite structure.

2. The study of the phase composition showed that all coatings observed were characterized with classical phase composition of the plasma coatings made of self-fluxing nickel-chromium alloys: Nickel matrix, intermetallic compounds Cr_7Ni_3 and (Fe, Ni) , nickel borides NiB , Ni_2B , Ni_3B ; nickel silicide Ni_3Si , chromium borides CrB , Cr_2B ; chromium carbides Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 .

3. Coatings containing up to 20 % of oxide ceramics were characterized with lower friction coefficients compared to coatings formed by pure self-fluxing alloy or when the ceramic content was 25 % or higher. The best combination of the tribological properties was obtained for coating with 15 % of oxide ceramics.

REFERENCES

1. Paul, K. Chu. Surface Engineering and Modification of Materials. Paper No PL005. Available at: <http://www.meeting.edu.cn/meeting/webmedia/jingpin/icse2011/pic/abstract.pdf>. (Accessed: 12.05.2016).
2. Das S., Chanda A., Banerjee G. (2013). Plasma Spray: A Proposed Augmentation to Achieve Better Orthopedic Coating for Industrial Application. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 2 (5), 72–81.
3. Yoshida T. Innovative Plasma Spray Technology for Advanced Coatings. Paper No PL009. Available at: <http://www.meeting.edu.cn/meeting/webmedia/jingpin/icse2011/pic/abstract.pdf>. (Accessed: 12.05.2016).
4. International Thermal Spray Association. Available at: <http://www.mecpl.com/pdf-files/what-is-thermal-spray.pdf>. (Accessed: 10.05.2016).
5. Vardelle A., Moreau C., Themelis N. J., Chazelas C. (2015) A Perspective on Plasma Spray Technology. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 35 (3), 491–509. Doi: 10.1007/s11090-014-9600-y.
6. Kobayashi A., Ando Y. High Heat Resistant Coatings Formed by Gas Tunnel Type Plasma Spraying. Paper No. I031. Available at: <http://www.meeting.edu.cn/meeting/webmedia/jingpin/icse2011/pic/abstract.pdf>. (Accessed: 12.05.2016).
7. Simunovic K. Thermal Spraying. *Welding Engineering and Technology. EOLSS*. Available at: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/e6-171-17-00.pdf>. (Accessed: 12.05.2016).
8. Dubsky J., Chraska P., Kolman B., Stahr C. C., Berger L.-M. (2011) Phase Formation Control in Plasma Sprayed Alumina – Chromia Coatings. *Ceramics – Silikaty*, 55 (3), 294–300.
9. Tushinskii L. I., Plokhov A. V., Tokarev A. O., Sindeev V. I. (2004) *Methods of Materials Investigations: Structure, Properties and Processes for Deposition of Non-Organic Coatings*. Moscow, Publishing House “Mir”. 384 (in Russian)..
10. Kalinichenko A. S., Devoino O. G., Meshkova V. V. (2015) Influence of Oxide Ceramics Content on Structure and Properties of Nickel-Chromium Plasma Coatings. *Sovremennye Metody i Tekhnologii Sozdaniia i Obrabotki Materialov: Sb. Nauch. Tr. Kn. 2. Tekhnologii i Oborudovanie Mekhanicheskoi i Fiziko-Tekhnicheskoi Obrabotki* [Modern Methods and Technologies for Development and Treatment of Materials: Collection of Research Papers. Book. 2. Technologies and Equipment for Mechanical and Physicotechnical Processing]. Minsk, Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 171–174 (in Russian).

Received: 24.06.2016

Accepted: 29.08.2016

Published online: 26.09.2016

ЛИТЕРАТУРА

1. Paul, K. Chu. Surface Engineering and Modification of Materials [Electronic resource] / K. Chu Paul // Paper No PL005. Mode Access: <http://www.meeting.edu.cn/meeting/webmedia/jingpin/icse2011/pic/abstract.pdf>. Date access: 12.05.2016.
2. Das, S. Plasma Spray: a Proposed Augmentation to Achieve Better Orthopedic Coating for Industrial Application / S. Das, A. Chanda, G. Banerjee // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). 2013. Vol. 2, Iss. 5. P. 72–81.
3. Yoshida, T. Innovative Plasma Spray Technology for Advanced Coatings [Electronic resource] / T. Yoshida // Paper No PL009. Mode access: <http://www.meeting.edu.cn/meeting/webmedia/jingpin/icse2011/pic/abstract.pdf>. Date access: 12.05.2016.
4. International Thermal Spray Association [Electronic resource]. Mode access: <http://www.mecpl.com/pdf-files/what-is-thermal-spray.pdf>. Date access: 10.05.2016.
5. A Perspective on Plasma Spray Technology / A. Vardelle [et al.] // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. Vol. 35, Iss. 3. P. 491–509.
6. Kobayashi, A. High Heat Resistant Coatings Formed by Gas Tunnel Type Plasma Spraying [Electronic resource] / A. Kobayashi, Y. Ando // Paper No I031. Mode access: <http://www.meeting.edu.cn/meeting/webmedia/jingpin/icse2011/pic/abstract.pdf>. Date access: 12.05.2016.
7. Simunovic, K. Thermal Spraying [Electronic resource] / K. Simunovic // Welding Engineering and Technology. EOLSS. Mode access: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/e6-171-17-00.pdf>. Date access: 12.05.2016.
8. Phase Formation Control in Plasma Sprayed Alumina – Chromia Coatings / J. Dubsky [et al.] // Ceramics – Silikaty. 2011. Vol. 55, No 3. P. 294–300.
9. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский [и др.]. М.: Мир, 2004. 384 с.
10. Калиниченко, А. С. Влияние содержания оксидной керамики на структуру и свойства никельхромовых плазменных покрытий / А. С. Калиниченко, О. Г. Девойно, В. В. Мешкова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн. / редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. Кн. 2: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. С. 171–174.

Поступила 24.06.2016

Подписана в печать 29.08.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-371-379

УДК 621.436

Оценка содержания дисперсных частиц в отработавших газах дизельных двигателей

Докт. техн. наук, проф. Г. М. Кухаренок¹⁾, В. И. Березун²⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),²⁾ОАО «УКХ «Минский моторный завод» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016

Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Загрязнения атмосферы выбросами вредных веществ ухудшают экологическую обстановку в мире. Отработавшие газы дизельных двигателей являются одним из основных загрязнителей окружающей среды. На текущий момент не удается определить степень и границу порогового уровня загрязнения воздуха, ниже которого частицы не оказывают влияния на здоровье человека. В статье рассмотрены актуальные вопросы нормирования и контроля дисперсных частиц. Для исследовательских работ наиболее удобны методы измерения, обеспечивающие быстрое получение результата. Однако легитимным, с точки зрения законодательства, является гравиметрический способ исследования, требующий соблюдения определенной процедуры регулировок и расчетов. Он предусматривает наличие сложной системы разбавления пробы, настройка которой должна учитывать как температурные, так и кинетические параметры измеряемого потока. Для обеспечения точности измерения и воспроизводимости результатов загрузка фильтра должна находиться в регламентируемом диапазоне, для чего параметры разбавления следует выбирать не только исходя из типа двигателя, но и из его уровня выброса. Способы оценки горячей пробы отработавших газов обладают большим быстродействием, а результаты коррелируются с показателями эффективности сгорания. Однако такой подход не учитывает ряд процессов, происходящих при остывании газов в окружающей среде. Поэтому в данном случае результаты измерения должны оцениваться в рамках определенных граничных условий применительно к объекту исследования. Трудность достижения современных экологических норм обусловлена сложным фракционным составом и многостадийностью процесса образования вредных компонентов. Приведены расчетные зависимости между частицами и дымностью, сделан их сравнительный анализ. Проанализированы методы измерения и исследования дисперсных частиц на основании результатов испытания двигателя при различных значениях параметров топливоподачи (давления впрыска и угла опережения впрыска топлива).

Ключевые слова: дисперсные частицы, дымность, фракционный состав

Для цитирования: Кухаренок, Г. М. Оценка содержания дисперсных частиц в отработавших газах дизельных двигателей / Г. М. Кухаренок, В. И. Березун // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 371–379

Evaluation of Dispersed Particle Content in Exhaust Gas of Diesel Engine

G. M. Kuharonak¹⁾, V. I. Berazun²⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),²⁾OJSC “Minsk Motor Plant” Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Pollution of an atmosphere due to hazardous substances emissions deteriorates ecological environment in the world. Exhaust gases of diesel engines are considered as one of the main environmental pollutants. At the moment it is not possible to determine rate and limits of threshold level of air pollution which do not affect human health. The paper considers current issues pertaining to regulation and control over dispersed particles. The most convenient measuring methods for investigations are those which provide the opportunity to obtain immediate results. However, from the legislative point of view, a gravimetric investigation method is a legitimate one which requires compliance with certain procedures of adjustments and calculations. The method presupposes availability of complicated system for sample dilution and its adjustment must include temperature and kinetic parameters of the measured flow. In order to ensure measuring accuracy and results reproducibility filter loading

Адрес для переписки

Кухаренок Георгий Михайлович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-81-86
dvs_atf@bntu.by

Address for correspondence

Kuharonak Georgy M.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-81-86
dvs_atf@bntu.by

should be in a regulated range and dilution parameters should be chosen according to not only engine type but also according to its emissions rate. Methods for evaluation of a hot exhaust gas sample is characterized by higher response and the results correlate with indices of combustion efficiency. However, such approach does not account for a number of processes that take place during gas cooling in the environment. Therefore, in this case, measuring results are to be evaluated within certain boundary conditions with respect to the object of investigations. Difficulty in achievement of modern ecological standards is substantiated by complicated fractional composition and multiple stage process in formation of hazardous components. The paper presents calculated dependences between particles and smokiness and contains a comparative analysis. Methods for measurement and investigations of dispersed particles have analyzed on the basis of the results obtained during engine tests at various values of fuel supply parameters (injection pressure and timing advance angle of fuel injection).

Keywords: dispersed particles, smokiness, fractional composition

For citation: Kuharonak G. M., Berazun V. I. (2016) Evaluation of Dispersed Particle Content in Exhaust Gas of Diesel Engine. *Science & Technique*. 15 (5), 371–379 (in Russian)

Введение

Обеспокоенность мирового сообщества климатическими изменениями на планете и загрязнением атмосферы порождает развитие программ по совершенствованию технологических процессов и ограничению выбросов. О глобальности проблемы говорит факт проведения экологических конференций по климату на межгосударственном уровне, результатом которых зачастую является наложение ряда обязательств по сокращению выбросов. Цель последней конференции (COP 21), прошедшей с 30 ноября по 12 декабря 2015 г. в Ле-Бурже во Франции, – подписание международного соглашения по поддержанию увеличения средней температуры планеты на уровне ниже 2°C , применимого ко всем странам. По мнению климатологов, все предпринимаемые меры носят лишь внешний характер, ввиду того что ограничение выбросов не является обязательным, а подписанные документы не предусматривают серьезной ответственности за нарушение соглашений.

Одним из основных загрязнителей воздуха, оказывающих негативное влияние на здоровье человека, являются взвешенные в воздухе частицы. Считается, что частицы с аэродинамическим диаметром более 10 мкм (PM-10) удаляются из атмосферы в течение нескольких часов после выброса. Частицы же с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм (PM-2,5) могут сохраняться в атмосфере до нескольких недель и способны беспрепятственно попадать в низкие области легких и альвеолы [1].

Говоря о нормировании дисперсных частиц, выбрасываемых дизельными двигателями, следует отметить, что практически во всех стандартах ограничивающим показателем является массовая характеристика выбросов. И только в нормах для колесных транспортных средств

финального уровня дополнительно введен качественный показатель – ограничение количества частиц [2, 3]. Для внедорожной техники такой показатель отсутствует вовсе, даже для техники экологического уровня Stage 4.

Сегодня не удастся определить степень и границу порогового уровня загрязнения воздуха, ниже которого частицы не оказывают влияния на здоровье человека [1]. Однако после изучения современных научных подходов рабочая группа Всемирной организации здравоохранения пришла к выводу, что такой предел может существовать только в области нижних границ значений мониторинга, проводимого на территории Европы в настоящее время. Для достижения такого уровня регламентируемый выброс дисперсных частиц от двигателя, действующий на территории Европейского союза с 1992 г., должен был снизиться с 3,60 до 0,01 г/(кВт·ч) по циклу ESC.

Основная часть

На территории Евразийского таможенного союза за основу правил экологической безопасности взята европейская интерпретация, отраженная в технических регламентах со смещением сроков введения [4, 5]. Следуя европейскому сценарию, отечественные предприятия берут на вооружение уже выработанные мировые стратегии и подходы достижения современных норм, не участвуя в формировании и выработке критериев оценки токсичности выбросов, а также в выделении областей наибольшего влияния на фактор загрязнения.

По данным [6], предотвращение ущерба от транспортного средства в стоимостном выражении при переходе на более высокий экологический класс имеет нисходящую тенденцию, в то время как затраты на производство и сложность конструкции растут. Поэтому для раз-

живающихся стран, оказавшихся в роли догоняющих, справедлив вопрос: а являются ли адекватными столь высокие требования к двигателям без соответствующего нормирования сопряженных областей-источников вредных веществ? В отличие от стран с развитой экономикой, которые могут позволить себе принятие волевых решений, большинство вынуждены прагматично относиться к экологическому вопросу. Так, при проведении исследований продуктов износа шин и фрикционных материалов тормозов различных производителей на российском рынке было установлено превышение уровня нормативов выброса твердых частиц от отработавших газов в течение срока службы грузовых автомобилей и городского транспорта: шинами – в 150 раз, тормозными накладками – в 17 раз. Эти данные представила делегация Российской Федерации на 166-й сессии Всемирного форума по конструкции транспортных средств в г. Женеве (Швейцария) в июне 2013 г. как информационный документ WP.29-160-39.

Все перечисленное в очередной раз подтверждает сложность определения ключевых факторов влияния на экологическую обстановку. Привлечение внимания главным образом к нормам по выбросам транспортных средств обусловлено прогрессирующим увеличением автопарка в мире, большей токсичностью выбросов в сравнении с производственными стационарными источниками загрязнений, расположением выхлопных труб на малой высоте, близкой к уровню дыхания, плохо доступной областью для рассеивания ветром и эксплуатацией вблизи жилых районов. Дисперсные частицы занимают отдельное место среди нормируемых показателей, так как являются канцерогенами и накапливаются в организме в процессе жизнедеятельности человека.

Количество частиц после выхлопной трубы у двигателей экологического уровня ЕВРО-6, оборудованного системой очистки отработавших газов, меньше, чем в воздухе до фильтра на входе в двигатель. Таким образом, транспортное средство, соответствующее высокому экологическому классу, может быть очистительной системой атмосферы. Но если допустить, что выше определенного экологического уровня главным источником выбросов становится не двигатель, а продукты износа элементов транспортного средства, то на повестку дня

выходит вопрос о перераспределении либо добавлении новых показателей нормирования.

Несмотря на значительные успехи в области проектирования и доводки дизельных двигателей в последнее время главным образом за счет развития технологий в области топливopодачи, систем нейтрализации и электронного управления, необходимо понимать, что излишнее ограничение выбросов вредных веществ – это недополученная эффективность от сгорания топлива. Для того чтобы представить, насколько трудно достичь современных норм, необходимо рассмотреть состав и структуру дисперсных частиц, образующихся в дизельных двигателях.

Эмиссия от сгорания топлива состоит из трех фаз: твердой, жидкой и газовой. Первые две фазы образуются в результате неполного сгорания топлива и масла и представляют собой совокупность органических и неорганических веществ, элементов коррозии и износа двигателя. В составе дисперсных частиц, по результатам исследований, идентифицированы более 1000 видов веществ [7], которые классифицируют по основным четырем группам: углеродная, органическая, сульфаты с нитратами и неорганические примеси (рис. 1) [8, 9].

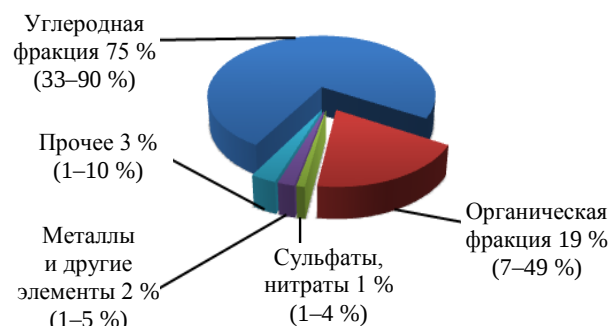


Рис. 1. Фракционный состав дизельных частиц

Fig. 1. Fractional composition of diesel particles

При работе двигателя на различных режимах изменяются как количественная, так и фракционная составляющие частиц. Неоднороден состав и в процессе протекания внутрицилиндровых реакций. Образование дисперсных частиц в дизельном двигателе – весьма сложный процесс, и несмотря на множество работ, посвященных этой теме, судить о его механизмах и природе можно лишь в приближенном виде. С точки зрения процессов, происходящих в цилиндре, механизм образования сажевых частиц наглядно представлен на рис. 2.

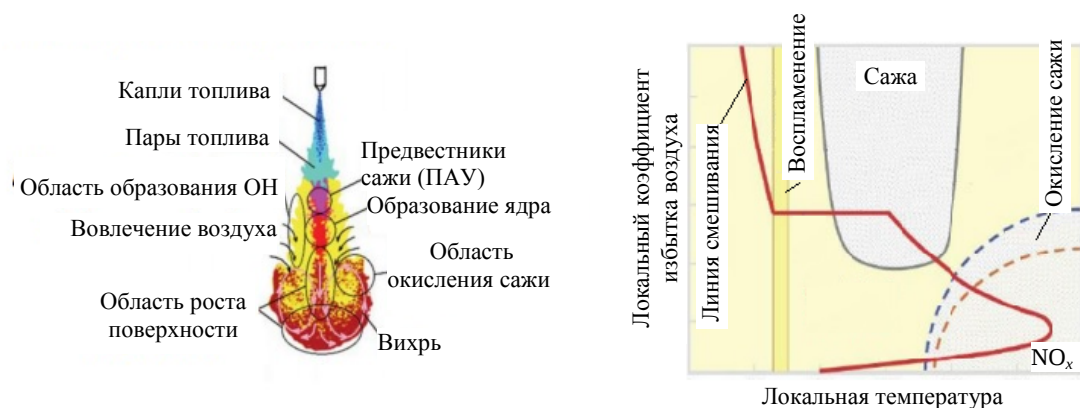


Рис. 2. Стадии образования частиц в камере сгорания

Fig. 2. Particle formation stages in combustion chamber

Основная часть элементарного углерода образуется в период диффузионного сгорания. Развивающаяся реакция горения в топливном факеле за счет вовлечения кислорода по периферийной области стимулирует интенсификацию образования гидроксильных радикалов, за счет которых происходит окисление наибольшей доли образовавшейся сажи. В более плотном центральном осевом ядре и переднем фронте факела ввиду кислородного голодания происходят процесс роста поверхности ядер и коагуляция сажи [10]. Оставшиеся продукты неполного сгорания топлива и масла, пройдя систему выпуска, попадают в атмосферу, где осуществляются их конденсация и адсорбция на поверхности твердых частиц, которые за это время образуют агломераты (рис. 3).

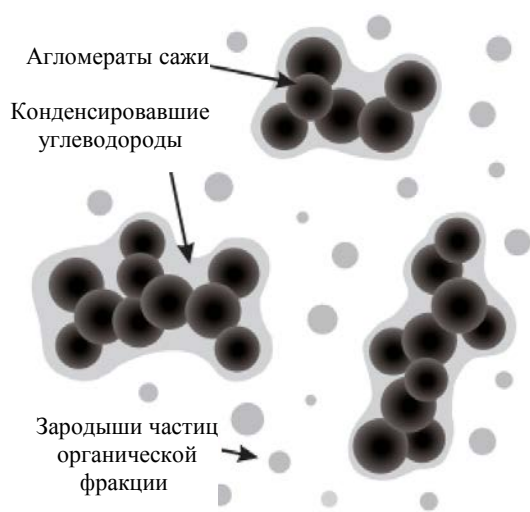


Рис. 3. Структура частиц

Fig. 3. Structure of particles

Все это указывает на то, что пределами камеры сгорания двигателя процесс формирования частиц не заканчивается и частично продолжается в атмосфере. Поэтому доводка рабочего процесса, с точки зрения улучшения экологических показателей, неразрывно связана с разработкой новых методик исследования и измерения, которые бы максимально правдоподобно учитывали реальные процессы.

До недавнего времени на итоговый показатель выбросов существенное влияние оказывали сульфаты, формирующиеся на последней стадии из-за высокого содержания серы в дизельном топливе. Однако современные тенденции снижения содержания серы, регламентированные законодательством, исключили данную составляющую из наиболее весомых. Аналогичный подход прослеживается и с зольной составляющей. Большинство производителей включают в химмотологическую карту только масла с низким зольным числом, тем самым снижая долю данной фракции в составе дисперсных частиц современных дизельных двигателей. Токсичность дисперсных частиц определяется также размерными и количественными показателями. Обобщенные данные выбросов различных типов дизелей приведены на рис. 4.

Сегодня единственный легитимный метод измерения дисперсных частиц, прописанный в правилах ЕЭК ООН, – гравиметрический. Если для измерения итоговых циклов токсичности применение всей процедуры является оправданным и единственно верным, то при доводочных работах рабочего процесса это вызыва-

ет неудобства, связанные с высокой трудоемкостью и временным фактором.

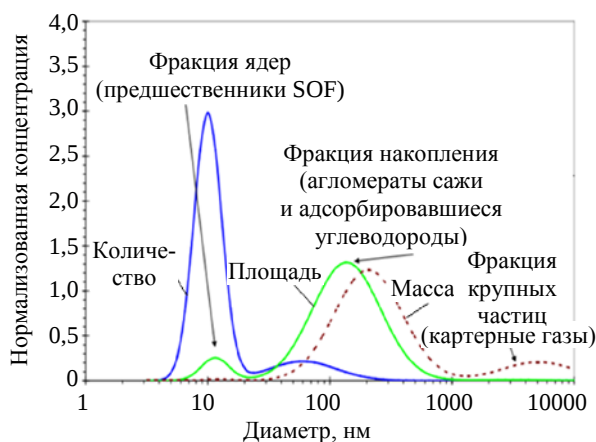


Рис. 4. Распределение фракций частиц
Fig. 4. Distribution of particle fractions

Ввиду этого ученые всего мира уже длительное время пытаются предложить методику измерения, точность которой приближалась бы к гравиметрическому методу, а скорость определения позволяла производить исследования на переходных режимах. Наибольшую популярность в исследовательских кругах получило направление поиска зависимостей между дисперсными частицами PM и дымностью N:

- формула Н. Hardenberg и Н. Albrecht [11]

$$PM = 0,349 \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{N}{100}} \right); \quad (1)$$

- формула И. В. Парсаданова [12]

$$PM = 0,0023N + 0,00005N^2 + 0,145e_{CH} + 0,33e_{CH}^2; \quad (2)$$

где e_{CH} – выброс углеводородов, г/ч;

- формула, полученная на основе данных, приведенных в статье А. Г. Иванова и Т. Р. Филиппосянца [13]:

$$PM = 0,000002629N^3 - 0,000232677N^2 + 0,010719579N; \quad (3)$$

- формула Ю.В. Гутаревича [14]

$$PM = 0,0001N^2. \quad (4)$$

Также исследованы зависимости определения частиц, mg/m^3 , от FSN:

- формула А. С. Alkidas [15]

$$PM = 565 \left[\ln \left(\frac{10}{10 - FSN} \right) \right]^{1,206}; \quad (5)$$

- формула G. G. Muntean [16]

$$PM = (-184FSN - 727,5) \log \left[1 - \frac{FSN}{10} \right]. \quad (6)$$

В последнее время для исследовательских работ ввиду снижения уровня выбросов большой популярностью пользуется метод определения дымности в FSN, отнесения оптических дымомеры в область технической диагностики и первичной оценки показателей. В связи с этим особый интерес представляет зависимость расчета твердых частиц [17]

$$SC = \frac{1}{0,405} \cdot 4,95FSNe^{0,38FSN}. \quad (7)$$

Проанализировав вышеприведенные зависимости (рис. 5), можно отметить широкий диапазон варьирования результатов, полученных в различных лабораториях на разных объектах исследования независимо от методов определения дымности (оптического и FSN). Это объясняется различием фракционного состава дисперсных частиц.

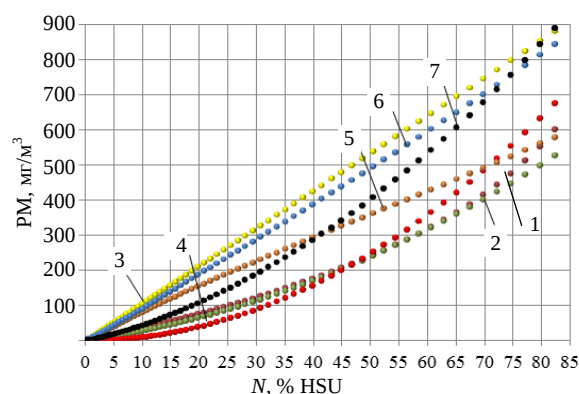


Рис. 5. Исследование расчетных зависимостей между частицами и дымностью

Fig. 5. Research of calculation dependence between particles and smokiness

Особенностью методики измерения дымомером является анализ горячей пробы, для чего организовывается подогрев как пробоотборни-

ков, так и измерительных камер. Судить при таком исследовании можно лишь о сажевой составляющей, являющейся основным источником оптической непрозрачности отработавших газов (ОГ).

Многофракционный состав дисперсных частиц, а также особенности образования каждой из фракций в выпускной системе транспортного средства требуют соблюдения всех условий их образования и в измерительной аппаратуре. В современных приборах для организации этих процессов применяются подходы частичнопоточного и полнопоточного разбавления пробы ОГ, реализуемые за счет электронного управления. При этом температура пробы на фильтре не должна согласно методике превышать 52 °С на любом режиме работы двигателя.

Для оценки методик измерения, реализованных в приборах SPC-472, AVL-439 и AVL-415, в ИЦ ОАО «УКХ «Минский моторный завод» проведены испытания четырехцилиндрового дизельного двигателя с турбонаддувом и охладителем наддувочного воздуха на режиме номинальной мощности 90 кВт при различных параметрах топливоподачи. Результаты измерений в зависимости от угла опережения впрыска топлива θ и давления впрыска $p_{впр}$ приведены на рис. 6, 7.

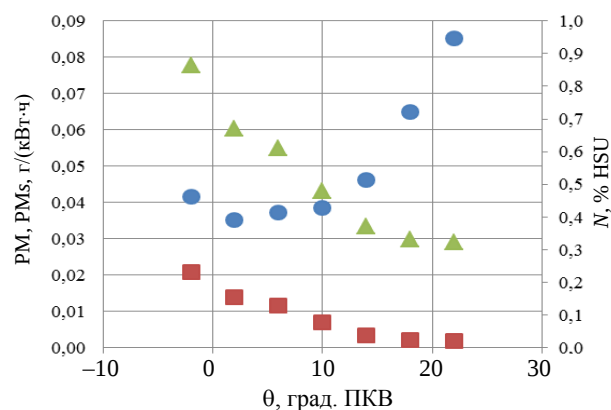


Рис. 6. Изменение выбросов частиц, сажи и дымности при $p_{впр} = 150$ МПа и различных значениях θ :
● – PM, SPC-472; ■ – PMs, AVL-415; ▲ – N, AVL-439

Fig. 6. Changes in emissions of particles, soot and smokiness at $p_{injection} = 150$ MPa and various values of θ :
● – PM, SPC-472; ■ – PMs, AVL-415; ▲ – N, AVL-439

Как видно из графиков на рис. 6, 7, при θ выше 10 град. поворота коленчатого вала (ПКВ) выброс дисперсных частиц резко увеличивается, несмотря на это, выброс сажи имеет нисходящий характер, а минимальный удельный эф-

фективный расход достигается при более высоком $\theta = 18$ град. ПКВ.

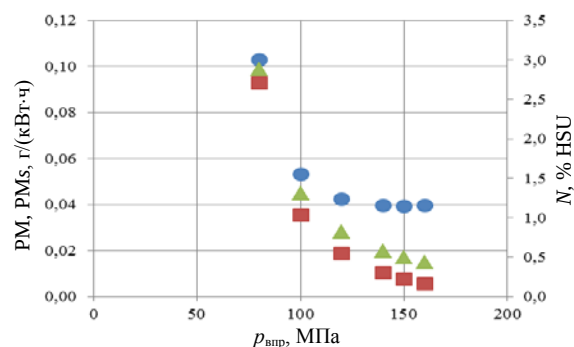


Рис. 7. Изменение выбросов частиц, сажи и дымности при $\theta = 10$ град. ПКВ и различных значениях $p_{впр}$:
● – PM, SPC-472; ■ – PMs, AVL-415; ▲ – N, AVL-439

Fig. 7. Changes in emissions of particles, soot and smokiness at $\theta = 10$ degrees of crankshaft rotation and various values of $p_{injection}$:
● – PM, SPC-472; ■ – PMs, AVL-415; ▲ – N, AVL-439

Следует отметить, что хоть уровень оптической дымности находится ниже 1 % HSU, точность результатов позволяет проследить общую тенденцию с показаниями, полученными по другой методике FSN. При изучении фильтров, полученных при измерении дисперсных частиц, также прослеживается тенденция осветления лицевой поверхности с ростом θ при одновременном повышении массы. Руководствуясь исследованиями фирмы AVL по измерению частиц (рис. 8), следует полагать, что рост растворимой органической фракции несгоревших углеводородов увеличивается с большей интенсивностью, чем снижается нерастворимая органическая фракция.

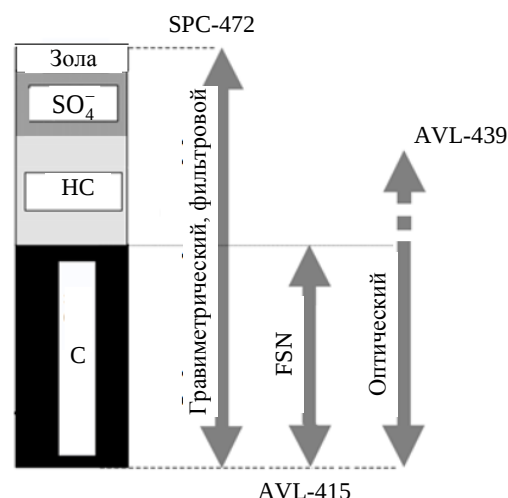


Рис. 8. Методы измерения и исследования твердых частиц

Fig. 8. Methods for measuring and investigation of solid particles

С увеличением давления впрыска уровень твердых частиц падает. Однако после давления впрыска более 140 МПа в данной комплектации двигателя эффективность снижения незначительна и при снижении уровня твердых частиц разница с дисперсными частицами увеличивается. При установке в выпускном тракте сетчатых элементов без покрытия драгоценными металлами и уловителей разница по выбросам существенно сокращается, что подчеркивает влияние конфигурации выпускной системы в образовании дисперсных частиц.

Таким образом, выброс сажи однозначно снижается при повышении эффективности цикла протекания процесса, что дает возможность с большой долей точности прогнозировать выбросы на основе характера протекания процесса в цилиндре в отличие от органической фракции, уровень которой первостепенно определяется интенсивностью процессов конденсации и коагуляции. Поэтому любые зависимости расчета дисперсных частиц, предложенные без учета протекания реакций образования растворимых фракций в системе выпуска, будут иметь значительную неопределенность.

Рост уровня выбросов дисперсных частиц с повышением θ , вопреки общепринятой тенденции на основе данных доводки дизельных двигателей низшего экологического класса, объясняется новым подходом увеличения преобладающей доли объемного смесеобразования, которое сопровождается увеличением диаметра горловины камеры сгорания и соответственно угла раскрытия топливных факелов. Поэтому применение ранней стратегии впрыска наравне с поздней при такой организации протекания рабочего процесса приводит к попаданию топлива на относительно холодные части вне камеры сгорания в поршне, стимулируя тем самым чрезмерное образование углеводородов.

При доводке рабочего процесса, с точки зрения снижения дисперсных частиц, необходимо выделить эффективный диапазон изменения параметров топливоподачи, в рамках которого преобладающим фактором является эффективность сгорания, в противном случае необходимо учитывать химические процессы в выпускном тракте. С учетом этого нужно отметить, что на характер протекания реакций в выпускной системе процесс сгорания в цилиндре

оказывает влияние лишь кинетикой газодинамического потока, характеризующейся расходом ОГ, температурой ОГ в конце сгорания и количеством несгоревших углеводородов, подвергающихся дальнейшим преобразованиям в зависимости от конструкции выпускной системы.

Как показали результаты испытаний, при корректировке диапазона границ изменения параметров топливоподачи и степени рециркуляции отработавших газов доля сажевых компонентов становится доминирующей, что соответствует мировым тенденциям. Это дает возможность использовать модель образования сажи как основного источника дисперсных частиц для прогнозирования выброса вредных веществ в процессе сгорания, а учесть химические процессы в выпускной системе при изменении регулировочных параметров можно на основании температуры в выпускной системе.

Получается, что контроль дымности для широкой гаммы транспортных средств с различной настройкой рабочего процесса двигателя при прохождении технического осмотра не отражает реального выброса дисперсных частиц, а может свидетельствовать только о техническом состоянии. Если говорить о современных двигателях с электронным управлением, то показатель «дым на разгоне» является легкодостижимым без выполнения основных показателей по выбросу вредных веществ. Воспроизвести же сами циклы испытания без специализированных беговых барабанов и стендов, стоимость которых не ограничивается 1 млн евро, вообще не представляется возможным. Таким образом, реальная экологическая обстановка в мире может действительно улучшиться только в том случае, если наряду с введением норм будут оговариваться адекватные методы и формы контроля, идентифицирующие изменение заводских настроек транспортных средств и сбои систем, влияющих на выбросы вредных веществ.

ВЫВОДЫ

1. Достижение современных экологических норм связано главным образом с доводкой рабочего процесса двигателя. Процесс образования дисперсных частиц в дизелях не заканчивается камерой сгорания, а продолжается в

системе выхлопа и атмосфере. Процессы, происходящие на завершающей стадии образования, плохо коррелируются с оптической непрозрачностью. В связи с этим расчетные зависимости между дисперсными частицами и дымностью имеют значительную неточность.

2. Потенциал снижения выбросов вредных веществ определяется не только возможностью топливоподающей аппаратуры, агрегатов наддува и способами организации рециркуляции отработавших газов, но и выбором параметров топливоподачи и воздушного заряда на впуске с учетом конструктивной концепции организации процесса сгорания.

3. Чувствительность углеродной фракции частиц к показателям, характеризующим эффективность процесса сгорания, дает основание использовать способ оценки горячей пробы без разбавления как превалирующий при исследовании внутрицилиндровых процессов, ограничив диапазон значений управляющих параметров на основании анализа конструкции и предварительных испытаний.

4. Для определения пределов последующих проектов ограничений выбросов вредных веществ, а также анализа существующих необходимо при мониторинге окружающей среды различать частицы от сгорания в двигателе и элементов износа деталей транспортного средства.

5. Выявить вмешательство в системы двигателей высокого экологического класса, обеспечивающих регламентируемый выброс вредных веществ, посредством только тестов при периодическом государственном техническом осмотре проблематично. Поэтому, помимо введения новых экологических стандартов, необходимо совершенствовать методику контроля и проверки выбросов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабаева, И. В. О распространении и оседании пылевых частиц размером до 10 мкм в горизонтальном турбулентном потоке [Электронный ресурс] / И. В. Кабаева, А. Г. Шестаков, А. С. Артюхин // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2007. Вып. 2 (3). Режим доступа: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2-3-12_0507.pdf. Дата доступа: 21.04.2016.
2. Единообразные предписания, касающиеся подлежащих принятию мер по ограничению выбросов загрязняющих газообразных веществ и взвешенных частиц из двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для использования на транспортных средствах, а также выбросов загрязняющих газообразных веществ из двигателей с принудительным зажиганием, работающих на природном газе или сжиженном нефтяном газе, и предназначенных для использования на транспортных средствах: Правила ЕЭК ООН № 49-06 / введ. 01.01.2015. Минск: Госстандарт; Минск: БелГИСС, 2014. 602 с.
3. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах в отношении выброса загрязняющих веществ этими двигателями: Правила ЕЭК ООН № 96-03, 1995. 502 с.
4. О безопасности колесных транспортных средств: TP TC 018–2011: [принят 09.12.11; вступает в силу 01.01.15] / Евразийская экономическая комиссия. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2012. 273 с.
5. О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним: TP TC 031–2012: [принят 20.07.2012; вступает в силу 15.02.2015] / Евразийская экономическая комиссия. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2013. 39 с.
6. Кутенев, В. Ф. О реальном выбросе твердых частиц автомобильным транспортом / В. Ф. Кутенев, В. В. Степанов, В. К. Азаров // Журнал ААИ. 2013. № 4 (81). С. 45–47.
7. Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust: Report EPA/600/8-90/057F. Washington (DC): National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development. USA: Environmental Protection Agency, 2002. 669 p.
8. PAH Content of Diesel Fuel and Automotive Emission: Research Report VTT-R-1155-06 / Päivi Aakko [et al.]. USA, 2006. 54 p.
9. Heck, Ronald M. Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology / Ronald M. Heck, Robert J. Farrauto, Suresh T. Gulati. New York: Wiley, 2002. 391 p.
10. Kittelson, D. Particle Formation and Models / D. Kittelson, M. Kraft // Encyclopedia of Automotive Engineering. 2015. No 1 (23). P. 107–130.
11. Hardenberg, H. Grenzen der Rußmassbestimmung aus Optischen Transmessungen / H. Hardenberg, H. Albrecht // MTZ: Motortechn. Z. 1987. No 2. P. 51–54.
12. Парсаданов, И. В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе топливно-экологического критерия / И. В. Парсаданов. Харьков: Изд-во Центр НТУ «ХПИ», 2003. 244 с.
13. Филиппосянц, Т. Р. К вопросу об ускоренных методах контроля и доводки дизелей по экологическим параметрам / Т. Р. Филиппосянц, А. Г. Иванов // Экология двигателя и автомобиля: сб. науч. тр. НАМИ. М., 1998. С. 19–25.
14. Экология автомобильных двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов [и др.]. Луганск: ВНУ имени В. Даля, 2004. 268 с.
15. Alkidas, A. C. Relationship Between Smoke Measurements and Particulate Measurements / A. C. Alkidas // SAE Technical Paper. 1984. No 840412. P. 316–322.

16. Muntean, G. G. A Theoretical Model for the Correlation of Smoke Number to Dry Particulate Concentration in Diesel Exhaust / G. G. Muntean // SAE Paper. 1999. No 1999-01-0515. P. 316–322.
17. Eine Neue Messmethodik der Bosch-Zahl Mit Erhoehter Empfindlichkeit / R. Christian [et al.] // MTZ. 1993. Vol. 54. № 1. P. 16–22.

