

НАУКА и ТЕХНИКА



Science and Technique V. 19, No 4
(2020)

**Международный
научно-технический журнал**

**International
Scientific and Technical Journal**

Серия 1. Машиностроение

Series 1. Mechanical Engineering

Издается с января 2002 года

Published from January 2002

Периодичность издания – один раз в два месяца

Publication frequency – bimonthly

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Founder

Belarusian National
Technical University

Журнал включен в базы данных:

Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:

Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

- Шелег В. К., Жигалов А. Н., Богдан Д. Д.**
Исследование влияния аэродинамического
звукового упрочнения на износ металлорежущих
твердосплавных пластин с покрытиями 271
- Пантелеенко Ф. И., Данилов А. А.**
Классификация методов формообразования
и синтез на ее основе схем обработки
профильных моментопередающих
поверхностей 280
- Киселев М. Г., Монич С. Г., Богдан П. С.,
Корчигин Д. Л., Ефименко В. В.**
Влияние режимов электроэрозионного
модифицирования изношенной рабочей
поверхности стоматологических фрез
на восстановление ее режущей способности 288
- Козерук А. С., Диас Гонсалес Р. О., Сухотцкий А. А.,
Филонова М. И., Кузнецик В. О.**
Технологические особенности
формообразования плоского инструмента
для обработки аксионов 297
- Kuharonak G. M., Kapskiy D. V., Berezun V. I.**
Ensuring Requirements for Emissions
of Harmful Substances of Diesel Engines
(**Кухарёнок Г. М., Капский Д. В., Березун В. И.**
Обеспечение требований к выбросам
вредных веществ дизелей) 305

CONTENTS

Mechanical Engineering

- Sheleg V. K., Jigalov A. N., Bogdan D. D.**
Study on Effect of Aerodynamic
Sound Hardening for Wear
of Coated Carbide Metal Plates 271
- Panteleenko F. I., Danilov A. A.**
Classification of Formation Methods
and Synthesis of Schemes for Processing Profile
Moment-Transmitting Surfaces Based
on the Classification 280
- Kiselev M. G., Monich S. G., Bogdan P. S.,
Korchigin D. L., Efimenko V. V.**
Influence of Electro-Erosive
Modification Modes for Worn Working Surface
of Dental Cutters on Restoration
of its Cutting Ability 288
- Kozeruk A. S., Dias Gonzalez R. O., Sukhotzkiy A. A.,
Filonova M. I., Kuznechik V. O.**
Technological Features
of Forming Flat Tool
for Processing Axicons 297
- Kuharonak G. M., Kapskiy D. V., Berezun V. I.**
Ensuring Requirements for Emissions
of Harmful Substances of Diesel Engines 305

Гаркавенко А. С., Мокрицкий В. А., Маслов О. В., Соколов А. В.
 Природа деградации полупроводниковых лазеров с электронным накачиванием энергии.
 Теоретические предпосылки 311

Кохненко Н. С., Карпунин И. И., Кузьмич В. В.
 Исследование надежности основных узлов и устройств высекальных прессов для производства упаковки 320

Сернов С. П., Балохонов Д. В., Колонтаева Т. В., Исаев А. В.
 Адаптивный задний комбинированный фонарь транспортного средства с несменными источниками света 329

Szwaja S.
 Knock Reduction Measures in the Gas Fuelled Internal Combustion Engine (Швайя С.
 Меры по уменьшению стука в газовом двигателе внутреннего сгорания) 339

Czerepicki A., Choromański W., Kozłowski M., Kazinski A.
 Analysis of the Problem of Electric Buses Charging in Urban Transport (Черепицкий А., Хороманьский В., Козловский М., Козинский А.
 Анализ проблемы при зарядке электрических автобусов городского транспорта) 349

Olkhova M., Roslavtsev D., Matviichuk O., Mykhalenko A.
 City Delivery Routes Planning Based on the Ant Colony Algorithm (Ольхова М., Рославцев Д., Матвийчук А., Михаленко А.
 Планирование маршрутизации по доставке товаров в городе на основе оптимизации муравьиного алгоритма) 356

Garkavenko A. S., Mokritsky V. A., Maslov O. V., Sokolov A. V.
 Nature of Degradation in Semiconductor Lasers with Electronic Energy Pumping.
 Theoretical Background 311

Kohnenko N. S., Karpunin I. I., Kuz'mich V. V.
 Study of Reliability for Main Components and Devices of Die-Cutting Presses for Packaging 320

Sernov S. P., Balokhonov D. V., Kolontaeva T. V., Isaev A. V.
 Vehicle Adaptive Rear Combination Light with Non-Replaceable Light Sources 329

Szwaja S.
 Knock Reduction Measures in the Gas Fuelled Internal Combustion Engine 339

Czerepicki A., Choromański W., Kozłowski M., Kazinski A.
 Analysis of the Problem of Electric Buses Charging in Urban Transport 349

Olkhova M., Roslavtsev D., Matviichuk O., Mykhalenko A.
 City Delivery Routes Planning Based on the Ant Colony Algorithm 356

**Главный редактор
 Борис Михайлович Хрусталеv**

Редакционная коллегия

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

**Editor-in-Chief
 Boris M. Khroustalev**

Editorial Board

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

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

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

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

Ведущий стилистический редактор

В. Н. Гурьянчик

Leading Style Editor

V. N. Guryanchyk

Адрес редакции

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

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

<http://sat.bntu.by>

Address

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

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

<http://sat.bntu.by>

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.

Регистрационный номер 285

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

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 30.07.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-271-279>

УДК 621.9

Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на износ металлорежущих твердосплавных пластин с покрытиями

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾,
канд. техн. наук, доц. А. Н. Жигалов²⁾, асп. Д. Д. Богдан²⁾

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

²⁾Барановичский государственный университет (Барановичи, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Для повышения стойкости металлорежущих твердосплавных пластин, работающих при процессах прерывистого резания в тяжелых технологических условиях с ударной нагрузкой, разработан метод аэродинамического звукового упрочнения, используя который с небольшой добавленной стоимостью возможно увеличить ресурс твердосплавного инструмента до 3,7 раза. Износ пластин, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, после 100 мин резания меньше своих неупрочненных аналогов в 1,12–1,7 раза. Покрытие на металлорежущих твердосплавных пластинах не носит превалирующего значения при работе инструмента с ударными нагрузками. В последнем случае наибольшее влияние на повышение стойкости оказывает вязкость внутренней структуры пластины. Для металлорежущих твердосплавных пластин в процессе прерывистого резания со значительными ударными нагрузками метод аэродинамического звукового упрочнения более эффективен, чем метод нанесения покрытий, причем не только по стойкостным показателям работы инструмента, но и по себестоимости самой доработки. Получены эмпирические зависимости износа по задней поверхности твердосплавных пластин, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, и пластин с покрытиями PVD в виде аппроксимации полиномами 5-й и 2-й степеней, которыми удобно пользоваться в производственных условиях. Выявлено, что чем больше у твердосплавных пластин предел прочности при изгибе, тем меньше влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на повышение износостойкости. Так, с учетом того, что для основы ВК8 предел прочности при изгибе составляет 1666 МПа, а для Т5К10 – 1421 МПа, снижение износа после упрочнения аэродинамическим звуковым методом для пластин ВПЗ115 с основой ВК составляет 11,5 %, в то время как для ВПЗ225 с основой ТК – 27,1 %.

Ключевые слова: аэродинамическое звуковое упрочнение, твердые сплавы, покрытия, износостойкость

Для цитирования: Шелег, В. К. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на износ металлорежущих твердосплавных пластин с покрытиями / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 271–279. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-271-279>

Study on Effect of Aerodynamic Sound Hardening for Wear of Coated Carbide Metal Plates

V. K. Sheleg¹⁾, A. N. Jigalov²⁾, D. D. Bogdan²⁾

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

²⁾Baranovichi State University (Baranovichi, Republic of Belarus)

Abstract. To increase the durability of metal-cutting carbide plates operating during in harsh technological conditions with impact load, an aerodynamic sound hardening method has been developed that can increase a life of carbide tools up

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

to 3.7 times with a small added cost. The wear of plates hardened by the aerodynamic sound method, after 100 min of cutting, is 1.12–1.7 times less than their un-strengthened analogues. A coating on metal carbide plates does not have a prevailing value when a tool is working with impact loads. While working with impact loads viscosity of an internal plate structure occurs the greatest influence on increasing resistance. For metal-cutting carbide plates during interrupted cutting with significant impact loads, a method of aerodynamic sound hardening is more effective than a coating method, not only in terms of tool performance, but also in the cost of completion itself. Empirical dependences of wear on the rear surface of carbide plates hardened by a aerodynamic sound method and plates with PVD coatings have been obtained in the form of approximation by polynomials of the 5th and 2nd degrees, which are convenient to use in a production environment. It has been revealed the higher carbide plate strength in bending leads to less influence of the method of aerodynamic sound hardening on the increase in wear resistance. So, taking into account the fact that for BK8-base the ultimate bending strength is 1666 MPa, and for T5K10 it is 1421 MPa, wear reduction after hardening by the aerodynamic sound method for ВП3115-plates with BK base is 11.5 %, while for ВП3225 – plates with TK-base – 27.1 %.

Keywords: aerodynamic sound hardening, hard alloys, coatings, wear resistance

For citation: Sheleg V. K., Jigalov A. N., Bogdan D. D. (2020) Study on Effect of Aerodynamic Sound Hardening for Wear of Coated Carbide Metal Plates. *Science and Technique*. 19 (4), 271–279. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-271-279> (in Russian)

Введение

Металлорежущий твердосплавный инструмент широко применяется в современном машиностроении для обработки различных поверхностей деталей машин. В Республике Беларусь такой инструмент не производится.