Поступила 03.03.2016

Подписана в печать 04.05.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Kabaeva I. V., Shestakov A. G., Artiukhin A. S. (2007) About Distribution and Settling of Dust Particles up to 10 μm -size in Horizontal Turbulent Flow. *Internet-Vestnik of VSUACE* [Internet-Bulletin of Volgograd State University of Architecture & Civil Engineering], 3 (2). Available at: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2-3-12_0507.pdf. (Accessed 21 April 2016) (in Russian).
2. Uniform Provisions Concerning the Measures to be Taken Against the Emission of Gaseous and Particulate Pollutants from Compression-Ignition Engines and Positive Ignition Engines for Use in Vehicles. Regulation No 49-06 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE). Minsk, Gosstandart, 2014. 602 (in Russian).
3. Uniform Provisions Concerning the Approval of Compression Ignition (C.I.) Engines to be Installed in Agricultural and Forestry Tractors and in Non-Road Mobile Machinery with Regard to the Emissions of Pollutants by the Engine. Regulation No 96-03 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE), 1995. 502 (in Russian).
4. TP TC 018–2011 [Technical Regulations of the Customs Union]. On Safety of Wheeled Vehicles. Minsk: Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2012. 273 (in Russian).
5. TP TC 031–2012 [Technical Regulations of the Customs Union]. On Safety of Agricultural and Forestry Tractors and their Trailers. Minsk: Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2013. 39 (in Russian).
6. Kutenev V. F., Stepanov V. V., Azarov V. K. (2013) About Actual Emission of Particulate Matter from Motor Vehicles. *AAE Journal* [Association of Automotive Engineers – Russia], 81(4), 45–47 (in Russian).
7. Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust: Report EPA/600/8-90/057F. Washington (DC): National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development. USA: Environmental Protection Agency, 2002. 669.
8. Päivi Aakko, Tiina Harju, Markku Niemi, Leena Rantanen-Kolehmainen (2006) *PAH Content of Diesel Fuel and Automotive Emission*: Research Report VTT-R-1155-06. USA. 54.
9. Ronald M. Heck, Robert J. Farrauto, Suresh T. Gulati (2002) *Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology*. New York, Wiley. 391.
10. Kittelson D., Kraft M. (2015) Particle Formation and Models. *Encyclopedia of Automotive Engineering*, 23 (1), 107–130. DOI: 10.1002/9781118354179.auto161.
11. Hardenberg H., Albrecht H. (1987) Grenzen der Rußmassenbestimmung aus Optischen Transmessungen. *MTZ: Motor-technische Zeitschrift*, (2), 51–54.
12. Parsadanov I. V. (2003) *Improvement of Quality and Competitiveness of Diesel Engines on the Basis of Fuel and Ecological Criterion*. Kharkiv, Publishing Centre of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. 244 (in Russian).
13. Filiposyants T. R., Ivanov A. G. (1998) On the Question of Accelerated Control Methods and Development of Diesel Engines in Accordance with Ecological Parameters. *Ekologiya Dvigatelia i Avtomobilia: Sb. Nauch. Tr. NAMI* [Ecology of Engine and Motor Vehicle: Collection of Research Papers. Central Research and Development Automobile and Engine Institute]. Moscow, 19–25 (in Russian).
14. Zvonov V. A., Zaigraev L. S., Chernykh V. I., Kozlov A. V. (2004) *Ecology of Automotive Internal Combustion Engines*. Lugansk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. 268 (in Russian).
15. Alkidas A. C. (1984) Relationship Between Smoke Measurements and Particulate Measurements. *SAE Technical Paper*, No 840412. 9. DOI: 10.4271/840412.
16. Muntean G. G. (1999) A Theoretical Model for the Correlation of Smoke Number to Dry Particulate Concentration in Diesel Exhaust. *SAE paper*, No 1999-01-0515, 316–322.
17. Christian R., Knopf F., Jaschek A., Schindler W. (1993) Eine Neue Messmethodik der Bosch-Zahl Mit Erhoehter Empfindlichkeit. *MTZ: Motortechnische Zeitschrift*, 54 (1), 16–22 (in German).

Received: 03.03.2016

Accepted: 04.05.2016

Published online: 26.09.2016

Роль ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий при электроискровом легировании

Докт. техн. наук Н. М. Чигринова¹⁾, асп. С. И. Ловыгин²⁾, В. Е. Чигринов¹⁾

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

²⁾ОХП ИСЗП ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016

Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Приведены результаты исследований кинетики массопереноса и динамика формирования покрытий интегральным способом электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием на разных стадиях их формирования. В настоящее время для нанесения защитно-упрочняющих покрытий в пределах допустимых толщин и характеристик в основном применяется классический метод электроискрового легирования с использованием твердосплавных анодов и частотой импульсного переменного напряжения на катушке вибровозбудителя от 20 до 1600 Гц. Главной особенностью применения ультразвукового воздействия (частота 22–44 кГц) в процессе электроискрового легирования является возможность дальнейшего наращивания толщины формируемых покрытий даже после достижения порога хрупкого разрушения материала покрытия. Методика проводимой работы базировалась на комплексных гравиметрических, металлографических, рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследованиях формируемых покрытий на основе композиций, изготовленных методом высокоэнергетического горячего прессования, и системы «тугоплавкий карбид (WC) – связка» в виде сплава на основе никеля из серии «колмоной» системы Ni – Ni₃B, легированной добавками меди и кремния. Первоначальная обработка поверхности в диапазоне ультразвуковых частот 22–44 кГц способствует заметному возрастанию скорости массопереноса, которая определяется прежде всего химическим составом и термодинамической устойчивостью анодов. Это объясняется активацией поверхности в процессе ее предварительного деформирования с ультразвуковой частотой с созданием дополнительных условий для возникновения искрового разряда. Завершающая ультразвуковая обработка улучшает качество покрытия вследствие его дополнительной проковки, приводя к увеличению однородности его структуры и повышению ее плотности.

Ключевые слова: электроискровое легирование, ультразвуковое воздействие, порог, хрупкое разрушение, активация, однородность

Для цитирования: Чигринова, Н. М. Роль ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий при электроискровом легировании / Н. М. Чигринова, С. И. Ловыгин, В. Е. Чигринов // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 380–390

Role of Ultrasound in Mechanisms of Anode-Cathode Interactions during Electrospray Alloying

N. M. Chigrinova¹⁾, S. I. Lovygin²⁾, V. E. Chigrinov¹⁾

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

²⁾Separate Self-Financing Unit, Institute for Welding and Protective Coatings, State Scientific Institution “Institute of Powder Metallurgy” National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper reveals results of investigations on mass transfer kinetics and dynamics of coating formation while using integral electrospray alloying method with additional ultrasonic exposure at different stages of formation. Nowadays, a classical method for electrospray alloying with hard-alloy anodes and impulse AC voltage frequency on the vibration exciter

Адрес для переписки

Чигринова Наталья Михайловна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-81
tiro@bntu.by

Address for correspondence

Chigrinova Nataliya M.
Belarusian National Technical University
67 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-81
tiro@bntu.by

coil from 20 to 1600 Hz has been mainly used for application of protective and strengthening coatings within permissible thickness and characteristics. The key aspect of ultrasonic exposure application (frequency 22–44 kHz) during electrospark alloying is the possibility to increase further thickness of coatings to be formed even after reaching a brittle fracture threshold of the coating material. Methodology of the executed research activity has been based on integrated studies (gravimetric, metallographic, X-ray diffraction and electron microscopic) of coatings which are to be formed through compositions produced while using method of high-energy hot compaction and a “refractory carbide (WC) and a binding material” system in the form of alloy based on nickel from the series of “colmonoy” Ni – Ni₃B system which is alloyed with additions of copper and silicon. The initial surface treatment within ultrasonic frequency range (22–44 kHz) contributes to a noticeable increase in the mass transfer rate, which is primarily determined by chemical composition and thermodynamic stability of anodes. It is due to surface activation in the process of its preliminary deformation at ultrasonic frequency which creates additional conditions for striking of a spark. The final ultrasonic treatment improves coating quality due to its additional forging that leads to an increase of its structure homogeneity and density.

Keywords: electrospark alloying, ultrasonic exposure, threshold, brittle fracture, activation, homogeneity

For citation: Chigrinova N. M., Lovygin S. I., Chigrinov V. E. (2016) Role of Ultrasound in Mechanisms of Anode-Cathode Interactions during Electrospark Alloying. *Science & Technique*. 15 (5), 380–390 (in Russian)

Введение

Перспективным направлением обеспечения функциональности и конкурентоспособности с увеличением ресурса большинства изделий машиностроения и металлообработки, эксплуатируемых в условиях повышенных знакопеременных нагрузок и рабочих скоростей, термостатирования и агрессивных сред, является их поверхностное упрочнение с созданием функционально-адаптированных покрытий. Выбор методов формирования указанных покрытий определяется условиями эксплуатации упрочняемого изделия и исходным состоянием его рабочих поверхностей. Одна из малоэнергоёмких и практически универсальных недорогих технологий обработки любых токопроводящих материалов – электроискровое легирование (ЭИЛ) [1]. Развитие технологии ЭИЛ, получившей мощный импульс в конце 50 – начале 60-х гг. XX в., к 70-м гг. практически прекратилось. Сдерживающими факторами стали малая производительность процесса, невозможность получения бездефектных, с минимальным уровнем напряжений покрытий, обладающих требуемой геометрией поверхности. Поэтому среди исследований метода появилось множество вариантов комбинации типовой технологии ЭИЛ с другими способами обработки поверхностей.

Перспективный вариант – комбинация ЭИЛ с последующей лазерной обработкой упрочнённой поверхности [2], ЭИЛ с последующей механической обработкой, ЭИЛ в сочетании с термической и финишной механическими обработками для достижения заданной шероховатости и качества поверхностного слоя, ЭИЛ с

последующей пластической деформацией сформированного покрытия. Необходимо отметить, что большинство технологий поверхностной обработки при создании функционально-адаптированных покрытий имеют близкую физико-химическую природу с процессами металлизации материалов, для которых характерны следующие основные стадии:

а) исходная деструкция расходного вещества – сольватация (электрод, электролит) и электротермомеханическая (эрозионная) деструкция поверхности анода или катода;

б) массоперенос исходного материала на поверхность металлической основы (изучаемого объекта);

в) закрепление на поверхности основы в виде функционального покрытия необходимой конфигурации с той или иной интенсивностью, глубиной и динамикой диффузионных процессов между основой и слоем.

В связи с этим выбор материалов легирующих электродов и их структурное состояние, определяемое методом их получения, играют определяющую роль в процессах формирования работоспособных покрытий, улучшающих свойства обработанной поверхности. Авторы [3, 4], рассматривающие ЭИЛ как определённый вид поверхностной термической обработки, утверждают, что при легировании в качестве электрода может быть использован любой материал на металлической основе. Данная позиция продуктивна, однако требует дополнительных мер по снижению пористости, неравнотолщинности, шероховатости и уровня остаточных напряжений в формируемых из разнородных материалов покрытиях.

При упрочнении материала в процессе ЭИЛ, например тугоплавкими соединениями, отличающимися высокими твердостью и хрупкостью, основными факторами, определяющими эффективность упрочнения, являются дисперсность и агрегатное состояние продуктов эрозии материала анода и их способность закрепляться на подложке. Авторы [5] отмечают, что не удается обнаружить корреляцию между эрозионными свойствами тугоплавких соединений и их физическими и механическими характеристиками. Однако ими установлено, что чем выше степень пластичности соединений, тем выше эффективность упрочнения. Последнее обусловлено тем, что для хрупких тугоплавких соединений продукты эрозии могут иметь размер до 4 мм, они не разогреваются при переходе через искровой промежуток и не закрепляются на подложке. В связи с этим тугоплавкие соединения характеризуются высокой эрозионной стойкостью: коэффициент переноса электродного материала не превышает 30 %, на обрабатываемой поверхности формируется покрытие толщиной не более 10–30 мкм, твердость которого близка к твердости электродного материала 15–25 ГПа.

Применение стандартных твердых сплавов в качестве легирующих анодов позволяет максимально эффективно использовать преимущества компонентов – пластичность металлической связи и высокую твердость тугоплавкого соединения. При этом толщина защитного покрытия достигает 50–100 мкм, его сплошность также возрастает, но твердость не превышает 15–25 ГПа. Поэтому сегодня стандартные твердые сплавы на основе карбида вольфрама используются как электродные материалы в процессах электроэрозионного упрочнения. Однако надо иметь в виду, что эти сплавы являются материалами инструментального назначения, т. е. материалами с высоким сопротивлением разрушению при внешнем температурном и механическом воздействии. Это ограничивает эффективность процессов электроэрозионного упрочнения.

При рассмотрении физико-химических критериев разработки электродных материалов для ЭИЛ внимания заслуживает направление, связанное с повышением эрозионной активности и управлением интенсивностью процесса массопереноса материала анода на катод [6].

Исследование процесса формирования покрытий

Для выяснения роли перечисленных факторов в процессе формирования работоспособных качественных покрытий методом электроискрового легирования изучали поведение электродов из порошковых сплавов на основе никеля («колмоной»), полученных методом распыления расплавов. Выбор порошковых материалов для легирующих анодов определяется несколькими соображениями: возможностью получения более толстых покрытий, что связано с их высокой эрозионной способностью; невысокой стоимостью вследствие применения при их изготовлении широко распространенного метода порошковой металлургии; возможностью получения покрытий с высокими эксплуатационными свойствами. Но при этом механизм крупнокапельного переноса материала таких анодов на обрабатываемую поверхность в процессе ЭИЛ изучен недостаточно и поиск путей улучшения качества этих покрытий со стабилизацией их рельефа – задача, требующая решения.

В исходном состоянии порошки указанного сплава имеют глобулярную форму, доэвтектическую структуру с первичной фазой твердого раствора на основе никеля и эвтектики (твердый раствор на основе никеля + боросилицид никеля). Электроды для электроискрового легирования получали методами порошковой металлургии (размол, смешивание, введение пластификатора, прессование и спекание) с оптимальной пористостью изготовленных электродов 10 % (рис. 1).

Порошки сплава «колмоной» на основе никеля системы Ni–Cu–B–Si получали методом выплавки с последующим распылением их расплава, что гарантирует равномерное распределение легирующих элементов, высокую чистоту по количеству вредных элементов в газообразном виде (кислород, вода, азот), которые являются причиной охрупчивания сплавов. Смесь ««колмоной» – карбид вольфрама» получали путем размол-смешивания в течение 4 ч [5]. Макро- и микроструктурное состояние литого сплава ««колмоной» + 10 % WC» приведено на рис. 2.

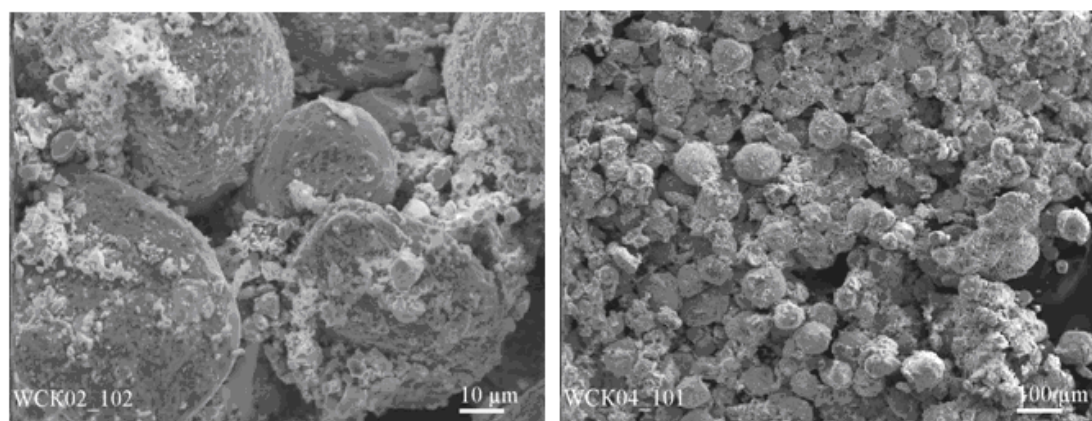


Рис. 1. Внешний вид композиции «колмоной» + 10 % WC»

Fig. 1. External view of “colmonoy” composition + 10 % WC”

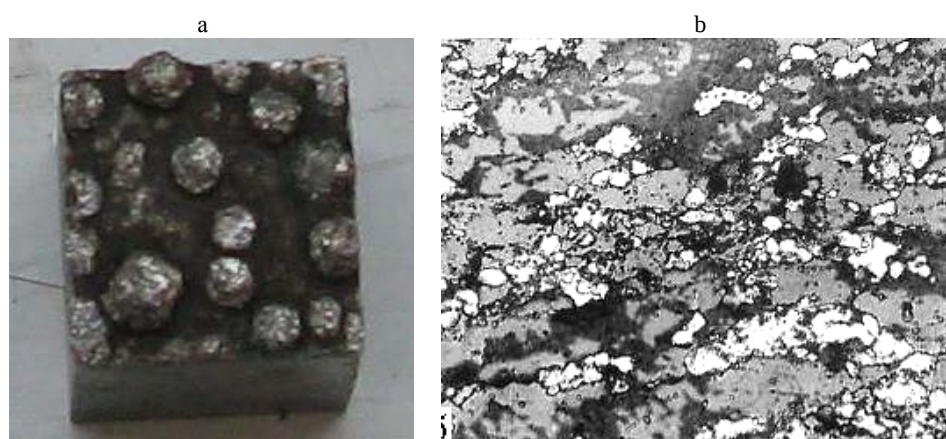


Рис. 2. Макро- (a) и микроструктура (b) сплава «колмоной» + 10 % WC», ×250

Fig. 2. Macro- (a) and microstructure (b) of “colmonoy” alloy + 10 % WC”, ×250

На дифрактограмме (рис. 3), определяющей химический состав полученной композиции с большим количеством карбидов, максимальный пик соответствует композиции «колмоной».

Исследование механизмов массопереноса полученных анодов на поверхность металлической основы из стали 45 и характера закрепления на ней создаваемого покрытия необходимых конфигурации и качества производили на образцах размерами 10×10×10 мм. Время легирования было одинаковым для всех образцов. В экспериментах для сравнения применялись стандартный метод ЭИЛ и интегральная технология электроискровой обработки, состоящая в последовательном трехступенчатом легировании с использованием на первоначальной и последней стадиях создания покрытия ульт-

развукового воздействия УЗО + ЭИЛ + УЗМ (где УЗО – ультразвуковая обработка; УЗМ – ультразвуковая металлизация).

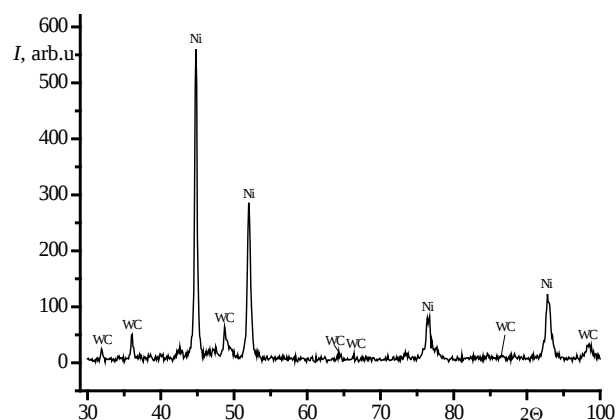


Рис. 3. Дифрактограмма легирующей композиции

Fig. 3. X-ray diffractogram of alloying composition

Именно этот метод, как было установлено на предыдущих этапах исследований, отличается наиболее высокой стабильностью изменения электрических характеристик процесса во времени, определяющей более стабильную эрозию легирующих анодов при смене режима легирования. При этом гарантированно обеспечивается устойчивая динамика диффузионных анодно-катодных взаимодействий, приводящих в совокупности к получению равнотолщинного, имеющего высокую адгезию покрытия с минимальным количеством структурных несовершенств [7].

При исследовании процесса нанесения покрытия методом ЭИЛ изучаемыми электродами подтвержден вывод о том, что при стандартном электроискровом легировании катода с высокой энергией плазмы и низкочастотным механическим ударом (600 Гц) во всем диапазоне электрических режимов отмечается нестабильность процесса обработки, выраженная в заметных колебаниях уровня электрических параметров, приводящего к хаотичному массопереносу, определяемому неравномерной и спонтанной эрозией легирующего анода (рис. 4).

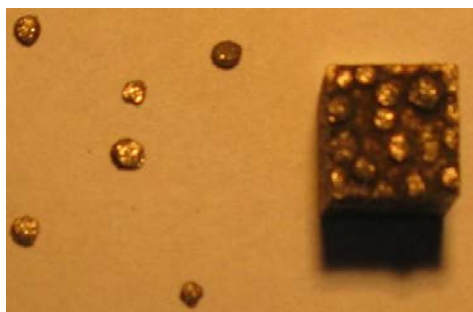


Рис. 4. Фрагменты разрушающегося легированного слоя (анод: «колмоной» + 10 % WC)

Fig. 4. Fragments of collapsing alloyed layer (anode: “colmonoy” + 10 % WC)

Такой крупнокапельный массоперенос материала анода на упрочняемую поверхность способствует получению весьма неравнотолщинных, с высокой шероховатостью покрытий. Вообще, считается, что формирование неравномерного рельефа упрочняемой поверхности при типовом ЭИЛ напрямую зависит от приведенной энергии импульсов: чем больше приведенная энергия, тем рельеф грубее, а шероховатость выше. При данном подходе не учитыва-

ются сложность и стохастичность процесса ЭИЛ, определяемого множеством взаимовлияющих факторов. Поэтому шероховатость поверхности, образованная электроискровой обработкой, близка к нерегулярной. Шероховатость зависит от энергии единичного импульса, так как единичный импульс определяет размеры капли расплавленного металла, а следовательно, и высоту микронеровностей. Установлено [8], что в результате электроискровой обработки показатель R_a шероховатости полученного слоя может варьироваться от 3,2 до 12,5 мкм и более. Такой микрорельеф поверхности непригоден для многих высокотехнологичных и качественных узлов и механизмов. Типовой технологический процесс получения высококачественного покрытия методом ЭИЛ изображен на рис. 5 [6].

Важным аспектом является то, что массоперенос материала легирующего электрода происходит преимущественно в местах, наиболее выступающих над средней линией профиля (4-, 5- и 6-й шаги). Указанную неоднородность полученной структуры покрытия, а значит, и анизотропию его свойств можно объяснить следующими особенностями процесса: через возникающий при касании анода и катода в процессе ЭИЛ канал сквозной проводимости пучок электронов фокусированно ударяется о твердую металлическую поверхность анода. Энергия движения остановленных электронов выделяется в его поверхностных слоях. Энергия от специального источника питания импульсно подводится к разрядному промежутку, поэтому плотность тока в канале значительно превосходит критические значения. Вследствие этого металл анода локально разогревается, расплавляется и частично испаряется. Капля расплавленного металла отделяется от анода и, опережая его, движется к катоду. В процессе отделения от анода летящая капля успевает нагреться до высокой температуры, закипает и взрывается. Цепь тока прерывается, фокусирующее действие электромагнитного поля исчезает, и образовавшиеся частицы летят широким фронтом. Поскольку перегретая капля и частицы находятся в газовой среде, возможно образование химических соединений, вследствие чего отделившиеся от анода частицы могут отличаться от материала анода. Достигнув катода, расплавленные частицы анода свариваются с ним и частично внедряются в его поверхность.

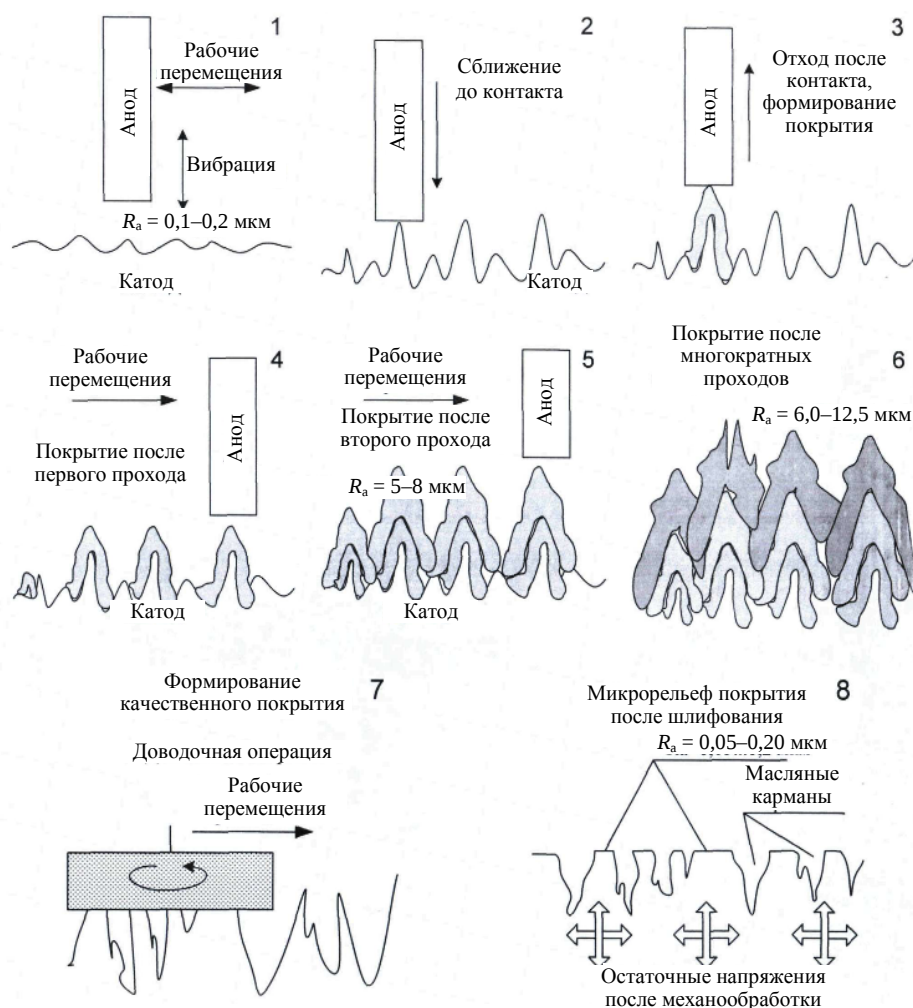


Рис. 5. Формирование профиля поверхности покрытия после типового электроискрового легирования стального катода

Fig. 5. Formation of coating surface profile after typical electrospark alloying of steel cathode

Движущийся за частицами электрод-анод механически ударяет о катод, перемешивая частицы анода. При этом протекают процессы диффузии и химических реакций. Механический удар по раскаленной массе металла проковывает полученное покрытие, увеличивая его однородность и плотность. Так как процесс носит локальный характер, имеет место и сверхскоростная закалка. После этого электрод-анод отходит от катода, а на поверхности последнего остается прочно соединенный с ним слой материала анода. Поскольку материал порошкового анода представляет собой сплав, который при воздействии на него энергией электроразрядной плазмы в период легирования эродировать весьма неравномерно, то при механическом биении о поверхность катода разновеликие отрываю-

щиеся капли анода (рис. 4), оседая на упрочняемую поверхность и кристаллизуясь, формируют неравномерные по толщине покрытия со случайным рельефом поверхности. При этом чем крупнее капля, что характерно для систем «тугоплавкое соединение – металл», чем толще создаваемое покрытие, тем больше различия в коэффициентах теплопроводности и теплоотвода между осевшей каплей материала анода и поверхностью катода, что вызывает появление трещин (рис. 6).

Сделать процесс электроискрового легирования более совершенным позволяет применение дополнительного ультразвукового воздействия. В настоящее время разработано множество устройств для электроискрового легирования с одновременным ультразвуковым воздействи-

ем. Ультразвуковая колебательная система способствует более стабильному течению пластической деформации, существенному упрочнению поверхностного слоя детали, увеличению микротвердости, а также снятию остаточных макро- и микронапряжений, сглаживанию неровности поверхности. В результате создается поверхностный слой с регулярным характером микрорельефа, однородной микроструктурой и сниженной шероховатостью. Авторы [6] в результате исследования указывают, что применение ультразвуковой обработки после предварительной операции шлифования снижает высоту микронеровностей от 3,2–6,2 до 1,3–3,7 мкм.

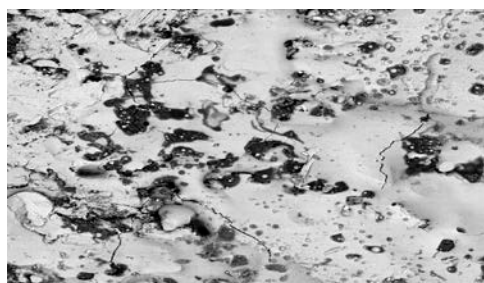


Рис. 6. Разветвленная сеть микротрещин на поверхности покрытия, полученного стандартным методом электроискрового легирования, $\times 1500$

Fig. 6. Extensive network of microcracks on coating surface produced by typical electrospark alloying method, $\times 1500$

Идея авторов данной статьи о применении ультразвука в процессе формирования более качественных покрытий заключается не в одновременном, а в последовательном ультразвуковом воздействии на поверхность катода. Именно такая обработка на первоначальном этапе обеспечивает гарантированное сглаживание неоднородностей в рельефе поверхности, обуславливая более стабильный массоперенос материала анода вследствие исключения на обрабатываемой поверхности зон, заметно выступающих над средней линией профиля. Это, в свою очередь, способствует более равномерному протеканию диффузионных процессов в анодно-катодной зоне при ЭИЛ. Кроме того, ранее выдвигалась гипотеза о том, что использование ультразвука для обработки поверхности катода до начала формирования собственно покрытия позволит уйти от основного недостатка стандартного метода ЭИЛ – ограниченности толщины покрытий, обусловленной тем,

что при увеличении времени легирования происходит накопление внутренних напряжений в легированном слое, которые релаксируют в определенный момент с последующим хрупким разрушением поверхностного слоя [9]. По мнению авторов данной статьи, использование ультразвука на первоначальной стадии интегральной обработки активирует поверхности анода и катода, интенсифицируя тем самым диффузионные потоки, стабилизируя их и обеспечивая устойчивые анодно-катодные взаимодействия. Кроме того, ультразвук уплотняет и выравнивает поверхность, а на ней в процессе ультразвукового легирования формируется равнотолщинный и однородный слой более мелких (благодаря ультразвуку) капель анода, на котором уже в процессе ЭИЛ покрытие из таких же по составу капель будет «вырастать» значительно быстрее. Цель завершающей ультразвуковой обработки – снижение уровня остаточных напряжений в покрытии, его доуплотнение, повышение однородности рельефа поверхности, снижение ее шероховатости.

В подтверждение выдвинутой гипотезы дополнительно к ранее проведенным исследованиям [6] изучалось влияние ультразвукового воздействия на разных стадиях формирования электроискровых покрытий с целью определения перспектив увеличения их массы и толщины покрытий после достижения порога хрупкого разрушения материала. При этом диапазон энергомеханических параметров интегральной обработки выбирали с учетом сделанных ранее выводов, что именно частота и интенсивность ультразвукового воздействия оказывают определяющее влияние на структурное и напряженное состояния легирующего анода и обрабатываемого катода, а величина электрических режимов – на характер и эрозионную способность материалов анодов и соответственно динамику их массопереноса, на интенсивность анодно-катодных взаимодействий.

Предварительную ультразвуковую обработку поверхности катода производили на установке ультразвукового электроискрового легирования УИЛ-2 с максимально возможной частотой 20,4–23,6 кГц, а модификацию поверхности уже сформированного покрытия – с применением специально разработанного и созданного авторами макетного образца ульт-

тразвукового устройства (рис. 7), работающего в диапазоне частот от 15 до 150 кГц, с выбранными для экспериментов частотами 22 и 44 кГц (напряжение питания 220 В; выходная мощность 1200 Вт; выходная частота 22–44 кГц).

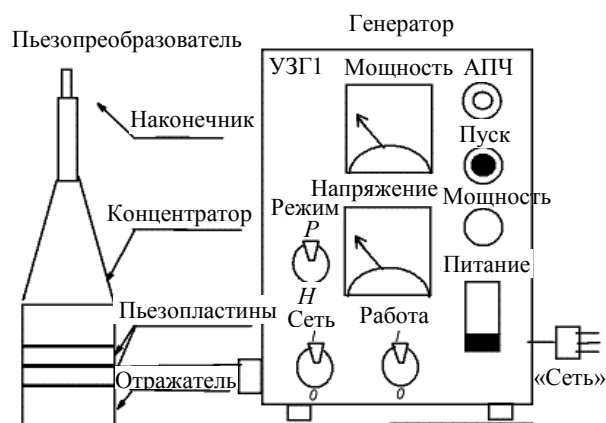


Рис. 7. Блок-схема ультразвукового устройства

Fig. 7. Block diagram of ultrasound device

Применение созданного ультразвукового устройства для модификации сформированного в процессе типового ЭИЛ покрытия (рис. 8а) позволило существенно улучшить его качество: топография упрочненной поверхности отличается минимальным количеством структурных несовершенств и регулярным рельефом с отклонениями от равнотолщинности не более 2–5 мкм (рис. 8б), что легко объясняется действием ультразвука на вещество [7].

Большую равнотолщинность покрытия, полученного в процессе трехступенчатого легирования УЗО + ЭИЛ + УЗМ, можно объяснить

активацией поверхности катода при ее предварительном деформировании с ультразвуковой частотой, обуславливающим создание дополнительных условий для возникновения искрового разряда. В результате этого осуществляется более интенсивный массоперенос, а также проковка высокочастотным механическим ударом электрода (анода) поверхности стальной основы (катода) при ультразвуковой модификации наносимого покрытия, которая значительно увеличивает его однородность и плотность [10]. По мнению авторов статьи, наложение таких колебаний способствует большему диспергированию капель расплава, переносимых с легирующего электрода на упрочняемую поверхность.

Поскольку рост покрытия при электроискровом легировании связан с эрозией легирующего электрода, то с целью оптимизации процесса эрозии порошковых анодов решалась задача расчета объема материала анода, эродирующего при ЭИЛ на стальной катод. Для этого ранее была создана физико-математическая модель, определяющая оптимальный размер капли анода, оседающей на поверхности катода в процесс анодно-катодных взаимодействий при легировании [11]. Экспериментально такую оценку выполняли посредством изучения кинетики массопереноса порошковых анодов во времени с использованием гравиметрического метода для определения привеса катода. Измерение массы стального катода проводили при помощи аналитических весов марки АДВ-200 с погрешностью $\pm(2 \cdot 10^{-4})$ г через каждую минуту легирования.

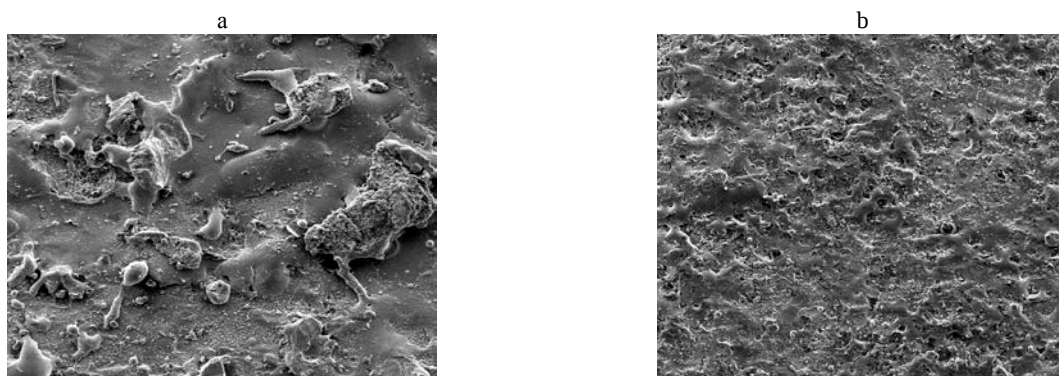


Рис. 8. Топография поверхности покрытий, полученных типовым электроискровым легированием (а) и интегральным методом УЗО + ЭИЛ + УЗМ (б), $\times 1500$

Fig. 8. Topography of coatings surface produced by typical electrospark alloying (a) and integral ultrasonic treatment [UST] + electrospark alloying [ESA] + ultrasonic metallization [USM] (b) methods, $\times 1500$

После серии измерений строили графики зависимости массы катода от продолжительности ЭИЛ. Прямое измерение массы позволяет говорить о направлении массопереноса и его эффективности. Режимы легирования подбирали исходя из оптимальных условий: максимального приращения массы, отсутствия интенсивного окисления и схватывания электродов. Обработку продолжали до формирования сплошного покрытия на поверхности катода, длительность ее зависела от материала, выбранного в качестве анода. Эффективность легирования оценивали по кинетическим зависимостям изменения массы катода от времени легирования и по качеству поверхности сформированного покрытия.

Графики изменения привеса массы катода от времени его легирования порошковыми анодами на основе сплава «колмоной», содержащими разное количество карбида вольфрама, приведены на рис. 9. Как видно из полученных зависимостей, при легировании стали 45 порошковым анодом из сплава «колмоной» + 10 % WC» порог хрупкого разрушения формируемого покрытия наступил на 11-й минуте легирования. На 15-й минуте легирования было произведено ультразвуковое воздействие на формируемое покрытие в течение 2 мин с частотой 22 кГц. В результате процесс прироста массы катода, а значит, и толщины формируемого покрытия возобновился и продолжался до 25-й минуты.

Анализ кривой привеса массы катода при его легировании порошковым анодом состава

«колмоной» + 80 % WC» показал возрастание продолжительности легирования с постоянным увеличением привеса. Порог хрупкого разрушения наступал на 26-, 34- и 43-й минутах легирования. На 26-, 34- и 43-й минутах легирования производили ультразвуковое воздействие на формируемое покрытие в течение 2 мин с частотой 22 кГц, после чего вновь наблюдали прирост массы катода с 26-й по 32-ю минуту, с 34-й по 41-ю минуту и с 43-й по 57-ю минуту легирования.

Исходя из полученных экспериментальных данных по динамике массопереноса, можно сделать вывод, что прирост массы катода зависит от содержания более твердых и хрупких фаз в составе порошковых анодов, в данном случае – от концентрации карбида вольфрама WC. Большой прирост массы катода отмечен при легировании анодами с содержанием 10 % WC, наименьший – с содержанием 80 % WC.

Объяснить это можно тем, что в процессе крупнокапельной эрозии таких порошковых анодов капли хрупкой, наименее термодинамически устойчивой фазы WC, неравномерно дробясь и хаотично оседая на поверхности катода, привариваются к ней и формируют грубый неоднородный рельеф, проковать который, снизить уровень остаточных растягивающих напряжений в покрытии с помощью ультразвука и обеспечить активацию процессов взаимодействия в анодно-катодной области для дальнейшего нарастания слоя более затруднительно, чем в случае «спокойного» рельефа.

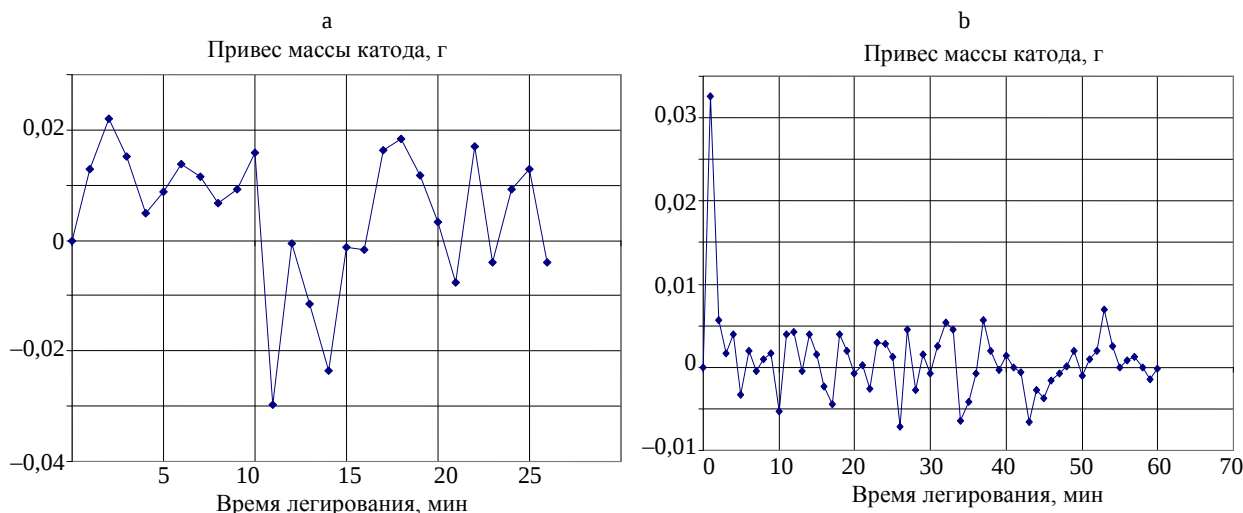


Рис. 9. Зависимость привеса массы катода от времени его легирования порошковыми анодами для сплавов: а – «колмоной» + 10 % WC»; б – «колмоной» + 80 % WC»

Fig. 9. Alloying time dependence of cathode weight increment by powder anodes for alloys: а – “colmonoy” + 10 % WC”; б – “colmonoy” + 80 % WC”

ВЫВОДЫ

1. В процессе проведенного исследования подтверждено, что основные недостатки стандартной технологии электроискрового легирования с высокой энергией плазмы и низкочастотным механическим ударом – неустойчивость процесса, хаотичный массоперенос, обусловливаемый неравномерной и спонтанной эрозией легирующего анода, низкое качество покрытия – нивелируются в случае применения дополнительного ультразвукового воздействия на материал, особенно при использовании в качестве анодов сложнокомпонентных электродных систем.

2. При изучении роли ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий установлены широкие перспективы и высокая эффективность интегральной технологии УЗО + ЭИЛ + УЗМ, особенно для применения порошковых легирующих композиций, имеющих низкий порог хрупкого разрушения и обычно эродирующих крупнокапельным путем, приводя к формированию покрытий с грубым, неоднородным рельефом поверхности.

3. В случае использования интегральной технологии отмечена возможность дальнейшего наращивания толщины формируемых покрытий даже после достижения порога хрупкого разрушения материала покрытия. Определено, что ультразвуковое воздействие с частотой 22 кГц на формируемое покрытие по достижении последним порога хрупкого разрушения снижает величину остаточных (растягивающих) напряжений в поверхностном слое, что позволяет продолжить процесс наращивания толщины покрытия. При этом показано, что первоначальная обработка поверхности в изучаемом диапазоне ультразвуковых частот (15–44 кГц) способствует заметному возрастанию скорости массопереноса при электроискровом легировании независимо от уровня вольт-амперных характеристик и типа металлической основы и определяется прежде всего химическим составом и термодинамической устойчивостью анодов.

4. При изучении влияния частоты и интенсивности электромеханического воздействия

на кинетику массопереноса легирующего анода систем «тугоплавкое соединение – металл», полученных методами порошковой металлургии, определено, что покрытия с минимальным количеством несовершенств и регулярным рельефом с отклонениями от равнотолщинности не более 2–5 мкм получаются в процессе трехступенчатого легирования УЗО + ЭИЛ + УЗМ. Более активно нарастание массы катода происходит после ультразвуковой обработки его поверхности с частотой 44 кГц. В этом случае созданная поверхность имеет очень тонкий рельеф с существенно меньшей шероховатостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко, Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко, Б. Р. Лазаренко // Электронная обработка материалов. 1977. № 3. С. 12–16.
2. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов. Минск: Вышэйш. шк., 1988. 154 с.
3. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич [и др.]. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
4. Самсонов, Г. В. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г. В. Самсонов, А. Д. Верхогуров. Киев: Наук. думка, 1986. 50 с.
5. Разработка технологии получения многокомпонентных электродов систем «карбид – металл». Определение оптимальных режимов смешивания, прессования и спекания: отчет о НИР (этап 1) / Институт проблем материаловедения НАН Украины; рук. темы А. В. Паустовский. Киев, 2013. 19 с. Ф54.2/013; 1-8-13.
6. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов: теория и практика / Ф. Х. Бурумкулов [и др.]. Саранск: МГУ имени Н. П. Огарева, 2003. 504 с.
7. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электро-механическим воздействием / Н. М. Чигринова. Минск, 2010. 310 с.
8. Рахимьянов, Х. М. Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании / Х. М. Рахимьянов, Ю. С. Семенова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 2. С. 3–9.
9. Коротаев, Д. Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием / Д. Н. Коротаев. Омск: СибАДИ, 2009. 255 с.

10. Самсонов, Г. В. Закономерности электроискрового разрушения тугоплавких металлов с углеродом, бором / Г. В. Самсонов, А. Н. Лемешко // Электронная обработка материалов. 1969. № 6. С. 3–6.
11. Чигринова, Н. М. Микроплазменное легирование с ультразвуковым модифицированием поверхности / Н. М. Чигринова, А. А. Кулешов, В. В. Нелаев // Электронная обработка материалов. 2010. № 2. С. 27–36.

Поступила 26.11.2015

Подписана в печать 29.02.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Lazarenko N. I., Lazarenko B. R. (1977) Electric Spark Alloying of Metal Surfaces. *Elektronnaya Obrabotka Materialov* [Electronic Processing of Materials], (3), 12–16 (in Russian).
2. Spiridonov N. V., Kobayakov O. S., Kupriyanov I. L. (1988) *Plasma and Laser Hardening Methods*. Minsk, Vysheyskaya Shkola. 154 (in Russian).
3. Gitlevich A. E., Mikhailov V. V., Parkansky N. Ya., Revutsky V. M. (1985) *Electrospark Alloying of Metal Surfaces*. Kishinev, Publishing House “Shtiintsa”. 196 (in Russian).
4. Samsonov G. V., Verkhuturov A. D. (1986) *Electrospark Alloying of Metal Surfaces*. Kiev, Naukova Dumka. 50 (in Russian).
5. Paustovskiy A. V. [Project Coordinator] (2013). Development of Technology for Obtaining Multicomponent Electrodes of Carbide-Metal System. Determination of Optimal Blending, Pressing and Sintering Modes: Research Report (Stage 1). Kiev, Institute for Problems of Materials Science, National Academy of Science of Ukraine. 19. Ф54.2/013; 1-8-13 (in Russian, unpublished).
6. Burumkulov F. Kh., Lezin P. P., Senin P. V., Ivanov V. I., Velichko S. A., Ionov P. A. (2003) *Electrospark Technologies for Restoration and Strengthening of Machine Parts and Tools (Theory and Practice)*. Saransk: Ogarev Mordovia State University [Ogarev MSU]. 504 (in Russian).
7. Chigrinova N. M. (2010) Intensification of Microplasma-spark Hardening and Restoration Processes for Metal Products of Increased Accuracy by Electromechanical Action. Minsk. 310 (in Russian).
8. Rakhimyanov Kh. M., Semyonova Yu. S. (2010) Modeling of Process for Formation of Regular Microrelief at Ultrasonic Plastic Deformation. *Uprochniayushchie Tekhnologii i Pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings], (2), 3–9 (in Russian).
9. Korotayev D. N. (2009) *Technological Possibilities for Formation of Wear-Resistant Nanostructures by Electrospark Alloying*. Omsk: Siberian State Automobile and Highway Academy [SibADI]. 255 (in Russian).
10. Samsonov G. V., Lemesko A. N. (1969) Regularities of Electric Destruction in Refractory Metals with Carbon and Boron. *Elektronnaya Obrabotka Materialov* [Electronic Processing of Materials], (6), 3–6 (in Russian).
11. Chigrinova N. M., Kuleshov A. A., Nelaev V. V. (2010) Microplasma-Spark Alloying with Ultrasonic Surface Modification. *Elektronnaya Obrabotka Materialov* [Electronic Processing of Materials], (2), 27–36 (in Russian).

Received: 26.11.2015

Accepted: 29.02.2016

Published online: 26.09.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-391-396

УДК 621.9.048

Влияние геометрических параметров лунки, полученной на металлической поверхности в результате воздействия электрического разряда, на ее режущую способность

Докт. техн. наук, проф. М. Г. Киселев¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты Г. А. Есьман¹⁾, А. В. Дроздов¹⁾, асп. П. С. Богдан¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Выполнен анализ геометрических параметров лунок, полученных на поверхности проволоки при ее электроконтактной обработке. Приведена фотография и дано описание одной из таких лунок. Проанализирована форма сечения полученной лунки с учетом образовавшихся по ее краям наплывов затвердевшего металла, которые в первом приближении можно считать элементами режущего клина. Исходя из положений теории резания, рассмотрена форма наплывов затвердевшего металла в продольном сечении, указаны углы, образованные ими, рабочие плоскости и кромки, которые могут участвовать в процессе резания. Показано, что режущие элементы на поверхности лунки располагаются симметрично. Это делает возможным осуществление процесса резания при перемещении инструмента в обоих направлениях возвратно-поступательного движения. Выделены параметры режущей поверхности, влияющие на протекание процесса резания. Отмечено, что за счет изменения энергии электрического разряда через напряжение либо емкость накопительного конденсатора источника питания можно целенаправленно влиять на форму и размеры наплывов металла и соответственно на значения параметров режущего клина, определяющих режущую способность инструмента. Сделан вывод о возможности получения наивыгоднейших значений этих параметров путем оптимизации режимов электроконтактной обработки проволоки.

Ключевые слова: электроконтактная обработка, проволоочный инструмент, единичная лунка, режущий инструмент, стружка, электрод-инструмент

Для цитирования: Влияние геометрических параметров лунки, полученной на металлической поверхности в результате воздействия электрического разряда, на ее режущую способность / М. Г. Киселев [и др.] // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 391–396

Effect of Dimple Geometric Parameters Obtained on Metal Surface by Electrical Discharge on its Cutting Ability

M. G. Kiselev¹⁾, G. A. Yesman¹⁾, A. V. Drozdov¹⁾, P. S. Bohdan¹⁾

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

Abstract. The paper contains an analysis of dimple geometric parameters obtained on wire surface during its in its electrical discharge machining. A photography and description of one of the dimples has been given in the paper. The paper has analyzed a cross-sectional shape of the obtained dimple with due account of the solidified metal flows formed along its edges. The flows in a first approximation can be considered as elements of a cutting wedge. According to cutting theory provisions the paper considers solidified metal flow shapes in a longitudinal section and indicates angles which have been formed by the flows, working planes and edges which can be involved in the cutting process. It has been shown that cutting elements on the dimple surface are arranged symmetrically that makes it possible to carry out cutting process while moving a tool in both

Адрес для переписки

Киселев Михаил Григорьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-40-81
kippp@bntu.by

Address for correspondence

Kiselev Mihail G.
Belarusian National Technical University
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-40-81
kippp@bntu.by

directions of reciprocating motion. Parameters of cutting surface influencing on cutting process execution have been specified in the paper. It has been demonstrated that due to changes in energy of electric discharge through voltage or capacity of a power supply storage capacitor it is possible purposefully to influence on the shape and size of metal flows and, respectively, on values of cutting wedge parameters that characterize a tool cutting ability. A conclusion has been made about possibility to obtain the most advantageous values of these parameters while optimizing modes of wire electrical discharge machining.

Keywords: electrical discharge machining, wire tool, single dimple, cutting tool, chip, electrode tool

For citation: Kiselev M. G., Yesman G. A., Drozdov A. V., Bohdan P. S. (2016) Effect of Dimple Geometric Parameters Obtained on Metal Surface by Electrical Discharge on its Cutting Ability. *Science & Technique*. 15 (5), 391–396 (in Russian)

В исследованиях [1–3] установлено, что в результате электроконтактной обработки (разновидность электроэрозионной) металлической поверхности ей можно придать режущую способность. Достигается это за счет того, что в результате электрической эрозии на поверхности формируются характерные лунки (кратеры), имеющие по краям наплывы (валики) затвердевшего металла, которые располагаются выше уровня исходной поверхности [4], как показано на рис. 1.

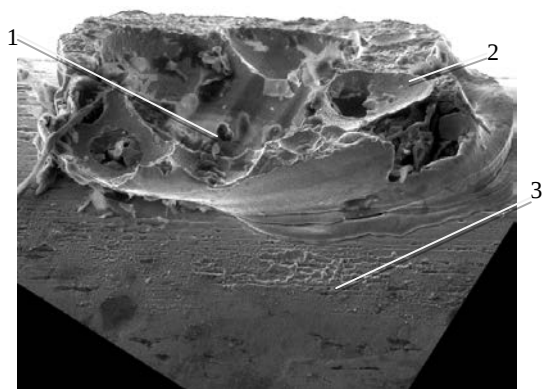


Рис. 1. Фотография единичной лунки, полученной на поверхности стальной проволоки диаметром 0,36 мм при однократном электроконтактном воздействии:

1 – лунка; 2 – наплывы затвердевшего по ее краям металла; 3 – исходная поверхность проволоки

Fig. 1. Photography of single dimple obtained on steel wire surface of 0.36 mm diameter while using single electrical discharge machining:

1 – dimple; 2 – solidified metal flows along dimple edges; 3 – initial wire surface

Формирование лунок при электроконтактной обработке связано с последовательным протеканием различных процессов [5]. При сближении электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью на расстоянии, соответствующем минимальному межэлектродному промежутку, образуется канал проводимости, по которому за весьма короткий промежуток времени протекает электрический ток высокой

плотности. В результате металл на границах канала проводимости расплавляется и испаряется, а рабочая жидкость, окружающая канал разряда, испаряясь, образует газовую полость. В начальный момент скорость движения границы газовой полости достигает 200 м/с, а давление в ней – сотен атмосфер. После окончания импульса тока газовая полость продолжает по инерции расширяться, что приводит к быстрому падению давления в ней, вплоть до давления ниже атмосферного. В момент, когда размеры газовой полости приближаются к наибольшим, а давление в ней – к наименьшему, перегретый металл, который находится в образовавшейся лунке, вскипает и выбрасывается из нее. Реактивной струей паров металла оставшийся в лунке жидкий металл выдавливается из нее и, застывая, образует окаймляющий лунку наплыв (валик) металла [6].

Именно эти наплывы металла могут быть своеобразными режущими элементами, которые способны в процессе обработки снимать стружку с поверхности материалов, уступающих им по твердости. Важно подчеркнуть, что геометрические параметры формируемых лунок, включая форму и размеры образовавшихся по их краям наплывов металла, определяются условиями и режимами выполнения электроконтактной обработки, в частности энергией электрического разряда, наличием и свойствами применяемой диэлектрической жидкости [7, 8]. Отсюда следует, что путем варьирования режимов и условий электроконтактной обработки поверхности можно за счет изменения формы и размеров образовавшихся наплывов металла соответствующим образом влиять на ее режущую способность. В этой связи цель исследований заключалась в оценке с позиции теории резания влияния геометрических параметров лунки, получаемой на поверхности заготовки в процессе электроконтактной обработки, на уровень ее режущей способности.

Проанализируем геометрию наплывов металла с точки зрения формирования на них режущих элементов (кромки), для чего воспользуемся схемой, представленной на рис. 2.

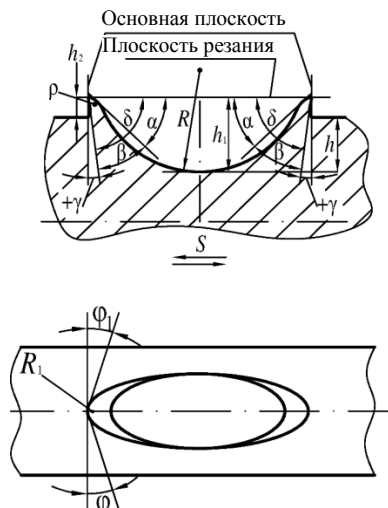


Рис. 2. Схема сечения лунки с указанием геометрических параметров, влияющих на ее режущую способность:

γ , α – передний и задний угол соответственно;
 β – угол резания; ρ – радиус закругления режущей кромки; R – радиус лунки (впадины);
 h_1 – глубина впадины; h_2 – высота зуба

Fig. 2. Diagram of dimple section with an indication of geometrical parameters exerting influence on its cutting ability: γ , α – front rake and back angle, respectively; β – cutting angle; ρ – bending radius of cutting edge; R – dimple radius (cavity);
 h_1 – cavity depth; h_2 – tooth height

Как известно [9, 10], в процессе резания инструмент должен занимать определенное положение относительно станка и обрабатываемой заготовки. Непосредственную работу резания выполняет режущая часть под действием усилия, передаваемого от станка через присоединительную часть инструмента. Чтобы режущая часть смогла внедриться под отделяемый слой материала, она должна иметь форму клина (рис. 3). Этот клинообразный элемент режущей части инструмента называют режущим клином. Во всех случаях режущий клин имеет по меньшей мере две рабочие поверхности: переднюю и заднюю. По передней поверхности (рис. 3) сходит отделяемая в процессе резания стружка, а задняя поверхность обращена в сторону обработанной поверхности заготовки. Пересечение передней и задней поверхностей образует край клина, называемый режущей кромкой или режущим лезвием. Форма

рабочих поверхностей режущего клина, расположение этих поверхностей относительно друг друга и относительно составляющих движения резания определяются геометрией режущей части или геометрическими параметрами, от которых зависит работоспособность инструмента. Для обеспечения возможности изготовления инструмента, а также количественной оценки его параметров последние задают в определенных системах координат: статической или кинематической (рабочей). Статическая система предназначена для определения параметров инструмента в статике (инструмента как геометрического тела) с целью его изготовления.

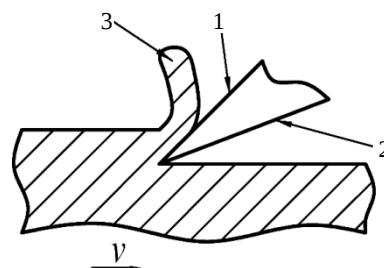


Рис. 3. Режущий клин: 1, 2 – передняя и задняя поверхность соответственно; 3 – отделяемая стружка

Fig. 3. Cutting wedge: 1, 2 – front and back surface, respectively; 3 – separated chips

Кинематическая, или рабочая, система координат используется для определения параметров инструментов в процессе резания с учетом реальной траектории резания. Следует отметить, что при обработке вектор истинной скорости резания изменяет свое положение в пространстве в зависимости от соотношения его составляющих и положения точки режущей кромки относительно заготовки или инструмента. Вместе с ним перемещаются координатные плоскости. Поэтому углы инструмента в процессе обработки, так называемые кинематические геометрические параметры или рабочие углы, также изменяются.

Для конкретных инструментов и условий работы есть свои наивыгоднейшие значения рабочих углов, при которых процесс резания протекает в наивыгоднейших условиях. Из теории резания известно, что с увеличением переднего угла γ уменьшаются коэффициент усадки стружки, работа стружкообразования и все составляющие силы резания. В результате снижается количество выделяемой теплоты,

что положительно влияет на стойкость инструмента. Однако при этом уменьшается угол заострения режущего клина и ухудшается отвод теплоты от его источников в тело инструмента. Оба процесса действуют одновременно и приводят к экстремальной зависимости стойкости инструмента T от переднего угла γ .

При $\gamma = \gamma_{\text{опт}}$ условия резания наиболее благоприятны и стойкость инструмента максимальна. Для $\gamma < \gamma_{\text{опт}}$ превалирует влияние тепловыделения, для $\gamma > \gamma_{\text{опт}}$ — влияние теплоотвода. С увеличением прочности и твердости обрабатываемого материала, способствующих росту температуры резания, а также при снижении прочности инструментального материала оптимальное значение γ уменьшается.

Задний угол α влияет на процессы, происходящие на задней поверхности инструмента. Зависимость $T = f(\alpha)$ имеет максимум при некотором оптимальном значении $\alpha_{\text{опт}}$. При изменении α от 0 до $\alpha_{\text{опт}}$ на стойкость сильнее влияют уменьшение ширины площадки контакта (ρ на рис. 2) и снижение сил на задней поверхности. Когда α становится больше $\alpha_{\text{опт}}$, стойкость инструмента снижается из-за чрезмерного уменьшения угла заострения, прочности режущего клина и ухудшения теплоотвода в тело инструмента. Величина оптимального заднего угла возрастает с усилением факторов, способствующих изнашиванию по задней поверхности:

- при повышении способности обрабатываемого материала к упругому восстановлению обработанной поверхности (характеризуется пределом упругости);
- при уменьшении толщины срезаемого слоя.

Главный угол в плане ϕ при постоянных глубине резания и подаче изменяет соотношение между шириной и толщиной среза: с увеличением ϕ толщина среза увеличивается, а ширина уменьшается. Поэтому в случае свободного резания любых материалов, а также несвободного резания хрупких материалов с увеличением ϕ составляющая сил резания P_z уменьшается. Однако при резании пластичных материалов инструментами с переходным дуговым лезвием определенного радиуса влияние ϕ проявляется в усилении степени деформации срезаемого слоя по сравнению с прямолинейным резанием.

Вспомогательный угол в плане ϕ_1 влияет главным образом на стойкость инструмента и шероховатость обработанной поверхности. Зависимость $T = f(\phi_1)$ имеет максимум при оптимальном значении $\phi_{1\text{опт}}$. Это объясняется наличием таких факторов, влияющих на стойкость инструмента в противоположных направлениях при увеличении ϕ_1 , как:

- уменьшение рабочей длины вспомогательной режущей кромки и соответствующее снижение износа;
- сокращение отвода теплоты из зоны резания в тело инструмента в связи с уменьшением того объема инструмента, который примыкает к углу ϕ_1 , и соответствующее увеличение его износа.

Кроме всего прочего, увеличение ϕ_1 сопровождается ростом высоты микронеровностей на обработанной поверхности, поэтому в случае чистовой обработки стараются свести ϕ_1 к минимуму, т. е. к нулю. Это достигается созданием на инструментах переходной режущей кромки с $\phi_1 = 0$ (прямолинейной или радиусной).

Таким образом, для создания наиболее благоприятных условий протекания процесса обработки необходимо обеспечить оптимальные значения геометрических параметров режущих элементов, полученных в результате электроконтактной обработки исходной поверхности инструмента. Как было показано ранее [3], энергия электрического импульса W (напряжение накопительного конденсатора U и его емкость C) оказывает существенное влияние на глубину и форму формируемых на поверхности проволочного инструмента наплывов металла (рис. 4).

Так, при малом значении W эти наплывы имеют различную высоту h_2 и скругленную (радиусом ρ) по краям лунки форму (рис. 4а). По мере повышения энергии импульса, одновременно с увеличением радиуса R и глубины лунки h_1 , возрастает высота наплывов h_2 (высота зуба) и изменяется их форма. Они становятся более вытянутыми и имеют характерную границу (кромку) в месте сопряжения с исходной поверхностью (рис. 4с), которая характеризуется меньшим значением радиуса ρ ее скругления. Отмеченные изменения в размерах и форме наплывов металла объясняют повышение режущей способности инструмента с увеличением энергии электрического импульса в про-

цессе электроконтактной обработки его поверхности.

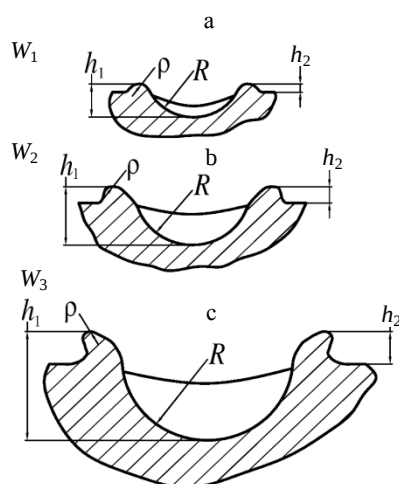


Рис. 4. Схема сечения единичной лунки на образовавшейся поверхности при различном значении энергии электрического импульса W : а – W_1 ; б – W_2 ; в – W_3 ($W_a < W_b < W_c$)

Fig. 4. Diagram of cross-section for single dimple formed on the surface at various energy value of electrical impulse W : а – W_1 ; б – W_2 ; в – W_3 ($W_a < W_b < W_c$)

Отмеченные изменения в размерах и форме наплывов металла объясняют повышение режущей способности инструмента с увеличением энергии электрического импульса в процессе электроконтактной обработки его поверхности. Важно отметить то положительное обстоятельство, что наплывы металла располагаются симметрично относительно центра лунки, а это, в свою очередь, позволяет осуществлять процесс резания при движении проволоочного инструмента вдоль его оси в обоих направлениях.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что наплывы металла по краям лунки, полученной на поверхности проволоки в результате ее электроконтактной обработки, обоснованно можно рассматривать как своеобразные режущие элементы, способные снимать стружку с материалов, уступающих им по твердости.

2. Установлено, что размеры получаемой лунки, включая форму и размеры образовавшихся по ее краям наплывов металла, влияют на геометрические параметры образованного ими режущего клина. В частности, изменяются

углы γ , α , β , δ , φ , а также радиус закругления режущей кромки ρ , которые определяют условия протекания процесса резания.

3. Установлено, что за счет применения энергии электрического импульса в ходе электроконтактной обработки поверхности проволоочного инструмента можно целенаправленно влиять на геометрические параметры единичной лунки, а также на форму и размеры образовавшихся по ее краям наплывов металла. Так, с повышением энергии электрического разряда, одновременно с увеличением радиуса и глубины лунки возрастает высота наплывов металла (высота зуба) и изменяется их форма: они становятся более вытянутыми, имеют характерную границу (кромку) в месте сопряжения с исходной поверхностью и характеризуются меньшим значением радиуса закругления режущей кромки.

4. Показано, что благодаря симметричному расположению наплывов металла относительно центра лунки становится возможным осуществлять процесс резания материалов при движении проволоочного инструмента вдоль его оси в обоих направлениях, что является существенным достоинством данного инструмента.

5. С целью практического использования такого проволоочного инструмента необходимо продолжить исследования, направленные в первую очередь на определение режимов и условий выполнения электроконтактной обработки его поверхности, позволяющие эффективно управлять процессом формирования на ней наплывов металла с оптимальными параметрами элементов режущего клина, обеспечивающими наибольшую режущую способность инструмента и высокое качество распиленных им поверхностей заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эффективность применения электроконтактной обработки поверхности проволоочного инструмента с целью придания ей режущей способности / М. Г. Киселев [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В: Прикладные науки. Промышленность. 2013. № 11. С. 73–77.
2. Влияние режимов электроконтактной обработки исходной поверхности проволоочного инструмента на величину сил резания в процессе распиливания им материалов без использования абразивной суспензии /

- М. Г. Киселев [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. 2014. Т. 42, № 1. С. 15–22.
3. Экспериментальная оценка режущей способности штрипс с модифицированной путем электроконтактной обработки рабочей поверхностью / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. Т. 28, № 3. С. 64–68.
4. Особенности формирования следов обработки на поверхности титанового образца при однократном электроконтактном воздействии на нее проволочным электродом-инструментом / М. Г. Киселев [и др.] // Наука и техника. 2013. № 2. С. 23–27.
5. Фотеев, Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. М.: Машиностроение, 1980. 184 с.
6. Исследование стадий взаимодействия проволочного электрода-инструмента с поверхностью заготовки при ее электроконтактной обработке / М. Г. Киселев [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. 2013. Т. 53, № 2. С. 3–10.
7. Бирюков, Б. Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б. Н. Бирюков. М.: Машиностроение, 1981. 128 с.
8. Попилов, Л. Я. Основы электротехнологии и новые ее разновидности / Л. Я. Попилов. Л.: Машиностроение, 1971. 216 с.
9. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. М.: Высш. шк., 1985. 304 с.
10. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент / С. А. Рубинштейн [и др.]. М.: Машиностроение, 1968. 392 с.
2. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Moskalenko A. V., Bogdan P. S. (2014) Influence of Contact-Initiated Machining Modes Used for Initial Surface of Wire Tool on Value of Cutting Force in the Sawing Process of Materials Without Usage of Abrasive Suspension. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], 42 (1), 15–22 (in Russian).
3. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Bogdan P. S., Gabets V. L. (2014) Experimental Evaluation of Cutting Capability for Strip Working Surface Modified by Contact-Initiated Machining. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 28 (3), 64–68 (in Russian).
4. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Monich S. G., Bogdan P. S. (2013) Peculiar Features of Machining Marks Formation on Surface of Titanium Specimen with Single Electro Contact Action of Wire Electrode-Tool. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], (2), 23–27 (in Russian).
5. Foteev N. K. (1980) *EDM [Electric Discharge Machining] Technology*. Moscow, Mashinostroyenie. 184 (in Russian).
6. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Monich S. G., Bogdan P. S. (2013) Investigations on Interaction Stages of Wire Tool Electrode and Workpiece Surface While Using Contact-Initiated Machining. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gome], 53 (2), 3–10 (in Russian).
7. Biryukov B. N. (1981) *Electrophysical and Electrochemical Methods for Dimensional Processing*. Moscow, Mashinostroyenie. 128 (in Russian).
8. Popilov L. Ya. (1971) *Fundamentals of Electrotechnics and its New Types*. Leningrad, Mashinostroyenie. 216 (in Russian).
9. Granovsky G. I., Granovsky V. G. (1985) *Metal Cutting*. Moscow, Vysshaya Shkola. 304 (in Russian).
10. Rubinshtein S. A., Levant G. V., Ornis N. M., Tarasovich Iu. S. (1968) *Fundamentals of Metal Cutting and Cutting Tool*. Moscow, Mashinostroyenie. 392 (in Russian).

Поступила 15.01.2016
Подписана в печать 17.03.2016
Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

Received: 15.01.2016
Accepted: 17.03.2016
Published online: 26.09.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-397-406

УДК 631.372:622.232

К обоснованию колесного шасси комбайна для работы с оборудованием уборки свеклы

Кандидаты техн. наук, доценты Г. А. Таяновский¹⁾, А. А. Калина¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016

Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Статья посвящена актуальной научно-технической проблеме создания многомостовых колесных шасси высокоэффективных модульных свеклоуборочных комбайнов большой грузоемкости, в частности выбору главных параметров шасси и колесного привода. Такие машины предназначены для эксплуатации в сложных почвенно-климатических условиях уборки сахарной свеклы. Разработаны методические положения решения задачи научно обоснованного выбора модели колесного шасси из числа выпускаемых или разрабатываемых, параметров агрегирования рабочего аппарата и шасси, рационального алгоритма управления ходовой системой агрегата при работе с заданным (отечественным или зарубежным) полунавесным оборудованием для уборки свеклы. При решении задачи развиты положения теории колесных машин применительно к специфике колесных шасси модульных свеклоуборочных комбайнов с механическим или гидрообъемным разветвленным приводом колес многомостового движителя. Получены расчетно-теоретические выражения для определения главных параметров колесного шасси, включающие в явном виде определяющие его рабочий процесс физические величины эксплуатационных условий. Это позволило реализовать полученные выражения в виде программного приложения, удобного для анализа главных параметров исследуемого шасси комбайна и рациональных параметров разветвленного привода колес, а также комплектации шинами в случае проектирования свеклоуборочного комбайна на основе колесного шасси выбранной схемы. Исследования имеют теоретическое значение и представляют практический интерес для разработчиков новых многомостовых модульных свеклоуборочных комбайнов.

Ключевые слова: свеклоуборочный комбайн, параметры, колесное шасси, агрегирование

Для цитирования: Таяновский, Г. А. К обоснованию колесного шасси комбайна для работы с оборудованием уборки свеклы / Г. А. Таяновский, А. А. Калина // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 397–406

To Substantiation of Combine Wheeled Chassis for Beet Harvesting Equipment

G. A. Tajanowski¹⁾, A. A. Kalina¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers a current scientific and technical problem pertaining to creation of multi-bridge wheeled chassis for highly efficient modular sugar beet harvesters of large cargo capacity and, in particular, to selection of main parameters of chassis and wheeled drive. Such machines are designed for operation under complicated soil and climatic conditions during sugar beet harvesting. Methodological rules and regulations have been developed for solution of problems pertaining to scientifically substantiated selection of a manufactured or developed wheeled chassis model, building-block parameters of a working device and a chassis, rational control algorithm of the unit running system while using a specified (domestic or foreign) semi-mounted equipment for beet harvesting. While solving the problem theoretical provisions for

Адрес для переписки

Калина Алла Александровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/1,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-28
mparts@bntu.by

Address for correspondence

Kalina Alla A.
Belarusian National Technical University
65/1 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-28
mparts@bntu.by

wheeled vehicles regarding specific features of a wheeled chassis for modular sugar beet harvesters with extensive mechanical or hydrostatic wheel drive of a multi-bridge propulsion system have been developed in the paper. Calculated and theoretical expressions for determination of main parameters for a wheeled chassis have been obtained and they include physical quantities of operational conditions that explicitly determine its working process. Such approach has made it possible to realize the obtained expressions as a software application which is suitable for analysis of main parameters in respect of the investigated harvester chassis and rational parameters of a branch wheel drive and also for a complete set of tires in the case when a sugar beet harvester is designed on the basis of wheeled chassis according to the selected scheme. Investigations have theoretical significance and represent practical interest for development specialists of new modular multi-bridge sugar beet harvesters.

Keywords: sugar beet harvester, parameters, wheeled chassis, building-block system

For citation: Tajanowskij G. A., Kalina A. A. (2016) To Substantiation of Combine Wheeled Chassis for Beet Harvesting Equipment. *Science & Technique*. 15 (5), 397–406 (in Russian)

Введение

Идея создания сельскохозяйственных уборочных машин на базе универсального самоходного шасси нашла свое воплощение еще в прошлом веке. Немецкая фирма Agro-Industrie-Projekt GmbH в содружестве с ведущими сельхозмашиностроительными компаниями Claas, Laverda, Amazone, Dutzi и KHD-Fahr сконструировала универсальные шасси Multipower 320T, предназначенные для монтажа различных сельскохозяйственных машин и орудий: зерно- и свеклоуборочных комбайнов, соломоизмельчителей, разбрасывателей удобрений, машин для уборки кукурузы на зерно. Все машины и оборудование приводились в действие непосредственно от шестицилиндрового дизельного двигателя шасси мощностью 223 кВт. Масса шасси составляла 5050 кг, годовая загрузка 2136 ч.

Наряду с самоходными шасси на европейском рынке появились энергосредства (например, Steut 8300), разработанные специально для эксплуатации с навесными комбайнами высокой производительности и другими сельскохозяйственными машинами. Гидрообъемная трансмиссия с трехскоростной механической коробкой передач позволила обеспечить более свободную компоновку узлов и меньшую высоту их размещения, а следовательно, и снижение центра тяжести, несмотря на высокое расположение кабины.

Некоторые фирмы стали использовать модульный принцип построения самоходных машин в классе навесных комбайнов к тягово-энергетическим средствам. В основе конструкции таких машин лежит принцип тягового средства, предназначенного для работы с уборочными машинами: трансмиссия бесступенчатого регулирования или обеспечивающая длительную работу на реверсе, развитая система

механических и гидравлических отборов мощности, платформа и сцепное устройство. Тягово-энергетическое средство выполняется преимущественно по схеме 4К4 с равными колесами и шарнирно-ломающейся рамой.

ПО «Гомсельмаш» представило многовариантность машин как сочетание двух направлений: возможности комплектации базового энергосредства как шасси технологическими орудиями и возможности комплектации высвобождаемого от орудий шасси в качестве специализированного энергосредства для агрегатирования с уборочными комбайнами и другими машинами с активными рабочими органами.

В последнее десятилетие многие сельхозмашиностроительные компании обратили особое внимание на создание уборочных машин для корнеплодов, в частности для уборки свеклы. Рациональный подбор универсального колесного шасси, на базе которого составляется полунавесной технологический агрегат, предназначенный для уборки сахарной свеклы (комбайн), во многом определяет не только производительность, рабочую скорость движения, удельную энергоемкость процесса, но и, как показала практика, вообще способность агрегата осуществлять его.

Во многих странах заводами сельскохозяйственного машиностроения разрабатываются новое свеклоуборочное оборудование и высокоэффективные свеклоуборочные комбайны модульного построения на базе универсальных самоходных энергонасыщенных полноприводных колесных шасси. В этой связи приобрела актуальность задача рационального объединения в агрегат таких шасси с упомянутым свеклоуборочным оборудованием или оборудованием, предназначенным для уборки других корнеклубнеплодов. Особенно в том случае, если рабочие модули будущего агрегата созда-

ются отдельно и разными производителями. Применение такой концепции построения позволит расширить возможности межгосударственной кооперации при создании комбайнов с учетом специфики места использования, а также будет способствовать продвижению продукции отечественного машиностроения на зарубежные рынки.

Если использовать готовое технологическое оборудование, то дорабатывать его нецелесообразно. Поэтому модель универсального колесного шасси, схему его ошиновки и параметры шин, полную массу и мощность двигателя, рабочие скорости или передачи в коробке передач, рабочие частоты вращения валов механического и гидравлического отборов мощности, параметры баллаستировки шасси необходимо выбирать таким образом, чтобы непрерывно обеспечивать близкий к оптимальному режим работы присоединяемого оборудования и ходовой системы. Независимо от изменения характеристик сопротивления рабочему аппарату и перераспределения нагрузок по колесам от переменного груза в бункере по пути движения комбайна.

В статье изложены разработанные авторами предложения по выбору главных параметров универсального полноприводного колесного шасси для объединения в агрегат с новым, в том числе зарубежным оборудованием, предназначенным для уборки различных возделываемых культур, а также предложения о рациональном законе управления ходовой системой комбайна при изменении условий его движения по полю при уборке. Рассмотрены варианты механического и гидромеханического приводов колес шасси.

Объекты исследования

Эффективность применения колесных энергонасыщенных самоходных полноприводных шасси может быть достигнута при выборе рациональных параметров ходовой системы, технологической части и параметров агрегатирования звеньев уборочного агрегата. Для обеспечения высокой надежности в работе такие агрегаты создаются на базе полноприводных шасси. Ходовые системы их оснащаются колесами с шинами специальной комплектации, в том числе сдвоенными, с целью создания необходи-

мого запаса грузоподъемности ходовой системы, высоких тягово-сцепных свойств, проходимости и маневренности агрегата, для работы с тяжелым полунавесным оборудованием, каким является рабочий свеклоуборочный аппарат, бункер с грузом и конвейерами (рис. 1, 2).

В состав рабочего технологического оборудования самоходного свеклоуборочного комбайна обычно входят следующие основные функциональные части-модули: ботвоуборочный модуль, корнеуборочный модуль с механизмом контроля глубины копания и вибрационными копаками, подъемно-сепарирующий блок с подающими роторами, бункер с системой транспортеров. Часть из перечисленных модулей объединены в агрегатируемый с ходовой системой комбайна спереди посредством навесной системы полунавесной рабочий аппарат. Ходовая система комбайна – совокупность элементов конструкции, образующих раму-остов комбайна с движителем и системой поворота. Она предназначена для восприятия усилия от рабочего аппарата и массы монтируемого на ней технологического оборудования на раму-остов и колеса, размещения грузового бункера с накапливаемым в нем грузом, а также для передвижения по опорной поверхности.