Твердосплавные инструменты, наряду со своей высокой твердостью, достаточно хрупкие, что снижает их эффективное использование при механической обработке в процессе прерывистого резания из-за пониженной ударной стойкости.

Для повышения стойкости металлорежущего твердосплавного инструмента при прерывистом резании применяется метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) [1], позволяющий с небольшой добавленной стоимостью существенно увеличить ресурс инструмента (до 3,7 раза) за счет повышения предела прочности при изгибе до 2230 МПа и ударной вязкости до 90 КДж/м² при сохранении заданной высокой твердости (до 92 HRA). Эффект при использовании метода АДУ заключается в воздействии волн звуковой частоты, приведенных в резонансное состояние, на дислокационную структуру упрочняемых твердых сплавов [2]. В результате этого происходит измельчение карбидных фаз и их перераспределение, уменьшение дислокаций внутренней структуры, а за счет самоорганизации на уровне кристаллической решетки обеспечивается переход от беспорядочного движения флуктуаций и их хаотического состояния к новому по-

рядку, позволяющему улучшать параметры структуры для заданных условий эксплуатации [3].

Также разработана математическая модель образования энергии в твердых сплавах, отличающаяся учетом влияния приведенных в резонансное состояние акустических волн звуковой частоты и предварительного теплового нагрева от внешнего источника на генерируемую энергию в атомах кристаллических решеток. Модель позволяет устанавливать значения амплитудно-частотных параметров и температуры, при которых возникающая энергия создает условия для смещения атомов кристаллических решеток элементов твердых сплавов и дислокационных образований, возникших от дефектов, связанных с нарушениями периодичности положения атомов в кристаллической решетке, в пределах всей структуры упрочняемого материала [4]. С использованием основных положений теорий волновых процессов, квантовой физики, классической теплоемкости и термодинамики, дислокаций, самоорганизации и хаотизации, упругости и пластичности, реологии, а также с применением технологии функционально-ориентированного проектирования и имитационного реологического моделирования дано математическое описание механизма аэродинамического звукового упрочнения, связанного с накачкой энергий в твердое тело, со смещением атомов кристаллической решетки и дислокаций в свободное, а затем в самоорганизованное состояние [5]. Осуществлено экспериментальное определение амплитудно-час-

тотных характеристик при аэродинамическом звуковом упрочнении твердых сплавов [6]. Проведены исследования влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из стали [7]. АДУ оказывает влияние на шероховатость обработанных поверхностей: в период нормального износа шероховатость сначала уменьшается, а затем увеличивается, причем с одинаковой и значительно меньшей, чем в период приработки, интенсивностью [8]. Проведенные исследования влияния на предел прочности при изгибе и твердость твердых сплавов показали, что при упрочнении методом АДУ пластин марок Т5К10, Т15К6, ВК6, ВК8 твердость практически не изменяется по сравнению с базовыми, а предел прочности при изгибе увеличивается на 19–23 % [9].

Одни из наиболее эффективных направлений, повышающих стойкость твердосплавного металлорежущего инструмента, – методы химического осаждения покрытий (ХОП) из парогазовой фазы (CVD – Chemical Vapor Deposition) и физического осаждения покрытий (ФОП, PVD – Physical Vapor Deposition) [2]. Методы ХОП получили широкое распространение для нанесения покрытий на основе карбидов, нитридов, карбонитридов титана, а также окисла алюминия на многогранные неперетачиваемые твердосплавные пластины. В основе методов ХОП лежат гетерогенные химические реакции в парогазовой среде, окружающей режущий инструмент, в результате которых образуются покрытия, конденсирующиеся на его поверхности. При получении на рабочих поверхностях режущего инструмента соединений тугоплавких металлов исходными продуктами служат газообразные галогениды, при взаимодействии которых с другими составляющими смесей (H_2 , NH_3 , CO_2 и прочими) образуются и конденсируются необходимые покрытия. Покрытия из TiN, TiC, TiCN являются базовыми при производстве инструментов из твердых сплавов. Методами ХОП из газовой фазы можно получать одно-, двух- и даже трехслойные покрытия, состоящие последовательно из карбида титана, карбонитрида титана и нитрида титана. Методы ХОП реализуются

при температуре около 1000–1200 °С, что исключает их использование для нанесения покрытий на инструменты из быстрорежущих и углеродистых сталей с низкой температурой отпуска. При CVD – покрытия с толщиной до 20 мкм (Al_2O_3). Покрытие на основе ХОП увеличивает износостойкость инструмента, а также обеспечивает диффузионный барьер между твердым сплавом и материалом детали, защищает основу пластины от окисливания при высоких температурах, что позволяет работать с большими скоростями резания (увеличенными на 25–80 %). Благодаря этому стойкость твердосплавных пластин с покрытием в среднем увеличивается от 1,3 до 8 раз в широкой области применения [10].

На основе методов ХОП разработаны технологии, применяемые известными фирмами-производителями твердосплавного инструмента. Нанесение покрытий методом ФОП происходит за счет ионно-плазменной обработки в вакууме при 400–500 °С путем переноса массы вещества из парогазовой фазы, содержащей пары металла. Процессы ФОП позволяют управлять свойствами покрытия также и по номенклатуре инструментальных подложек [2]. Их широко используют такие ведущие мировые производители твердосплавного инструмента, как Sandvik Coromant, Hertel, Kennametal Hertel, Walter и др.

В связи с тем, что метод АДУ является новым и недостаточно изученным, интерес вызывает проведение исследований его эффективности в сравнении с эффективностью известных методов нанесения покрытий.

Основная часть

Выполняли исследования влияния метода АДУ на износостойкость твердосплавных пластин формы PNUA-110408 производства ОАО «Победит» с заводским покрытием CVD – ВП3115, ВП3225 и с PVD-покрытием, нанесенным в ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» (пластины Т5К10ж, Т5К10ч), а также пластин ООО «Вириал» формы VH5912, имеющих PVD-покрытие. Рассматривалась эффективность пластин, упрочненных методом АДУ (ВП3115у, ВП3225у, Т5К10у), в сравнении с эф-

фективностью пластин без покрытий (Т5К10) и неупрочненных (ВП3115н, ВП3225н, Т5К10н). Выбор марок твердых сплавов для проведения исследований основывался на наибольшей применимости таких сплавов в металлообрабатывающей промышленности при обработке прерывистых поверхностей со значительными ударными и циклически изменяющимися нагрузками.

При исследованиях износа пятигранные твердосплавные пластины формы РNУА-110408 размещались в корпусе фрезы таким образом, что главный и вспомогательный углы в плане были соответственно равны $\varphi = 64^\circ$, $\varphi_1 = 8^\circ$, $\gamma_3 = 10^\circ$, передний угол заточки $\gamma_3 = 10^\circ$, задний угол заточки $\alpha_3 = 10^\circ$. Обработка производилась на карусельно-фрезерном специальном станке модели ГФ2211 торцовыми фрезами диаметрами d , равными 63 и 200 мм. Обработке подвергались заготовки из стали 45 размерами 16×140 мм с твердостью НВ 178–198. Имитация ударных нагрузок осуществлялась путем установки в пакете нескольких (от одной до пяти) заготовок с размещением между ними прокладок размером более величины подачи на зуб. Применялись режимы резания: скорость резания $v = 158,3$ м/мин, подача на зуб $s_z = 0,21$ мм/зуб, глубина резания $t = 1,0$ мм. Пластины ВП3115 имеют основу ВК, пластины ВП3225 – основу ТК.

Замеры износа производили по задней поверхности h_3 пластин через определенное время резания на инструментальном стереоскопическом микроскопе Stemi 2000-С фирмы Carl Zeiss с точностью измерений до 0,001 мм. Зависимости износа от времени резания для исследуемых металлорежущих твердосплавных пластин приведены на рис. 1.

На рис. 2 зависимости износа по задней поверхности h_3 от времени резания τ для исследуемых сплавов представлены в виде линий тренда, аппроксимирующих экспериментальные кривые по полиному 5-й степени. В табл. 1 приведены формулы для исследуемых сплавов, описывающие кривые тренда, представленные на рис. 2, и величины достоверности их аппроксимации в виде коэффициента R^2 , представляющего собой долю дисперсии переменной износа в дисперсии времени.

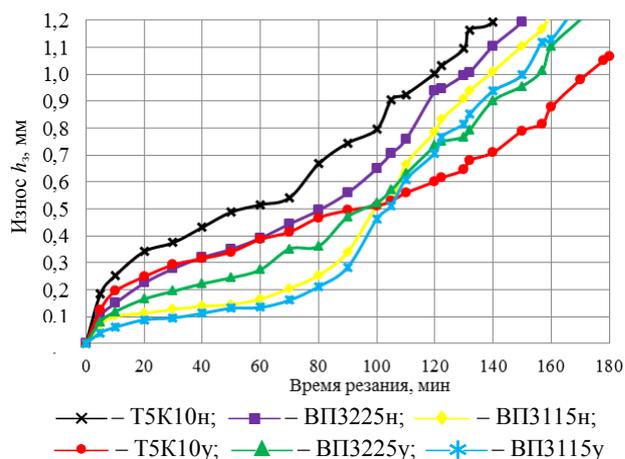


Рис. 1. Зависимости износа по задней поверхности h_3 твердосплавных пластин с покрытием CVD и аэродинамическим звуковым упрочнением при фрезеровании стали 45 (× – произошел скол)

Fig. 1. Dependences of rear surface wear h_3 for carbide inserts with CVD coating and aerodynamic sound hardening during milling of steel 45 (x – cleavage occurred)

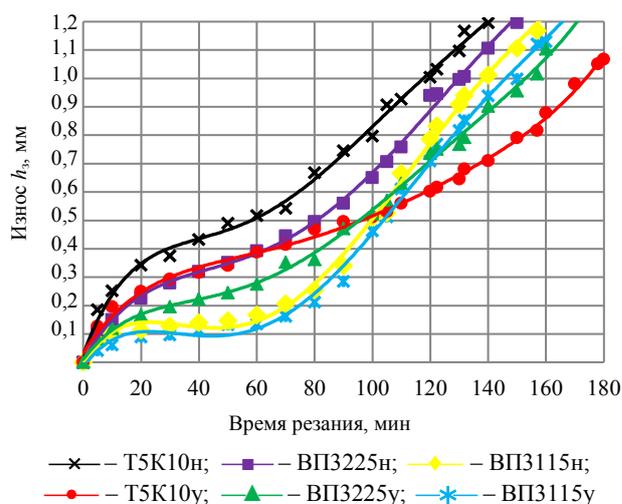


Рис. 2. Зависимости износа по задней поверхности h_3 твердосплавных пластин с покрытием CVD и аэродинамическим звуковым упрочнением при фрезеровании стали 45 в виде полинома 5-й степени

Fig. 2. Dependences of rear surface wear h_3 for carbide inserts with CVD coating and aerodynamic sound hardening during milling of steel 45 in the form of degree-five polynomial

Согласно табл. 1, экспериментальные результаты с высокой долей достоверности аппроксимации описаны принятыми линиями тренда. Величины погрешностей не превышают 2 %, о чем свидетельствуют коэффициенты R^2 .

Таблица 1

Формулы для исследуемых сплавов, описывающие кривые тренда, представленные на рис. 2, и величины достоверности их аппроксимации в виде коэффициента R^2

Formulas for the studied alloys describing trend curves presented in Fig. 2 and reliability values of their approximation in the form of coefficient R^2

Сплав	Формула кривой тренда	R^2
T5K10н	$h_3 = 0,0000000001\tau^5 - 0,00000007\tau^4 + 0,00001\tau^3 - 0,0008\tau^2 + 0,0278\tau + 0,029$	0,9895
T5K10у	$h_3 = 0,0000000004\tau^5 - 0,00000002\tau^4 + 0,000004\tau^3 - 0,0003\tau^2 + 0,0159\tau - 0,0337$	0,9966
ВП3225н	$h_3 = 0,0000000004\tau^5 - 0,00000002\tau^4 + 0,000005\tau^3 + 0,000418\tau^2 + 0,018\tau + 0,00077$	0,9978
ВП3225у	$h_3 = 0,0000000007\tau^5 - 0,00000003\tau^4 + 0,000005\tau^3 - 0,0004\tau^2 + 0,0136\tau + 0,01068$	0,9978
ВП3115н	$h_3 = 0,0000000001\tau^5 - 0,00000006\tau^4 + 0,00001\tau^3 - 0,0006\tau^2 + 0,0167\tau + 0,0056$	0,9976
ВП3115у	$h_3 = 0,0000000001\tau^5 - 0,00000005\tau^4 + 0,000009\tau^3 - 0,0006\tau^2 + 0,0144\tau - 0,0168$	0,9973

Анализ графических зависимостей (рис. 1) показывает, что износ пластин, упрочненных АДУ, после 100 мин резания меньше износа своих неупрочненных аналогов. Так, при 120 мин резания износ по задней поверхности h_3 для базовых пластин T5K10н составляет 1,02 мм, в то время как для пластин T5K10у, упрочненных АДУ, – 0,60 мм, что в 1,7 раза меньше. Для неупрочненных пластин ВП3225н износ $h_3 = 0,89$ мм, а для пластин, упрочненных АДУ, 0,70 мм, что в 1,27 раза меньше. Для неупрочненных пластин ВП3115н износ h_3 составляет 0,78 мм, а для пластин ВП3115у – на 11,5 % меньше.

Представленные в табл. 1 зависимости, описываемые полиномом 5-й степени, являются громоздкими и неудобными для практического применения. Предлагается упростить экспериментальные зависимости и представить их в виде полинома 2-й степени. Результаты в гра-

фическом виде представлены на рис. 3, а в виде эмпирических зависимостей – в табл. 2.

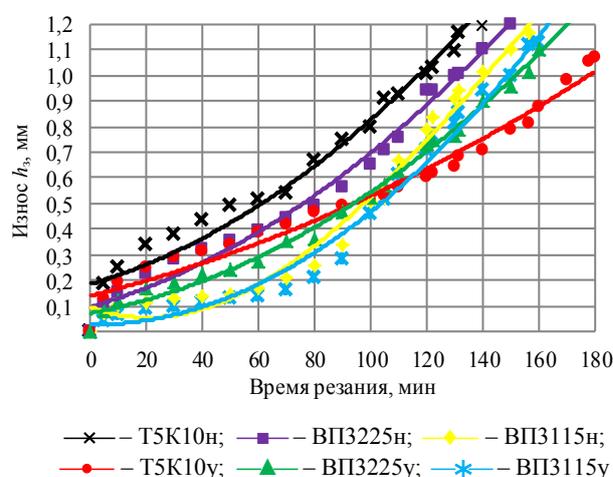


Рис. 3. Зависимости износа по задней поверхности h_3 твердосплавных пластин с покрытием CVD и аэродинамическим звуковым упрочнением при фрезеровании стали 45, аппроксимированные полиномом 2-й степени (× – произошел скол)

Fig. 3. Dependences of rear surface wear h_3 for carbide inserts with CVD coating and aerodynamic sound hardening during milling of steel 45, approximated by a polynomial of the 2nd degree (× – cleavage occurred)

Таблица 2

Формулы для исследуемых сплавов, описывающие кривые тренда, представленные на рис. 3, и величины достоверности их аппроксимации в виде коэффициента R^2

Formulas for the studied alloys describing trend curves presented in Fig. 3 and reliability values of their approximation in the form of coefficient R^2

Сплав	Формула кривой тренда	R^2
T5K10н	$h_3 = 0,00005\tau^2 + 0,0032\tau + 0,1863$	0,9739
T5K10у	$h_3 = 0,00005\tau^2 + 0,0027\tau + 0,1412$	0,9726
ВП3225н	$h_3 = 0,00005\tau^2 + 0,0032\tau + 0,0971$	0,9889
ВП3225у	$h_3 = 0,00005\tau^2 + 0,002\tau + 0,073$	0,9945
ВП3115н	$h_3 = 0,00005\tau^2 - 0,0002\tau + 0,0533$	0,9845
ВП3115у	$h_3 = 0,00004\tau^2 + 0,00003\tau + 0,0263$	0,9865

Результаты величин достоверности аппроксимации (табл. 2), характеризующиеся коэффициентом R^2 , показывают, что погрешность описания зависимостей износа по задней поверхности для твердосплавных пластин от

времени резания в виде полинома 2-й степени составляет не более 3 %, что является достаточно высоким уровнем точности и достоверности.

Следует отметить, что чем выше у твердосплавных пластин предел прочности при изгибе, тем меньше влияние метода АДУ на улучшение свойств по стойкости. Так, с учетом того, что для основы ВК8 предел прочности при изгибе составляет 1666 МПа, а для основы Т5К10 – 1421 МПа, снижение износа после воздействия метода АДУ для пластин ВП3115 – 11,5 %, в то время, как для пластин ВП3225 – 27,1 %. Исходя из анализа зависимостей, представленных в табл. 1 и 2, износ неупрочненных пластин более зависим от времени резания, чем пластин, упрочненных методом АДУ, на что указывают эмпирические коэффициенты при времени резания τ в первой степени, которые значительно больше. Так, коэффициент при времени резания τ в первой степени для пластины Т5К10н равен 0,0278, а для Т5К10у – 0,0159, что на 74,8 % больше. Соответственно превышение таких коэффициентов для пластин ВП3225 составляет 38,5 %, для ВП3115 – 16,0 %.

В зоне устоявшегося резания (от 20 до 90–100 мин) лучшие показатели по стойкости пластин наблюдаются у сплавов ВП3115у и ВП3115н, средние значения износа у пластин ВП3225у, Т5К10у и ВП3225н, а наибольший износ у Т5К10. Такое поведение пластин ВП3115у и ВП3115н объясняется комбинированным действием свойств, заложенных в них. Так, покрытие CVD, являясь весьма твердым и износостойким, снижает адгезионный износ, а основа, состоящая из сплава ВК, достаточно хорошо держит ударные нагрузки. Для пластин ВП3225у, ВП3225н и Т5К10у, основу которых составляет сплав ТК, хуже воспринимающий ударные нагрузки по сравнению с ВК, износостойкость на среднем уровне обеспечивается в основном за счет преобладающего влияния покрытия для сплавов ВП3225у, ВП3225н или упрочнения методом АДУ – для Т5К10у. Неупрочненная пластина Т5К10 не имеет преимуществ по заданным свойствам по сравнению с другими пластинами, участвующими в данном опыте, поэтому и показывает наихудшие результаты.