Рис. 1. Пример универсального самоходного шасси по схеме 6К6 в составе свеклоуборочного агрегата – комбайна

Fig. 1. Example of universal self-propelled chassis according to scheme 6K6 including sugar beet harvester

Высоким спросом пользуются комбайны, наиболее приспособленные для работы в экстремальных условиях свекловичных полей при особо сложной уборке культуры поздней осенью на переувлажненных почвах, трудных для сепарации, которые характерны и для восточноевропейских стран, возделывающих сахарную свеклу.



Рис. 2. Пример универсального самоходного шасси по схеме 4К4 в составе свеклоуборочного комбайна

Fig. 2. Example of universal self-propelled chassis according to scheme 4K4 including sugar beet harvester

Крупнейшие европейские производители выпускают типоразмерные ряды самоходных свеклоуборочных комбайнов, чаще всего включающие модели шести-, девяти- и двенадцатирядных самоходных комбайнов с двигателями мощностью от 400 до 610 л. с., емкостью бункера от 13 до 33 т, рассчитанных для использования в крупных, средних и мелких хозяйствах с различным уровнем урожайности свеклы – от 20 до 70 т/га [1–4]. Однако спрос на универсальную, высокопроизводительную, надежную и малоэнергоёмкую технику блочно-модульного построения, обеспечивающую низкие эксплуатационные издержки и высокое качество уборки, простую в ремонте и обслуживании, по-прежнему велик и не удовлетворен.

Исследования авторов направлены на создание положений выбора шасси для агрегатирования с заданным, например зарубежным, полунавесным оборудованием, предназначенным для уборки свеклы, на основании которых возможно решение задачи научно обоснованного выбора модели колесного шасси из числа выпускаемых или разрабатываемых, параметров агрегатирования рабочего аппарата и шасси, рационального алгоритма управления ходовой системой агрегата.

Тяговая динамика и эксплуатационные показатели уборочного агрегата

Изменение нормальных нагрузок на мосты уборочного агрегата из-за навешенного оборудования, изменение давления воздуха в шинах и их комплектации приводят к перераспределению вращающих моментов в приводе к веду-

щим колесам и к активным рабочим органам (АРО) рабочего аппарата. Все это сказывается на показателях эффективности работы двигателя агрегата. Случайный характер возмущений со стороны поля на движитель и рабочий аппарат вносят свой вклад в динамику движения агрегата и его эксплуатационные показатели. Как установлено в результате испытаний, на практике показатели работы шасси с различными рабочими аппаратами для уборки свеклы существенно отличаются как по производительности, так и по расходу топлива на единицу производительности. Отмечалось повышенное буксование колес ходовой системы. Разработана оригинальная методика испытаний для определения сопротивления подаче рабочего аппарата при работе, скорости движения, буксования ведущих колес мостов комбайна, радиусов качения колес, деформации почвы, частоты вращения коленчатого вала и мощности двигателя, технической производительности по убранной массе в бункере, сменного расхода топлива и сменной производительности. Выполнен расчетно-теоретический анализ рабочего процесса исследуемых уборочных агрегатов. Результаты расчетов и натурных опытов показали, что реализованные в настоящее время режимы работы движителя и рабочего аппарата в испытанных агрегатах могут быть далеки от рациональных, чем и объясняются различия в их отдельных эксплуатационных показателях. В процессе испытаний выявлялись практические возможности изменения упомянутых режимов с целью приближения их к рациональным.

Параметры некоторых активных рабочих органов, навески, давление воздуха в шинах

колес и комплектацию шин можно менять, а, значит, и управлять КПД ходовой системы и эффективностью полунавесного агрегата в целом. Поэтому представляет научный и практический интерес установление закономерностей динамики полноприводного тягово-энергетического шасси, работающего в составе уборочного агрегата, в зависимости от упомянутых факторов. Для других машинно-тракторных агрегатов подобные вопросы рассматривались ранее в [2, 5–7]. Методический подход к выбору рациональных параметров АРО и параметров агрегатирования рабочего аппарата с колесным шасси в целом основывается на результатах анализа динамики уборочных комбайнов.

При создании таких агрегатов следует учитывать, что максимальные значения КПД ходовой системы полноприводной машины, как с заблокированными механическими межосевыми связями, так и при гидромеханическом приводе по схеме полного дифференцирования, достигаются при сведении к минимуму кинематического рассогласования между ведущими колесами [6, 8, 9]. При буксованиях каждого ведущего колеса, характерных для близкого к линейному участку зависимости удельных касательных усилий от буксования колеса, потери в ходовой системе меньше, чем на нелинейных участках упомянутых зависимостей [7]. Получены зависимости потенциала эффективности ведущего колеса, оборудованного шиной (рис. 3), от определяющих параметров

$$\eta_{ki}(f, \delta) = \left[1 - \frac{f_{ci}}{\varphi_{ci}(1 - e^{-k_i \delta_i})} \right] (1 - \delta_i) = \eta_{pi} \eta_{\delta i},$$

где φ_{ci} , f_{ci} – коэффициент сцепления и условный коэффициент сопротивления качению i -го ведущего колеса с опорной поверхностью [6, 8, 10]; k_i – параметр аппроксимации зависимости $P_{ki} = F(\delta_i)$ выражением [6, 8]

$$P_{ki} = R_i \varphi_i (1 - e^{-k_i \delta_i}).$$

Графические зависимости влияния коэффициента сопротивления качению колеса и буксования на потенциал эффективности колеса показаны на рис. 3.

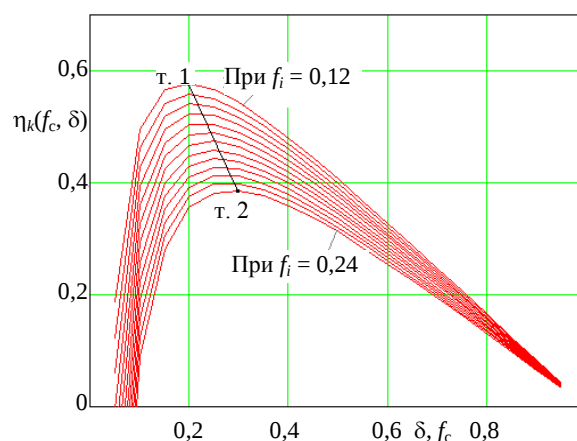


Рис. 3. Зависимости $\eta_{ki}(f, \delta)$:
 $f_c = 0,12-0,24$; $\varphi_c = 0,7$; $\delta = 0-0,98$; $k = 4,8$

Fig. 3. Dependences $\eta_{ki}(f, \delta)$:
 $f_c = 0,12-0,24$; $\varphi_c = 0,7$; $\delta = 0-0,98$; $k = 4,8$

Как видно из рис. 3, потенциал эффективности колеса имеет максимум при некотором значении буксования, уменьшающемся и сдвигающемся с ухудшением дорожных условий в сторону больших буксований. Из этого следует, что имеет смысл поставленную задачу решать также в пределах участков кривых буксования ведущих колес, близких к линейным [7] при работе на полях с малым сопротивлением движению комбайна, путем управления скоростями колес и активных рабочих органов рабочего аппарата до достижения требуемых балансовых соотношений по их производительности.

К режимам работы, определяющим показатели эксплуатационных свойств уборочного агрегата, относятся: трогание и разгон, движение с установившейся скоростью по неровностям опорной поверхности поля при работе уборочного оборудования, поворот и маневрирование, торможение. Моделирование и анализ перечисленных режимов рабочего процесса уборочного агрегата при исследовании его динамики необходимы, так как позволяют выявить его свойства с целью проведения анализа и последующего выбора рациональных конструктивных параметров проектируемого комбайна. Среди определяющих факторов, подлежащих анализу, наиболее важные: конструктивно-компоновочная схема, параметры кинематики системы поворота, активных рабочих органов, тягово-сцепные характеристики шин, масса, мощность и характеристики элемен-

тов поддрессирования, если они имеются, колесного шасси, а также микропрофиль пути и характеристики сопротивления подаче рабочего аппарата со стороны убираемых рядков свеклы, определяющие характер входного воздействия на динамическую систему комбайна [1, 2, 5–9].

Многообразие случайных сочетаний параметров и свойств поля с убираемыми корнеклубнеплодами приводит к существенным изменениям текущих рабочих режимов двигателя колесного шасси, технико-экономических показателей рабочего процесса и качества уборки. В частности, изменение буксования ведущих колес шасси при имеющих место на поле колебаниях состояния поверхности движения и сопротивления подаче рабочего аппарата приводит к рассогласованию балансового соотношения производительностей агрегата по ходу и по активным рабочим органам, а также к отклонению качества уборки от целесообразной, что ухудшает качество получаемого сырья, особенно на каменистых, неровных, тяжелых по проходимости полях [3, 4, 10–12]. При повышении буксования ведущих колес, как показали испытания, существенно растут расходы топлива, ухудшается проходимость, снижается производительность агрегата, некоторая часть убираемой массы растений движется не по оптимальным траекториям.

Изменением конструктивных и режимных факторов можно в известной степени влиять как на эксплуатационные показатели уборочного агрегата, так и на качество уборки. Поэтому возможно решение задачи оперативной «настройки» в процессе движения комбайна параметров привода его активных рабочих органов, обеспечивающих минимизацию удельных энергозатрат при стабилизации производительности и качества уборки в рамках выбранной на стадии проектирования рациональной структурно-компоновочной схемы агрегата (рис. 1, 2). С этой целью необходимо разрабатывать технические решения, которые расширяют эксплуатационную гибкость современного свеклоуборочного комбайна. Например, путем использования сложной системы поворота, колесной формулы 6К6 (рис. 1), путем обеспечения движения колес по разным колеям, использования поворотного моста управляемых колес (рис. 2) и т. п.

К определению главных параметров колесного шасси для свеклоуборочного комбайна

Важный вопрос выбора рациональных параметров колесного шасси заключается в принятии критерия, по которому такой выбор будет производиться. От этого зависят результаты работы уборочного агрегата и его эксплуатационная эффективность. Интегральным проявлением эффективности свеклоуборочного комбайна при заданной средней скорости движения (т. е. при постоянной производительности по ходу) на гоне может служить расход топлива, он зависит от степени загрузки двигателя и особенностей протекания скоростных характеристик его на внешнем и частичных режимах. Значит, для наилучшей эффективности должна быть оптимальная загрузка двигателя, которую необходимо установить и поддерживать. Но поскольку внешние факторы при движении комбайна, как ранее указывалось, непрерывно изменяются, то также изменяются и режимы двигателя. Это означает, что в условиях эксплуатации требуется автоматическая оптимизация режимов работы комбайна.

Многими учеными – В. В. Кацыгиным, В. В. Гуськовым, Ю. К. Киртбая, С. А. Иофиновым, В. Н. Болтинским, И. И. Киселевым, Л. Е. Агеевым и другими – предложены различные эмпирические выражения оптимальной загрузки двигателя для обеспечения наибольшей экономичности и производительности тяговых и тягово-приводных машинно-тракторных агрегатов [1–14]. Большинство из таких формул степень оптимальной загрузки двигателя (по сути – математическое ожидание загрузки) связывают со значением неравномерности тягового сопротивления, что объективно физически имеет смысл. В этом можно убедиться, рассмотрев многопараметровую характеристику двигателя (рис. 4).

Линия *ab* соответствует минимальным удельным эффективным расходам топлива. Поэтому за оптимальные загрузки двигателя можно принять те загрузки, которые соответствуют этой линии. По характеристике можно наглядно представить возможные стратегии управления уборочным агрегатом, целью которых должно быть наиболее близкое приближе-

ние к линии ab в случае ухода от нее при изменении внешних факторов во время рабочего движения комбайна по полю. Такое приближение возможно за счет управления подачей топлива, передаточными отношениями к ведущим колесам и к АРО рабочего аппарата непосредственно во время движения, а также за счет «настроек на данное поле» ходовой системы шасси и уборочного оборудования перед началом движения.

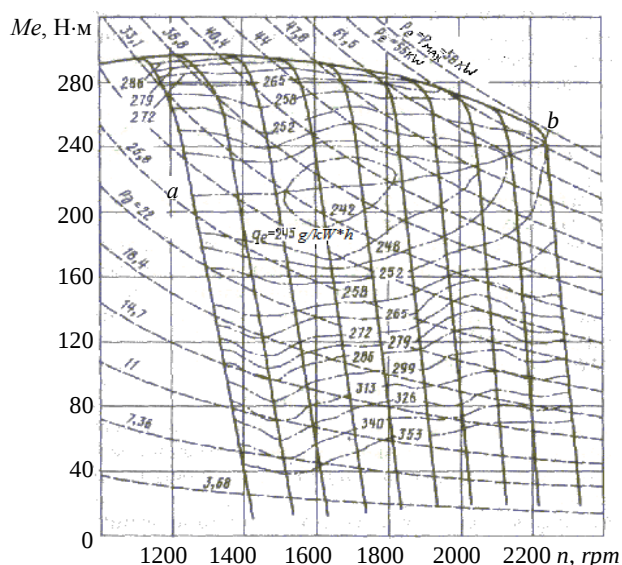


Рис. 4. Пример многопараметровой характеристики дизельного двигателя

Fig. 4. Example of multi-parameter characteristics of diesel engine

Важным является выбор массы колесного шасси для тягово-приводного уборочного агрегата – комбайна, а не так называемого тягового класса, значение которого у современных колесных шасси, оснащенных мощными двигателями с протяженными участками постоянной мощности на внешней скоростной характеристике, сейчас не во всем определяет его тягово-энергетические возможности. Топливно-экономические характеристики таких двигателей, оснащенных новыми топливоподающими системами, например common rail, отличаются от характеристик старых моделей двигателей. Поэтому упомянутые формулы оптимальной загрузки двигателя не всегда соответствуют действительности. Предположим, что такая формула установлена как функция степени неравномерности тягового сопротивления от по-

лунавесного уборочного оборудования, сопротивления самопередвижению шасси и параметров модели скоростной характеристики двигателя. На практике это означает, что для обеспечения высокой топливной экономичности за счет использования автоматической системы непрерывного поддержания оптимальной (по критерию удельного эффективного расхода топлива) загрузки двигателя необходим двигатель большей номинальной мощности, так как колебания нагрузки приводят к большим затратам мощности на передвижение, чем при постоянном сопротивлении.

Эксплуатационную массу колесного самоходного шасси тягово-приводного полунавесного уборочного агрегата определим на основе выражения, предложенного в [6], в котором дополнительно учтем зависимость коэффициента сцепления колес ϕ от схемы сдвигания колес шасси, если она применяется при работе на поле, а также то, что в состав полной массы входят и массы самих дополнительных колес, оборудованных шинами, масса навесного оборудования в виде конвейеров, бункера и т. п. Тогда минимально необходимая масса колесного шасси определится из выражения

$$m = \frac{(1 + 0,5k_{\text{нер}})(1 + \varepsilon(v^2 - v_3^2))F_{\text{кр}}}{[\phi(\text{схемы_двигателя})\lambda - (1 + 0,5k_{\text{нер}})(1 + \varepsilon(v^2 - v_3^2))F_{\text{кр}}]} \rightarrow \frac{1}{-(f(\text{схемы_двигателя})\cos\alpha + \sin\alpha)}g,$$

где $k_{\text{нер}}$ – коэффициент неравномерности тягового сопротивления полунавесного рабочего аппарата; ε – то же увеличения тягового сопротивления при повышении рабочей скорости; v_3 – эталонная скорость, которая предусмотрена паспортом (агротехническими требованиями) полунавесного рабочего аппарата для осуществления уборки в конкретной группе воздействий по видам полей; λ – коэффициент нагрузки ведущих колес у неполноприводного шасси, если шасси с одним ведущим мостом, то $\lambda < 1$; $F_{\text{кр}}$ – тяговое сопротивление полунавесного рабочего аппарата передвижению колесного шасси [6]; α – угол подъема рельефа свекловичного поля.

При этом зависимости коэффициента использования сцепления φ (схемы_двигателя), соответствующего максимуму тягового КПД агрегата, и коэффициента сопротивления качению колес f (схемы_двигателя) аналитически определяются на основе моделирования тяговых сил шин колесного шасси на конкретной залежи, находящейся в наихудшем состоянии, при котором имеет смысл производить уборку свеклы на практике. Распределением нагрузки по колесам проектируемого шасси можно управлять за счет изменения компоновки – размещения составных частей навесного оборудования на базе шасси. Масса изменяется при заполнении бункера, поэтому выбором формы и размещением бункера, конвейеров также можно повлиять на достижение рациональной нагрузки на колеса двигателя.

Приведенное выражение для определения эксплуатационной массы колесного шасси учитывает изменение средней величины тягового сопротивления подаче рабочего аппарата, увеличение его при повышении скорости по сравнению с заданной для движения на рабочем гоне и изменение состояния опорной поверхности и рельефа поля. При проведенных испытаниях и в работах других авторов отмечалась тесная корреляция степени неравномерности силовых факторов на валах привода рабочих органов и колесах шасси с неравномерностью тягового сопротивления оборудования [6, 8, 10, 11].

Потребная мощность дизельного двигателя для разрабатываемого колесного шасси определяется из выражения

$$P_{дв} = \left\{ \frac{v}{3600\eta_{тр}\eta_{\delta}} \times \left[\left(f \cos \alpha_d + \sin \alpha_d \right) m_{\Sigma} g + \left(1 + k_{нер} \right) \left[1 + \varepsilon \left(v^2 - v_3^2 \right) \right] F_{кр} \right] + \left(\frac{N_{АРО1}}{\eta_{АРО1}} + \frac{N_{АРО2}}{\eta_{АРО2}} \right) \left(1 + k_{нер} \right) \right\} \frac{1}{k_{опт}},$$

где v – рабочая скорость машинно-тракторного агрегата; η_{δ} – КПД буксования двигателя; $\eta_{тр}$ – КПД привода колесного двигателя; $N_{АРО1}$ – мощность, затрачиваемая на привод АРО1 рабочего аппарата [3, 4, 10, 11]; $N_{АРО2}$ – мощность, затрачиваемая на привод АРО2 подаю-

ще-транспортирующей системы [11, 12]; $\eta_{АРО1}$, $\eta_{АРО2}$ – КПД привода АРО1 и АРО2; $k_{опт}$ – коэффициент оптимальной загрузки двигателя; m_{Σ} – полная масса, соответствующая вертикальным нагрузкам на колеса агрегата.

Выбор схемы и параметров двигателя колесного шасси в значительной степени предопределяет энергетическую эффективность создаваемого свеклоуборочного комбайна. Уровень энергозатрат зависит от закона распределения касательных сил между ведущими колесами двигателя машины. В качестве принципа распределения касательных сил ведущих колес, определяющих, в конечном итоге, и выбор закона управления приводами колес, часто принимается принцип равенства буксований колес двигателя, который обоснован для механических приводов многими учеными-исследователями (М. Г. Беккер, Ю. В. Пирковский, А. Х. Лефаров, В. А. Петрушов, В. В. Ванцевич и др.) [5, 6, 8, 9]. Авторами данной статьи принят методический подход к определению действительных буксований колес с гидромеханическим приводом в случае работы по схеме полного дифференцирования, при которых КПД ходовой системы η_{xs} наибольший. Полезная мощность комбайна N_{pol} , связанная с преодолением сил сопротивления подаче рабочего аппарата $P_{АРО}$ и сил сопротивления качению колес при перемещении переменного груза в бункере, определяется выражением

$$N_{pol} = \left(P_{АРО} + g \sum_{i=1}^n m_{GRi} f_i \right) v_d,$$

где m_{GRi} – часть веса груза в бункере комбайна, приходящаяся на i -е колесо двигателя; g – ускорение свободного падения.

Тогда для числа колес в конкретном варианте шасси $n = 4$

$$\eta_{xs} = \frac{N_{pol}}{N_{DV}} = \frac{P_{АРО} + g \sum_{i=1}^4 m_{GRi} f_i}{\sum_{i=1}^4 \left[\frac{R_i \varphi_i}{1 - \delta_i} \left(1 - e^{-k_i \delta_i} \right) \right]},$$

где N_{DV} – текущая мощность двигателя.

Для поиска оптимальных значений тяги колес уборочного комбайна можно использовать обобщенный метод множителей Лагранжа – метод нахождения условного экстремума

функции $F(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)$ относительно m ограничений $Q_i(x) = b_i$, где i меняется от единицы до n – числа ведущих колес. Задача условной оптимизации имеет вид:

$$Z = F(\delta_1, \delta_2, \delta_i, \dots, \delta_n) = \frac{P_{\text{APO}} + g \sum_{i=1}^n m_{\text{Gri}} f_i}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{R_i \varphi_i}{1 - \delta_i} (1 - e^{-k_i \delta_i}) \right]} \rightarrow \max, i = 1, n;$$

$$Q(\delta_1, \delta_2, \delta_i, \dots, \delta_n) = b.$$

Для ее решения используется метод множителей Лагранжа [5, 7]. Выписывается функция Лагранжа $L(\delta_1, \delta_2, \delta_i, \dots, \delta_n) = F(\delta_1, \delta_2, \delta_i, \dots, \delta_n) + \lambda(b_i - Q_i(\delta_1, \delta_2, \delta_i, \dots, \delta_n))$, и решается система уравнений, определяющая стационарные точки этой функции:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(\delta_1, \dots, \delta_n)}{\partial \delta_i} - \lambda \frac{\partial Q(\delta_1, \dots, \delta_n)}{\partial \delta_i} = 0, i = 1, n; \\ b - Q(\delta_1, \delta_2, \delta_i, \dots, \delta_n) = 0. \end{cases}$$

Применительно к рассматриваемой задаче можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \left[R_i \varphi_i (1 - e^{-k_i \delta_i}) \right] = P_{\text{APO}} + \sum R_i f_i; \\ \frac{1}{1 - \delta_i} - \frac{1 - e^{k_i \delta_i}}{k_i (1 - \delta_i)^2} = -\lambda_i, i = 1, \dots, n, \end{cases}$$

где λ_i – множитель Лагранжа.

Именно решение этой системы уравнений, которое производится численным методом [5], даст рациональные значения $\delta_1, \delta_2, \delta_i, \dots, \delta_n$.

Для отслеживания изменений эксплуатационных показателей исследуемого уборочного агрегата при изменении внешних воздействий на него со стороны поля во время рабочего хода использовалась разработанная авторами методика. Она основана на математической модели исследуемого комбайна [2, 5, 7], которая учитывает различные условия движения, параметры рабочего оборудования, колесного шасси. Методика позволяет определять: загрузку двигателя, буксование и тягу колес движителя, время и ускорение, а также возможность осуществления разгона, скорость движения после

окончания разгона, вращающие моменты на валах трансмиссии, динамическую нагруженность элементов приводов. Кроме того, дает возможность учесть взаимовлияние буксования колес движителя и рабочего процесса АРО, производить оценку совместного влияния параметров агрегата и режимов нагружения рабочих органов на эксплуатационные показатели агрегата с целью выбора их рациональных значений и разработки системы управления активными рабочими органами для существенного снижения удельных энергозатрат. С помощью виртуальной модели комбайна, реализованной на ПЭВМ как программное приложение в системе символьной математики, выполняется расчетный анализ показателей агрегатирования колесного шасси, при различной комплектации шинами колес движителя, с технологическим оборудованием различных компоновочных схем и параметров, с целью выбора наилучшего по показателям удельных энергозатрат и другим показателям качества рабочего процесса параметров полунавесного оборудования и параметров агрегатирования звеньев в составе уборочного агрегата.

ВЫВОД

Разработаны предложения к выбору главных параметров колесного полноприводного самоходного шасси для рационального агрегатирования со свеклоуборочным оборудованием в составе самоходного сельскохозяйственного комбайна, методические положения анализа рабочего процесса исследуемых объектов. Указаны средства настройки проектируемого комбайна на условия эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новый свеклоуборочный комбайн компании Holmer [Электронный ресурс] // Агроинфо. Режим доступа: <http://agroinfo.info/novyy-sveklouborochnyj-kombajn-kompanii-holmer/>. Дата доступа: 01.06.2016.
2. Tajanowskij, G. Mathematical Model of a Harvest Combine for Reception Fuel Chips from Fast-Growing Plants / G. Tajanowskij, A. Kalina, W. Tanas // Teka Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. Lublin: Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 2008. Vol. VIII P. 267–276.
3. Тырнов, Ю. А. Энергетический баланс и распределение мощности двигателя по потребителям при работе свеклоуборочного комбайна Holmer / Ю. А. Тырнов, Д. А. Гушин // Повышение эффективности использования свеклоуборочных комбайнов зарубежного производства: сб. науч. тр. Тамбов: ГНУ ВИИТиН, 2009. Вып. 16. С. 9–13.

4. Ногтиков, А. А. Сравнительная эксплуатационно-технологическая оценка и оценка показателей качества работы зарубежных свеклоуборочных комбайнов. Анализ воздействия ходовых систем комбайнов на почву / А. А. Ногтиков // Повышение эффективности использования свеклоуборочных комбайнов зарубежного производства: сб. науч. тр. Тамбов: ГНУ ВИИТиН, 2009. Вып. 16. С. 27–30.
5. Таяновский, Г. А. Комплексная оценка ходовой системы полноприводной колесной машины переменной массы / Г. А. Таяновский, А. А. Калина // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2013. Т. 1. С. 440.
6. Моделирование характеристик дизельного двигателя / Ю. Е. Атаманов [и др.]. Минск: БНТУ, 2014. 195 с.
7. Таяновский Г. А. Тяговые свойства транспортно-технологической машины с гидрообъемным приводом колес / Г. А. Таяновский // Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 25-летию кафедры «Гидропневмоавтоматика и гидропневмопривод» Белорусского национального технического университета, 17–19 ноября 2010 г. Минск: БНТУ, 2010. С. 153–161.
8. Тракторы: теория / В. В. Гуськов [и др.]; под общ. ред. В. В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
9. Гуськов, В. В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В. В. Гуськов. М.: Машиностроение, 1966. 195 с.
10. Капустин, В. П. Свеклоуборочные машины: учеб. пособие / В. П. Капустин. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. 196 с.
11. Погарель, Л. В. Свеклоуборочные машины. Конструирование и расчет / Л. В. Погарель, Н. В. Татяненко, В. В. Брей. Киев: Техника, 1983. 168 с.
12. Саакян, Д. Н. Система показателей комплексной оценки мобильных машин / Д. Н. Саакян. М.: Агропромиздат, 1988. 415 с.
13. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин: теория систем автоматического управления / В. П. Автушко [и др.]; под ред. Н. В. Богдана, Н. Ф. Метлюка. Минск: НПО ООО «ПИОН», 2001. 396 с.
14. Стандарт отрасли. Показатели качества свеклоуборочных машин: ОСТ 10.8.6–2000. Минсельхоз, 2000. 65 с.

Поступила 24.03.2016

Подписана в печать 23.05.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. New Sugar Beet Harvester of Holmer Company. *Agroinfo*. Available at: <http://agroinfo.info/novyj-svekloubo-rochnyj-kombajn-kompanii-holmer/>. (Accessed 1 Yune 2016) (in Russian).
2. Tajanowskij G., Kalina A., Tanas W. (2008). Mathematical Model of a Harvest Combine for Reception Fuel Chips from Fast-Growing Plants. *Teka Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. Vol. VIII*. Lublin, Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 267–276.
3. Tyrnov Yu. A., Gushchin D. A. (2009) Energy Balance and Power Distribution of Engine for Consumers During Operation of Holmer Sugar-Beet Harvester. *Efficiency*

Improvements in Usage of Foreign-Manufactured Sugar Beet Harvesters. Collection of Research Papers. Tambov, State Scientific Institution “All-Russian Institute of Machinery and Petroleum”, Issue 16. 9–13 (in Russian).

4. Nogtikov A. A. (2009) Comparative Operational and Technological Assessment and Evaluation of Operational Qualitative Indices of Foreign-Manufactured Sugar Beet Harvesters. Analysis of Harvester Driving System Impact on Soil. *Efficiency Improvements in Usage of Foreign-Manufactured Sugar Beet Harvesters. Collection of Research Papers*. Tambov, State Scientific Institution “All-Russian Institute of Machinery and Petroleum”, Issue 16, 27–30 (in Russian).
5. Tayanovsky G. A., Kalina A. A. (2013) Integrated Assessment of Driving System for Four-Wheeled Drive Vehicle of Variable Mass. *Nauka – Obrazovaniiu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 11-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of 11th International Scientific and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 440 (in Russian).
6. Atamanov Iu. E., Plishch V. N., Povarekha A. S., Ravino V. V., Taianovskii G. A. (2014) *Simulation of Diesel Engine Characteristics*. Minsk, Belarusian National Technical University. 195 (in Russian).
7. Tayanovsky G. A. (2010) Haulage Capacity of Transport and Technological Machine with Hydrostatic Drive Wheels. *Gidropnevmosistemy Mobilnykh i Tekhnologicheskikh Mashin: Sbornik Dokladov Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konf., Posviashchennoi 25-letiiu Kafedry “Gidropnevmoavtomatika i Gidropnevmooprivod” Belorusskogo Natsionalnogo Tekhnicheskogo Universiteta, 17–19 Noiabria 2010 g.* [Hydropnevmosystems Mobile and Technological Machines: a Collection of Papers of the International Scientific Conference Dedicated to the 25th Anniversary of the Department “Gidropnevmoavtomatika and Gidropnevmooprivod” Belarusian National Technical University, 17–19 November 2010], 153–161 (in Russian).
8. Guskov V. V., Velev N. N., Atamanov Iu. E., Bocharov N. F., Ksenevich I. P., Solonskii A. S. (1988) *Tractors: Theory*. Moscow, Mashinostroyeniye. 376 (in Russian).
9. Guskov V. V. (1966) *Optimal Parameters of Agricultural Tractors*. Moscow, Mashinostroyeniye. 195 (in Russian).
10. Kapustin V. P. (2010) *Sugar Beet Harvesters*. Tambov, Publishing House of Tambov State Technical University. 196 (in Russian).
11. Pogorely L. V., Tatianko N. V., Brei V. V. (1983) *Sugar Beet Harvesters. Design and Calculation*. Kiev, Tekhnika. 168 (in Russian).
12. Saakyan D. N. (1988) *System of Qualitative Indices for Sugar Beet Harvesters*. Moscow, Agropromizdat. 415 (in Russian).
13. Avtushko V. P., Bogdan N. V., Budko V. V., Metliouk N. F. (2001) *Hydraulic and Pneumatic Automation and Hydraulic Drive of Mobile Machines: Theory of Automatic Control Systems*. Minsk, Publishing House of Scientific and Industrial Limited Liability Company “PION”. 396 (in Russian).
14. Industry-Specific Standard 10.8.6–2000. Qualitative Indices of Sugar Beet Harvesters: Publishing House “Minselkhoz”, 2000. 65 p.

Received: 24.03.2016

Accepted: 23.05.2016

Published online: 26.09.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-407-414

УДК 621.923.7:537.528

Концептуальная модель коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки в режиме электроимпульсного полирования

Докт. техн. наук, доц. Ю. В. Синькевич¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Электрическая проводимость парогазовой оболочки в режиме электроимпульсного полирования тесно связана с механизмами физико-химических процессов, протекающих на поверхности анода и в прианодной области электролита, съема металла, сглаживания неровностей профиля поверхности и технологическими режимами, влияющими на производительность и точность обработки. Представлена экспериментально обоснованная концептуальная модель механизма электрической проводимости парогазовой оболочки, согласно которой электрический ток, протекающий в оболочке и имеющий квазипостоянную и высокочастотную составляющие, обеспечивается за счет ионной проводимости в электролитных мостиках, замыкающих оболочку, и ионной проводимости в газовой фазе оболочки. Показано, что квазипостоянная составляющая тока представляет собой композицию электрического тока от перекрывающихся во времени импульсов тока от электролитных мостиков, замыкающих оболочку с частотой 0,01–0,90 кГц, и тока в газовой фазе оболочки. Высокочастотная составляющая тока обусловлена ионной проводимостью в мостиках, коммутирующих оболочку с частотой порядка 2,5 МГц. Теоретически обоснована аномально высокая электропроводность электролита в электролитных мостиках. Показано, что образование парогазовой оболочки и ее обновление связаны с тепловым взрывным механизмом разрушения электролитных мостиков. Вибрация оболочки и гидродинамические потоки в объеме электролита возникают в результате воздействия на приграничный с оболочкой слой электролита ударных волн от взрывов электролитных мостиков и схлопывания кавитационных пузырьков в прианодной области электролита.

Ключевые слова: электроимпульсное полирование, электролит, парогазовая оболочка, электролитный мостик, импульс тока, ионная проводимость

Для цитирования: Синькевич, Ю. В. Концептуальная модель коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки в режиме электроимпульсного полирования / Ю. В. Синькевич // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 407–414

Conceptual Model of Commutation Mechanism for Electric Conductivity of Vapor-Gas Envelope in Electro-Impulse Polishing Mode

Yu. V. Sinkevitch¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Electric conductivity of vapor-gas envelope in electro-impulse polishing mode is closely connected with mechanisms of physical and chemical processes occurring on an anode surface and in pre-anode area of electrolyte, metal removing, smoothing-out of surface profile irregularities and technological regimes influencing on productivity and processing accuracy.

Адрес для переписки

Синькевич Юрий Владимирович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-97
metech@bntu.by

Address for correspondence

Sinkevitch Yuriy V.
Belarusian National Technical University
9 B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-97
metech@bntu.by

The paper presents experimentally substantiated conceptual model of a mechanism for electric conductivity of vapor-gas envelope. According to the model an electric current passing in the envelope and having quasi-constant and high-frequency components is provided by ionic conductivity in electrolyte envelope-enclosing bridges and ionic conductivity in gas envelope phase. It has been shown that quasi-constant of the current component represents a composition of electric current consisting of overlapping time current impulses from electrolyte bridges that enclose the envelope with frequency of 0.01–0.90 kHz and current in a gas phase of the envelope. High-frequency current component is pre-conditioned by ionic conductivity in bridges that commutate the envelope with frequency of 2.5 MHz. The paper theoretically substantiates excessive electrical conductivity of electrolyte in the electrolyte bridges. It has been demonstrated that formation of vapor-gas envelope and its renovation are connected with thermal burst mechanism for destruction of electrolyte bridges. Envelope vibration and hydrodynamic flows within the electrolyte occur due to impulse wave impact on electrolyte layer which is on the border of the envelope. The waves are caused by bursts of electrolyte bridges and cavitation bubble collapse in pre-anode electrolyte area.

Keywords: electro-impulse polishing, electrolyte, vapor-gas envelope, electrolyte bridge, current impulse, ionic conductivity

For citation: Sinkevitch Yu. V. (2016) Conceptual Model of Commutation Mechanism for Electric Conductivity of Vapor-Gas Envelope in Electro-Impulse Polishing Mode. *Science & Technique*. 15 (5), 407–414 (in Russian)

Закономерности физико-химических процессов, характерные для разных режимов электролитной анодной обработки, определяют области практического применения разработанных технологий [1]. В частности, в электрогидродинамическом режиме реализуется процесс электроимпульсного полирования (ЭИП) металлов и сплавов, который широко используется в промышленных масштабах в Республике Беларусь и за рубежом. Научная и практическая значимость изучения механизма прохождения электрического тока через парогазовую оболочку (ПГО) вытекает из тесной связи электрической проводимости оболочки с механизмами физико-химических процессов, протекающих на поверхности анода и в прианодной области электролита, съема металла, сглаживания неровностей профиля поверхности и технологическими режимами, влияющими на производительность и точность обработки. Анализ литературных данных [2] выявил многообразие и противоречивость предложенных гипотез об электрической проводимости оболочки. Согласно одной из гипотез [3], основанной на результатах осциллографических исследований электрического тока в ПГО, ток в своем составе имеет постоянную и высокочастотную составляющие. В [3] показано, что зависимости уровня постоянной и амплитуды переменной составляющих тока от температуры электролита, рабочего напряжения и площади поверхности образца имеют сложный характер. Постоянную составляющую тока автор работы связывает с ионной проводимостью ПГО, переменную – с замыканием оболочки электролитными мостиками.

При изучении механизма электрической проводимости оболочки большое значение имеют данные о ее толщине. Согласно имеющимся теоретическим и экспериментальным данным, толщина оболочки при разных режимах анодной обработки может находиться в диапазоне от 0,003 до 1,200 мм. В результате математического моделирования динамической системы «анод – ПГО – электролит», представленной в виде квазистационарной плоскопараллельной модели – аналога плоского конденсатора, получено выражение для расчета толщины оболочки [4]

$$l_0 = \sqrt{\frac{U}{2f}} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0}{\rho}}, \quad (1)$$

где l_0 – толщина оболочки, м; U – падение напряжения на оболочке, В; f – частота колебаний тока в оболочке, Гц; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 – электрическая постоянная, Ф/м; ρ – плотность раствора электролита, кг/м³.

Оценим толщину ПГО, приняв $\epsilon = 1,0$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\rho = 0,97 \cdot 10^3$ кг/м³ при температуре электролита $T_{эл} = 80$ °С [5]. Данные о толщине оболочки для экспериментально установленного мегагерцового диапазона частот колебаний электрического тока [3, 6] представлены на рис. 1.

Дополнительно, используя экспериментальные данные о толщине оболочки, оценим вероятную частоту колебаний тока. Для чего выражение (1) перепишем в виде

$$f = \frac{U}{2l_0^2} \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\rho}}$$

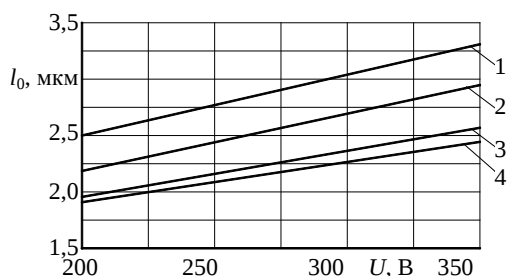


Рис. 1. Толщина парогазовой оболочки в зависимости от частоты колебаний электрического тока, МГц:
1 – 1,5; 2 – 2,0; 3 – 2,5; 4 – 3,0

Fig. 1. Thickness of vapor-gas envelope according to frequency of electric current oscillations, MHz:
1 – 1.5; 2 – 2.0; 3 – 2.5; 4 – 3.0

Расчетные данные о вероятной частоте колебаний электрического тока в ПГО, из которого следует, что в структуре тока возможны низкочастотные гармоники тока, в виде графиков представлены на рис. 2.

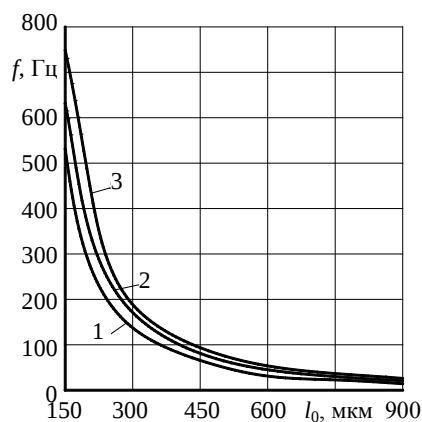


Рис. 2. Зависимость частоты колебаний электрического тока от толщины парогазовой оболочки:
1 – $U = 250$ В; 2 – 300 В; 3 – 350 В

Fig. 2. Dependence of electric current oscillation frequency on vapor-gas envelope thickness:
1 – $U = 250$ В; 2 – 300 В; 3 – 350 В

При разработке концептуальной модели механизма электрической проводимости ПГО использовали данные, полученные в ходе осциллографических, частотных и спектральных исследований тока [6–8]. Осциллограммы тока снимали с помощью электронного запоминающего

осциллографа С8-13. Частотомером ЧЗ-34 измеряли частоту высокочастотной составляющей тока. Следует отметить, что каждая из полученных осциллограмм представляет собой одну из возможных реализаций процесса ЭИП в конкретный момент времени продолжительностью 2 мкс, а сам процесс, выраженный в виде осциллограмм, – это бесконечная совокупность таких реализаций, образующих статистический ансамбль. В то же время частота колебаний высокочастотной составляющей тока, измеренная частотомером ЧЗ-34, представляет собой величину, усредненную на значительно более продолжительном интервале времени по сравнению с 2 мкс. Спектральные характеристики тока в диапазоне частот от 0,01 до 60,00 кГц исследовали с использованием гетеродинного анализатора спектра СК4-56.

Анализ осциллограмм показал, что амплитуда и частота колебаний высокочастотной составляющей тока в режиме ЭИП являются квазипостоянными величинами, равными в среднем соответственно 0,65 А и 2,50 МГц, и не существенно зависят от параметров процесса обработки. Однако данные, полученные с помощью частотомера, выявили более сложный характер зависимости частоты колебаний тока от температуры электролита (рис. 3а), рабочего напряжения (рис. 3б) и площади поверхности образца (рис. 3с).

Анализ полученных спектров тока показал, что в режиме ЭИП гармоники тока по амплитуде распределены неравномерно в диапазоне частот от 0,01 до 60,00 кГц. Гармоники с наибольшими амплитудами сосредоточены в полосе частот от 0,01–0,02 до 0,80–0,90 кГц. На частотах более 0,90 кГц спектры тока подобны спектру белого шума с низким уровнем амплитуд спектральных составляющих. В областях частот 0,05–0,15 и 0,40–0,70 кГц гармоники тока сосредоточены в виде совокупных пиков, уровень которых зависит от условий проведения процесса обработки. Увеличение температуры электролита, рабочего напряжения, площади поверхности образца и принудительное перемешивание электролита приводят к росту амплитуды совокупного пика гармоник в области частот от 0,4 до 0,7 кГц. Уровень

гармоник тока в области белого шума зависит от режима анодной обработки, причем наибольший уровень гармоник характерен для режимов электролитно-плазменного и электролитно-разрядного нагревов.

На основе известных и полученных данных можно предложить следующую концептуальную модель коммутационного механизма электрической проводимости ПГО в режиме ЭИП. Схема пробоя оболочки единичным электролитным мостиком представлена на рис. 4.

Пробой оболочки проходит через несколько стадий. На первой стадии (рис. 4а) в области случайной неоднородности электрического поля на поверхности электролита, граничащей с ПГО, под действием пондеромоторной силы формируется микровыступ, и электролит начинает втягиваться в оболочку. Происходит за-

рождение электролитного мостика (рис. 4б), который назовем основным электролитным мостиком. По мере приближения мостика к поверхности анода возрастает локальная напряженность электрического поля и, соответственно, увеличивается пондеромоторная сила, что придает ускорение движению электролитного мостика. При подходе мостика к поверхности анода на расстояние порядка 1,8–3,3 мкм (рис. 1) на его поверхности зарождаются многочисленные дополнительные электролитные мостики (рис. 4с) по аналогии с первой стадией пробоя ПГО основным мостиком. Поверхность основного электролитного мостика как бы прорастает множеством дополнительных мостиков. При этом размеры дополнительных мостиков существенно меньше размера основного мостика.

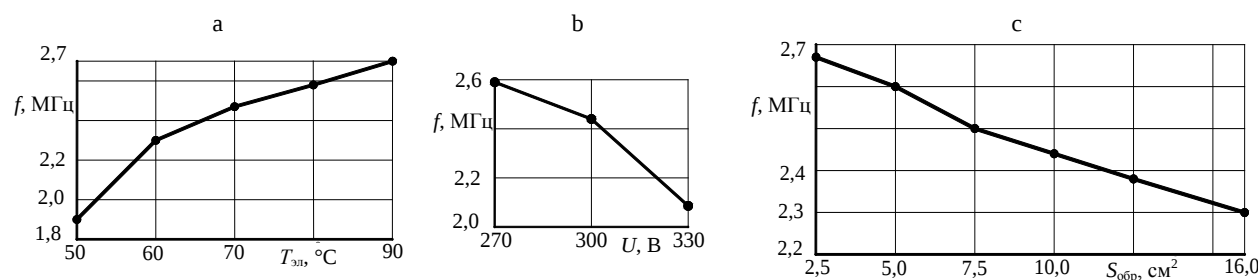


Рис. 3. Зависимость частоты колебаний высокочастотной составляющей тока от: а – температуры электролита при $U = 300 \text{ В}$ и $S_{обр} = 16 \text{ см}^2$; б – рабочего напряжения при $T_{эл} = 80 ^\circ\text{C}$ и $S_{обр} = 10 \text{ см}^2$; в – площади поверхности образца при $T_{эл} = 60 ^\circ\text{C}$ и $U = 300 \text{ В}$

Fig. 3. Dependence of oscillation frequency for high-frequency current component on: а – electrolyte temperature at $U = 300 \text{ V}$ and $S_{formation} = 16 \text{ cm}^2$; б – operational voltage at $T_{electrolyte} = 80 ^\circ\text{C}$ and $S_{formation} = 10 \text{ cm}^2$; в – specimen surface area at $T_{electrolyte} = 60 ^\circ\text{C}$ and $U = 300 \text{ V}$

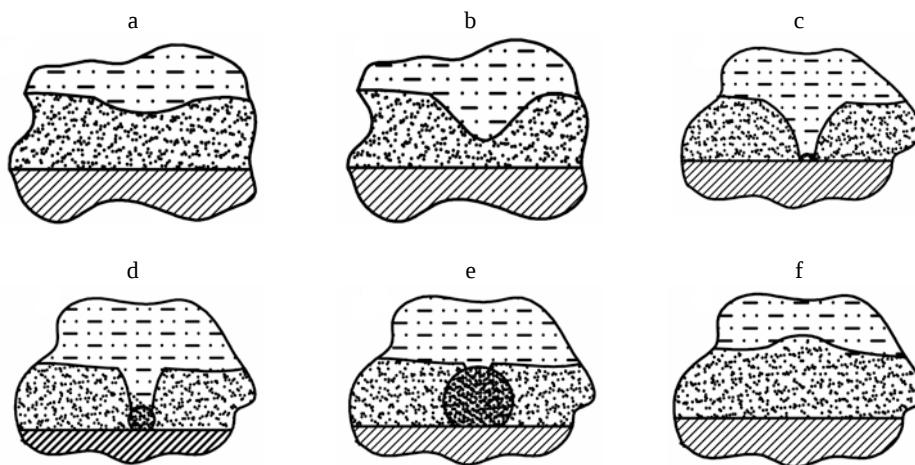


Рис. 4. Схема пробоя парогазовой оболочки электролитным мостиком

Fig. 4. Scheme of vapor-gas envelope burst by electrolyte bridge

Физическое состояние основного и дополнительных электролитных мостиков определяется их инерцией и напряженностью электрического поля. Дополнительные мостики достигают поверхности анода за время порядка 0,2–0,3 мкс и первыми касаются поверхности анода, замыкая ПГО. Основные мостики по сравнению с дополнительными обладают большей инерцией. Для достижения поверхности анода им требуется время порядка 0,5–50,0 мс. По мере джоулевого нагрева температура электролита в области контакта мостика с поверхностью анода достигает точки кипения. Поскольку температура продолжает быстро возрастать, то условия не соответствуют равновесному пузырьковому кипению, и имеет место перегрев локальной микроскопической области электролита. Величина перегрева при атмосферном давлении, достаточная для реализации механизма взрывного вскипания воды, не превышает 205 °С [9]. В конечном итоге подведенной энергии оказывается достаточно для преодоления фазового барьера – дополнительные электролитные мостики, а затем и основной мостик взрываются (рис. 4d). В электрической цепи появляется импульс тока, представляющий собой композицию импульса тока от основного мостика и многочисленных импульсов тока от дополнительных мостиков (рис. 5). Высокочастотный сигнал электрического тока, фиксируемый с помощью осциллографа, является следствием коммутации ПГО дополнительными электролитными мостиками, эмитированными с поверхности основного мостика.

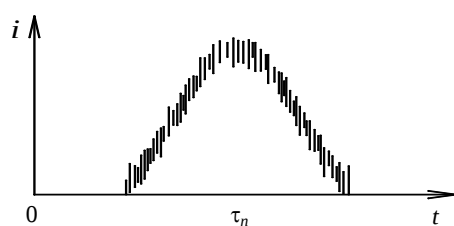


Рис. 5. Структура единичного импульса электрического тока

Fig. 5. Structure of single impulse for electric current

Интересным фактом, установленным в ходе осциллографических исследований тока и требующим объяснения, является аномально высокая амплитуда импульсов тока от дополнительных мостиков. Известно [10], что водные растворы электролитов – проводники электрического тока II рода, в которых ток обеспечива-

ется перемещением положительно и отрицательно заряженных ионов под действием электрического поля. Сила общего тока, равная сумме токов, вызванных противоположным движением катионов и анионов раствора, зависит от подвижности ионов. При одинаковых условиях подвижности большинство ионов мало отличаются друг от друга за исключением ионов водорода и гидроксидов, подвижность которых больше в 3–8 раз [10]. Подвижность ионов существенно зависит от вязкости раствора, которая, в свою очередь, зависит от его температуры. Повышение температуры приводит к снижению вязкости раствора и увеличению подвижности ионов. С другой стороны, скорость движения иона в растворе под действием внешнего электрического поля ограничивается силой трения, связанной с существованием ионной атмосферы, окружающей ион и перемещающейся в сторону, противоположную движению иона [10]. Эффект торможения называется электрофоретическим эффектом. На скорость движения иона также оказывает влияние релаксационный эффект [10], связанный с образованием и разрушением ионной атмосферы при движении иона. В условиях ЭИП в момент касания дополнительным электролитным мостиком поверхности анода температура электролита в мостике быстро возрастает, что приводит к резкому снижению вязкости раствора и значительному повышению подвижности ионов в локальном объеме дополнительного мостика. Кроме того, при расчетной напряженности электрического поля порядка 10^7 В/м в области дополнительного мостика реализуется эффект Вина [10], который заключается в том, что при напряженности поля более 10^5 В/м движущийся ион выходит за пределы ионной атмосферы, которая не успевает вновь образовываться в каждом новом месте нахождения иона и ее тормозящий эффект на скорость движения иона не проявляется. В результате электропроводность электролита в дополнительном мостике резко возрастает и достигает предельно возможной величины для данного раствора.

Аномально высокую амплитуду импульсов электрического тока при замыкании ПГО дополнительными электролитными мостиками можно объяснить совокупным действием высокой температуры электролита в локальном объеме мостика и реализацией эффекта Вина. При пробое оболочки основными мостика-

ми расчетная напряженность электрического поля в локальных областях составляет порядка $4 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$ В/м. Следовательно, и в этом случае возможна реализация эффекта Вина.

Взрывы основного и дополнительных электролитных мостиков сопровождаются ударной волной и образованием микроскопического парогазового пузырька в ПГО (рис. 4е). Под действием ударной волны давление на электролит со стороны оболочки резко возрастает, и электролит, граничащий с оболочкой, отбрасывается от поверхности анода (рис. 4ф). Толщина оболочки увеличивается. В тонком приграничном слое электролита зарождается микропоток. В начальный момент времени скорость движения микропотока достаточно высока, что приводит к снижению давления в микропотоке. На некотором расстоянии от ПГО в результате снижения скорости движения микропотока под действием сил трения давление в микропотоке повышается до уровня, близкого к давлению в основном объеме электролита. Перепад давлений может привести к возникновению в прианодной области электролита гидродинамической кавитации. Кавитационный пузырек, перемещаясь с микропотоком в область с более высоким давлением, схлопывается, излучая ударную волну. Совокупное действие ударных волн от взрывов электролитных мостиков и схлопывания кавитационных пузырьков способствует возникновению вибрации ПГО и формированию гидродинамических потоков в электролите.

При взрыве электролитных мостиков в оболочку попадают водяной пар, растворенные в электролите газы, нейтральные кластеры, состоящие преимущественно из молекул воды, молекулы компонентов раствора и ионы. Отрицательно заряженные ионы под действием электрического поля начинают двигаться в ПГО

в направлении анода, положительно заряженные ионы – в направлении катода (электролита). Возникает электрический ток, обусловленный ионной проводимостью в газовой фазе оболочки. Его доля в общем токе, протекающем через оболочку в режиме ЭИП, не превышает 2 % [11].

Авторы [12, 13] представляют ПГО в виде эквивалентной электрической схемы, включающей конденсатор с параллельно подключенным нелинейным сопротивлением. По данным [12], удельная емкость оболочки $150 - 300$ пФ/см². В условиях ЭИП зарождение основных электролитных мостиков является статистически независимым случайным событием. Мостики могут иметь разные размеры и соответственно различную величину электрического сопротивления. С учетом пренебрежимо малой величины электрического сопротивления металлического анода систему «анод – ПГО – электролит» можно представить в виде эквивалентной электрической схемы, включающей конденсатор $C_{ПГО}$, электрические сопротивления электролита $R_{эл}$, газовой фазы оболочки $R_{ПГО}$ и электролитных мостиков $R_1, R_2, \dots, R_n$ (рис. 6а). Для данной схемы в общем случае справедливо неравенство

$$R_{ПГО} \neq R_1 \neq R_2 \neq \dots \neq R_n.$$

Из эквивалентной электрической схемы (рис. 6а) следует, что постоянная составляющая тока, протекающего через ПГО, обеспечивается за счет ионной проводимости в газовой фазе оболочки. Основные электролитные мостики, замыкая оболочку в моменты времени $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$, шунтируют электрическое сопротивление газовой фазы оболочки $R_{ПГО}$, что приводит к появлению в электрической цепи импульсов тока, обусловленных ионной проводимостью в электролитных мостиках.

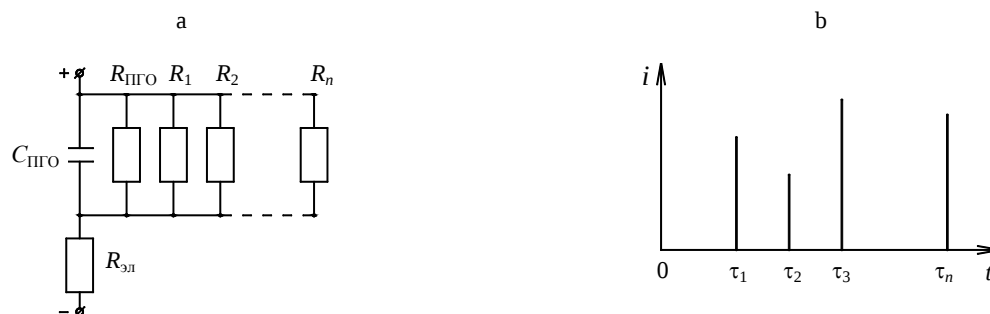


Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема (а) системы «анод – парогазовая оболочка – электролит» и схема единичных импульсов тока (б)

Fig. 6. Equivalent electric diagram (a) system “anode – vapor-gas envelope – electrolyte” and diagram of single current impulses (b)

На рис. 6b они условно представлены в виде коротких импульсов с разной амплитудой. Очевидно, что основные мостики могут зарождаться с равной вероятностью в одинаковые моменты времени на разных участках поверхности электролита, граничащего с ПГО. Следовательно, электрические сопротивления отдельных мостиков оказываются подключенными параллельно, что в соответствии с законом Ома приводит к снижению общего сопротивления оболочки и росту силы тока в электрической цепи. Этот эффект наглядно проявляется при увеличении площади обрабатываемой поверхности.

Таким образом, так называемая постоянная составляющая электрического тока, фиксируемая с помощью осциллографа и амперметра постоянного тока, на самом деле представляет собой композицию тока в газовой фазе ПГО и тока от перекрывающихся во времени импульсов тока от основных электролитных мостиков, коммутирующих оболочку с частотой 0,01–0,90 кГц. Схема, поясняющая эффект перекрытия во времени импульсов тока от основных мостиков, представлена на рис. 7.

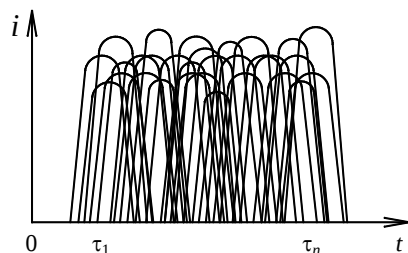


Рис. 7. Эффект перекрытия импульсов тока во времени

Fig. 7. Effect of impulse overlapping in time

В рамках предложенной концептуальной модели можно объяснить разнообразные физические явления, наблюдаемые при реализации процесса ЭИП, например появление звука с частотой 0,4–0,7 кГц. При увеличении площади обрабатываемой поверхности высота звука не меняется, но его уровень возрастает. Звуковые колебания возникают в результате воздействия на электролит ударных волн от взрывов основных электролитных мостиков. Колебания в электролите передаются на стенки ванны установки ЭИП и далее в воздух в виде звуковых колебаний. Чем больше площадь обрабатываемой поверхности, тем больше электролитных мостиков, замыкающих ПГО, и выше уровень звука. Высота звука зависит от того, с какой преобладающей частотой основные электролитные мостики коммутируют оболочку.

ВЫВОДЫ

1. Согласно экспериментально обоснованной концептуальной модели коммутационного механизма электрической проводимости парогазовой оболочки в режиме электроимпульсного полирования, электрический ток, имеющий квазипостоянную и высокочастотную составляющие, обеспечивается за счет ионной проводимости в электролитных мостиках и газовой фазе оболочки.

2. Квазипостоянная составляющая электрического тока представляет собой композицию тока от перекрывающихся во времени импульсов тока от основных электролитных мостиков, коммутирующих оболочку с частотой 0,01–0,90 кГц и тока в газовой фазе парогазовой оболочки. Высокочастотная составляющая тока является составной частью импульсов тока от основных мостиков и обусловлена ионной проводимостью в дополнительных электролитных мостиках, замыкающих оболочку с частотой порядка 2,5 МГц.

3. Аномально высокая электропроводность электролита в электролитных мостиках обеспечивается за счет высокой подвижности ионов вследствие сверхбыстрого разогрева электролита джоулевой теплотой и реализации эффекта Вина.

4. Образование парогазовой оболочки и ее обновление связаны с тепловым взрывным механизмом разрушения электролитных мостиков. Вибрация оболочки и гидродинамические потоки в объеме электролита возникают в результате воздействия на приграничный с оболочкой слой электролита ударных волн от взрывов электролитных мостиков и схлопывания кавитационных пузырьков в прианодной области электролита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синькевич, Ю. В. Применение электролитной анодной обработки в металлообрабатывающей промышленности / Ю. В. Синькевич // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 29. С. 92–96.
2. Синькевич, Ю. В. Современные представления о механизме электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электролитной анодной обработки / Ю. В. Синькевич // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 29. С. 102–107.
3. Янковский, И. Н. Электроимпульсное полирование коррозионностойких и углеродистых конструкционных сталей с обеспечением заданного комплекса свойств обрабатываемых поверхностей / И. Н. Янковский. Минск, 2008. 187 с.
4. Синькевич, Ю. В. Физико-математическая модель процесса электроимпульсного полирования / Ю. В. Синькевич, И. Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр.

- Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2006. Вып. 32. С. 206–212.
5. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А. А. Равделя, А. М. Пономаревой. 9-е изд. СПб: Спец. лит., 1998. 232 с.
 6. Собственные радиоизлучение и ток электрического разряда как инструмент контроля и управления процессом электроимпульсного полирования / Г. Н. Здор [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2009. № 2. С. 111–119.
 7. Янковский, И. Н. Осциллографические исследования электрического тока в парогазовой оболочке при анодном процессе / И. Н. Янковский, Ю. В. Синькевич, Г. Я. Беляев // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г.: в 3 т. Новополоцк: Полоцкий гос. ун-т, 2009. Т. 3. С. 13–17.
 8. Синькевич, Ю. В. Исследование механизма прохождения электрического тока через парогазовую оболочку при анодном процессе / Ю. В. Синькевич, И. Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. Донецк: Донецкий национ. техн. ун.-т, 2011. Вып. 41. С. 287–292.
 9. Советников, В. П. О возможности взрывного вскипания на докритической стадии электрического разряда в воде / В. П. Советников, Л. Л. Теляшов // Электронная обработка материалов. 1979. № 4. С. 46–49.
 10. Антропов, Л. И. Теоретическая электрохимия / Л. И. Антропов. М.: Высш. шк., 1975. 560 с.
 11. Синькевич, Ю. В. Оценка адекватности физико-математической модели парогазовой оболочки в условиях электроимпульсного полирования / Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В. Л. Кирпичева и 45-летию ПГУ, Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. Новополоцк: Полоцкий гос. ун-т, 2013. С. 47–50.
 12. Дураджи, В. Н. Нагрев металлов в электролитной плазме / В. Н. Дураджи, А. С. Парсаданян; под общ. ред. А. С. Парсаданяна. Кишинев: Штиинца, 1988. 216 с.
 13. Исследование электрической устойчивости системы «источник питания – нагрузка» при электролитной обработке / В. К. Станишевский [и др.] // Электронная обработка материалов. 1988. № 1. С. 26–29.
- Поступила 04.04.2016
Подписана в печать 06.06.2016
Опубликована онлайн 26.09.2016
- ### REFERENCES
1. Sinkevich Yu. V. (2015) Application of Electrolytic Anode Treatment in Metal-Working Industry. *Mashinostroenie. Resp. Mezhved. Sb. Nauch. Tr.* [Mechanical Engineering. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, Issue 29, 92–96 (in Russian).
 2. Sinkevich Yu. V. (2015) Modern Concept for Mechanism of Electrical Vapor-Gas Envelope Conductivity under Conditions of Electrolytic Anode Treatment. *Mashinostroenie. Resp. Mezhved. Sb. Nauch. Tr.* [Mechanical Engineering. Republican Interdepartmental Collection of Research Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, Issue 29, 102–107 (in Russian).
 3. Yankovsky I. N. (2008) *Electrical Impulse Polishing of Corrosion-Resistant and Carbon Structural Steel by Ensuring Specified Complex of Properties for Treated Surfaces*. Minsk. 187 (in Russian).
 4. Sinkevich Yu. V., Yankovsky I. N. (2006) Physical and Mathematical Model of Electrical Impulse Polishing Process. *Progressivnye Tekhnologii i Sistemy Mashinostroeniia. Mezhdunar. Sb. Nauch. Tr.* [Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. International Collection of Research Papers]. Donetsk, Donetsk National Technical University, Issue 32, 206–212 (in Russian).
 5. Ravdel A. A., Ponomariova A. M. (1998) *Quick-Reference Guide for Physical and Chemical Values*. 9th Edition. Saint-Petersburg: Publishing House Special Literature. 232 (in Russian).
 6. Zdor G. N., Timoshevich V. B., Sinkevich Iu. V., Iankovskii I. N. (2009) Intrinsic Radio Emission and Current of Electrical Discharge as Control and Management Tool for Electrical Impulse Polishing Process. *Izvestiia Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Seriia Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Science Series], (2), 111–119 (in Russian).
 7. Yankovsky I. N., Sinkevich Yu. V., Belyaev G. Ya. (2009) Oscillographic Investigations on Electric Current in Vapor-Gas Envelope During Anode Process. *Materialy, Tekhnologii i Oborudovanie v Proizvodstve, Eksploatatsii, Remonte i Modernizatsii Mashin: Sb. Nauch. Tr. VII Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 3* [Materials, Technologies and Equipment in Production, Operation, Repair and Modernization of Machines: Collection of Research Papers of 7th International Scientific and Technical Conference. Vol. 3]. Novopolotsk, Polotsk State University, 13–17 (in Russian).
 8. Sinkevich Yu. V., Yankovsky I. N. (2011) Investigations on Mechanism of Electric Current Passage Through Vapor-Gas Envelope During Anode Process. *Progressivnye Tekhnologii i Sistemy Mashinostroeniia. Mezhdunar. Sb. Nauch. Tr.* [Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. International Collection of Research Papers]. Donetsk, Donetsk National Technical University, Issue 41, 287–292 (in Russian).
 9. Sovetnikov V. P., Telyashov L. L. (1979) On Possibility of Boil-Off at Pre-Streamer Stage of Electric Discharge in Water. *Elektronnaya Obrabotka Materialov* [Electronic Material Processing], (4), 46–49 (in Russian).
 10. Antropov L. I. (1975) *Theoretical Electrochemistry*. Moscow, Vysshaya Shkola. 560 (in Russian).
 11. Sinkevich Yu. V., Sheleg V. K., Yankovsky I. N. (2013) Evaluation of Adequateness for Physical and Mathematical Model of Vapor Gas Envelope Under Conditions of Electrical Impulse Polishing. *Innovatsionnye Tekhnologii v Mashinostroenii: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posviashch. Pamiati Prof. V. L. Kirpicheva i 45-letiiu PGU* [Innovation Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Dedicated to the Memory of prof. V. L. Kirpichev and 45th Anniversary of the Polotsk State University]. Novopolotsk, Polotsk State University, 47–50 (in Russian).
 12. Duradji V. N., Parsadanyan A. S. (1988) *Heating of Metals in Electrolytic Plasma*. Kishinev: Publishing House “Stiintsa”. 216 (in Russian).
 13. Stanishevskii V. K., Parshuto A. E., Semchenko A. A., Kosobutskii A. A. (1988) Investigations on Electric Stability of “Power Source – Load” System During Electrolytic Treatment. *Elektronnaya Obrabotka Materialov* [Electronic Material Process], (1), 26–29 (in Russian).

Received: 04.04.2016

Accepted: 06.06.2016

Published online: 26.09.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-415-419

УДК. 621.891:621.793

К определению влияния варьирования режимов лазерной обработки на трибологические характеристики режущего инструмента

Кандидаты техн. наук О. В. Дьяченко¹⁾, М. А. Кардаполова¹⁾, студ. О. В. Серякова¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Резюме. Рассмотрены вопросы повышения стойкости и надежности режущего инструмента для нарезания гастрономических продуктов с помощью лазерной обработки, приводящей к увеличению сопротивления материала рабочих поверхностей ударным нагрузкам. Изучено влияние лазерного оплавления с дополнительным легированием на структуру, микротвердость, износостойкость клеевых покрытий системы Fe–B–Cr–Si. Для решения задачи выбора оптимального качественного, а впоследствии и количественного состава многокомпонентной обмазки использован метод математического моделирования на симплексных решетках Шеффе. Установлена одинаковая тенденция изменения микроструктуры у всех клеевых покрытий, оплавленных лучом лазера. Рост скорости луча лазера вызвал следующие изменения микроструктуры: литая равновесная, дендритная, пересыщенная боридная и карбидо-боридная. Найдены модели поверхностей отклика, позволяющие судить о степени влияния параметров лазерной обработки на микротвердость полученных лазерным легированием клеевых покрытий и интенсивность их изнашивания при различных усилиях для всех исследуемых составов. Установлено, что нет строгой корреляции между твердостью и интенсивностью изнашивания покрытий после лазерного легирования клеевых покрытий. Это говорит о том, что упрочнение произошло не только за счет увеличения карбидо-боридной фазы, но и за счет упрочнения матрицы. Кроме того, регрессионная модель влияния состава обмазки на трибологические характеристики клеевых покрытий показала, что оптимальный состав многокомпонентной обмазки, обеспечивающий максимальную износостойкость покрытий, составляет 2/3B4C и 1/3TaB. Установлено, что упрочнение клеевого покрытия после лазерного легирования многокомпонентной обмазкой происходит за счет не только увеличения карбидо-боридной фазы, но и упрочнения матрицы.

Ключевые слова: лазерная обработка, микротвердость, микроструктура, интенсивность изнашивания, регрессионная модель

Для цитирования: Дьяченко, О. В. К определению влияния варьирования режимов лазерной обработки на трибологические характеристики режущего инструмента / О. В. Дьяченко, М. А. Кардаполова, О. В. Серякова // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 415–419

To Determination of Influence for Variations in Laser Treatment Modes on Tribological Characteristics of Cutting Tool

O. V. Diachenko¹⁾, M. A. Kardapolova¹⁾, O. V. Seriakova¹⁾

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

Abstract. The paper considers problems pertaining to higher durability and reliability of a cutting tool for cutting gastro-nomic products while using laser processing that leads to resistance increase of material operating surfaces against impact forces. Influence of laser fusion with additional doping on structure, microhardness, wear resistance for adhesive coatings of Fe–B–Cr–Si system has been studied in the paper. In order to solve a problem for selection of optimal qualitative and subsequently quantitative composition of a multi-component coating a mathematical modeling method using Scheffe's simplex lattices has been used in the paper. Similar tendency for measuring micro-structure of all adhesive coatings fused by laser

Адрес для переписки

Дьяченко Ольга Владимировна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-81
tiro@bntu.by

Address for correspondence

Diachenko Olga V.
Belarusian National Technical University
67 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-81
tiro@bntu.by

beams has been established in the paper. Increase in beam speed has caused the following microstructure changes: cast equilibrium, dendrite, supersaturated boride, carbide and boride. Response surface models have been found and they provide the possibility to assess influence quantity of laser processing parameters on microhardness of adhesive coatings obtained by laser doping and intensity of their wear under various conditions for all investigated compositions. It has been ascertained that there is no strict correlation between hardness and intensity of coating wear after laser doping used for adhesive coatings. This testifies to the fact that hardening has taken place not only due to an increase of carbide-boride phase, but also due to matrix hardening. In addition, a regression model for coating composition effect on tribological characteristics of the adhesive coatings has revealed that an optimal composition of a multicomponent coating ensuring maximum wear resistance of coatings constitutes B4C is 2/3 and 1/3 TaB. It has been determined that hardening of the adhesive coating after laser doping while using multicomponent coating occurs not only due to increase of carbide-boride phase, but also due to matrix hardening.

Keywords: laser processing, micro-hardness, microstructure, wear rate, regression model

For citation: Diachenko O. V., Kardapolova M. A., Seriakova O. V. (2016). To Determination of Influence for Variations in Laser Treatment Modes on Tribological Characteristics of Cutting Tool. *Science & Technique*. 15 (5), 415–419 (in Russian)

Введение

Повышение стойкости и надежности режущего инструмента для нарезания гастрономических продуктов в первую очередь зависит от увеличения сопротивления материала рабочих поверхностей ударным нагрузкам. Использование лазерного легирования для поверхностного упрочнения и восстановления изношенных рабочих поверхностей режущих инструментов для нарезания гастрономических продуктов – перспективное направление в развитии современных технологий [1, 2]. Широко известен способ получения износостойких покрытий сочетанием плазменного напыления с последующим лазерным оплавлением [1, 2]. Этот метод весьма успешно зарекомендовал себя при изготовлении и восстановлении длинномерных, крупногабаритных деталей и деталей сложной конфигурации. Однако данная технология достаточно затратная. Авторами статьи предпринята попытка замены плазменных покрытий на клеевые.

В технологии получения порошковых многокомпонентных материалов и изделий из них часто приходится решать задачи поиска оптимальных вариантов материалов, в частности путем выбора соответствующего соотношения исходных компонентов. Для решения задачи выбора оптимального качественного, а впоследствии и количественного состава многокомпонентной обмазки использовали метод математического моделирования на симплексных решетках Шеффе [3–10].

Цель работы – изучение влияния лазерного оплавления с дополнительным легированием на структуру, микротвердость, износостойкость клеевых покрытий системы Fe–B–Cr–Si.

Методика

Для исследования микроструктуры, микротвердости и сравнительных испытаний на износ использовали образцы из стали 45 прямоугольной формы сечением 10×10 мм и длиной 30 мм, на поверхность которых кистью наносили пасту, приготовленную путем смешивания трех компонентов: клея AGO, ацетона и порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф. Далее выдерживали на воздухе при комнатной температуре в течение часа для полного удаления растворителя из клеевого слоя. Толщина слоя составляла 0,6 мм. Оплавление осуществили непрерывным лазером ЛГН-702 мощностью $N = 800$ Вт при диаметре лазерного луча $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м со скоростями движения детали относительно луча лазера (скоростями луча лазера): $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с, $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ м/с, $v_3 = 3,33 \cdot 10^{-3}$ м/с, $v_4 = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с, с коэффициентом перекрытия 0,8 после предварительного нанесения порошковых обмазок В₄С, ТаВ, МоВ на клеевой связке (3 % клея AGO в ацетоне). Содержание легирующих элементов в обмазке выбрали исходя из матрицы планирования соответственно в долях единицы: 0, 1/3, 2/3 и 1,0. Толщина слоя обмазки составила 0,09–0,11 мм и контролировалась толщиномером МТ-40НЦ. После нанесения клеевого покрытия и оплавления образцы разрезали поперек лазерных дорожек для исключения влияния нестабильности температурных условий нагрева и охлаждения на краях образца.

Микрошлифы травили в 5%-м растворе пикриновой кислоты в спирте, затем в 5%-м растворе азотной кислоты в спирте. Протравленные образцы изучали на световом металлографическом микроскопе Unimet (Япония) при увеличении ×400. Микротвердость измеряли микротвердомером ПМТ-3.

Таблица 1

Матрица планирования,
микротвердость клеевых покрытий
и интенсивность изнашивания пары трения

Planning matrix,
micro-hardness of adhesive coatings
and wear intensity of friction couple

№ п/п	z_1	z_2	z_3	Y_i	$I_h \cdot 10^{-7}$ при P, H			Микро- твердость $H_\mu, ГПа$
	B_4C (X_1)	TaB (X_2)	MoB (X_3)		30	50	70	
1	1,00	0	0	Y_1	0,41	0,44	0,87	12,14
2	0	1	0	Y_2	0,52	0,56	0,92	7,80
3	0	0	1	Y_3	0,38	0,60	0,64	10,83
4	2/3	1/3	0	Y_{112}	0,34	0,52	0,64	9,57
5	1/3	2/3	0	Y_{122}	0,65	0,69	0,71	10,54
6	2/3	0	1/3	Y_{113}	0,49	0,57	0,79	8,75
7	1/3	0	2/3	Y_{133}	0,42	0,65	0,69	8,99
8	0	2/3	1/3	Y_{223}	0,32	0,65	0,79	8,04
9	0	1/3	2/3	Y_{233}	0,57	0,61	0,79	10,18
10	1/3	1/3	1/3	Y_{123}	0,79	0,89	0,94	10,78

Коэффициенты уравнения (1) определяли по формулам:

$$\beta_1 = Y_1; \beta_2 = Y_2; \beta_3 = Y_3; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_{12} &= \frac{9}{4}(Y_{112} + Y_{122} - Y_1 - Y_2); \\ \beta_{13} &= \frac{9}{4}(Y_{113} + Y_{133} - Y_1 - Y_3); \\ \beta_{23} &= \frac{9}{4}(Y_{223} + Y_{233} - Y_2 - Y_3); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{12} &= \frac{9}{4}(3Y_{112} - 3Y_{122} - Y_1 - Y_2); \\ \gamma_{13} &= \frac{9}{4}(3Y_{113} - 3Y_{133} - Y_1 - Y_3); \\ \gamma_{23} &= \frac{9}{4}(3Y_{223} - 3Y_{233} - Y_2 - Y_3); \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\beta_{123} = 27Y_{123} - \frac{27}{4}(Y_{112} + Y_{122} + Y_{133} + Y_{223} + Y_{233}) + \frac{9}{2}(Y_1 + Y_2 + Y_3). \quad (6)$$

Обсуждение результатов

Установлена одинаковая тенденция изменения микроструктуры у всех клеевых покрытий, оплавленных лучом лазера. С ростом скорости луча лазера она изменяется от литой равновесной до мелкой квазиэвтектической – как для покрытий без легирования, так и легированных TaB, MoB и B₄C. Структуры оплавленных лазером клеевых покрытий, легированных B₄C, показаны на рис. 1.

Для ускоренных сравнительных испытаний материалов на износ при сухом трении использовали машину трения МТ-1 при линейной скорости вращения истирающего диска 2,3 м/с (угловая скорость 880 об/мин), нагрузке $P = 30\text{--}70$ Н, твердости диска 40–45 HRC. Время эксперимента 300 с.

По результатам проведенных экспериментов вычисляли интенсивности изнашивания для каждого случая по формуле

$$I_h = \frac{\Delta v}{A_t L_t} = \frac{A_t h}{A_t L_t} = \frac{H}{L_t} = \frac{b^2}{8rL_t}, \quad (1)$$

где I_h – интенсивность изнашивания пары трения; A_t – площадь поверхности трения; L_t – путь трения; b, r – длина и радиус лунки.

Математическую обработку полученных интенсивностей изнашивания проводили с помощью симплекс-метода. Исследуемая система содержала три варьируемых компонента (многокомпонентная обмазка состояла из TaB, MoB и B₄C). Поэтому в качестве симплекса использовали модели третьего порядка.

Первая серия опытов состояла из девяти основных испытаний, вторая – из девяти основных и одного дополнительного опытов. Полученная модель учитывала взаимодействие следующих факторов:

$$Y_i = \sum_{j=1}^q \beta_j X_j + \sum_{j=1}^q \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{j=1}^q \gamma_{ij} (X_i - X_j) + \sum_{j=1}^q \delta_{ijk} X_i X_j X_k, \quad (2)$$

где Y_i – параметры оптимизации; $\beta_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ijk}$ – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметры оптимизации; q – количество компонентов; X_i, X_j, X_k – (z_i) – кодированные уровни содержания компонентов; i, j, k – номер коэффициента модели, который совпадает с порядковым номером.

Для составления таблицы данных (матрицы планирования) определяли пределы изменения основных входных параметров, в качестве которых принимали содержание легирующих элементов в обмазке (табл. 1): $x_1 = z_1$ – содержание B₄C; $x_2 = z_2$ – содержание TaB; $x_3 = z_3$ – содержание MoB.