Следует отметить, что время обработки, при котором начинается критический износ у пластин, кроме Т5К10, примерно одинаковое и соответствует времени резания, примерно равному 60–70 мин.

Если взять за критерий критического износа величину износа по задней поверхности $h_3 = 1,0$ мм, то наименьшую стойкость, равную 118 мин, обеспечивает пластина Т5К10н без покрытия и без упрочнения методом АДУ. Далее стойкости пластин ВП3225н, ВП3115н, ВП3115у, ВП3225у и Т5К10у повышаются в следующем порядке: 130, 140, 147, 154 и 175 мин соответственно. Исходя из этого можно сделать вывод, что покрытие на пластинах не обладает преобладающим значением при работе инструмента с ударными нагрузками. Для работы с ударными нагрузками наибольшее влияние на повышение стойкости оказывает вязкость внутренней структура пластины.

Таким образом, при процессах прерывистого резания со значительными ударными нагрузками твердосплавные пластины, упрочненные методом АДУ, показывают большую эффективность по сравнению с пластинами с износостойкими покрытиями, причем не только по стойкостным показателям их работы, но и по себестоимости самой доработки.

В промышленности постоянно появляются новые твердосплавные металлорежущие пластины, которые производитель характеризует как наиболее эффективные. Твердосплавные пластины марки VH5912 представляют собой твердый сплав с PVD-покрытием и рекомендуются для токарной и фрезерной обработки сталей групп обрабатываемости P20–P40. Пластины VH5912 обладают повышенной износостойкостью.

На рис. 4 представлены экспериментальные кривые износа по задней поверхности h_3 от времени резания для режущих пластин Т5К10у, VH5912у, упрочненных методом АДУ, и неупрочненных Т5К10н, VH5912н, Т5К10жн, Т5К10чн в виде экспериментальных замеров износа и эмпирических кривых тренда, аппроксимированных в виде полинома 5-й степени. В табл. 3 приведены степенные зависимости, описывающие кривые тренда, изображенные

на рис. 4, а также величины достоверности их аппроксимации в виде коэффициента R^2 .

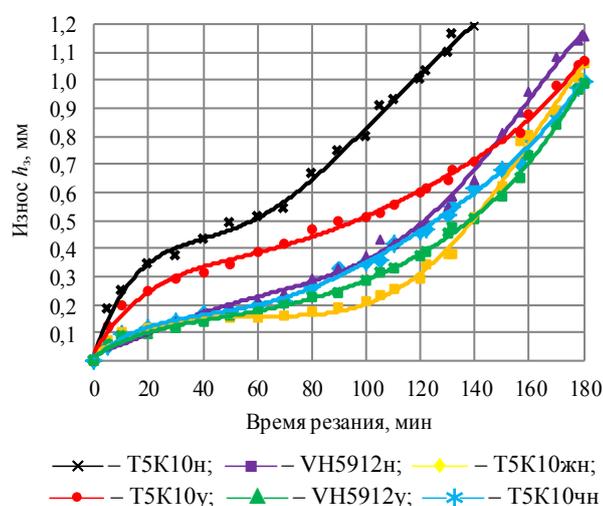


Рис. 4. Зависимости износа по задней поверхности h_3 твердосплавных пластин с покрытием CVD ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» и пластин ООО «Вириал» с аэродинамическим звуковым упрочнением при фрезеровании стали 45, аппроксимированные полиномом 5-й степени

Fig. 4. Dependences of rear surface wear h_3 for carbide inserts with CVD coating made by State Scientific Institution "Physical-Technical Institute" of the National Academy of Sciences of Belarus and LLC "Virial" plates with aerodynamic sound hardening during milling of steel 45, approximated by a polynomial of degree 5

Как видно из табл. 3, экспериментальные результаты с высокой долей достоверности аппроксимируются линиями тренда в виде полинома 5-й степени; величины коэффициентов R^2 , изменяющиеся в диапазоне 0,9895–0,9982, не превышают 2%-й достоверности.

Пластины VH5912у, упрочненные методом АДУ (рис. 4), имеют на всем протяжении кривой износ меньше износа неупрочненных аналогов VH5912н. Например, при 160 мин резания износ пластины VH5912у составляет 0,77 мм, а VH5912н – 0,94 мм, что меньше в 1,22 раза. Показатели по износу пластины VH5912у, упрочненной АДУ, также лучше, чем пластины T5K10у, упрочненной АДУ. Это происходит благодаря тому, что VH5912 имеет более низкую дисперсность структуры и более высокий предел прочности при изгибе, чем T5K10. Согласно табл. 4, износ неупрочненных пластин более зависим от времени резания, чем износ пластин, упрочненных методом АДУ.

Так, эмпирические коэффициенты при времени τ с первой степенью, равные для пластин VH5912н и T5K10н соответственно 0,0278 и 0,0058, больше, чем данные характеристики упрочненных методом АДУ пластин: для VH5912у – 0,0159, для T5K10н – 0,0027.

Таблица 3

Формулы для исследуемых сплавов, описывающие кривые тренда, представленные на рис. 4, и величины достоверности их аппроксимации в виде коэффициента R^2

Formulas for the studied alloys describing trend curves presented in Fig. 4 and reliability values of their approximation in the form of coefficient R^2

Сплав	Формула кривой тренда	R^2
T5K10н	$h_3 = 0,0000000001\tau^5 - 0,00000007\tau^4 + 0,00001\tau^3 - 0,0008\tau^2 + 0,0278\tau + 0,029$	0,9895
T5K10у	$h_3 = 0,0000000004\tau^5 - 0,00000002\tau^4 + 0,000004\tau^3 - 0,0003\tau^2 + 0,0159\tau - 0,0337$	0,9966
VH5912н	$h_3 = 0,0000000004\tau^5 + 0,00000002\tau^4 - 0,000002\tau^3 + 0,00008\tau^2 + 0,0058\tau + 0,0262$	0,9968
VH5912у	$h_3 = 0,0000000003\tau^5 - 0,00000002\tau^4 + 0,000003\tau^3 - 0,0002\tau^2 + 0,0027\tau - 0,0102$	0,9979
T5K10жн	$h_3 = 0,0000000004\tau^5 + 0,00000001\tau^4 + 0,000001\tau^3 - 0,00002\tau^2 + 0,0048\tau + 0,0304$	0,9958
T5K10чн	$h_3 = 0,0000000002\tau^5 - 0,000000008\tau^4 + 0,000001\tau^3 - 0,0001\tau^2 + 0,0063\tau - 0,0163$	0,9982

Если произвести сравнение по износу пластин с покрытием, таких как VH5912у, T5K10жн, T5K10чн, то, как видно из рис. 4, они ведут себя практически одинаково. Это можно объяснить тем, что PVD-покрытия, нанесенные в ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» и ООО «Вириал», имеют практически одинаковый технологический уровень.

ВЫВОДЫ

1. Получены эмпирические зависимости износа по задней поверхности твердосплавных металлорежущих пластин, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, и пластин с PVD-покрытиями – в виде аппроксима-

ции полиномами 5-й и 2-й степеней, которыми удобно пользоваться в производственных условиях.

2. Достоверность аппроксимации экспериментальных и трендовых кривых составляет не менее 97 %, что указывает на высокую степень их точности и достоверности.

3. Установлено, что износ пластин, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, после 100 мин резания меньше износа своих неупрочненных аналогов в 1,12–1,7 раза.

4. Выявлено, что чем выше у твердосплавных пластин предел прочности при изгибе, тем меньше влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на повышение износостойкости. Так, с учетом того, что для основы ВК8 предел прочности при изгибе составляет 1666 МПа, а для основы Т5К10 – 1421 МПа, снижение износа после упрочнения аэродинамическим звуковым методом для пластин ВП3115 с основой ВК составляет 11,5 %, в то время как для ВП3225 с основой ТК – 27,1 %.

5. Следует отметить, что в зоне устоявшегося резания (от 20 до 90–100 мин) лучшие показатели по стойкости пластин наблюдаются у сплавов ВП3115у (основа ВК, покрытие PVD, упрочнение АДУ) и ВП3115н (основа ВК, покрытие PVD, без АДУ), средние значения износа – у пластин ВП3225у (основа ТК, покрытие PVD, упрочнение АДУ), Т5К10у (без покрытия, упрочнение АДУ) и ВП3225н (основа ТК, покрытие PVD, без АДУ), наименьшая стойкость – у Т5К10 без АДУ. Такое поведение пластин ВП3115у и ВП3115н объясняется комбинированным действием свойств, заложенных в них. Например, покрытие CVD, являясь весьма твердым и износостойким, снижает адгезионный износ, а основа, состоящая из сплава ВК, достаточно хорошо держит ударные нагрузки. Для пластин ВП3225у, ВП3225н и Т5К10у, основу которых составляет сплав ТК, хуже воспринимающий ударные нагрузки по сравнению с ВК, износостойкость на среднем уровне обеспечивается в основном за счет преобладающего влияния покрытия для сплавов ВП3225у, ВП3225н или упрочнения методом АДУ – для Т5К10у. Неупрочненная пластина Т5К10 не имеет преимуществ по заданным свойствам

по сравнению с другими пластинами, участвующими в данном опыте, поэтому и показывает наихудшие показатели.

6. Время обработки, при котором начинается критический износ у всех пластин, кроме Т5К10, примерно одинаковое (60–70 мин).

7. Покрытие на металлорежущих твердосплавных пластинах не носит преобладающего значения при работе инструмента с ударными нагрузками. Для работы с ударными нагрузками наибольшее влияние на повышение стойкости оказывает вязкость внутренней структуры пластины.