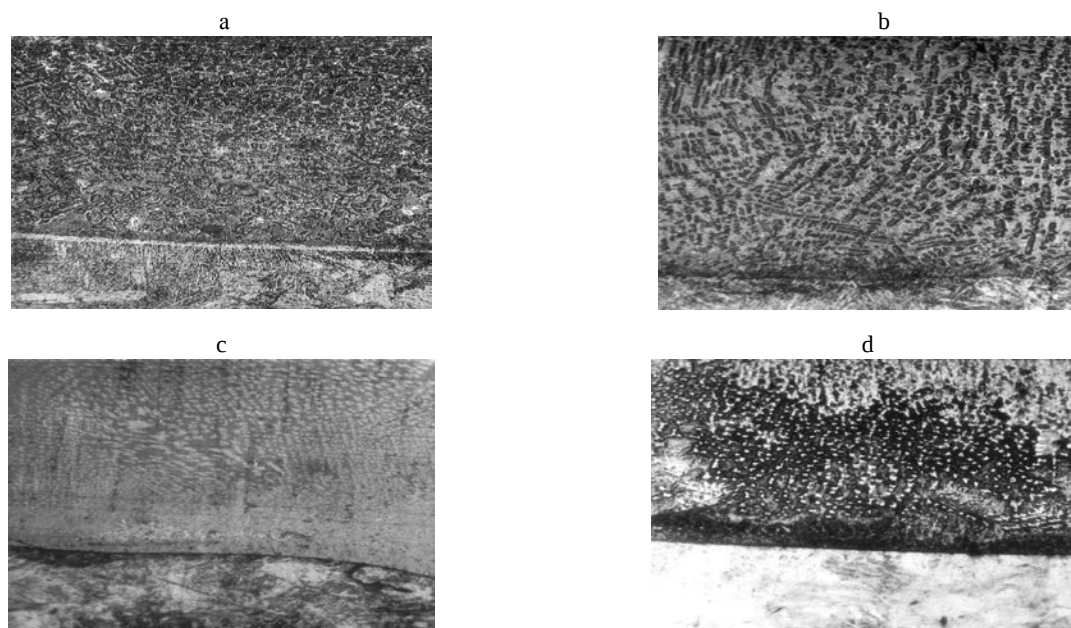


Рис. 1. Микроструктура покрытий, полученных оплавлением клеевого покрытия из порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф, легированного В₄С при скоростях луча лазера, м/с: а – $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); б – $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); в – $v_3 = 3,33 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); д – $v_4 = 5 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$)

Fig. 1. Microstructure of coatings obtained by fusion of adhesive coating while using powder ПР-Х4Г2Р4С2Ф, alloyed В₄С at laser beam speed, m/s: а – $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); б – $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); в – $v_3 = 3,33 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); д – $v_4 = 5 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$)

Рост скорости луча лазера вызвал следующие изменения микроструктуры: литая равновесная, дендритная, пересыщенная боридная и карбидо-боридная. С увеличением скорости луча лазера уменьшилось время, в течение которого произошло оплавление покрытия. Вследствие этого образуется пересыщенный твердый раствор, из которого при остывании покрытия выпадают бориды и карбиды в виде квазиэвтектики.

При скорости луча лазера $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с (рис. 1а) образовалась литая равновесная ячеистая структура с вкраплениями дендритов. Это свидетельствует о достаточно долгом пребывании покрытия в зоне лазерного облучения, приведшем к перераспределению элементов. Увеличение скорости до $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ м/с (рис. 1б) привело к появлению дендритов 1-го и 2-го порядков, ориентированных под углом 45° в направлении теплоотвода. Дальнейший рост скорости луча лазера до v_3 (рис. 1с) привел к образованию пересыщенного твердого раствора, из которого выделились мелкодисперсные бориды и карбиды неправильной формы. Увеличение скорости луча лазера до v_4 (рис. 1д)

сократило время проплавления покрытия, вследствие чего из твердого раствора образовалась мелкодисперсная структура, состоящая из мелких карбидов и боридов. Более темная переходная зона говорит о недостаточном проплавлении покрытия с основой.

Интенсивность изнашивания клеевых покрытий, а также микротвердость являются основными показателями лазерного упрочнения [2–5]. С помощью формул (1)–(6) получены модели поверхностей отклика, позволяющие судить о степени влияния параметров X_1 – X_3 на микротвердость полученных лазерным легированием клеевых покрытий и интенсивность их изнашивания при различных усилиях P (табл. 2). По этим формулам найдена интенсивность изнашивания для всех 10 составов и определено, что наиболее износостойким является состав обмазки № 4, содержащий $2/3\text{В}_4\text{С}$ и $1/3\text{TaB}$ (табл. 2).

Во всех случаях интенсивность изнашивания зависела от скорости луча лазера, диаметра луча и коэффициента перекрытия лазерных дорожек и возрастала с увеличением нагрузки.

Таблица 2

Уравнения регрессии для клеевых покрытий, легированных составом TaB + MoB + B₄CRegression equations for adhesive coatings alloyed by composition TaB + MoB + B₄C

Усилие P , Н	Уравнение регрессии	Количество веществ-упрочнителей	Интенсивность изнашивания, max
30	$Y_3 = 0,41X_1 + 0,52X_2 + 0,38X_3 + 0,135X_1X_2 + 0,27X_1X_3 - 0,023X_2X_3 - 1,85X_1X_2(X_1 - X_2) + 0,405X_1X_3(X_1 - X_3) - 2,003X_2X_3(X_2 - X_3) + 11,7X_1X_2X_3$	$2/3B_4C + 1/3TaB$	0,34
50	$Y_5 = 0,44X_1 + 0,56X_2 + 0,6X_3 + 0,473X_1X_2 + 0,405X_1X_3 + 0,225X_2X_3 - 0,877X_1X_2(X_1 - X_2) - 0,18X_1X_3(X_1 - X_3) + 0,36X_2X_3(X_2 - X_3) + 10,17X_1X_2X_3$	$2/3B_4C + 1/3TaB$	0,52
70	$Y_7 = 0,87X_1 + 0,92X_2 + 0,64X_3 - 0,99X_1X_2 - 0,0675X_1X_3 + 0,045X_2X_3 - 0,36X_1X_2(X_1 - X_2) + 0,158X_1X_3(X_1 - X_3) - 0,63X_2X_3(X_2 - X_3) + 11,88X_1X_2X_3$	$2/3B_4C + 1/3TaB$	0,64
Микро- твер- дость	$Y = H_\mu = 12,14X_1 + 9,67X_2 + 8,04X_3 - 0,3X_1X_2 + 1,8X_1X_3 + 0,54X_2X_3$	$1B_4C$	$H_{цmax} = 12,14$ ГПа

ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что нет строгой корреляции между твердостью и интенсивностью изнашивания покрытий после лазерного легирования клеевых покрытий. Это свидетельствует о том, что упрочнение произошло не только за счет увеличения карбидо-боридной фазы, но и за счет упрочнения матрицы.

2. Регрессионная модель влияния состава обмазки на трибологические характеристики клеевых покрытий показала, что оптимальный состав многокомпонентной обмазки, обеспечивающий максимальную износостойкость покрытий, составляет $2/3B_4C$ и $1/3TaB$.

3. Установлено, что упрочнение клеевого покрытия после лазерного легирования многокомпонентной обмазкой происходит за счет не только увеличения карбидо-боридной фазы, но и упрочнения матрицы.

4. Открываются новые возможности для повышения стойкости восстановленных режущих частей измельчительного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология лазерной обработки конструкционных и инструментальных материалов в авиадвигателестроении / Р. Р. Латыпов [и др.]. М.: Машиностроение, 2007. 240 с.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2008. 664 с.
3. Вакс, Е. Д. Практика прецизионной лазерной обработки / Е. Д. Вакс, М. Н. Миленький, Л. Г. Сапрыкин. Москва: Техносфера, 2013. 708 с.
4. Буснюк, Н. Н. Математическое моделирование: учеб. пособие / Н. Н. Буснюк, А. А. Черняк. Минск: Беларусь, 2014. 214 с.
5. Буснюк, Н. Н. Математическое моделирование: практикум / Н. Н. Буснюк, А. А. Черняк, Ж. А. Черняк. Минск: Беларусь, 2014. 295 с.
6. Маталыцкий, М. А. Теория вероятностей, математическая статистика и случайные процессы: учеб. пособие / М. А. Маталыцкий, Г. А. Хацкевич. Минск: Вышэйш. шк., 2012. 720 с.

7. Самарский, А. А. Математика. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. М.: Физ.-мат. лит-ра, 2005. 320 с.
8. Трусова, П. В. Введение в математическое моделирование / П. В. Трусова. М.: Логос, 2007. 440 с.
9. Черняк, А. А., Математическое программирование. Алгоритмический подход / А. А. Черняк, Ж. А. Черняк, Ю. М. Метельский. Минск: Вышэйш. шк., 2007. 352 с.
10. Юденков, В. А. Дисперсионный анализ / В. А. Юденков // Математическая статистика. Минск: Биосфера, 2013. 75 с.

Поступила 28.01.2016

Подписана в печать 04.03.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Latypov R. R., Teregulov N. G., Smyslov A. M., Lobanov A. V. (2007) *Technology of Laser Processing for Structural and Tool Materials in Aircraft Engine Manufacturing*. Moscow, Mashinostroyeniye. 240 (in Russian).
2. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. (2008) *Technological Processes of Laser Processing*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University. 664 (in Russian).
3. Vaks E. D., Milenkii M. N., Saprykin L. G. (2013) *Practice of Precision Laser Processing*. Moscow, Tekhnosfera. 708 (in Russian).
4. Busnjuk N. N., Chernyak A. A. (2014) *Mathematical Simulation*. Minsk, Belarus. 214 (in Russian).
5. Busnjuk N. N., Chernyak A. A., Chernyak Zh. A. (2014) *Mathematical Simulation. Practical Course*. Minsk, Belarus. 295 (in Russian).
6. Matalytsky M. A., Khatskevich G. A. (2012) *Probability Theory, Mathematical Statistics and Stochastic Processes*. Minsk, Vysheyschaya Shkola. 720 (in Russian).
7. Samarsky A. A., Mikhailov A. P. (2005) *Mathematics. Mathematical Simulation. Ideas. Methods. Examples*. Moscow, Physical and Mathematical Literature. 320 (in Russian).
8. Trusova P. V. (2007) *Introduction to Mathematical Simulation*. Moscow: Publishing House "Logos". 440 (in Russian).
9. Chernyak A. A., Chernyak Zh. A., Metelsky Yu. M. (2007) *Mathematical Programming. Algorithmic Approach*. Minsk, Vysheyschaya Shkola. 352 (in Russian).
10. Yudenkov V. A. (2013) *Analysis of Variance*. Minsk, Biosphere. 75 (in Russian).

Received: 28.01.2016

Accepted: 04.03.2016

Published online: 26.09.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-420-426

УДК 621.43.016

Методика расчетной оценки теплонапряженного состояния головки цилиндра дизельного двигателя с воздушным охлаждением

Канд. техн. наук А. Н. Авраменко¹⁾

¹⁾Институт проблем машиностроения имени А. Н. Подгорного НАН Украины (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Повышение уровня форсирования современных дизельных двигателей оказывает влияние на технико-экономические, экологические и ресурсные показатели двигателей внутреннего сгорания. Это, в свою очередь, требует комплексной оценки и совершенствования их характеристик. Как известно, рабочий процесс и тепловая напряженность деталей камеры сгорания связаны между собой. Изменение конструктивных, режимных и регулировочных параметров систем и конструктивных элементов двигателей внутреннего сгорания, обеспечивающих процессы смесеобразования и сгорания, оказывает неизбежное влияние на теплонапряженное состояние деталей камеры сгорания. Совместная оценка параметров рабочего цикла и прочностных показателей деталей двигателей внутреннего сгорания позволяет решить целый ряд проблем, возникающих в процессе разработки двигателей новой конструкции и доводки существующих. В статье приведены результаты сравнительной расчетной оценки теплонапряженного состояния головки цилиндра быстроходного дизельного двигателя Д21А (2Ч10,5/12) при работе в режиме номинальной мощности. Для моделирования и уточнения теплонапряженного состояния при описании граничных условий теплопроводности решались сопряженные задачи «газ – стенка»: одна – для камеры сгорания дизеля (внутренняя задача) – моделирование рабочего цикла дизеля, другая – для ребер охлаждения при их обдуве потоком воздуха (внешняя задача). Вычисления производили в трехмерной нестационарной постановке в декартовых координатах. Для моделирования рабочего цикла дизельного двигателя использовали расчетную сетку, описывающую конфигурацию камеры сгорания, впускных и выпускных каналов. Решение внешней задачи для поверхности ребер охлаждения при их обдуве потоком воздуха позволило уточнить температуры и коэффициенты теплоотдачи и тем самым в дальнейшем повысить точность расчетной оценки уровня температур и напряжений головки цилиндра.

Ключевые слова: головка цилиндра, граничные условия, теплонапряженное состояние, рабочий цикл, дизель

Для цитирования: Авраменко, А. Н. Методика расчетной оценки теплонапряженного состояния головки цилиндра дизельного двигателя с воздушным охлаждением / А. Н. Авраменко // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 420–426

Methodology for Estimation of Heat-Stressed State for Cylinder Head of Diesel Engine with Air Cooling

A. N. Avramenko¹⁾

¹⁾Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkov, Ukraine)

Abstract. Performance tuning improvement of modern diesel engines exerts an influence on technical and economic, ecological and resource indices of an internal combustion engine (ICE). In its turn, that requires a complex estimation and improvement of engine indices. As is known, working process and thermal intensity of combustion chamber parts are interconnected between themselves. Changes in design, operating and adjustment parameters of systems and structural elements of internal combustion engines that enable air-fuel mixing and combustions processes have necessary impact on heat-

Адрес для переписки

Авраменко Андрей Николаевич
Институт проблем машиностроения
имени А. Н. Подгорного НАН Украины
ул. Д. Пожарского, 2/10,
61000, г. Харьков, Украина
Тел.: +380 57 394-47-54
an0100@yandex.ru

Address for correspondence

Avramenko Andrey N.
Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems
of the National Academy of Sciences of Ukraine
2/10, D. Pozharskogo str.,
61000, Kharkov, Ukraine
Tel.: +380 57 394-47-54
an0100@yandex.ru

stressed state of combustion chamber parts. Joint estimation of operating cycle parameters and strength indices of ICE parts makes it possible to solve a number of problems originating in the process of designing new engine models and further development of the existing ones. The paper provides results of comparative estimation on heat-stressed state of a cylinder head for a high-speed diesel engine D21A (2410,5/12) while operating a rated power mode. In order to simulate and specify a heat-stressed state for description of boundary heat conductivity conditions the following adjoint “gas – wall” problems have been solved: the first one – for combustion chamber of a diesel engine (an internal problem) – simulation of a working cycle for a diesel engine; the second one – for cooling edges while blowing over them by air flow (an external problem). Calculations have been made in three-dimensional non-stationary presentation within the Cartesian coordinates. In order to simulate a working cycle of the diesel engine a computational grid describing combustion chamber configuration, inlet and outlet channels has been used in the paper. Solution of the external problem for cooling edge surface in case of blowing over them by air flow has permitted to specify temperatures and heat-transfer coefficient and later to improve an accuracy while estimating level of temperatures and stresses of the cylinder head.

Keywords: cylinder head, boundary conditions, heat-stressed state, working cycle, diesel engine

For citation: Avramenko A. N. (2016) Methodology for Estimation of Heat-Stressed State for Cylinder Head of Diesel Engine with Air Cooling. *Science & Technique*. 15 (5), 420–426 (in Russian)

Введение

Рабочий процесс и теплонапряженность деталей камеры сгорания (КС) двигателя внутреннего сгорания (ДВС), как известно, связаны между собой. Изменение конструктивных, режимных и регулировочных параметров систем и конструктивных элементов ДВС, обеспечивающих процессы смесеобразования и сгорания, оказывает неизбежное влияние на теплонапряженное состояние (ТНС) деталей КС. Решение сопряженных задач «газ – стенка» и соответственно совместная оценка параметров рабочего цикла и прочностных показателей деталей ДВС позволяют справиться с целым рядом проблем, возникающих в процессе разработки двигателей новой конструкции и доводки существующих.

Анализ публикаций

При моделировании ТНС деталей КС всегда возникают сложности с выбором схемы задания граничных условий задачи теплопроводности на теплообменной поверхности исследуемых деталей, выбором закона изменения граничных условий при исследовании нестационарных режимов, а также с выбором самих значений граничных условий задачи теплопроводности [1, 2]. Обычно при моделировании ТНС деталей КС исследователи пользуются неполными экспериментальными данными о тепловом и деформированном состояниях деталей КС. Это обусловлено ограниченными возможностями, связанными с особенностями конструкции ДВС и несовершенством измерительной аппаратуры. Такие особенности сказыва-

ются на точности выбора схемы задания граничных условий, закона их изменения и значения самих граничных условий теплообмена.

Развитие программных комплексов позволяет с определенной степенью достоверности моделировать процессы смесеобразования и сгорания в цилиндре поршневого ДВС, о чем свидетельствуют зарубежные публикации [3, 4]. Численное моделирование процессов рабочего цикла дает возможность оценить влияние конструктивных и режимных факторов на показатели рабочего цикла и сократить время доводки двигателя [5, 6].

В статье автором предложен подход, в соответствии с которым решается сопряженная задача: расчет рабочего цикла дизеля с последующим получением распределения граничных условий задачи теплопроводности по теплообменной поверхности деталей КС, характером их изменения и значениями граничных условий. Впоследствии эти данные используются при описании граничных условий для моделирования ТНС деталей КС на исследуемом режиме работы дизеля.

Цель и постановка задачи

Цель работы – сравнительная расчетная оценка ТНС головки цилиндра быстроходного дизеля при работе в номинальном режиме с использованием предложенной методики описания граничных условий задачи теплопроводности на теплообменной поверхности ребер охлаждения головки с воздушным охлаждением путем решения внешней задачи «газ – стенка». В работе ставились задачи:

- описать начальные и граничные условия, выполнить расчет рабочего цикла дизеля;
- разработать конечно-элементную сетку, описывающую конфигурацию головки цилиндра;
- используя результаты расчета параметров рабочего цикла и результаты, полученные при решении внешней задачи (обдув головки потоком охлаждающего воздуха), выполнить сравнительный расчет (ТНС) головки цилиндра;
- сравнить результаты расчетов температурного поля головки цилиндра без решения и с решением внешней задачи, а также с результатами термометрирования;
- сделать выводы и рекомендации.

Основные этапы и результаты исследования

Базовый двигатель – быстроходный тракторный дизель 2Ч10,5/12 семейства Д21. Для численного моделирования рабочего цикла использовали ранее разработанные геометрию и расчетную сетку КС [7]. Краткая техническая характеристика дизеля представлена в табл. 1.

Таблица 1

Техническая характеристика дизеля	
Двигатель	Д21А
Отношение S/D , мм	120/105
Степень сжатия	16,5
Номинальная мощность N_e , кВт	18,4
Частота вращения, соответствующая номинальной мощности n , мин ⁻¹	1800
Тип камеры сгорания – полусферическая в поршне	
Давление начала впрыска, МПа	17
Количество сопловых отверстий распылителя, шт.	3
Диаметр сопловых отверстий, мм	0,3
Угол опережения впрыска топлива до ВМТ, град. п.к.в.	14
Продолжительность впрыска, град. п.к.в.	20

Расчет процесса наполнения выполняли с учетом наличия остаточных газов в КС и впускном канале. В качестве начальных условий задавались: давление, температура, массо-

вая фракция остаточных газов в КС, а также скорости потока. Граничными условиями были давление и температура воздуха на впуске, параметры топливоподачи, перемещение поршня, впускного клапана.

Для описания процесса теплообмена между рабочим телом и стенками цилиндра в программном комплексе используется модель полной энергии (Total Energy), которая позволяет достаточно точно моделировать процесс теплообмена для сжимаемых жидкостей и газов и учитывать эффект нагрева рабочего тела в пограничном слое при движении потока с большими скоростями. Для моделирования процесса горения в цилиндре дизеля в программном комплексе применяются:

- модель разложения вихря (Eddy Dissipation) [8];
- модель пламен (Flamelet Model) [9];
- модель, описывающая скорости химических реакций в пламени (Finite Rate Chemistry);
- объединенная модель (Combined Model);
- модель горения углеводородных топлив (Hydrocarbon Fuel Model).

Расчетное распределение скорости свежего заряда в процессе наполнения представлено на рис. 1.

Максимальная скорость зарегистрирована в области клапанной щели и достигает 300 м/с. Результаты расчета сравнивались с экспериментальными данными, полученными методом электротермоанемометрирования при работе дизеля в этом же режиме [9]. Далее выполняли расчеты процесса сжатия свежего заряда и впрыска топлива.

Распределение температуры в цилиндре в меридиональном сечении КС, лежащем вдоль оси поршневого пальца, представлено на рис. 1б. Максимальная расчетная температура в исследуемом режиме достигает 2400 К, а максимальное давление сгорания – 8 МПа [6].

В дальнейшем выполнили расчет теплонапряженного состояния головки цилиндра. Для этого разработали геометрическую и конечно-элементную сетки, описывающие конфигурацию головки цилиндра. Конечно-элементная сетка насчитывает 153546 конечных элементов и 446479 узловых точек (рис. 2).

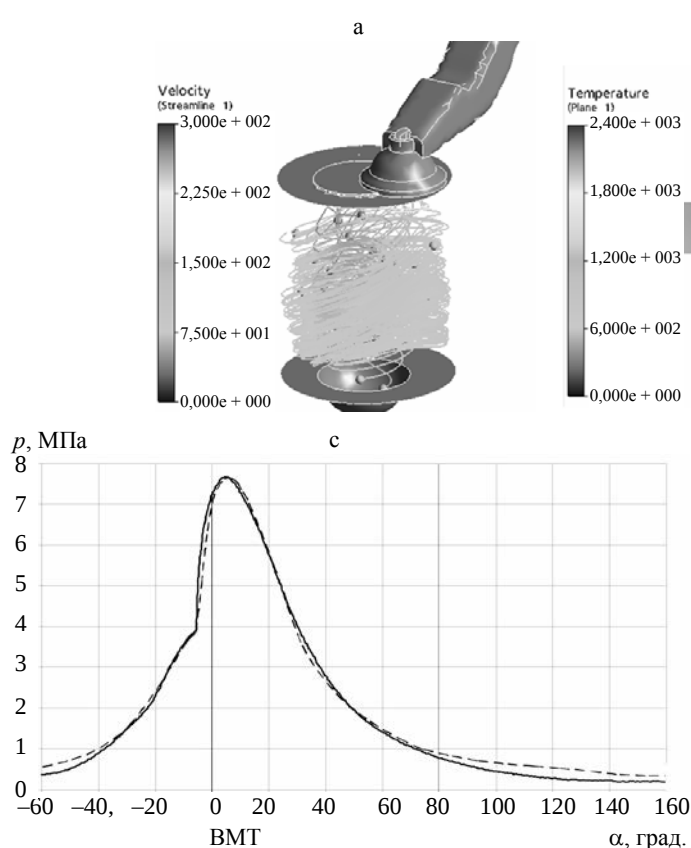


Рис. 1. Результаты моделирования рабочего цикла дизеля (режим $N_e = 18,4$ кВт, $n = 1800$ мин $^{-1}$): а – распределение скорости свежего заряда (м/с) по радиусу цилиндра; б – то же температуры (К) в выбранном сечении камеры сгорания; в – сравнение расчетной и экспериментальной [7] индикаторных диаграмм; — — — — эксперимент; — — — — расчет

Fig. 1. Results of working cycle simulation for diesel engine (mode $N_e = 18.4$ kW, $n = 1800$ min $^{-1}$): а – distribution of fresh charge speed (m/s) along cylinder radius; б – distribution of temperature (K) in selected cross-section of combustion chamber; в – comparison of calculating and experimental [7] indicator diagrams; — — — — experiment; — — — — calculation

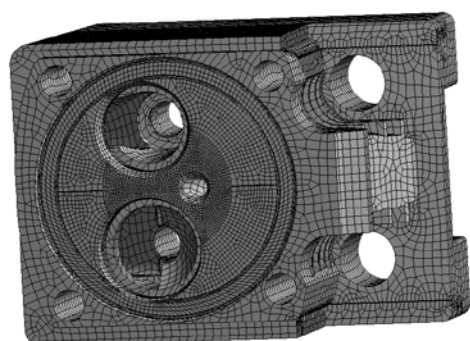


Рис. 2. Конечно-элементная сетка

Fig. 2. Finite-element grid

Для расчета ТНС головки цилиндра использовали граничные условия, полученные из результатов расчета рабочего цикла (температуры и коэффициенты теплоотдачи, а также давления в цилиндре). Рассматриваемая методика решения сопряженной задачи «газ – стенка» позволяет учитывать неравномерность распределения температуры газов в цилиндре дизеля и тем самым более корректно описывать и моделировать ТНС огневого днища головки цилиндра. При описании граничных условий задачи теплопроводности на поверхностях ребер охлаждения изначально ко-

эффициенты теплоотдачи и температура газа задавались с учетом существующих рекомендаций. В дальнейшем решали внешнюю задачу – обтекание головки цилиндра потоком охлаждающего воздуха с последующим уточнением граничных условий задачи теплопроводности для поверхностей ребер охлаждения.

Ранее проводили моторный эксперимент по определению теплового состояния головки цилиндра и поршня дизеля Д21А в исследуемом режиме [10]. Температурное поле огневого днища головки цилиндра представлено на рис. 3. Результаты расчета теплового состояния головки цилиндра сравнивались с данными термометрирования в контрольных точках (значения температур в контрольных точках обведены рамкой – рис. 3).

Максимальная температура огневого днища (210 °С) была зарегистрирована в области перемычки между отверстиями под седла клапанов (рис. 3а). На периферийных участках огневого днища температура достигала 160 °С. Погрешность в определении температурного поля головки цилиндра по сравнению с экспериментальным – менее 3 %.

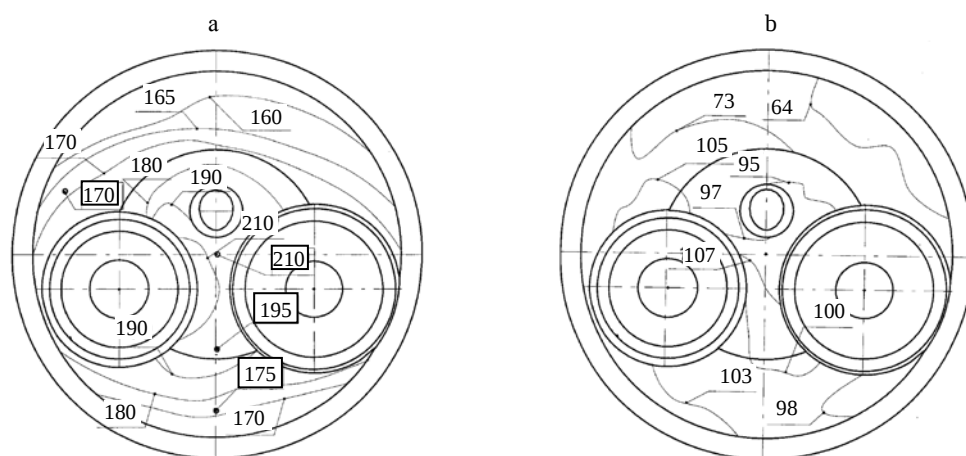


Рис. 3. Результаты расчета теплонпряженного состояния головки цилиндра (режим $N_e = 18,4$ кВт, $n = 1800$ мин⁻¹) для: а – полей температур, °С; б – интенсивностей напряжений, МПа

Fig. 3. Results of calculations for heat-stressed state of cylinder head (mode $N_e = 18,4$ kW, $n = 1800$ min⁻¹) for: а – fields temperatures, °С; б – stress intensities, МПа

В дальнейшем выполняли расчет напряженного состояния головки цилиндра. Для задания схемы закрепления использовали рекомендации [7].

Максимальные расчетные значения интенсивностей напряжений (107 МПа) были зарегистрированы в области перемычки между отверстиями под седла клапанов (рис. 3б). В области отверстия под форсунку интенсивности напряжений достигали 95 МПа, а на периферийных участках – 60–70 МПа.

Результаты решения внешней задачи – обтекание головки цилиндра потоком охлаждающего воздуха – представлены на рис. 4. Максимальная скорость потока охлаждающего возду-

ха достигала 75 м/с в проточной полости охлаждения, расположенной в центральной части головки цилиндра (рис. 4а). Вблизи внешних ребер охлаждения скорость потока изменялась от 5 до 30 м/с. Охлаждающий воздух нагревался до температуры 80 °С в центральной части проточной полости (рис. 4б).

Температурное поле огневого днища головки цилиндра для расчетного варианта с учетом корректировки граничных условий задачи теплопроводности для ребер охлаждения представлено на рис. 5. Максимальная температура огневого днища была зарегистрирована в области перемычки между отверстиями под седла клапанов и достигала 212 °С (рис. 5а).

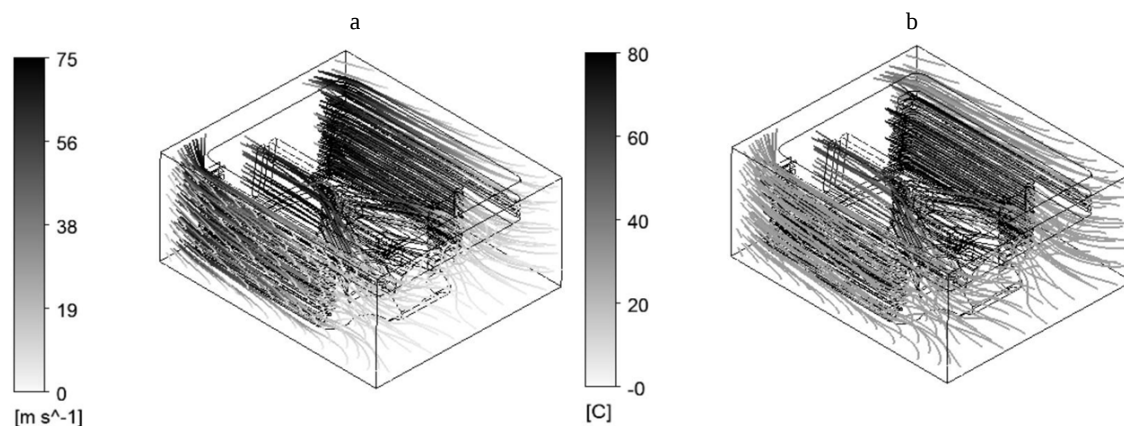


Рис. 4. Результаты численного моделирования процесса обдува головки цилиндра охлаждающим воздухом (внешняя задача): а, б – распределение скорости потока и температуры охлаждающего воздуха соответственно

Fig. 4. Results of numerical simulation for blowing-over process of cylinder head by cooling air (external problem): а, б – distribution of flow rate and temperature of cooling air, respectively

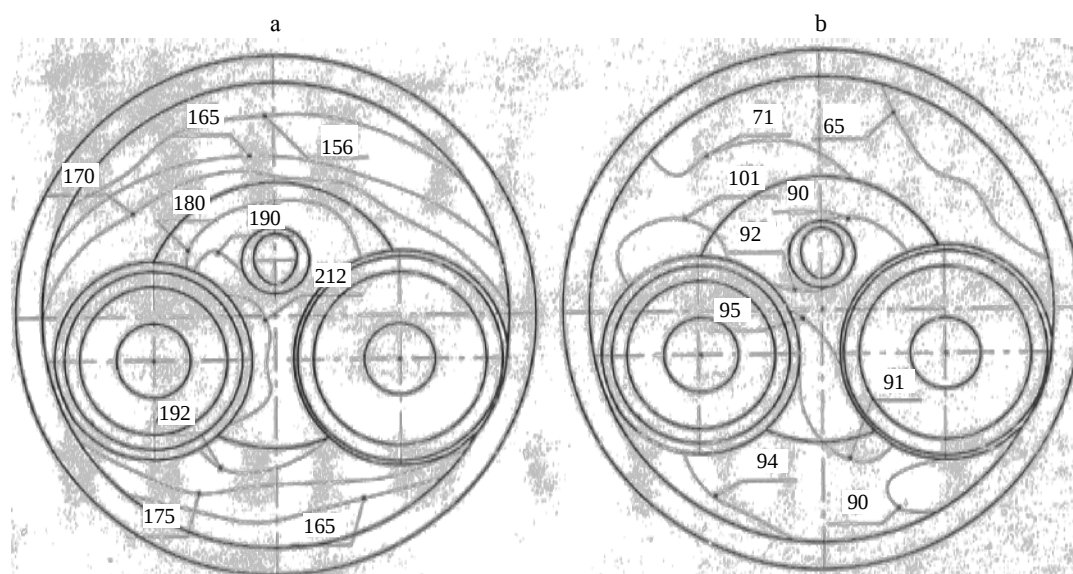


Рис. 5. Результаты расчета теплонпряженного состояния головки цилиндра с учетом корректировки граничных условий задачи теплопроводности (режим $N_e = 18,4$ кВт, $n = 1800$ мин⁻¹) для:
а – полей температур, °С; б – интенсивностей напряжений, МПа

Fig. 5. Results of calculations for heat-stressed state of cylinder head with due account of boundary conditions for heat conduction problem (mode $N_e = 18.4$ kW, $n = 1800$ min⁻¹):
а – temperature fields, °С; б – stress intensities, МПа

На периферийных участках огневого днища температура достигала 160 °С. После корректировки граничных условий изменилось температурное поле по высоте головки цилиндра, что, в свою очередь, оказало влияние на уровень напряжений по высоте головки цилиндра и огневого днища. Максимальные расчетные значения интенсивностей напряжений (95 МПа) были зарегистрированы в области перемычки между отверстиями под седла клапанов (рис. 5b). В области отверстия под форсунку интенсивности напряжений достигали 92 МПа, а на периферийных участках – 60–65 МПа.

Из результатов, представленных на рисунках, видно, что решение внешней задачи «газ – стенка» для головки цилиндра дизеля с воздушным охлаждением позволило более корректно описывать граничные условия задачи теплопроводности при расчетной оценке ТНС головки и тем самым повысить точность результатов численного моделирования.

ВЫВОД

По результатам проведенного исследования можно отметить следующее:

- решение сопряженной задачи «газ – стенка» для камеры сгорания дизеля позволило более корректно описать граничные условия задачи теплопроводности и тем самым повысить точность результатов моделирования теплового состояния огневого днища головки цилиндра;

- решение сопряженной задачи «газ – стенка» для поверхностей головки цилиндра, принудительно охлаждаемых воздухом, позволило уточнить граничные условия и получить более точные результаты о тепловом состоянии головки цилиндра по ее высоте, что положительно сказалось на результатах моделирования напряженного состояния головки цилиндра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенблит, Г. Б. Теплопередача в дизелях / Г. Б. Розенблит. М.: Машиностроение, 1977. 216 с.
2. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / Ф. И. Абрамчук [и др.]; под общ. ред. А. Ф. Шеховцова. Киев: Техника, 1992. 272 с.
3. Dahlén, L. CFD Studies of Combustion and In-Cylinder Soot Trends in a DI Diesel Engine – Comparison to Direct Photography Studies / L. Dahlén, A. Larsson // SAE Technical Paper 2000-01-1889. 2000.

4. Epping, K. The Potential of HCCI Combustion for High Efficiency and Low Emissions / K. Epping, S. Aceves, R. Bechtold // SAE Technical Paper 2002-01-1923, 2002.
 5. Ranjbar, A. A. Computational Study of the Effect of Different Injection Angle on Heavy Duty Diesel Engine / A. A. Ranjbar, K. Sedighi, M. Farhadi // Thermal Science. 2009. Vol. 13, No 3. P. 9–21.
 6. Абрамчук, Ф. И. Программный комплекс для моделирования внутрицилиндровых процессов ДВС / Ф. И. Абрамчук, А. Н. Авраменко // Двигатели внутреннего сгорания. 2010. № 2. С. 7–12.
 7. Эфрос, В. В. Дизели с воздушным охлаждением Владимирского тракторного завода / В. В. Эфрос. М.: Машиностроение, 1976. 277 с.
 8. Magnussen, B. F. The Eddy Dissipation Concept for Turbulent Combustion Modelling. Its Physical and Practical Implications, Presented at the First Topic Oriented Technical Meeting, International Flame Research Foundation, Ijmuiden / B. F. Magnussen // The Netherlands, Oct. 1989.
 9. Peters, N. Turbulent Combustion / N. Peters. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 322 p.
 10. Авраменко, А. Н. Оценка экономических, экологических и прочностных показателей быстроходного дизеля / А. Н. Авраменко // Вестник НТУ «ХПИ». 2009. № 47. С. 127–132.
- Поступила 06.09.2015
Подписана в печать 20.04.2016
Опубликована онлайн 26.09.2016
- REFERENCES
1. Rozenblit G. B. (1977) *Heat Transfer in Diesel Engines*. Moscow, Mashinostroyeniye. 216 (in Russian).
 2. Abramchuk F. I., Marchenko A. P., Razleitsev N. F., Tretiak E. I., Shekhovtsov A. F., Shokotov N. K. (1992) *Modern Diesel Engines: Improvement of Fuel Efficiency and Long-Term Strength*. Kyiv, Tekhnika. 272 (in Russian).
 3. Dahlén L., Larsson A. (2000) CFD Studies of Combustion and In-Cylinder Soot Trends in a DI Diesel Engine – Comparison to Direct Photography Studies. *SAE Technical Paper* 2000-01-1889. DOI: 10.4271/2000-01-1889.
 4. Epping K., Aceves S., Bechtold R. (2002) The Potential of HCCI Combustion for High Efficiency and Low Emissions. *SAE Technical Paper* 2002-01-1923. DOI: 10.4271/2002-01-1923.
 5. Ranjbar A. A., Sedighi K., Farhadi M. (2009) Computational Study of the Effect of Different Injection Angle on Heavy Duty Diesel Engine. *Thermal Science*, 13 (3), 9–21. DOI: 10.2298/TSCI0903009R.
 6. Abranchuk F. I., Avramenko A. N. (2010) Software Package for Simulation of Intracylinder Process in Internal Combustion Engine. *Dvigateli Vnutrennego Sgoraniia* [Internal Combustion Engines], (2), 7–12 (in Russian).
 7. Efros V. V. (1976) *Diesel Engines with Air Cooling Manufactured at the Vladimirsky Tractor Plant*. Moscow, Mashinostroyeniye. 277 (in Russian).
 8. Magnussen B. F. (1989) *The Eddy Dissipation Concept for Turbulent Combustion Modelling. Its Physical and Practical Implications*. Presented at the First Topic Oriented Technical Meeting, International Flame Research Foundation, Ijmuiden. Norway, Trondheim, Norwegian Institute of Technology, Report N-7034.
 9. Peters N. (2000) *Turbulent Combustion*. Cambridge University Press. 322.
 10. Avramenko A. N. (2009) Evaluation of Economic, Ecological and Strength Indices in High-Speed Diesel Engines. *Vestnik Natsionalnogo Tekhnicheskogo Universiteta "Kharkovskii Politekhnikeskii Institut"* [Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"], (47), 127–132 (in Russian).
- Received: 06.09.2015
Accepted: 20.04.2016
Published online: 26.09.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-427-434

УДК 629.113-592.004.58

Бортовой мониторинг технического состояния силовых агрегатов колесных и гусеничных машин

Доктора техн. наук Ю. Д. Карпиевич¹⁾, А. Г. Баханович¹⁾, инж. И. И. Бондаренко²⁾

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

²⁾Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассмотрены новые методики бортового диагностирования степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления и фрикционных дисков гидropоджимных муфт коробок передач, в основу которых положен физический процесс использования работы трения как интегрального показателя. Разработана новая методика определения степени выработки ресурса моторного масла. Представлены структурные схемы бортового мониторинга технического состояния силовых агрегатов колесных и гусеничных машин. Использование работы трения как интегрального показателя при определении степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления и фрикционных дисков гидropоджимной муфты позволит оперативно, в любой период эксплуатации колесных и гусеничных машин определять их остаточный ресурс, а также прогнозировать время замены. А использование объема израсходованного топлива двигателем при определении степени выработки ресурса моторного масла предоставит возможность оперативно, в любой период эксплуатации машин рассчитать остаточный ресурс моторного масла, а также прогнозировать время его замены.

Ключевые слова: бортовое диагностирование, диск сцепления, фрикционный диск, колесные и гусеничные машины

Для цитирования: Карпиевич, Ю. Д. Бортовой мониторинг технического состояния силовых агрегатов колесных и гусеничных машин / Ю. Д. Карпиевич, А. Г. Баханович, И. И. Бондаренко // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 427–434

On-Board Monitoring of Technical State for Power Units of Wheeled and Tracked Vehicles

Yu. D. Karpievich¹⁾, A. G. Bakhanovich¹⁾, I. I. Bondarenko²⁾

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

²⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers new methodologies pertaining to on-board diagnosis of wear-out rate for friction linings of a clutch driven disk and friction discs of a hydraulic press clutch of transmission gear boxes which are based on physical process that uses friction work as an integrated indicator. A new methodology in determination of life-span rate for engine oil has been developed in the paper. The paper presents block schematic diagrams for on-board monitoring of technical state for power units of wheeled and tracked vehicles. Usage of friction work as an integrated indicator for determination of wear-out rate for friction linings of clutch driven disk and friction discs of a hydraulic press clutch makes it possible timely at any operational period of wheeled and tracked vehicles to determine their residual operation life and forecast their replacement. While taking volume of the used fuel for determination of engine oil life-span rate it permits quickly and effectively at any operational period of wheeled and tracked vehicles to determine residual useful life of the engine oil and also forecast its replacement.

Keywords: on-board diagnosis, clutch disk, friction disc, wheeled and tracked vehicles

For citation: Karpievich Yu. D., Bakhanovich A. G., Bondarenko I. I. (2016) On-Board Monitoring of Technical State for Power Units of Wheeled and Tracked Vehicles. *Science & Technique*. 15 (5), 427–434 (in Russian)

Адрес для переписки

Карпиевич Юрий Дмитриевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-82-05
avto_atf@bntu.by

Address for correspondence

Karpievich Yuriy D.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-82-05
avto_atf@bntu.by

Введение

В условиях рыночных отношений одной из основных задач, стоящих перед промышленностью Республики Беларусь, является повышение технического уровня, надежности и конкурентоспособности колесных и гусеничных машин. Сложившийся в прошлом столетии и получивший наибольшее распространение регламентный характер контрольно-диагностических работ не может обеспечить требуемый уровень технического состояния колесных и гусеничных машин, так как не учитывает индивидуальные особенности каждой машины, условия ее эксплуатации, техническое обслуживание и проведенные ранее ремонтные воздействия [1]. Внешние средства диагностирования также не позволяют своевременно выявлять внезапные отказы, что отрицательно сказывается на безопасности, а в силу планово-предупредительного или эпизодического характера контрольно-диагностических работ недостаточно эффективны при выявлении постепенных отказов.

Именно стремление снять указанные ограничения стимулировало в нашей стране и за рубежом разработку бортовых систем диагностирования колесных и гусеничных машин, которое улучшает качество и повышает надежность их агрегатов и узлов [2]. Идентичность функциональных структур микропроцессорных систем управления и бортового диагностирования позволяет за счет совместного использования общей аппаратуры (датчиков, исполнительных механизмов, микроЭВМ) обеспечить непрерывный контроль системы и объекта управления без использования каких-либо специализированных технических средств и избежать тем самым необоснованного усложнения конструкции колесных и гусеничных машин и разработки дополнительного диагностического оборудования [3].

Необходимость создания подобных систем вызвана тем, что у большинства колесных и гусеничных машин при проведении диагностических работ отмечаются значительные отклонения параметров, характеризующих их техническое состояние до проведения диагностических работ. То есть колесные и гусеничные машины эксплуатируются в ряде случаев при недопустимых или критических режимах, что отрицатель-

но сказывается на работоспособности узлов, безопасности движения, экономических, экологических и других показателях. Часть колесных и гусеничных машин, находящихся в технически исправном состоянии, в соответствии с графиком проведения регламентных работ подвергается преждевременному диагностированию или техническому обслуживанию, т. е. очевидны необоснованные трудовые и материальные затраты.

Таким образом, бортовое диагностирование технического состояния узлов и агрегатов колесных и гусеничных машин, и в частности силовых агрегатов, является весьма актуальной задачей. Оно позволит перейти к техническому обслуживанию колесных и гусеничных машин по фактической необходимости и за счет этого исключить, с одной стороны, возможность эксплуатации неисправных колесных и гусеничных машин, а с другой – необоснованные простои, материальные и трудовые затраты, например при преждевременном техническом обслуживании.

Методика диагностирования

Как известно, силовой агрегат состоит из сцепления, коробки передач и двигателя внутреннего сгорания. Рассмотрим новый метод бортового диагностирования степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления. Структурная схема микропроцессорной системы бортового диагностирования степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления представлена на рис. 1.

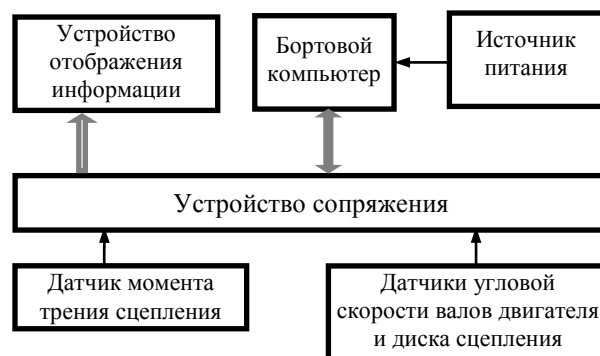


Рис. 1. Структурная схема микропроцессорной системы бортового диагностирования степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления

Fig. 1. Block schematic diagram on microprocessor based system of on-board diagnosis for wear-out rate of friction linings in clutch driven disk

Ядром системы является микроЭВМ, в ПЗУ которой хранится программа диагностирования. Для связи микроЭВМ с объектом диагностирования используется устройство сопряжения, предназначенное для предварительной фильтрации входных информационных сигналов и преобразования их в стандартную для микроЭВМ форму.

Устройство отображения информации служит для индизирования степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления. Источник питания используется для обеспечения функционирования системы бортового диагностирования. Получение необходимой информации для определения степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления может производиться при помощи датчиков момента трения сцепления и угловой скорости валов двигателя и диска сцепления. Предлагаемый метод диагностирования степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления отличается от традиционных, основанных на непосредственном измерении толщины накладок [4].

Процессы трения и износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления носят ярко выраженный нестационарный характер. Это означает, что для оценки надежности и долговечности пар трения недостаточно располагать только отдельными, даже весьма важными показателями, такими как нагрузка на фрикционном контакте и скорость скольжения. Здесь необходимы обобщающие, комплексные показатели, одним из которых является работа трения L [5]:

$$L = \int_0^t M_{\tau} |\omega_d - \omega_c| dt; \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{\sum_{p=1}^n L_p}{L_0} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где L – текущие значения работы трения фрикционных накладок ведомого диска сцепления; ω_d , ω_c – угловая скорость валов двигателя и диска сцепления; t – время трения сцепления; M_{τ} – момент трения сцепления; Δ – степень износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления; $p = 1, 2, \dots, n$; n – количество вклю-

чений и выключений сцепления; L_0 – числовое значение работы трения, соответствующее предельно допустимому износу фрикционных накладок ведомого диска сцепления (определяется экспериментально).

При этом предполагается, что износ фрикционных накладок ведомого диска сцепления линейно зависит от работы трения. Из (2) видно, что степень износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления можно определить после каждого включения.

В процессе работы колесных и гусеничных машин происходит также износ фрикционных дисков гидropоджимных муфт коробок передач. С повышением энергонасыщенности колесных и гусеничных машин и рабочих скоростей тракторных агрегатов интенсифицируются рабочие процессы во фрикционных муфтах, возрастают динамическая нагруженность элементов механических трансмиссий, работа и мощность трения их фрикционных муфт при разгоне тракторных агрегатов и переключении передач. Особенности фрикционных муфт – передача крутящего момента за счет сил трения. Поскольку в период буксования муфты имеет место относительное перемещение фрикционных элементов при наличии сил трения, неизбежен износ рабочих поверхностей муфт. Износ этот тем интенсивнее, чем чаще включается муфта и больше работа трения за одно включение.

Частота включения муфты определяется размерами и микрорельефом поверхности поля, видом выполняемой работы, составом агрегата и квалификацией водителя, поэтому повлиять на уменьшение частоты включения муфты очень трудно. Что же касается численного значения работы трения за одно включение, то его можно регулировать в определенных пределах за счет выбора рационального закона включения или рационального режима работы агрегата в период включения муфты. Работа трения муфты за одно включение, в свою очередь, не остается постоянной. Она зависит от вида сельскохозяйственной операции, состава агрегата, почвенно-дорожного фона, номера включаемой передачи коробки, квалификации тракториста и др.

Рассмотрим новый метод бортового диагностирования степени износа фрикционных дисков гидropоджимных муфт коробок передач.

Структурная схема системы бортового диагностирования степени износа фрикционных дисков гидropоджимных муфт коробок передач представлена на рис. 2.

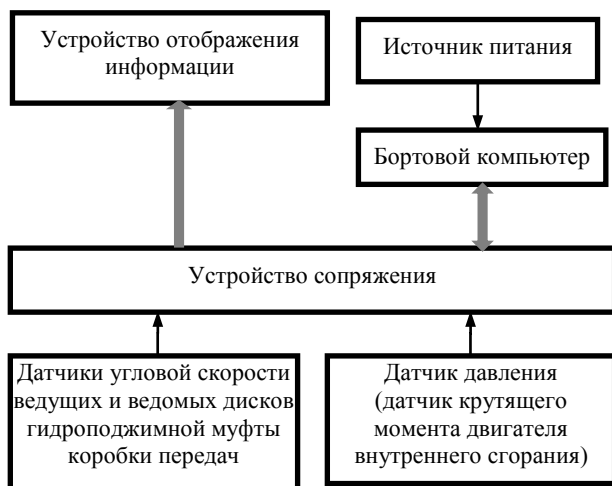


Рис. 2. Структурная схема системы бортового диагностирования степени износа фрикционных дисков гидropоджимных муфт коробок передач

Fig. 2 Block schematic diagram for on-board diagnosis of wear-out rate in friction discs of hydraulic press clutches of transmission gear boxes

Бортовой компьютер, работа которого поддерживается источником питания, постоянно проводит опрос датчиков угловой скорости ведущих и ведомых дисков гидropоджимной муфты коробки передач колесных и гусеничных машин и датчика давления (датчика крутящего момента двигателя внутреннего сгорания), сопоставляет полученные значения с установленными граничными условиями и принимает решение о дальнейшем функционировании системы. Для отображения информации предусмотрено специальное устройство.

Предлагаемый метод диагностирования степени износа фрикционных дисков гидropоджимных муфт коробок передач отличается от традиционных, основанных на непосредственном измерении толщины пакета фрикционных дисков. Процессы трения и износа фрикционных дисков гидropоджимных муфт коробок передач носят ярко выраженный нестационарный характер. Это означает, что для оценки надежности и долговечности пар трения недостаточно располагать только отдельными, даже весьма важными показателями, такими как нагрузка на фрикционном контакте и скорость

скольжения. Здесь необходимы обобщающие, комплексные показатели, одним из которых является работа трения [5].

Измеритель крутящего момента двигателя внутреннего сгорания колесных и гусеничных машин, который показан на рис. 3, содержит гидравлические цилиндры 1, перепускные клапаны 2, обратный клапан 4, шток-поршни 6, рабочее тело в виде жидкости 7, трубопроводы 8, датчик давления 5. Двигатель внутреннего сгорания, входящий в состав устройства прогнозирования степени износа и величины остаточного ресурса фрикционных дисков гидropоджимных муфт коробок передач колесных и гусеничных машин, состоит из блок-картера 3, к которому крепятся рычаги 10. Двигатель внутреннего сгорания установлен на опоре 9 и имеет возможность поворачиваться на некоторый угол относительно коробки передач, неподвижно закрепленной на раме.

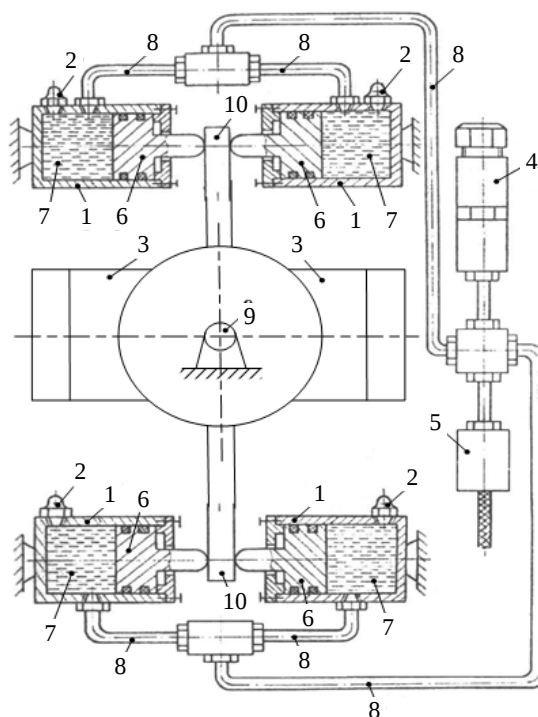


Рис. 3. Измеритель крутящего момента двигателя внутреннего сгорания

Fig. 3. Torque-measuring device of internal combustion engine

Измеритель крутящего момента включается во время запуска двигателя внутреннего сгорания и работает от бортовой электросети колесной или гусеничной машины. В процессе рабо-

ты двигателя внутреннего сгорания колесных и гусеничных машин бортовой компьютер постоянно считывает и запоминает значения информационных сигналов от измерителя крутящего момента двигателя внутреннего сгорания, в котором имеется датчик давления, и значения информационных сигналов от датчиков угловой скорости ведущих и ведомых дисков гидроподжимной муфты коробки передач. При включенной передаче крутящий момент передается трансмиссии, а двигатель внутреннего сгорания стремится повернуться на некоторый угол относительно коробки передач, неподвижно закрепленной на раме.

Рычаги выполнены за одно целое с блок-картером двигателя внутреннего сгорания и передают усилия на шток-поршни двух гидроцилиндров. Крутящий момент двигателя внутреннего сгорания измеряется путем регистрации реактивного момента, воздействующего на блок-картер. Реактивный момент, возникающий на блок-картере двигателя внутреннего сгорания, через рычаги воспринимается двумя гидравлическими цилиндрами, закрепленными неподвижно относительно рамы колесных и гусеничных машин и гидравлически связанных между собой датчиком давления. В замкнутой гидравлической системе возникает избыточное давление, пропорциональное крутящему моменту двигателя внутреннего сгорания. Избыточное давление рабочего тела в виде жидкости с помощью датчика давления преобразуется в информационный сигнал.

Значения информационных сигналов от измерителя крутящего момента двигателя внутреннего сгорания, в котором установлен датчик давления, а также значения информационных сигналов от датчиков угловой скорости ведущих и ведомых дисков гидроподжимной муфты коробки передач колесных и гусеничных машин поступают в бортовой компьютер. После этого бортовой компьютер определяет работу трения фрикционных дисков каждой гидроподжимной муфты путем интегрирования по времени произведения значений информационных сигналов от измерителя крутящего момента двигателя внутреннего сгорания на разность значений информационных сигналов от датчиков угловой скорости ведущих и ведомых дис-

ков гидроподжимной муфты коробки передач, взятых по модулю [6].

В случае полного включения гидроподжимной муфты разность значений информационных сигналов от датчиков угловой скорости ведущих и ведомых дисков гидроподжимной муфты коробки передач, взятых по модулю, равна нулю. Тогда работа трения фрикционных дисков гидроподжимной муфты отсутствует [7].

Значения работы трения фрикционных дисков для каждой гидроподжимной муфты и после каждого включения и выключения муфты прибавляются к сумме, полученной при предыдущих включениях и выключениях муфты. Общая сумма значений работы трения фрикционных дисков гидроподжимной муфты делится на заданное числовое значение работы трения фрикционных дисков гидроподжимной муфты, соответствующее предельно допустимому износу фрикционных дисков гидроподжимной муфты. Затем это соотношение умножается на 100 % и определяется процент износа фрикционных дисков каждой гидроподжимной муфты колесных и гусеничных машин. Все это можно записать следующим образом:

$$L = \int_0^t M_{\tau} |(\omega_g - \omega_k)| dt; \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{\sum_{p=1}^n L_p}{L_0} \cdot 100 \%,$$

где L – текущие значения работы трения фрикционных дисков гидроподжимной муфты; ω_g , ω_k – угловая скорость ведущих и ведомых дисков гидроподжимной муфты коробки передач соответственно; t – время трения фрикционных дисков гидроподжимной муфты; M_{τ} – крутящий момент двигателя внутреннего сгорания; Δ – степень износа фрикционных дисков гидроподжимной муфты; $p = 1, 2, \dots, n$; n – количество включений и выключений муфты; L_0 – числовое значение работы трения, соответствующее предельно допустимому износу фрикционных дисков гидроподжимной муфты (определяется экспериментально).

Основными в эксплуатации колесных и гусеничных машин считаются затраты на топли-

во, смазочные материалы и их ремонт. В процессе эксплуатации двигателей внутреннего сгорания масло подвергается количественным и качественным изменениям. Количественные изменения происходят при испарении легких масляных фракций, сгорании масла (так называемый угар), частичном вытекании через уплотнительные устройства. Качественные изменения обусловлены старением масла и химическими превращениями его компонентов, попаданием в масло пыли, продуктов изнашивания деталей, воды и несгоревшего топлива. Уменьшение количества и ухудшение качества работающего масла в условиях высокой интенсивности подобных процессов в современных высокофорсированных двигателях может в итоге привести к их отказу.

В картере работающего двигателя образуется сложная смесь исходного масла и продуктов его сгорания, от которых полностью очистить масло фильтрацией не удастся, вследствие чего количество углеродистых частиц в нем повышается. Выделяют две основные группы примесей, загрязняющих масло: органические (попадающие в масло из камеры сгорания продукты неполного сгорания топлива, соединения серы и свинца, продукты термического разложения, окисления и полимеризации масла) и неорганические (частицы пыли и продуктов износа деталей, продукты срабатывания зольных присадок в маслах, оставшиеся в двигателе после его изготовления технологические загрязнения). Свежее масло также содержит загрязняющие примеси, поступающие извне при его изготовлении, транспортировании, хранении и заправке.

На интенсивность процесса загрязнения масла, происходящего в работающем двигателе, влияют прежде всего вид и свойства топлива, качество моторного масла, тип, конструкция, техническое состояние, режим работы и условия эксплуатации двигателя и многие другие факторы. Так, при снижении полноты сгорания топлива и величины прорыва газов в картер масло загрязняется в основном органическими примесями. Образование в масле загрязняющих примесей может приостановиться в результате долива свежего масла, выпадения загрязняющих частиц в осадок, удержания их фильтрами.

Качество масел ухудшается в результате накопления в них продуктов неполного сгорания топлива, что обусловлено техническим состоянием двигателя. Это приводит к снижению вязкости, ухудшению смазывающей способности, нарушениям режима жидкого трения. В продуктах сгорания имеется большое количество коррозионно-активных окислов. Вследствие этого ускоряется образование продуктов окисления, находящихся в масле как в растворенном, так и во взвешенном состоянии. На изменение свойств масел существенное влияние оказывают температурный режим и техническое состояние двигателя.

Скорость окисления и загрязнения значительно выше при работе масел в изношенных двигателях, когда увеличен прорыв газов в картер и повышена температура двигателей, а также при работе двигателя с перегрузкой или в неустановившемся режиме. Скорость срабатывания введенных в масло присадок зависит от теплового режима деталей двигателя, его технического состояния, условий эксплуатации, качества используемого топлива. Срабатывание присадок приводит к изменению многих показателей качества масла: снижению щелочного числа, ухудшению моющих свойств, повышению коррозионности и т. д.

Таким образом, при работе двигателя в масле происходят значительные изменения: накапливаются продукты превращения углеводородов масла, загрязнения, попавшие с воздухом и топливом, увеличивается количество агрессивных соединений. Срок службы моторных масел до замены определяется не только пробегом автомобиля или наработкой трактора, но и временем, в течение которого совершена эта работа. При коротких суточных и малом годовом пробеге автомобиля ускоряются коррозионные процессы, старение масла, ухудшаются его защитные свойства. Поэтому в любом случае необходима замена масла не реже одного раза в год. Для установления сроков службы масла в двигателях применяют так называемые браковочные показатели, при достижении которых масло следует заменить. Браковочными показателями служат изменение вязкости, температуры вспышки, щелочности, содержание загрязняющих примесей, воды и топлива, значение диспергирующих свойств и др. Но опре-

деление браковочных показателей требует специального дорогостоящего лабораторного оборудования.

Рассмотрим новый метод бортового мониторинга выработки ресурса моторного масла. Структурная схема системы бортового мониторинга выработки ресурса моторного масла представлена на рис. 4.

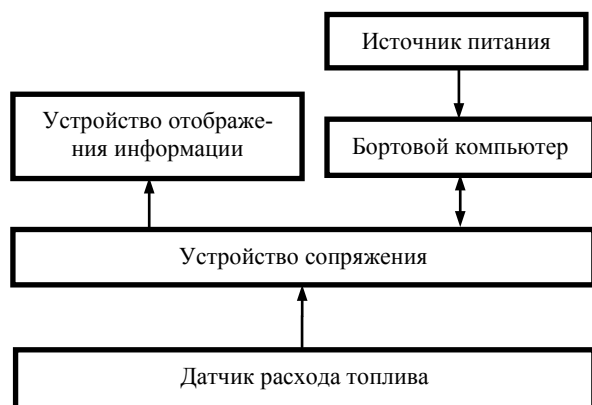


Рис. 4. Структурная схема системы бортового мониторинга выработки ресурса моторного масла

Fig. 4. Block schematic diagram for on-board monitoring of engine oil life-span rate

Предлагаемый метод бортового мониторинга выработки ресурса моторного масла отличается от традиционного, основанного на моточасах работы двигателя [8, 9]. Степень выработки ресурса моторного масла определяется по следующей формуле:

$$\Delta = \frac{\sum_{p=1}^n V_p}{V_0} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где V – объем израсходованного топлива за цикл «запуск – работа – остановка двигателя»; $p = 1, 2, \dots, n$; n – количество циклов; V_0 – объем израсходованного топлива, соответствующий предельной выработке ресурса моторного масла.

Объем израсходованного топлива, соответствующий предельной выработке ресурса моторного масла, можно рассчитать

$$V_0 = \frac{G_t t}{\rho}, \quad (5)$$

где G_t – часовой расход топлива; t – периодичность замены масла в моточасах работы двигателя,

установленная заводом-изготовителем; ρ – плотность топлива.

Часовой расход топлива определяется по формуле

$$G_t = \frac{g_e N_e}{10^3}, \quad (6)$$

где g_e – эффективный удельный расход топлива; N_e – эффективная мощность.

Величина эффективного удельного расхода топлива и эффективная мощность оговариваются в техническом паспорте двигателя. Из (4) видно, что степень выработки ресурса моторного масла можно определить после каждой остановки двигателя.

ВЫВОДЫ

1. Использование работы трения как интегрального показателя при определении степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления и фрикционных дисков гидроподжимной муфты позволит оперативно, в любой период эксплуатации колесных и гусеничных машин определять их остаточный ресурс, а также прогнозировать время замены.

2. Использование объема израсходованного топлива двигателем при определении степени выработки ресурса моторного масла предоставит возможность оперативно, в любой период эксплуатации машин рассчитать остаточный ресурс моторного масла, а также прогнозировать время его замены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устройство прогнозирования степени износа и величины остаточного ресурса тормозных накладок каждого колеса транспортных и тяговых машин: пат. 9122 Респ. Беларусь: МПК В60 Т17/22, G01M17/00 / Ю. Д. Карпиевич, В. Е. Тарасенко, Н. Н. Романюк; дата публ.: 03.01.2013.
2. Опанович, В. А. Технология диагностирования машин / В. А. Опанович, Ю. Д. Карпиевич // Наука и техника. 2012. № 2. С. 45–52.
3. Лукин, П. П. Конструирование и расчет автомобиля / П. П. Лукин, Г. А. Гаспарянц, В. Ф. Родионов. М.: Машиностроение, 1984. 376 с.
4. Работа трения как интегральный показатель степени износа фрикционных накладок ведомого диска сцепления колесных и гусеничных машин / Ю. Д. Карпиевич [и др.] // Перспективные технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве: мате-

- риалы Междунар. науч.-практ. конф. Минск: БГАТУ, 2013. Ч. 2. С. 125–128.
5. Сцепления транспортных и тяговых машин / И. Б. Барский [и др.]; под ред. Ф. Р. Геккера [и др.]. М.: Машиностроение, 1989. 344 с.
 6. Карпиевич, Ю. Д. Работа трения как интегральный показатель степени износа фрикционных дисков гидropоджимных муфт коробок передач / Ю. Д. Карпиевич, В. Б. Ловкис, И. И. Бондаренко // Наука и техника. 2014. № 2. С. 32–35.
 7. Метод диагностирования степени износа фрикционных дисков гидropоджимных муфт коробок передач колесных и гусеничных машин / Ю. Д. Карпиевич [и др.] // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. ведущим ученым БГАТУ, создателям науч. школы по автотракторостроению Д. А. Чудакову и В. А. Скотникову. Минск: БГАТУ, 2013. С. 66–70.
 8. Способ определения времени работы двигателя внутреннего сгорания и устройство для его осуществления: пат. ЕА 012556 В1: МПК G01M 15/05, G07C 5/00, G07C 5/10 / А. Р. Каплунский; дата публ.: 30.10.2009.
 9. Мальцев, Н. Г. Современные методы контроля расхода топлива и их применение для мониторинга режимов работы автотракторной техники / Н. Г. Мальцев, Ю. Д. Карпиевич // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. ведущим ученым БГАТУ, создателям науч. школы по автотракторостроению Д. А. Чудакову и В. А. Скотникову. Минск: БГАТУ, 2013. С. 35–39.
- Поступила 16.02.2016
Подписана в печать 19.04.2016
Опубликована онлайн 26.09.2016
- ### REFERENCES
1. Karpievich Yu. D., Tarasenko V. E., Romaniuk N. N. (2013) Device for Forecasting Wear-Out Rate and Life Residual Value of Brake Pads in Every Wheel of Transport and Traction Machines. Patent of the Republic of Belarus No 9122. (in Russian).
 2. Opanovich V. A., Karpievich Yu. D. (2012) Technology of Vehicle Diagnosis. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], (2), 45–52. (in Russian)
 3. Lukin P. P., Gasparyants G. A., Rodionov V. F. (1984) *Vehicle Designing and Calculation*. Moscow, Mashinostroyeniye. 376 (in Russian).
 4. Karpievich Yu. D., Zhukovskii Iu. M., Zakharov A. V., Maltsev N. G. (2013) Friction as an Integral Indicator of Wear-Out Rate for Friction Pads of Clutch Driven Disk of Wheeled and Tracked Vehicles. *Perspektivnye Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva v Selskokhoziaistvennom Proizvodstve: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Prospective Technologies and Technical Facilities in Agricultural Industry. Proceedings of International Scientific and Practical Conference. Part 2.] Minsk: Belarusian State Agrarian Technical University, 125–128 (in Russian).
 5. Barskii I. B., Borisov S. G., Galiagin V. A., Gekker F. R. [ed.], Kolodii Iu. K., Nikiforov G. S., Fedorov A. I., Sharipov V. M., Sherenkov G. M., Eglit I. M. (1989) *Clutches of Transport and Traction Machines*. Moscow, Mashinostroyeniye. 344 (in Russian).
 6. Karpievich Yu. D., Lovkis V. B., Bondarenko I. I. (2014) Frictional Work as Integral Indicator of Wear-Out Rate for Friction Discs of Gear Box Hydrocompressing Clutches. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], 2, 32–35 (in Russian).
 7. Karpievich Iu. D., Zhukovskii Iu. M., Bondarenko I. I., Maltsev N. G. (2013) Method for Wear-Out Rate Diagnostics of Friction Discs in Hydraulic Press Clutches of Gear Boxes Applied in Wheeled and Tracked Vehicles. *Nauchno-Tekhnicheskii Progress v Selskokhoziaistvennom Proizvodstve: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Posviashch. Vedushchim Uchenym BGATU, Sozdateliyam Nauch. Shk. po Avtotraktorostroeniiu D. A. Chudakovu i V. A. Skotnikovu* [Scientific and Technical Progress in Agricultural Industry. Proceedings of International Scientific and Practical Conference Dedicated to D. A. Tchudakov and V. A. Skotnikov, Leading Scientists of the Belarusian State Agrarian Technical University and Founders of Scientific School on Vehicle and Tractor Construction]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 66–70 (in Russian).
 8. Kaplunskii A. R. (2009) Method for Determination of Operational Longevity Pertaining to Internal Combustion Engine and Device for the Given Method. Patent EA 012556 B1. (in Russian).
 9. Maltsev N. G., Karpievich Yu. D. (2013) Modern Methods for Fuel Consumption Control and their Application for Monitoring of Operational Modes in Automotive Engineering. *Nauchno-Tekhnicheskii Progress v Selskokhoziaistvennom Proizvodstve: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Posviashch. Vedushchim Uchenym BGATU, Sozdateliyam Nauch. Shk. po Avtotraktorostroeniiu D. A. Chudakovu i V. A. Skotnikovu* [Scientific and Technical Progress in Agricultural Industry. Proceedings of International Scientific and Practical Conference Dedicated to D. A. Tchudakov and V. A. Skotnikov, Leading Scientists of the Belarusian State Agrarian Technical University and Founders of Scientific School on Vehicle and Tractor Construction]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 35–39 (in Russian).
- Received: 16.02.2016
Accepted: 19.04.2016
Published online: 26.09.2016

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-435-441

УДК 691.9.048.4

Как «научить» сплавы магния противостоять эксплуатационным рискам

Докт. техн. наук Н. М. Чигринова¹⁾, магистрант Е. И. Воробьева¹⁾, В. Е. Чигринов¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Изучены закономерности и механизмы структуро- и фазообразования в поверхностных слоях магниевых сплавов при их обработке методом микродугового оксидирования. Определено, что для всех видов покрытий на поверхности магниевых и алюминиевых сплавов характерны одинаковые особенности структурообразования: наличие тонкого плотного внутреннего подслоя и более толстого с развитой пористостью наружного. Такое структурное состояние защитного покрытия не является гарантированной защитой объектов от эксплуатационных воздействий, учитывая области их преимущественного использования – авиа-, автомобиле-, приборостроение, строительство и т. п. Проанализировано влияние щелочных электролитов с изменяющимся химическим составом за счет добавок фторидов натрия или калия на структуру и свойства указанных сплавов, а также на уровень основных эксплуатационных характеристик слоев, формируемых в таких электролитах. На основании этого сделан вывод о возможности продления их ресурса в эксплуатационных условиях. Выявлено, что существующие приемы и способы управления процессом микродугового оксидирования алюминиевых и магниевых сплавов, в частности режимы обработки и мощность технологического оборудования, определяют характер структурообразования и изменение фазового состава формируемых покрытий.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, структурообразование, электролит, фториды

Для цитирования: Чигринова, Н. М. Как «научить» сплавы магния противостоять эксплуатационным рискам / Н. М. Чигринова, Е. И. Воробьева, В. Е. Чигринов // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 435–441

How to Make Magnesium Alloys Be Resistant to Operational Risks

N. M. Chigrinova¹⁾, E. I. Vorobiova¹⁾, V. E. Chigrinov¹⁾

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

Abstract. The paper studies regularities and mechanisms of structure and phase formation in the surface layers of magnesium alloys when they are processed by method of micro-arc oxidation [MAO]. It has been determined that the same specific features of structure formation, namely: existence of a thin dense inner sublayer and a thicker outer sublayer with developed porosity are common for all types of coatings on the surface of magnesium and aluminum alloys. Such structural state of a protective coating can not be considered as a guaranteed protection against operational impacts, taking into account the fields of their primary application that is aviation construction, automotive construction, instrumentation, building construction, etc. The paper has analyzed the effect of alkaline electrolytes with varying chemical composition due to additions of sodium fluoride or potassium on the structure and properties of these alloys as well as on the level of basic performance characteristics of the layers formed in such electrolytes. On the basis of the analysis a conclusion has been made that it is possible to extend their life-span under operational conditions. It has been revealed that the existing techniques and methods for process control of MAO aluminum and magnesium alloys, particularly processing modes and technological equipment capacity determine a nature of structure formation and changes in a phase composition of the formed coatings.

Keywords: micro-arc oxidation, structure formation, electrolyte, fluorides

For citation: Chigrinova N. M., Vorobiova E. I., Chigrinov V. E. (2016) How to Make Magnesium Alloys Be Resistant to Operational Risks. *Science & Technique*. 15 (5), 435–441 (in Russian)

Адрес для переписки

Чигринова Наталья Михайловна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-81
tiro@bntu.by

Address for correspondence

Chigrinova Natalija M.
Belarusian National Technical University
67 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-81
tiro@bntu.by

Введение

Среди металлов и сплавов, находящихся широкое применение в авиа-, машино-, приборостроении, оптике и медицине, следует отметить класс вентильных металлов (это сплавы алюминия, титана, тантала, циркония, ниобия, магния), поскольку обработка их поверхности различными методами, приводящая к созданию на поверхности функциональных покрытий, позволяет настолько изменить их структурное состояние и свойства, что очевидной становится возможность улучшения их «поведения» в эксплуатационных условиях. Серьезное внимание в этой связи следует уделять магнию и его сплавам, имеющим весьма привлекательный набор физико-механических характеристик:

- малую плотность ($1,35\text{--}1,85\text{ г/см}^3$), что в 1,5–2 раза меньше, чем у алюминиевых сплавов, в 4–5 раз меньше, чем у сталей, и не превышает плотности наиболее часто используемых сегодня высокопрочных конструкционных пластмасс;

- высокие механические, конструкционные и служебные свойства в интервале температур от минус 273 до плюс 350 °С, прежде всего высокие показатели удельной прочности;

- превосходное свойство электромагнитного экранирования;

- исключительную способность поглощать энергию удара и вибрационные колебания, высокие демпфирующие свойства (по данному показателю превосходство перед алюминиевыми сплавами в 100 раз);

- высокий предел ползучести, хорошую свариваемость, высокие ударную вязкость и пригодность к переработке для вторичного использования, также хорошую тепловую и электрическую проводимость;

- хорошие технологические свойства при обработке резанием, литье (прежде всего, при литье под высоким давлением на машинах с холодной и горячей камерами прессования) и горячей обработке давлением;

- отсутствие эффекта «старения» (охрупчивания) в отличие от конструкционных пластмасс, которые магниевые сплавы могут адекватно заменить, обеспечив при этом ряд эксплуатационных и технологических преимуществ.

Однако практически все вентильные металлы имеют и ряд недостатков, ограничивающих их использование в аэрокосмической от-

расли, приборостроении, автомобильной, медицинской и других отраслях промышленности. Так, алюминиевые и магниевые сплавы обладают относительно невысокой износостойкостью, особенно при неблагоприятных условиях окружающей среды, а также низкой коррозионной стойкостью в водных растворах многих солей и кислот. В связи с этим для обеспечения надежной эксплуатации объектов из таких материалов на их критические поверхности, подвергающиеся серьезным эксплуатационным рискам, наносятся защитные покрытия, способные повысить уровень перечисленных характеристик.

Метод и технология нанесения покрытий

Одним из перспективных направлений в технологиях нанесения покрытий с набором таких свойств, как повышенные износо-, коррозионно-, термостойкости, является микродуговое оксидирование (МДО). Особенность этого метода состоит в пропускании через электролит, в который погружен металлический объект, высоких анодных токов, при которых на поверхности оксидируемого металла возникают локальные микроплазменные разряды, приводящие к растворению его поверхности и активному взаимодействию с кислородом с образованием оксидных слоев. Температура в этих разрядах достигает 7000–10000 °С, что вызывает оплавление созданных оксидных покрытий, наделяя их уникальными физико-химическими свойствами. Так, оксидный слой, несмотря на относительно большую пористость, тем не менее эффективно защищает оксидируемый металл от коррозии вследствие того, что именно в порах происходит наиболее интенсивный рост оксидов. Указанные слои могут создаваться в различных типах электролитов, чьи компоненты растворяют основной металл (кислые и щелочные электролиты), пассивируют его (фосфатные и полимерные электролиты) или взаимодействуют с ним более сложными и менее понятными способами (фторидные электролиты).

Поскольку у алюминиевых и магниевых сплавов зарегистрировано существенное улучшение устойчивости к коррозии в результате МДО по сравнению с чистыми металлами, поведение этих сплавов при их оксидировании в различных электролитах представляет немалый интерес для исследователей, о чем свидетельствует огромное число публикаций. Так,

в [1–7] показано, что добавление ионов фторида к щелочному электролиту для МДО алюминиевых и магниевых сплавов вызывает существенные изменения в структуре и свойствах покрытия. Однако механизм этих изменений еще полностью не изучен.

Установлено, что добавление фторидов к щелочным электролитам значительно улучшает технологические показатели покрытий на магниевых сплавах [1]. Фторид магния более слабый диэлектрик с относительной диэлектрической постоянной $\epsilon_0 = 4\text{--}5$ Ф/м в зависимости от кристаллографической оси, чем фторид алюминия, относительная диэлектрическая постоянная которого $\epsilon_0 = 2,2$ Ф/м. Поэтому для разложения фторидов алюминия требуется больше энергии. При МДО магниевых сплавов добавление фторидов благоприятствует образованию диэлектрического слоя фторида магния, в котором затем происходят пробои, вызывающие плазменные разряды. Фактически это означает, что фторид служит катализатором процесса МДО для магниевых сплавов. Добавление фторида калия KF в электролиты на основе $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{--KOH}$ приводит к уменьшению диаметра пор и поверхностной шероховатости, увеличению их плотности, поверхностной твердости и износостойкости [2]. Фактически фторид калия становится стандартным компонентом различных электролитов для производства покрытия на магнии и его сплавах.

Морфология покрытий МДО, характерная для магниевых [8] и алюминиевых [1] сплавов, иллюстрирующая наличие «вулканических», хаотично распределенных пор, представлена на рис. 1.

Анализ приведенных снимков позволил заключить, что характер и размеры пор, их плотность определяются видом оксидуемого материала. Так, в выбранном для изучения типичном фрагменте оксидного слоя на поверхности магниевого сплава AZ9110D зафиксирована достаточно равномерная пористость малых размеров (1–3 мкм) в отличие от покрытия на алюминиевом сплаве A5052, где наблюдаются отдельно расположенные поры больших размеров (≥ 8 мкм), а поры малых размеров (1,0–2,5 мкм) в большом количестве сосредоточены на небольших участках покрытия. Средние показатели пористости слоя на магниевом сплаве составляют 17 %, а в слое на алюминиевом – 31 %.