8. При процессах прерывистого резания со значительными ударными нагрузками твердосплавные пластины, упрочненные методом аэродинамического звукового упрочнения, показывают большую эффективность по сравнению с пластинами с износостойкими покрытиями, причем не только по стойкостным показателям их работы, но и по себестоимости самой обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ аэродинамического упрочнения изделий: пат. 21049 Респ. Беларусь; МПК С21D8/00 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головкин; дата публ. 30.06.2017.
2. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. Могилев: МГУП, 2019. 213 с.
3. Жигалов, А. Н. Прогрессивные технологии для процессов резания с ударами / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // Прогресивні технології машинобудування: матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф. Львів–Карпати, 5–10 лют. 2018 р. С. 47–49.
4. Шелег, В. К. Инновации при создании метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27–28 мая 2019 г. / Брест: Изд-во БрГТУ, 2019. С. 51–54.
5. Жигалов, А. Н. Алгоритм энергообмена при температурно-волновом воздействии метода аэродинамического звукового упрочнения / А. Н. Жигалов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы пятой Междунар. науч.-практ. конф., 16–17 мая 2019 г., Минск, М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т прикладной физ. проблем им. А. Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та. Минск, 2019. С. 178–180.

6. Шелег, В. К. Экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик при аэродинамическом звуковом упрочнении твердых сплавов / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 1. С. 11–20. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-11-20>.
7. Шелег, В. К. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из стали / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // Горная механика и машиностроение. 2019. № 3. С. 56–65.
8. Жигалов, А. Н. Влияние износа твердых сплавов, упрочненных аэродинамическим воздействием, на шероховатость обработанной поверхности при фрезерно-карусельном резании / А. Н. Жигалов // Вестник Белорусско-Российского университета. 2017. Т. 56, № 3. С. 5–15.
9. Жигалов, А. Н. Влияние аэродинамического звукового упрочнения на предел прочности при изгибе и твердость твердых сплавов / А. Н. Жигалов, А. А. Жолобов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 26–27 апр. 2018 г., Белор.-Рос. ун-т. Могилев: Белор.-Рос. ун-т., 2018. С. 131–132.
10. Табаков, В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания / В. П. Табаков, Д. И. Сагитов. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 179 с.
- Поступила 12.03.2020
Подписана в печать 19.05.2020
Опубликована онлайн 30.07.2020
- REFERENCES
- Jigalov A. N., Shaturov G. F., Golovkov V. M. (2017) *Method of Aerodynamic Hardening of Products: Patent No 21049 Republic of Belarus* (in Russian).
 - Jigalov A. N., Sheleg V. K. (2019) *Theoretical Foundations of Aerodynamic Sound Hardening of Carbide Tools for Intermittent Cutting*. Mogilev, Mogilev State University of Food Technologies. 213 (in Russian).
 - Jigalov A. N., Sheleg V. K. (2018) Advanced Technology for Impact Cutting. *Progresivni Tekhnologii Mashinobuduvanni: Materialy VII Mizhnar. Nauk.-Tekhn. Konf., L'viv-Karpaty, 5–10 Lyutogo 2018 r.* [Advanced Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of VII International Scientific and Technical Conference, Lviv-Karpaty, Febr. 5–10, 2018], 47–49 (in Russian).
 - Sheleg V. K., Jigalov A. N. (2019) Innovations in Creating the Method of Aerodynamic Sound Hardening of Carbide Tools. *Novye Tekhnologii i Materialy, Avtomatizatsiya Proizvodstva: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Brest, 27–28 Maya 2019 g.* [New Technologies and Materials, Automation of Production Process: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Brest, May 27–28, 2019]. Brest, Brest State Technical University, 51–54 (in Russian).
 - Jigalov A. N. (2019) Energy Exchange Algorithm for Temperature-Wave Exposure by the Method of Aerodynamic Soundhardening. *Prikladnye Problemy Optiki, Informatiki, Radiofiziki i Fiziki Kondensirovannogo Sostoyaniya: Materialy Pyatoi Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., 16–17 Maya 2019 g.* [Applied Problems of Optics, Informatics, Radio-physics and Physics of Condensed State: Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference, May 16–17, 2019]. Minsk, 178–180 (in Russian).
 - Sheleg V. K., Jigalov A. N. (2019) Experimental Determination of Amplitude-Frequency Characteristics in Response to Sound Strengthening of Hard Alloys. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 18 (1), 11–20 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-11-20>.
 - Sheleg V. K., Jigalov A. N. (2019) Investigation of the Influence of Method for Aerodynamic Sound Hardening on Wear of Carbide Tools During Milling of Steel Material. *Gornaya Mekhanika i Mashinostroyeniye = Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*, (3), 56–65 (in Russian).
 - Jigalov A. N. (2017) Effect of Wear of Hard Alloys Hardened by Aerodynamic Method on the Surface Roughness During Milling and Rotary Cutting. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], 56 (3), 5–15 (in Russian).
 - Jigalov A. N., Zholobov A. A. (2018) Effect of Aerodynamic Sound Hardening on Flexural Strength and Hardness of Hard Alloys. *Materialy, Oborudovanie i Resursosberegayushchie Tekhnologii: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., 26–27 Apr. 2018 g.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, April 26–27, 2018]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 131–132 (in Russian).
 - Tabakov V. P., Sagitov D. I. (2015) *Performance of Cutting Tools with Wear-Resistant Coatings in Tight Cutting Conditions*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University. 179 (in Russian).
- Received: 12.03.2020
Accepted: 19.05.2020
Published online: 30.07.2020

Классификация методов формообразования и синтез на ее основе схем обработки профильных моментопередающих поверхностей

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,
магистр техн. наук А. А. Данилов¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Дана характеристика известных классификаций методов формообразования поверхностей в машиностроении при механической и физико-технической обработке, согласно которым метод формообразования поверхности рассматривается как сочетание методов формирования ее производящих линий – образующей и направляющей – при условии, что темп генерации образующей выше, чем направляющей. Показаны преимущества построения классификации и формализованного описания методов формообразования поверхностей; каждый из них представляет сочетание методов формирования поверхности в поперечном сечении и по длине независимо от скорости генерации образующей и направляющей линий. Это повышает информативность описания метода формообразования, что важно для сравнения методов формообразования поверхностей и синтеза схем их обработки при функциональном проектировании станка. Отмечена целесообразность введения, по сравнению с известной классификацией А. А. Федотенка, в множество базовых методов формирования производящих линий (копированием, следом, касанием и обкатом) методов огибания, прерывистого следа и прерывистого обката, а также комбинированных, объединяющих преимущества образующих их базовых методов, что расширяет возможности синтеза прогрессивных схем обработки профильных поверхностей. Исходя из расширенного множества базовых методов и принятого принципа представления методов формообразования профильных поверхностей разработана их классификация как основа систематизации известных и синтеза возможных методов формообразования. Рассмотрены примеры синтеза на базе предложенной классификации рациональных методов формообразования, а на их основе – прогрессивных схем обработки профильных моментопередающих поверхностей. В частности, использование метода огибания вместо применяемого метода обката позволяет существенно упростить конструкцию инструмента, повысить его универсальность и точность формообразования моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело.

Ключевые слова: профильная поверхность, производящие линии, методы формообразования и обработки, формализованное описание, синтез, классификация, реализация на станках, треугольник Рело

Для цитирования: Пантелеенко, Ф. И. Классификация методов формообразования и синтез на ее основе схем обработки профильных моментопередающих поверхностей / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 280–287. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-280-287>

Classification of Formation Methods and Synthesis of Schemes for Processing Profile Moment-Transmitting Surfaces Based on the Classification

F. I. Panteleenko¹⁾, A. A. Danilov¹⁾

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

Abstract. The paper presents characteristics of the known classifications of surface shaping methods in mechanical engineering during mechanical and physical-technical processing; according to the classifications a surface shaping method is considered

Адрес для переписки

Пантелеенко Федор Иванович
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

Panteleenko Fedor I.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-71
Niil_svarka@bntu.by

as a combination of methods for generating its producing lines – generatrix and guide – provided that the generation rate of the generatrix is higher than the guide. The advantages of constructing a classification and a formalized description of surface shaping methods have been shown in the paper; each of them represents a combination of surface formation methods in cross section and in length, regardless of generation speed for generatrix and guide lines. This increases information content of the description for a shaping method which is important for comparing methods of shaping surfaces and synthesis of schemes for their processing in the functional design of the machine. The paper has revealed the fact that in comparison with the well-known classification of A. A. Fedotenka it is an expedient to introduce methods of bending, intermittent track and intermittent rolling, as well as combined methods combining advantages of their basic methods which expand the synthesis of progressive processing schemes for profile surfaces. The introduction of the methods has been made in many basic methods of generating production lines (copying, following, touching and rolling). Based on the expanded set of basic methods and the accepted principle of presenting the methods of shaping profile surfaces, their classification has been developed as the basis for systematization and synthesis of known and possible shaping methods. The paper considers examples of rational shaping method synthesis based on the proposed classification and progressive processing schemes for profile moment-transmitting surfaces on the basis of synthesis examples. In particular, the use of an envelope method instead of the applied rolling method has made it possible to simplify significantly a tool design, to increase its versatility and accuracy in formation of moment-transmitting surfaces with a profile in the form of a Relo triangle.

Keywords: profile surface, production lines, shaping and processing methods, formalized description, synthesis, classification, implementation on machines, Relo triangle

For citation: Panteleenko F. I., Danilov A. A. (2020) Classification of Formation Methods and Synthesis of Schemes for Processing Profile Moment-Transmitting Surfaces Based on the Classification. *Science and Technique*. 19 (4), 280–287. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-280-287> (in Russian)

Введение

Анализ известных и возможных методов формообразования и кинематических схем обработки профильных моментопередающих поверхностей (ПМП), учитывая их многообразие, должен базироваться на единой основе, которой является теория формообразования поверхностей. В разработку такого подхода существенный вклад внесли: академики Г. И. Грановский [1] и Е. Г. Коновалов [2]; профессора А. И. Голембиевский [3], Б. А. Перепелица [4], Н. Н. Попок [5], С. П. Радзевич [6], П. Р. Родин [7], А. А. Федотенок [8] и другие ученые. Известные научные положения в рассматриваемой области должны применяться и дополняться с учетом решаемых задач, что относится, в частности, к методам формообразования и обработки ПМП.

Актуальность решения этой задачи обусловлена необходимостью систематизации множества известных и возможных методов формообразования ПМП для их анализа, выбора или синтеза рациональных. Это позволит оценивать различные методы с общих позиций, характеризующих их возможности по универсальности, точности и производительности формообразования, сложности реализации и по другим признакам, важным для выбора рационального метода решения конкретной задачи [9]. Мето-

дологической основой ее решения является положение теории формообразования поверхностей, согласно которому метод формообразования поверхности определяется сочетанием методов формирования ее производящих линий – образующей и направляющей [2, 8].

Характеристика известных классификаций методов формообразования поверхностей

В соответствии с моделью формообразования, разработанной А. А. Федотенком, каждая из производящих линий поверхности может быть образована методами копирования (Кп), следа (Сл), касания (Кс) и обката (Об), которые положены в основу предложенной им классификации методов формирования поверхностей в машиностроении [8]. Классификация Е. Г. Коновалова [2] учитывает характер формирования производящих линий во времени (единовременный Е, непрерывный Н, прерывистый П) при условии, что темп формирования образующей выше, чем направляющей.

Основанные на этих моделях известные схемы формализованного представления методов формообразования поверхностей отражают возможные сочетания указанных методов генерации производящих линий. В обеих классификациях принято, что на первом месте в обозна-

чении метода формообразования поверхности указывается метод формообразования линии, осуществляемый с большей скоростью, независимо от того, к какой производящей линии поверхности он относится – к профилю (поперечному сечению) или к линии, определяющей форму поверхности по длине, например Кп–Сл, Кп–Кс – для геометрических схем или соответственно Е–Н, Е–П – для временных схем формообразования.

Такое представление метода формообразования поверхности недостаточно информативно, поскольку одно его обозначение без графического изображения не дает представления о схеме обработки. Например, обозначение Кп–Сл одинаково для различных технологических методов обработки некруглых поверхностей – протягивания отверстия и точения методом врезания. В этой связи применительно к некруглой цилиндрической или конической поверхности метод ее формообразования предпочтительно рассматривать как сочетание методов ее профилирования в сечении, перпендикулярном оси поверхности, и формирования ее по длине [5] независимо от скорости их генерации. В данном случае формообразование поверхности протягиванием обозначается как Кп–Сл, а точением – как Сл–Кп. При таком представлении метода формообразования поверхности однозначно задаются методы формирования обеих ее производящих линий, что необходимо для синтеза схем их обработки и проектирования кинематики станка. При этом целесообразно рассматривать не только базовые, но и комбинированные методы формообразования производящих линий [10].

Особенности предлагаемой классификации методов формообразования поверхностей

Известная классификация методов формообразования поверхностей в машиностроении [8] не учитывает возможность дискретного формирования производящих линий методами прерывистого следа Слⁿ и прерывистого обката Обⁿ. При формировании профиля поверхности этими методами, а ее формы по длине – базовыми методами следа, касания и обката образуются

следующие возможные методы формообразования ПМП: Слⁿ–Слⁿ, Слⁿ–Кс, Слⁿ–Об (Слⁿ – непрерывный след). Таким образом, дополнительные указанными методами известной классификации методов формообразования поверхностей расширяет их множество, что может быть основой синтеза новых схем обработки ПМП. С этой же целью целесообразно включить в классификацию комбинированные методы формирования производящих линий поверхности, основанные на сочетании базовых методов, что позволит объединить их преимущества. Например, формирование по длине (направляющей) некруглой цилиндрической поверхности комбинированным методом Кп + Сл, реализуемым при точении резцом с прямолинейной переходной режущей кромкой, исключает без введения дополнительных движений образование гребней (не срезанной части припуска), характерных для формообразования направляющей методом следа.

Далее в базовые методы формообразования производящих линий (копирования, следа, касания и обката), на которых основана классификация [8], следует ввести метод огибания (Ог), где производящая линия номинальной поверхности представляет собой огибающую множества вспомогательных линий – положений режущей кромки инструмента [5]. При круговой форме режущей кромки линия формируется методом огибания при перемещении центра окружности, ограничивающей режущую кромку, вдоль линии, эквидистантой образуемой линии. Так формируется, например, образующая криволинейной поверхности вращения при ее точении резцом с круговой режущей кромкой.

Метод огибания отличается от метода обката тем, что форма режущей кромки инструмента не зависит от параметров формируемой линии. Это упрощает реализацию метода обработки и повышает универсальность режущего инструмента, так как одним производящим элементом, например окружностью, можно формировать разные поверхности.

При методе же обката форма режущей кромки определяется геометрией формируемой линии, поскольку в процессе обработки этим методом на станке воспроизводится относи-

тельное перемещение двух аксоидов [7], форма и параметры которых зависят от геометрии формируемой поверхности и инструментальной поверхности. Поэтому осуществление метода обката (центроидного огибания) зачастую связано с применением инструмента с криволинейными режущими кромками переменной кривизны, например специального долбяка для обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело [11], вследствие чего усложняется реализация метода обработки и повышается себестоимость изделия.

При замене метода обката методом огибания существенно упрощается форма производящих элементов инструмента, например криволинейные режущие кромки переменной кривизны можно заменить прямолинейными или круговыми, что позволяет оснащать инструмент сменными многогранными или круглыми режущими пластинками. На этом основаны но-

вые способы обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежных станках [12].

Профилирование ПМП в общем случае возможно методом копирования, который широко применяется для обработки некруглых отверстий. Учитывая, что наружные поверхности деталей профильных моментопередающих соединений имеют регулярный профиль, возможно формирование методом копирования не всего профиля поверхности, а только одного из его конгруэнтных участков. В этом случае для формирования всего профиля необходимо движение деления. Такой метод профилирования обозначим $Kп^д$ – копирование с делением. С учетом изложенного на базе классификации методов формообразования поверхностей в машиностроении [8] разработана классификация методов формообразования ПМП (табл. 1).

Таблица 1

Классификация методов формообразования профильных поверхностей и реализующие их технологические методы обработки
Classification of methods for forming profile surfaces and technological processing methods that implement them

		Метод формирования поверхности по длине				
		Кп	Сл	Кс	Об	Комбинированный Кп + Сл
Метод формирования профиля поверхности	Кп	Методы физико-технической обработки	Протягивание Дорнование			Дорнование
	$Kп^д$	Методы физико-технической обработки	Строгание Выглаживание	Фрезерование Шлифование	Накатывание роликом	Выглаживание Суперфиниширование
	$Сл^д$	Точение Выглаживание	Точение Выглаживание			Точение резцом с переходной режущей кромкой
	$Сл^п$	Фрезоточение	Долбление Полигональное точение	Фрезерование Шлифование		Полигональное точение
	Кс	Фрезерование Шлифование	Фрезерование Шлифование	Фрезерование		
	$Об^д$	Накатывание	Обкатное точение Выглаживание	Шлифование червячным кругом	Накатывание шариком	Выглаживание
	$Об^п$		Долбление Выглаживание	Фрезерование червячной фрезой		
	Ог		Долбление Выглаживание	Фрезерование Шлифование	Накатывание шариком, роликом	

Таблица 2

Методы формообразования и реализующие их схемы обработки профильных моментопередающих поверхностей
 Forming methods and schemes for processing profile moment-transmitting surfaces that implement them

Метод формирования поверхности по длине					
	Кл	Сл	Кс	Об	Комбинированный Кл + Сл
Кл					
Кл ^{II}					
Сл ^{II}					
Сл ^{III}					

Метод формирования профиля поверхности

Окончание таблицы 2

		Метод формирования поверхности по длине			
		Кп	Сл	Кс	Об
Метод формирования профиля поверхности	Кп				
	Кс				
	Об				
	Комбинированный Кп + Сл				

Классификация как основа синтеза методов формообразования и схем обработки профильных моментопередающих поверхностей

Синтез метода формообразования ПМП с использованием предложенной классификации включает задание метода формирования ее профиля (выбирается из первого вертикального столбца табл. 1, например, $Сл^п$ или $Об^п$) и метода формирования поверхности по длине (выбирается из верхней строки табл. 1, например, $Сл^п$). Комбинацией методов формирования производящих линий образуется соответствующий метод формообразования, например $Сл^п-Сл^п$, $Об^п-Сл^п$, при этом в отличие от классификаций [2, 8] на первом месте указывается метод формирования профиля поперечного сечения поверхности независимо от скорости его генерации по сравнению со скоростью формообразования поверхности в продольном направлении. Такое представление метода формообразования поверхности предпочтительнее при выборе технологического метода обработки, проектировании станка и инструмента для его реализации.