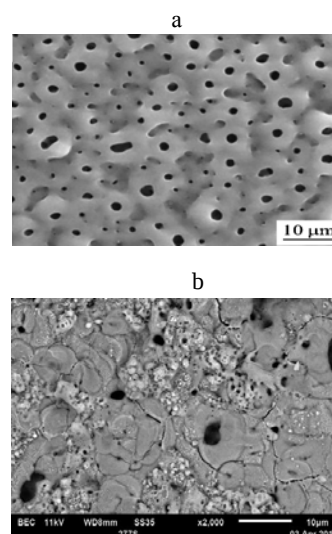


Рис. 1. Типовая морфология покрытия микродуговой оксидацией на сплаве: а – магниевом AZ9110D; б – алюминиевом A5052

Fig. 1. Typical morphology of micro-arc oxidation coating using alloy: a – magnesium AZ9110D; b – aluminum A5052

Однако надо отметить, что вследствие меньшей равномерности распределения пористости по всей площади покрытия, а не на единичном фрагменте, общее количество пор, выходящих на поверхность покрытия алюминиевого сплава, заметно меньше в сравнении с покрытием на магниевом сплаве (рис. 2).

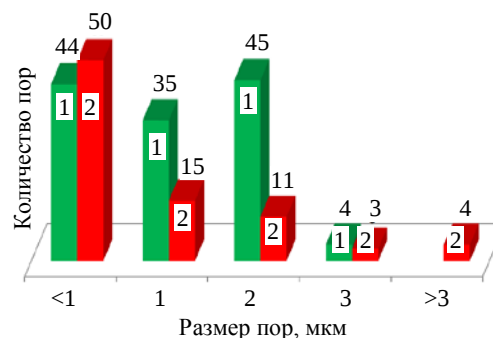


Рис. 2. Показатели пористости покрытий на поверхностях сплавов: 1 – магниевый AZ91; 2 – алюминиевый A5052

Fig. 2. Indicators of coating porosity on surfaces of alloys:

1 – magnesium AZ91; 2 – aluminum A5052

Элементный состав покрытий, полученных в электролите, содержащем 0,08 моль/л KOH, 0,08 моль/л Na_2SiO_3 , 0,2 моль/л KF в одинаковых условиях на поверхностях магниевых и алюминиевых сплавов, приведен в табл. 1 [1].

Элементный состав покрытий

Elemental composition of coatings

Точка	Магнийевый сплав AZ91	Точка	Алюминиевый сплав A5052
1	Mg 82 at%, Al 8 at%, O 9 at%, Si 1 at%	1	Al 94 at%, Mg 2 at%, O 4 at%
2	Mg 67 at%, Al 13 at%, O 17 at%, Si 3 at%	2	Al 61 at%, Mg 3.5 at%, O 34 at%, Si 1.5 at%
3	Mg 60 at%, Al 9 at%, O 27 at%, Si 4 at%	3	Al 70 at%, Mg 2.5 at%, O 15 at%, Si 9.5 at%, K 3 at%

Из табл. 1 видно, что металлическая составляющая, определяющая состав основного металла в сформированных покрытиях, на поверхности алюминия выше, чем после МДО магниевого сплава. Однако в покрытиях на поверхности магниевого сплава в большем количестве присутствует кремний, что позволяет надеяться на его более высокую износостойкость при эксплуатации.

Микроструктура и сечение покрытий, полученных на поверхности магниевого AZ9110D и алюминиевого A5052 сплавов в электролите, содержащем 0,08 моль/л KOH, 0,08 моль/л Na_2SiO_3 , 0,2 моль/л KF, после 15 мин оксидирования, приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3 и табл. 1, оксидный слой на магнелии не только более толстый, но и более однородный, чем на алюминии. В котором между основным металлом и оксидным слоем образуются пустоты, содержащие относительно большое количество кислорода. Заслуживает внимания, что процентное содержание кислорода меньше, чем ожидаемое, согласно стехиометрии оксидов магния и алюминия ($\text{Mg}:\text{O} = 1:1$ и $\text{Al}:\text{O} = 2:3$) [1]. Из этого можно заключить, что оксидный слой состоит не только из оксидов основных, но и оксидов примесных металлов. Данные выводы

подтверждаются элементным составом покрытий, приведенным в табл. 1.

Многие исследователи отмечают, что структура оксидных слоев, создаваемых на поверхности магнелиевых сплавов, изменяется с введением в электролит добавок фторидов и состоит из двух различающихся подслоев [1, 3, 4]. При неизменной общей толщине слоя его внутренний подслой имеет толщину не более 2–3 мкм и содержит приблизительно 70 % Mg, 25 % O и 5 % Al, а внешний подслой толщиной 15–18 мкм является пористым с пустотами и содержит 50–60 % O, 35–40 % Mg, 10 % Si и 2–4 % Al. Этот факт может быть связан с наличием большого количества в покрытии свободного кремния, препятствующего формированию оксидов магния.

В [1] отмечается, что по мере возрастания содержания KF в электролите структура слоев не изменяется, но в покрытии обнаруживается существенное количество фтора. Максимальное количество фторида обнаруживается в самой глубинной части внешнего подслоя. Поверхность оксидного слоя на поверхности магнелиевого сплава состоит из MgO (77 %) и Mg (23 %). Более глубокие слои покрытия демонстрируют увеличение Mg за счет MgO. Другие фазы, содержащие фтор, с уверенностью не определены.

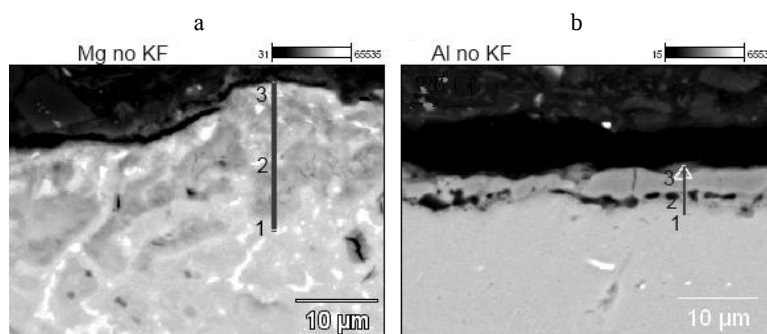


Рис. 3. Изображения сканирующего электронного микроскопа ($\times 3000$) при линейном сканировании ЭДС поперечного сечения покрытий, выполненных микродуговым оксидированием на магниевом AZ9110D (a) и алюминиевом A5052 (b) сплавах после 15 мин оксидирования [1]

Fig. 3. SEM images ($\times 3000$) with EDS linear scans of cross-sectioned PEO coatings deposited with the help of micro-arc oxidation on (a) magnesium AZ9110D and (b) aluminum A5052 alloys after 15-minute oxidation [1]

Добавление KF к электролитам вносит коррективы и в динамику нарастания оксидного слоя. В то время как для более низких концентраций KF (<0,05 моль/л) характерно образование только очень тонкого и пористого слоя покрытия, более высокое содержание KF приводит к образованию оксидного слоя 5–10 мкм в течение одного и того же временного промежутка.

Следует отметить, что при проведении МДО магния и алюминия в одинаковых условиях более интенсивный процесс образования и роста покрытий наблюдается на поверхности магниевых сплавов. Если для всех изученных сплавов магния после 15 мин МДО в одном и том же электролите были получены покрытия толщиной 20 мкм, то на алюминиевых сплавах толщина покрытия не превышала 5–10 мкм.

Известно [9, 10], что процессы МДО осуществляются обычно в анодном гальваностатическом режиме при эффективной плотности анодного тока 0,4–0,5 А/см². Оксидирование при плотности анодного тока меньше заявляемого приводит к формированию тонких, с нарушенной сплошностью пленок, практически состоящих только из оксида магния MgO и не обеспечивающих требуемой антикоррозионной защиты. Оксидирование при плотности анодного тока, выше заявляемых значений, приводит к сильному разогреву электролита и газообразованию, обуславливающему появление дефектов в формируемом покрытии, образование наростов и пятен на его поверхности. При этом выделяющиеся газы могут привести к «подрыву» и отслоению покрытия, что также отрицательно сказывается на его антикоррозионных свойствах. Разогрев электролита, в свою очередь, провоцирует более активный рост толщины керамических слоев одновременно с ухудшением качества (повышенная пористость, неравнотолщинность, увеличенная шероховатость).

Как же «научить» магниевые сплавы противостоять эксплуатационным рискам?

Анализ существующих публикаций показал следующее. Авторы [3] предлагают вести оксидирование при температуре 10–21 °C на переменном симметричном токе, который самопроизвольно переходит в асимметричный. Минимальная продолжительность оксидирования равна времени, при котором отношение величин амплитудных значений анодного напряжения к катодному находится в соотношении 1:4 или 1:6. Кроме того, погружение изделия в

электролит производят постепенно по частям или одновременно полным его погружением в зависимости от мощности установки для проведения микроплазменного оксидирования при жестком контроле концентрации фторидов. Такой процесс весьма трудоемок и нестабилен вследствие необходимости жестко контролировать последовательность действий и температуру электролита.

Авторами [4] предложена и опробована двухстадийная МДО – обработка, при которой образцы сначала в течение 54 мин оксидировали в электролите, содержащем 2 г/л гидроксида калия и 3 мл/л жидкого стекла, а затем в течение 40 мин – в электролите, содержащем 4 г/л гидроксида калия и 6 мл/л жидкого стекла. Основываясь на анализе экспериментальных данных, наблюдали, что сначала на обрабатываемой поверхности магниевых сплавов формируется плотная (малопористая) структура, а затем в более концентрированном электролите активно нарастает толщина покрытия, что позволяет эффективно повысить его коррозионно-защитную способность. Однако такая двухстадийная обработка достаточно продолжительная и энергоемкая.

Менее энергоемкий способ нанесения покрытия на магниевые сплавы предлагают авторы [5]. Процесс осуществляется в течение 8–20 мин в растворе электролита, содержащем 12–30 г/л силиката натрия и 5–10 г/л фторид натрия, в котором электрохимическая обработка происходит на переменном токе с плотностью 0,5–1,0 А/см² при увеличении напряжения от 0 до 250–300 В со скоростью 0,25–0,28 В/с и с соотношением периодов анодной и катодной поляризации $\tau_a/\tau_k = 1$. Однако в таких условиях не удастся получить равномерное по толщине и пористости покрытие на деталях сложной конфигурации. При этом адгезия покрытия к основе ухудшается, снижаются его антикоррозионные свойства. В [6] отмечено, что при воздействии огнем такое покрытие на магниевом сплаве не обеспечивает защиту от воспламенения.

Некоторые авторы утверждают, что получение защитных оксидных покрытий методом МДО с введением фторида позволяет увеличить производительность процесса более чем в 5,5 раза, снизить энергоемкость процесса в 9 раз и гарантировать при этом высокие антикоррозионные свойства. Длительность защитного действия таких покрытий может быть дополнительно увеличена после их обработки в растворе каучука и синтетических смол (табл. 2).

**Параметры процесса микродугового оксидирования
и характеристики получаемых покрытий [3]**
Parameters of micro-arc oxidation process and characteristics of obtained coatings [3]

Состав электролита, г/л	h, мкм	Работо- способность электролита, мес.	Коррозионная стойкость		W/hS, Вт·ч/(мкм·дм²)
			1, 10 ч	2, 144 ч	
2 NaOH, 4 Na ₆ P ₆ O ₁₈ , 3 NH ₄ F	51	Более 6	Без видимых следов коррозии	Точечная коррозия	68
2 NaOH, 4 Na ₆ P ₆ O ₁₈ , 10 NH ₄ F	53	Более 6			65
4 NaOH, 10 Na ₂ SiO ₃ , 0.5 NH ₄ F	11	5,5			148
4 NaOH, 10 Na ₂ SiO ₃ , 3 NH ₄ F	19	5,5			127
53 KOH, 55 KF, 140 Na ₃ PO ₄	2	Менее 2	Интенсивное коррозионное разрушение с выделением водорода		1297
53 KOH, 55 KF, 140 Na ₃ PO ₄ , 98 NaAlO ₂	0,8	Менее 2			1217

Таким образом, проведенный анализ способов получения защитных покрытий методом микродугового оксидирования в щелочных электролитах с изменяющимся химическим составом за счет добавок фторидов натрия или калия с анализом уровня основных эксплуатационных характеристик слоев, формируемых в таких электролитах, показал, что для всех видов покрытий на поверхности магниевых и алюминиевых сплавов характерны одинаковые особенности структурообразования: наличие тонкого (не более 1–2 мкм) плотного внутреннего подслоя и более толстого, с развитой пористостью наружного. Такое структурное состояние защитного покрытия не является гарантированной защитой объектов от эксплуатационных воздействий, учитывая области их преимущественного использования – авиа-, автомобиле-, приборостроение, строительство и т. п.

ВЫВОДЫ

1. Характер структурообразования и изменение фазового состава формируемых покрытий в немалой степени определяются мощностью и режимами обработки технологического оборудования. Проведенные исследования показывают, что для интенсификации нарастания толщины формируемых слоев в большинстве случаев либо наращивается мощность серийных установок, что приводит к повышению

энергоёмкости процесса, либо усложняется само оборудование, позволяя чередовать анодно-катодную обработку, что увеличивает его стоимость. При этом не гарантируется получение высокоплотных слоев, а себестоимость покрытий, получаемых с помощью дорогостоящего и более энергоёмкого оборудования, выше.

2. Решая задачи увеличения рабочего ресурса изделий для перечисленных отраслей промышленности с обеспечением возможности противостоять эксплуатационным рискам, следует учитывать и необходимость снижения энергоёмкости процессов их изготовления. Весьма немаловажным является экологическая чистота технологических процессов.

3. Проведенный анализ позволяет заключить, что один из эффективных путей решения указанных задач – разработка технологии микродугового оксидирования с оптимизацией параметров микроплазменного воздействия и составов электролитов при формировании керамикоподобных покрытий перспективного назначения на поверхности легких, в частности магниевых, сплавов при использовании традиционного микродугового оксидирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kazanski B. The Influence of Fluoride Additives on the Properties of Oxide Layer Produced by Plasma Electrolytic Oxidation / B. Kazanski, A. Kossenko, A. Lugovskoy,

- M. Zinigrad // Defect and Diffusion Forum. 2012. Vol. 326–328. P. 498–503.
2. Effects of Fluoride on the Structure and Properties of Micro-arc Oxidation Coating on Aluminium Alloy / Z. Wang [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. 2010. Vol. 505, No 1. P. 188–193.
 3. Способ получения защитных покрытий на поверхности изделий из магния и сплавов на его основе: пат. России № 2260078: МПК C25D11/30 / В. В. Хохлов, Н. М. Вавилкин, А. Г. Клевцов, В. А. Баутин, А. Г. Ракоч, А. Е. Кутырев, Ю. В. Магурова; дата публ.: 10.09.2005.
 4. Владимиров, Б. В. Влияние состава электролита на свойства сплава MA2-1 при микродуговом оксидировании / Б. В. Владимиров // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324, № 2. С. 143–148.
 5. Способ получения защитных покрытий на сплавах магния: патент России № 2357016: МПК C25D11/30 / С. В. Гнеденков, О. А. Хрисанфова, А. Г. Завидная, С. Л. Синебрюхов, В. С. Егоркин, М. В. Нистратова; дата публ.: 27.05.2009.
 6. Способ получения защитных покрытий на магниевых сплавах: пат. России № 2447202: МПК C25D11/30 / С. А. Каримова, И. А. Козлов, Т. Г. Павловская; дата публ.: 10.04.2012.
 7. Хла, Мо. Оптимизация процесса микродугового оксидирования алюминиевых и магниевых сплавов / Мо Хла. Москва, 2007. 133 с.
 8. Influence of Post-Annealing on the Oxide Layer of AZ91 Mg Alloy Prepared by Plasma Electrolytic Oxidation / D. Y. Hwang [et al.] // Materials Transactions. 2010. Vol. 51, No 2. P. 408–412.
 9. Аверьянов, Е. Е. Справочник по анодированию / Е. Е. Аверьянов. М.: Машиностроение, 1988. С. 81–82.
 10. Khaselev, O. Anodizing of Pure Magnesium in KOH-Aluminate Solutions under Sparkling / O. Khaselev, D. Weiss, J. Yahalom // Journal of the Electrochemical Society. 1999. Vol. 146, No 5. P. 1757–1761.
 - and Diffusion Forum, 326–328, 498–503. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.498.
 2. Wang Z., Wu L., Cai W., Shan A., Zhaohua J. (2010) Effects of Fluoride on the Structure and Properties of Micro-arc Oxidation Coating on Aluminium Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 505 (1), 188–193. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.06.027>.
 3. Khokhlov V. V., Vavilkin N. M., Klevtsov A. G., Bautin V. A., Rakoch A. G., Kutyrev A. E., Magurova Yu. V. (2005) Method for Obtaining Protective Coatings on the Surface of Products Made from Magnesium and Magnesium-Based Alloys. Patent of Russian Federation No 2260078. (in Russian).
 4. Vladimirov B. V. (2014) Influence of Electrolyte Composition on MA2-1-Alloy Properties During Micro-arc Oxidation. *Izvestiia Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 324 (2), 143–148 (in Russian).
 5. Gnedenkov S. V., Khrisanfova O. A., Zavidnaya A. G., Sinebryukhov S. L., Egorkin V. S., Nistratova M. V. (2009) Method for Obtaining Protective Coatings While Using Magnesium Alloys. Patent of Russian Federation No 2357016. (in Russian).
 6. Karimova S. A., Kozlov I. A., Pavlovskaya T. G. (2012) Method for Obtaining Protective Coatings While Using Magnesium Alloys. Patent of Russian Federation No 2447202. (in Russian).
 7. Khla Mo. (2007) *Optimization of Micro-arc Oxidation Process for Aluminium and Magnesium Alloys*. Moscow. 133 (in Russian).
 8. Hwang D. Y., Ko Y. G., Kim Y. M., Yoo B., Shin D. H. (2010) Influence of Post-Annealing on the Oxide Layer of AZ91 Mg Alloy Prepared by Plasma Electrolytic Oxidation. *Materials Transactions*, 51 (2), 408–412 DOI: 10.2320/matertrans.M2009290.
 9. Averyanov E. E. (1988) *Anodizing Guide*. Moscow, Mashinostroyeniye, 81–82 (in Russian).
 10. Khaselev O., Weiss D., Yahalom J. (1999) Anodizing of Pure Magnesium in KOH-Aluminate Solutions under Sparkling. *Journal of the Electrochemical Society*, 146 (5), 1757–1761. DOI: 10.1149/1.1391838.

Поступила 25.02.2016

Подписана в печать 26.04.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Kazanski B., Kossenko A., Lugovskoy M. (2012) The Influence of Fluoride Additives on the Properties of Oxide Layer Produced by Plasma Electrolytic Oxidation. *Defect*

Received: 25.02.2016

Accepted: 26.04.2016

Published online: 26.09.2016

Проектирование сети автотранспортных парков*

Докт. экон. наук, проф. Р. Б. Ивуть¹⁾, канд. техн. наук П. В. Попов²⁾,
докт. техн. наук, проф. И. Ю. Мирецкий²⁾

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

²⁾Волжский гуманитарный институт, филиал Волгоградского государственного университета
(Волжский, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В современных условиях важным фактором развития регионов стран является размер инвестиций. Существенное влияние на инвестиционную привлекательность регионов оказывает логистическая инфраструктура, которая обеспечивает комплексное транспортное, распределительное, информационное и иное обслуживание. Отсутствие должного внимания на разработку и реализацию стратегии развития логистической инфраструктуры со стороны руководителей регионов вызывает нежелание крупных федеральных и транснациональных компаний вкладывать инвестиции в инфраструктурные проекты. Одним из основных элементов логистической инфраструктуры является сеть автотранспортных терминалов. Она позволяет оптимизировать продвижение материального потока от точки зарождения до точки потребления с наименьшими затратами при поддержании заданного уровня обслуживания. К основным объектам транспортной инфраструктуры относят автомобильный транспорт, который обладает наибольшей гибкостью по сравнению с другими видами транспортных средств, что обуславливает его широкое применение. Для перераспределения грузопотоков внутри регионов стран формируют сеть автотранспортных парков (терминалов). Цель настоящего исследования – разработка математической модели формирования транспортной инфраструктуры на территории регионов стран. В статье предложен подход к формированию сети автотранспортных парков (терминалов) на территории крупного региона с учетом сформированной сети распределительно-подсортировочных складов. Построена модель для решения задачи минимизации суммарных затрат, связанных с содержанием автотранспортных парков, доставкой товаров от поставщиков и производителей на распределительно-подсортировочные склады и со складов – потребителям, с перегонем порожнего автомобильного транспорта, а также с грузопереработкой товаров. Модель позволяет определить оптимальное количество и месторасположение автотранспортных парков (терминалов) с учетом возможных мест их размещения, их мощность и учитывает ограничение по типам и количеству транспортных средств.

Ключевые слова: автотранспортный парк, транспортная инфраструктура, математическая модель, транспортный терминал, инфраструктура региона, опорная сеть, распределительно-подсортировочный склад

Для цитирования: Ивуть, Р. Б. Проектирование сети автотранспортных парков / Р. Б. Ивуть, П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 442–446

Designing of an Automobile Fleet Network

R. B. Ivut¹⁾, P. V. Popov²⁾, I. Yu. Miretskiy²⁾

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

²⁾Volzhsy Institute of Humanities Branch of Volgograd State University (Volzhsy, Russian Federation)

Abstract. Investment volume is considered as an important factor in regional development under current conditions. Logistical infrastructure which ensures a complex transport, distributive, information and other services exerts a significant influence

Адрес для переписки

Попов Павел Владимирович
Волжский гуманитарный институт,
филиал Волгоградского государственного университета
ул. 40 лет Победы, 11,
404133, г. Волжский, Волгоградская обл.,
Российская Федерация
Тел.: +7 917 649-78-22
donpascha@yandex.ru

Address for correspondence

Popov Pavel V.
Volzhsy Institute of Humanities
Branch of Volgograd State University
11 of 40 year Victory str.,
404133, Volzhsky, Volgogradskaya obl.,
Russian Federation
Tel.: +7 917 649-78-22
donpascha@yandex.ru

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект № 16-12-34015).

on regional investment attractiveness. Lack of clear vision on development and execution of development strategy for logistics infrastructure from the side of regional authorities results in unwillingness of large federal and transnational companies to provide investments in infrastructure projects. Network of automotive transport terminals is one of the main elements in logistics infrastructure. The network allows to optimize a flow of material goods from the point of their origin to the point of their consumption with the lowest possible costs and the required level of service. Automobile transport is one of the main objects of transport infrastructure and it is characterized by rather high flexibility in comparison with other types of transport facilities that preconditions its widespread application. Network of automobile fleets (terminals) has been formed for redistribution of goods traffic within the concerned regions. The purpose of the present research is to develop a mathematical model for formation of transport infrastructure on the territory of regions. The paper proposes an approach for formation of automobile fleet (terminal) network on the territory of a large region with due account of the established network of distribution and sorting-out warehouse facilities. A model has been developed for solving the problem pertaining to minimization of aggregate costs related to maintenance of automobile fleets, delivery of goods to and from distribution and sorting-out warehouse facilities to consumers, ferry of empty trucks and goods handling. The model makes it possible to determine optimal number and location area of automobile fleets (terminals) while accounting for their possible locations, capacity and limitations on type and number of transport facilities.

Keywords: automobile fleet, transport infrastructure, mathematical model, transportation terminal, regional infrastructure, backbone network, distribution and warehouse facilities

For citation: Ivut R. B., Popov P. V., Miretskiy I. Yu. (2016) Designing of an Automobile Fleet Network. *Science & Technique*. 15 (5), 442–446 (in Russian)

Введение

Важнейшим элементом развития регионов стран является транспортная инфраструктура. В соответствии с современной практикой она позволяет обеспечить выполнение следующего требования: «нужный товар требуемого качества и количества в заданное время и с оптимальными затратами». К ключевым объектам транспортной инфраструктуры относят транспортные терминалы (парки), транспортную сеть, транспортные средства.

Один из важнейших элементов видов транспортного средства – автомобильный транспорт. Перевозки автотранспортом обладают наибольшей гибкостью по сравнению с другими видами перевозок, поскольку они обеспечивают доставку товара «от двери до двери». Для обслуживания крупного региона с большим числом точек отправки и получения груза альтернативы автомобильным перевозкам фактически нет. Поэтому формирование эффективной транспортной инфраструктуры представляется весьма важной задачей.

Постановка задачи

Рассмотрим проблему моделирования автотранспортной инфраструктуры региона [1, 2]. С целью определения оптимального месторасположения и мощности автотранспортных парков на территории региона поставим следующую задачу оптимизации: составить такой план размещения автотранспортных парков, который обеспечит минимальные суммарные затраты на их содержание, доставку товаров от поставщиков и производителей на распределительно-

тельно-подсортировочные склады и со складов общего назначения потребителям, а также на грузопереработку товаров [3]. Будем считать, что места возможного расположения транспортных парков известны. Построим математическую модель для решения задачи.

При составлении модели полагаем, что [4, 5]:

- известны места расположения производителей продукции (производственных предприятий) и их характеристики;
- определен вид товароносителя, на котором формируется транспортный пакет;
- заданы максимальные объемы производства каждого товара на каждом предприятии;
- известны места расположения поставщиков разнородной продукции, отгружающих товар на заданных типах товароносителей, и запасы продукции у них;
- известны пункты размещения распределительно-подсортировочных складов общего назначения на территории региона и их мощности;
- для каждого распределительно-подсортировочного склада даны издержки на грузопереработку товаров на заданных типах товароносителей;
- известны пункты потребления по всем видам продукции и объемы спроса;
- заданы места возможного размещения автомобильных парков;
- определены возможные виды транспортных средств, осуществляющих перевозку грузов;
- заданы транспортные затраты по доставке единицы каждого вида продукции:
 - а) со склада общего назначения до пунктов потребления;

б) со складов производителей и от поставщиков до складов общего назначения;

- заданы транспортные издержки на перемещение транспортного средства от автомобильного парка до поставщиков, производителей и распределительно-подсортировочных центров.

Для описания точек сети отправки/получения продукции (товаров) введем следующую индексацию: i – номер пункта размещения транспортного парка ($i = \overline{1, I}$) с H видами транспортных средств; h – тип транспортного средства ($h = \overline{1, H}$); j – номер пункта расположения распределительно-подсортировочного склада общего назначения ($j = \overline{1, J}$), обрабатывающего L видов товаров; l – вид товара ($l = \overline{1, L}$); k – номер пункта потребления товаров (магазин розничной торговли), $k = \overline{1, K}$; p – номер производственного предприятия ($p = \overline{1, P}$); g – номер поставщика товаров ($g = \overline{1, G}$).

Сеть доставки/распределения товаров представлена на рис. 1.

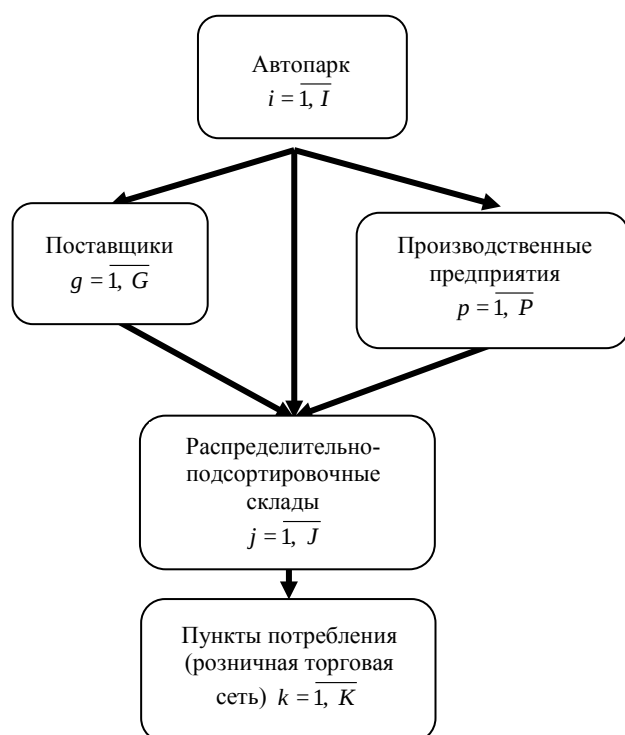


Рис. 1. Сеть доставки/распределения товаров

Fig. 1. Network of goods delivery/distribution

По каждому виду l товара, как было отмечено ранее, известны:

$$\mathbf{D}_k = \begin{pmatrix} d_{k1} \\ \vdots \\ d_{kr} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{V}_p = \begin{pmatrix} v_{p1} \\ \vdots \\ v_{pr} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{S}_g = \begin{pmatrix} s_{g1} \\ \vdots \\ s_{gr} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{W}_j = \begin{pmatrix} w_{j1} \\ \vdots \\ w_{jr} \end{pmatrix},$$

где d_{kl} – потребность в l -м товаре k -го магазина розничной торговли; v_{pl} – объем производства l -го товара на p -м производственном предприятии; s_{gl} – запас l -го товара у g -го поставщика; w_{jl} – заданная мощность по l -му товару распределительно-подсортировочного склада общего назначения в j -м пункте размещения [6–8].

Предполагается, что для обслуживания сети на все автопарки выделяется не более чем N_h единиц транспортного средства h -го типа ($h = \overline{1, H}$). Опишем затраты, связанные с функционированием автомобильного парка и сети доставки и переработки товаров. Это затраты по размещению автотранспортного парка в некотором пункте, транспортные затраты по доставке товаров, затраты на перегон порожнего автотранспорта, а также затраты на грузопереработку [1, 9, 10].

Приведенные затраты $f_i(x_i)$, связанные с размещением автотранспортного парка в i -м пункте, составляют

$$f_i(x_i) = c_i(x_i) + EK_i(x_i),$$

где $c_i(x_i)$ – годовые эксплуатационные затраты i -го автотранспортного парка без учета расходов на доставку товаров; $K_i(x_i)$ – единовременные капитальные вложения на строительство i -го автотранспортного парка; E – коэффициент эффективности капитальных вложений.

Суммарные приведенные затраты

$$z_1 = \sum_{i=1}^I f_i(x_i).$$

При определении затрат, связанных с использованием автотранспорта, учитываем следующие тарифы:

- 1) $c_{(1)jkh}^l$ – стоимость доставки (транспортные затраты) единицы транспортного пакета l -го товара из j -го склада общего назначения в k -й пункт потребления h -м видом транспорта;
- 2) $c_{(2)pjh}^l$ – то же со склада p -го производственного предприятия в j -й склад общего на-

значения h -м видом транспорта (для каждого вида товара имеются ограничения по объему производства в единицу времени);

3) $c_{(3)gjh}^l$ – то же от g -го поставщика в j -й склад общего назначения h -м видом транспорта;

4) $c_{(4)iph}$ – транспортные затраты на перегон единицы порожнего автомобильного транспорта h -го типа от i -го автопарка в p -е производственное предприятие;

5) $c_{(5)igh}$ – то же g -му поставщику;

6) $c_{(6)ijh}$ – то же в j -й распределительно-подсортировочный склад.

Соответствующие переменные модели (искомые величины) – это объемы перевозок $x_{(1)jkh}^l, x_{(2)pjh}^l, x_{(3)gjh}^l$ и количество перегоняемых порожних автомобилей $x_{(4)iph}, x_{(5)igh}, x_{(6)ijh}$.

Суммарные затраты, связанные с перевозкой грузов, теперь могут быть представлены в виде

$$z_2 = \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^H \left(\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{(1)jkh}^l x_{(1)jkh}^l + \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J c_{(2)pjh}^l x_{(2)pjh}^l + \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J c_{(3)gjh}^l x_{(3)gjh}^l \right),$$

а суммарные затраты на перегон порожнего транспорта – в виде

$$z_3 = \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H \left(\sum_{p=1}^P c_{(4)iph} x_{(4)iph} + \sum_{g=1}^G c_{(5)igh} x_{(5)igh} + \sum_{j=1}^J c_{(6)ijh} x_{(6)ijh} \right).$$

Перейдем к последнему виду затрат – затратам, связанным с грузопереработкой товаров на распределительно-подсортировочных складах. Для транспортного пакета l -го товара и j -го склада они тарифицируются как c_j^l . Учитывая, что поступление товаров на склады происходит в объемах

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H x_{(2)pjh}^l \quad \text{и} \quad \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{g=1}^G \sum_{h=1}^H x_{(3)gjh}^l$$

от предприятий и поставщиков соответственно, а отгрузки – в объеме

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H x_{(1)jkh}^l,$$

находим суммарные затраты на грузопереработку в виде:

$$z_4 = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J c_j^l \left(\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H x_{(1)jkh}^l + \sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H x_{(2)pjh}^l + \sum_{g=1}^G \sum_{h=1}^H x_{(3)gjh}^l \right).$$

Таким образом, затраты, связанные с функционированием автомобильного парка и сети доставки и переработки товаров, составляют

$$Z = z_1 + z_2 + z_3 + z_4.$$

Задача состоит в определении месторасположения автомобильных парков, количества и видов транспорта и такого плана перевозок, чтобы затраты Z были минимальными, и удовлетворялся спрос D_k каждого потребителя. Функцию Z требуется минимизировать при следующих ограничениях.

1. Объем ввозимых на склад и вывозимых со склада товаров не должен превышать его мощности ни по одному из видов товара:

$$\sum_{p=1}^P \sum_{h=1}^H x_{(2)pjh}^l + \sum_{g=1}^G \sum_{h=1}^H x_{(3)gjh}^l \leq w_{jl}, \quad j = \overline{1, J}; \quad l = \overline{1, L};$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H x_{(1)jkh}^l \leq w_{jl}, \quad j = \overline{1, J}; \quad l = \overline{1, L}.$$

2. Потребность каждого магазина розничной торговли по каждому товару должна быть полностью удовлетворена

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H x_{(1)jkh}^l \leq d_{kl}, \quad k = \overline{1, K}, \quad l = \overline{1, L}.$$

3. Количество продукции, вывозимой с каждого производственного предприятия, не должно превосходить его объемов производства ни по одному из видов товара

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H x_{(2)pjh}^l \leq v_{pl}, \quad p = \overline{1, P}; \quad l = \overline{1, L}.$$

Аналогичное требование должно выполняться и для поставщиков

$$\sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H x_{(3)gjh}^l \leq s_{gl}, \quad g = \overline{1, G}; \quad l = \overline{1, L}.$$

Ограничения по типам и количеству транспортных средств

$$\sum_{i=1}^I \left(\sum_{p=1}^P x_{(4)iph} + \sum_{g=1}^G x_{(5)igh} + \sum_{j=1}^J x_{(6)ijh} \right) \leq N_h, \quad h = \overline{1, H}.$$

Все переменные могут принимать неотрицательные целочисленные значения:

$$x_{(1)jkh}^l; x_{(2)pjh}^l; x_{(3)gjh}^l; x_{(4)iph}^l; x_{(5)igh}^l; x_{(6)ijh}^l \in \mathbb{Z}_{\geq 0},$$

$$l = \overline{1, L}; \quad j = \overline{1, J}; \quad k = \overline{1, K}; \quad p = \overline{1, P}; \quad g = \overline{1, G}; \\ h = \overline{1, H}; \quad i = \overline{1, I}.$$

ВЫВОД

Построена модель для решения задачи минимизации суммарных затрат, связанных с содержанием автотранспортных парков, доставкой товаров от поставщиков и производителей на распределительно-подсортировочные склады и со складов – потребителям, с перегонном порожнего автомобильного транспорта, а также с грузопереработкой товаров. Модель позволяет определить оптимальное количество и месторасположение автотранспортных парков (терминалов) с учетом возможных мест их размещения, их мощность и учитывает ограничения по типам и количеству транспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емеличев, В. А. Метод построения последовательности планов для решения задач дискретной оптимизации / В. А. Емеличев, В. И. Комлик. М.: Наука. Главная ред. физ.-мат. лит.-ры, 1981. 208 с.
2. Емеличев, В. А. К задачам дискретной оптимизации / В. А. Емеличев // ДАН СССР. 1970. Т. 192, № 5.
3. Попов, П. В. Формирование сети распределительно-подсортировочных складов на территории Волгоградской области / П. В. Попов, А. В. Сопит // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 20, № 17 (144). С. 107–111.
4. Алексин, Р. В. Исследование взаимодействия элементов в транспортно-складском комплексе / Р. В. Алексин. Л., 1984. 215 с.
5. Попов, П. В. Моделирование складской инфраструктуры регионов Российской Федерации / П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий // Логистика. 2015. № 6. С. 24–27.
6. Рубенс, М. Математическое моделирование и управление распределением / М. Рубенс. Брюссель: Бельгийский ин-т кадров, технического содействия и трансфера технологий, 1993. 31 с.
7. Построение региональной сети складов общего назначения на территории Волгоградской области / И. В. Да-

выдкина [и др.] // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. 2015. № 2 (31). С. 99–102.

8. Попов, П. В. Формирование опорной сети складов общего пользования на территории Волгоградской области / П. В. Попов, И. Ю. Мирецкий, А. А. Полковников // Логистика. 2014. № 4. С. 36–39.
9. Бахтин, А. Е. Методы решения задач территориально-производственного планирования / А. Е. Бахтин. Новосибирск: Наука, 1976. 234 с.
10. Емеличев, В. А. Применение динамического программирования к решению задачи размещения / В. А. Емеличев, В. И. Комлик / ДАН БССР. 1966. № 10.

Поступила 12.07.2016

Подписана в печать 14.09.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Emelichev V. A., Komlik V. I. (1981) *Method for Construction of Coherent Plan to Solve Problems of Discrete Optimization*. Moscow, Science. Chief Editorial Board of Physical and Mathematical Literature. 208 (in Russian).
2. Emelichev V. A. (1970) To the Objectives of Discrete Optimization. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 192 (5) (in Russian).
3. Popov P. V., Sopit A. V. (2014) Formation of Distribution and Sorting-Out Warehouse Network on the Territory of the Volgograd Region. *Izvestiia Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Proceedings of Volgograd State Technical University], 20 (17), 107–111 (in Russian).
4. Aleksin R. V. (1984) *Investigations on Interaction of Elements in Transport and Warehouse Complex*. Leningrad. 215 (in Russian).
5. Popov P. V., Miretsky I. Yu. (2015) Simulation of Warehouse Infrastructure in the Regions of Russian Federation. *Logistika* [Logistics], (6), 24–27 (in Russian).
6. Rubens M. (1993) *Mathematical Modeling and Distribution Management*. Brussels, Belgian Institute of Personnel, Technical Assistance and Technology Transfer. 31 (in Russian).
7. Davydkina I. B., Morozov A. V., Popov P. V., Shevchenko O. Construction of Regional Network for General Purpose Warehouses on the Territory of the Volgograd Region. *Biznes. Obrazovanie. Pravo. Vestnik Volgogradskogo Instituta Biznesa* [Business. Education. Law. Bulletin of the Volgograd Institute of Business], 31 (2), 99–102 (in Russian).
8. Popov P. V., Miretsky I. Yu., Polkovnikov A. A. (2014) Formation of Backbone Network for General Purpose Warehouses on the Territory of the Volgograd Region. *Logistika* [Logistics], (4), 36–39 (in Russian).
9. Bakhtin A. E. (1976) *Methods for Solving Problems of Territorial-Production Planning*. Novosibirsk, Nauka. 234 (in Russian).
10. Emelichev V. A., Komlik V. I. (1966) Application of Dynamic Programming to Solve an Allocation Problem. *Doklady Akademii Nauk BSSR* [Proceedings of the BSSR Academy of Sciences], (10) (in Russian).

Received: 12.07.2016

Accepted: 14.09.2016

Published online: 26.09.2016