В табл. 1 для образуемых таким образом методов формообразования ПМП указаны соответствующие им возможные технологические методы обработки (фрезерование, долбление и др.), графическая иллюстрация некоторых из них в виде кинематических схем обработки представлена в табл. 2. Использование при синтезе методов формообразования ПМП указанных выше дополнительных методов формирования производящих линий существенно расширяет множество анализируемых вариантов и возможности синтеза новых методов формообразования.

Например, формирование профиля поверхности методом прерывистого следа $Сл^п$ в сочетании с формированием ее по длине методом непрерывного следа $Сл^п$ положено в основу предложенного способа обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело долблением (метод формообразования $Сл^п-Сл^п$) [12]. Аналогично на сочетании метода профилирования поверхности огибанием и формирования ее по длине методом непрерывного следа (формообразование поверхности методом $Ог-Сл^п$) основан признанный изобретением способ обработки ПМП с таким профилем инструментом с круговыми режущими кромками [12].

Оба способа по сравнению с известным [11], основанным на методе формообразования $Об^п-Сл^п$, реализуются более простыми

режущими инструментами при исключении влияния формы режущих кромок инструмента на геометрию формируемого профиля, что повышает его точность. Эти способы положены в основу технологий обработки поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на универсальном зубодолбежном станке обкатного типа [12].

Таким образом, предложенная классификация, отражая известные и возможные методы формообразования ПМП, является инструментом как систематизации, так и синтеза технологических методов и кинематических схем их обработки.

Следует отметить, что многообразие методов формообразования и кинематических схем обработки ПМП обусловлено типом поверхности изделия (открытая, полукрытая, закрытая [13]) и требованиями к качеству и точности обработки. Например, открытая ПМП с профилем в виде треугольника Рело может быть сформирована высокопроизводительным методом $Кп^п-Кс$, которому, как показано в табл. 1, 2, соответствуют технологические методы обработки фрезерованием и шлифованием. Эти два метода технически просто реализуются на универсальных станках с делительным устройством, например, фрезерованием на горизонтально-фрезерном станке или шлифованием на плоскошлифовальном станке соответствующими фасонными инструментами. В обоих случаях инструментальная поверхность профилируется по окружности, радиус которой равен ширине треугольника Рело.

Обработка же полукрытой поверхности с таким профилем, когда конструкция детали не позволяет применять указанные методы обработки вращающимися инструментами, возможна долблением при профилировании методами обката ($Об$) и огибания ($Ог$) (табл. 1, 2) [12] или круговым точением при формировании поверхности методом двойного следа [14].

ВЫВОДЫ

1. Многообразие известных и возможных методов обработки профильных моментопередающих поверхностей обуславливает актуальность исследований, обеспечивающих систематизацию, анализ и синтез рациональных методов их формообразования как основу прогрессивных технологий обработки таких поверхностей.

2. Предложенная классификация позволяет систематизировать известные методы формо-

образования профильных моментопередающих поверхностей, а также является основой синтеза новых решений. Это достигнуто за счет введения в множество известных базовых методов формообразования производящих линий методов прерывистого следа, огибания, комбинированных и др.

3. Установленные на основе предложенной классификации рациональные методы формообразования профильных моментопередающих поверхностей при профилировании методами прерывистого следа и огибания положены в основу прогрессивной технологии обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело, реализованной на зубодолбежном станке для обработки деталей профильных моментопередающих соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский, Г. И. Кинематика резания / Г. И. Грановский. М.: Машгиз, 1948. 199 с.
2. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки / Е. Г. Коновалов. Минск: Изд-во АН БССР, 1961. 297 с.
3. Голембиевский, А. И. Системология способов формирующей обработки в машиностроении / А. И. Голембиевский. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2017. 236 с.
4. Перепелица, Б. А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием / Б. А. Перепелица. Харьков: Вища шк., Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. 152 с.
5. Попок, Н. Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н. Н. Попок. Минск: Технопринт, 2001. 396 с.
6. Радзевич, С. П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / С. П. Радзевич. Киев: Растан, 2001. 592 с.
7. Родин, П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П. Р. Родин. Киев: Вища шк., 1977. 192 с.
8. Федотенок, А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А. А. Федотенок. М.: Машиностроение, 1970. 403 с.
9. Пантелеенко, Ф. И. Системный анализ и синтез рациональных методов профилирования некруглых поверхностей / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4, № 1. С. 59–64.
10. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. Минск: Наука и техника, 1995. 264 с.
11. Панкратов, П. А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания / П. А. Панкратов. Курск: Юго-Запад. гос. ун-т, 2013. 20 с.
12. Пантелеенко, Ф. И. Обработка моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов, И. К. Карась // Горная механика и машиностроение. 2018. № 4. С. 59–65.
13. Махаринский, Е. И. Основы технологии машиностроения / Е. И. Махаринский, В. А. Горохов. Минск: Вышэйш. шк., 1997. 386 с.
14. Пантелеенко, Ф. И. Анализ и реализация схем формирования профиля поверхности в виде треугольника Рело методом непрерывного следа / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов // Машиностроение: республик. межвед. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2018. Вып. 31. С. 203–212.

Поступила 12.03.2020

Подписана в печать 29.05.2020

Опубликована онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Granovskii G. I. (1948) *Kinematics of Cutting*. Moscow, Mashgiz Publ. 199 (in Russian).
2. Konovalov E. G. (1961) *Fundamentals of New Metalworking Methods*. Minsk, Publishing House of Academy of Sciences of the Belarussian Soviet Socialist Republic. 297 (in Russian).
3. Golembievskii A. I. (2017) *Systemology of Forming Processing Methods in Mechanical Engineering*. Novopolotsk, Polotsk State University. 236 (in Russian).
4. Perepelitsa B. A. (1981) *Mapping of Affine Space in the Theory of Surface Shaping by Cutting*. Kharkov, Vishcha Shkola Publ., Publishing House at Kharkov University. 152 (in Russian).
5. Popok N. N. (2001) *Mobile Reorganization of Mechanical Engineering Production*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 396 (in Russian).
6. Radzevich S. P. (2001) *Surface Shaping of Parts. Foundations of Theory*. Kiev, Rastan Publ. 592 (in Russian).
7. Rodin P. R. (1977) *Fundamentals of Surface Shaping by Cutting*. Kiev, Vishcha Shkola Publ. 192 (in Russian).
8. Fedotenok A. A. (1970) *Kinematic Structure of Machine Tools*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 403 (in Russian).
9. Panteleenko F. I., Danilov A. A. System Analysis and Synthesis of Rational Methods for Profiling Non-Circular Surfaces. *Aktual'nye Problemy v Mashinostroenii = Actual Problems in Machine Building*, 4 (1), 59–64 (in Russian).
10. Danilov B. A. (1995) *Forming Processing of Complex Surfaces by Cutting*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 264 (in Russian).
11. Pankratov P. A. (2013) *Development of Effective Mortising tool for Processing Complex Curved Surfaces by Rolling Method*. Kursk, Southwest State University. 20 (in Russian).
12. Panteleenko F. I., Danilov A. A., Karas I. K. (2018) Processing of Torque-Transmitting Surfaces with a Profile in the Form of a Relo Triangle on a Gear-Shaping Machine. *Gornaya Mekhanika i Mashinostroyenie = Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*, (4), 59–65 (in Russian).
13. Makhariinskii E. I., Gorokhov V. A. (1997) *Fundamentals of Mechanical Engineering Technology*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 386 (in Russian).
14. Panteleenko F. I., Danilov A. A. (2018) Analysis and Implementation of Schemes for Forming A Surface Profile in the Form of a Relo Triangle by Continuous Trace Method. *Mashinostroenie: Respubl. Mezhd. Sb. Nauch. Tr.* [Mechanical Engineering: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarussian National Technical University, (31), 203–212 (in Russian).

Received: 12.03.2020

Accepted: 29.05.2020

Published online: 30.07.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-288-296>

УДК 681.2.084

Влияние режимов электроэрозионного модифицирования изношенной рабочей поверхности стоматологических фрез на восстановление ее режущей способности

Докт. техн. наук, проф. М. Г. Киселев¹⁾,
кандидаты техн. наук С. Г. Монич¹⁾, П. С. Богдан¹⁾,
Д. Л. Корчигин¹⁾, магистрант В. В. Ефименко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Выполнена экспериментальная оценка влияния режимов электроэрозионного модифицирования изношенной рабочей поверхности фрезы на восстановление ее режущей способности. Приведены основные сведения о стоматологических фрезах. Изложены положения методики проведения экспериментальных исследований, включая описание устройства для модифицирования изношенной поверхности стоматологической фрезы и устройства определения ее режущей способности. Представлены и проанализированы экспериментальные данные, отражающие влияние на восстановление режущей способности изношенной поверхности стоматологической фрезы, напряжения накопительного конденсатора и количества наносимых на нее лунок в процессе ее модифицирования. Определены рациональные режимы модифицирования изношенной поверхности стоматологической фрезы, обеспечивающие наибольшее восстановление ее режущей способности. Показано, что с повышением напряжения возрастает энергия электрического разряда, воздействующего на обрабатываемую поверхность, что приводит к формированию на ней единичной лунки большего размера, включая наплывы металла по ее краю, выходящие за исходный контур изношенных зубьев фрезы. Эти наплывы металла на модифицированной поверхности фрезы играют роль своеобразных режуще-деформирующих элементов. Выявлено, что в процессе модифицирования изношенной поверхности фрезы необходимо обеспечивать условие отсутствия перекрытия формируемых на ней лунок, т. е. расстояние между центрами соседних лунок должно быть больше или равно размеру наплывов металла по их краям. В этом случае наплывы металла сохраняют свою первоначальную форму и имеют наибольшую при данных параметрах импульса высоту, благодаря чему обеспечивается более высокая, чем при перекрытии лунок, режущая способность модифицированной поверхности фрезы.

Ключевые слова: стоматологическая фреза, методика проведения экспериментов, модифицирование изношенной поверхности фрезы, восстановление режущей способности фрезы

Для цитирования: Влияние режимов электроэрозионного модифицирования изношенной рабочей поверхности стоматологических фрез на восстановление ее режущей способности / М. Г. Киселев [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 288–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-288-296>

Influence of Electro-Erosive Modification Modes for Worn Working Surface of Dental Cutters on Restoration of its Cutting Ability

M. G. Kiselev¹⁾, S. G. Monich¹⁾, P. S. Bogdan¹⁾, D. L. Korchigin¹⁾, V. V. Efimenko¹⁾

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

Abstract. An experimental assessment has been made of the influence of electro-erosive modification modes for worn working surface of an cutter on the restoration of its cutting ability. The paper provides basic information on dental cutters. The provisions of the experimental research methodology are described, including a description of a device for modifying

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
kipp@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
kipp@bntu.by

the worn surface of a dental cutter and a device for determining its cutting ability. Experimental data are presented and analyzed that reflect an effect on restoration of a cutting ability of a worn surface of a dental cutter, voltage of a storage capacitor and number of holes applied to it during its modification. Rational modes of modifying a worn-out surface of a dental mill that provide the greatest recovery of its cutting ability have been determined in the paper. It has been shown that with increasing voltage, the energy of the electric discharge acting on the treated surface increases, which leads to the formation of a single hole of a larger size on it, including metal flows along its edge that extend beyond the initial contour of the worn cutter teeth. These metal flows on the modified surface of the cutter play the role of peculiar cutting and deforming elements. It has been revealed that in the process of modifying the worn surface of the cutter, it is necessary to ensure that there is no overlap of the holes formed on it, i.e. the distance between the centers of adjacent holes should be greater than or equal to the size of metal deposits at their edges. In this case, the metal flows retain their original shape and have the highest height at these pulse parameters, which ensures a higher cutting ability of the modified cutter surface than when the holes are overlapped.

Keywords: dental cutter, experimental methods, modification of cutter worn surface, restoration of cutter cutting ability

For citation: Kiselev M. G., Monich S. G., Bogdan P. S., Korchigin D. L., Efimenko V. V. (2020) Influence of Electro-Erosive Modification Modes for Worn Working Surface of Dental Cutters on Restoration of its Cutting Ability. *Science and Technique*. 19 (4), 288–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-288-296> (in Russian)

Введение

Стоматологическая фреза представляет собой многолезвийный вращающийся инструмент (рис. 1), используемый для работы стоматологов-ортопедов и зубных техников вне ротовой полости. Она состоит из рабочей части 1 и хвостовика 2, служащего для закрепления фрезы в микромоторе [1, 2].

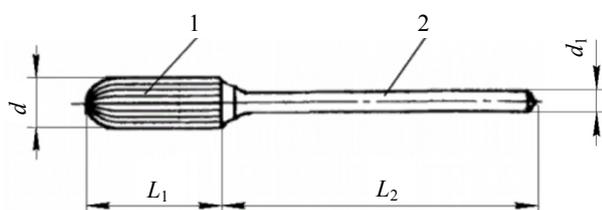


Рис. 1. Основные элементы стоматологической фрезы

Fig. 1. Main elements of dental cutter

Стоматологические фрезы предназначены для работы с прямым наконечником. Хвостовики фрез имеют цилиндрическую форму установленной длины $L_2 = (38 \pm 2)$ мм. Диаметр хвостовика фрезы $d_1 = 2,05$ мм.

По форме рабочей части фрезы подразделяются на цилиндрические, конические, параболические, почкообразные, куполообразные, с продольной, торцевой, поперечной, угловой или комбинированной насечкой, образующей режущие зубья. В зависимости от материала рабочей части фрезы разделяются на стальные, изготавливаемые целиком из быстрорежущей стали P18KФ2, P10K5Ф3, P9K5, и карбидные, рабочая часть которых выполняется из цилин-

дров твердого сплава ВК6М или ВК60М, которые привариваются к хвостовику, изготовленному из стали ШХ15.

Согласно ГОСТ 22090.1–93 «Инструменты стоматологические вращающиеся» для стальных фрез полный установленный ресурс машинного времени должен быть не менее 9 мин, а для твердосплавных – 40 мин. Следует подчеркнуть, что изношенные фрезы, т. е. потерявшие режущую способность, в дальнейшем не используются, а утилизируются.

Вместе с тем, как показали результаты исследований [3–5], эффективным способом придания поверхности режущей способности является ее электроэрозионное модифицирование. Сущность данной операции заключается в управляемом воздействии на обрабатываемую поверхность единичных электрических разрядов, в результате чего на ней образуются лунки, имеющие по краям наплывы (валики) застывшего металла, выходящие за исходный контур поверхности. Именно эти наплывы металла выполняют роль своеобразных режуще-деформирующих элементов, придающих модифицированной поверхности режущую способность, т. е. способность разрушать материалы, уступающие по твердости металлу наплывов. При этом за счет изменения энергии электрического разряда и места его воздействия на обрабатываемую поверхность можно управлять как высотой наплывов металла по краю лунки, так и их расположением на модифицированной поверхности, а соответственно влиять на ее режущую способность [6–9]. Однако сегодня отсутствуют сведения, касающиеся применения электроэро-

зионного модифицирования изношенной поверхности стоматологических фрез с целью восстановления их режущей способности, а соответственно увеличения срока их эксплуатации.

Цель исследований авторов статьи заключалась в экспериментальной оценке влияния режимов электроэрозионного модифицирования изношенной поверхности стоматологических фрез на восстановление их режущей способности.

Методика проведения испытаний

Объектом исследования являлась стальная стоматологическая фреза, предназначенная для работы с прямым стоматологическим наконечником. Исходный диаметр ее цилиндрической рабочей части, на которой выполнены шесть режущих лезвий, составлял 2,05 мм при длине рабочей части 12,50 мм и общей длине фрезы 50,00 мм.

Электроэрозионное модифицирование изношенной рабочей поверхности испытуемой фрезы осуществлялось с помощью специально созданного устройства [5], схема которого представлена на рис. 2.

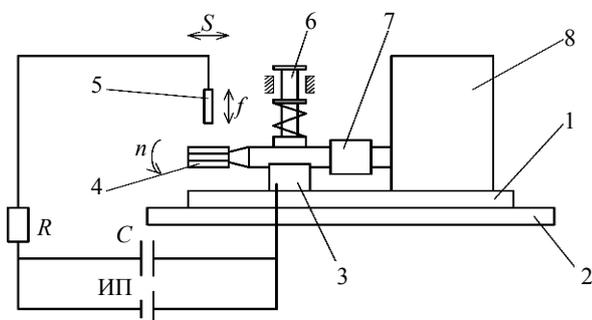


Рис. 2. Принципиальная схема устройства электроэрозионного модифицирования изношенной рабочей поверхности стоматологических фрез

Fig. 2. Schematic diagram of device for electro-erosive modification of worn-out working surface of dental cutters

На стальной плите 1, установленной на диэлектрическом (деревянном) основании 2, смонтирован электродвигатель 8 (ДСМ 2-П-220), с валом которого посредством эластичной муфты 7 соединен хвостовик обрабатываемой фрезы 4. Вал вращается с весьма низкой частотой n , равной 3 мин⁻¹. Хвостовик фрезы установлен в призме 3 и прижимается к ее поверх-

ности с помощью пружинного прижима 6. Электродом-инструментом служит тонкая (толщиной 0,1 мм) стальная пластина 5, которой вручную сообщается периодическое колебательное движение, направленное перпендикулярно изношенной поверхности фрезы. Электрод-инструмент и фреза включены в электрическую цепь, состоящую из источника питания постоянного тока ИП, накопительного конденсатора C и токоограничивающего резистора R . В процессе однократного акта сближения электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью фрезы на расстоянии, соответствующем минимальной величине межэлектродного промежутка (МЭП), между ними протекает электрический разряд, вызывающий формирование на обрабатываемой (изношенной) поверхности фрезы единичной лунки, имеющей по краям наплывы застывшего металла. Электроду-платине сообщается колебательное движение с частотой порядка 1 Гц, при этом в процессе модифицирования за счет его регулируемого перемещения в продольном направлении с подачей S изменялось количество единичных разрядов, воздействующих на обрабатываемую поверхность вращающейся фрезы. Модифицирование осуществлялось при трех значениях напряжения (30, 50 и 70 В) на накопительном конденсаторе емкостью 400 мкФ. При использовании большего напряжения происходит приваривание электрода-платины к поверхности фрезы.

Число лунок, наносимых на изношенную поверхность фрезы, варьировалось от 50 до 450. Использовалась прямая полярность (анодом являлась фреза), и обработка осуществлялась на воздухе без применения диэлектрической жидкости.

Для проведения экспериментальных исследований по определению режущей способности испытуемых фрез применялось устройство, принцип работы которого поясняется схемой, представленной на рис. 3.

Испытуемая фреза 1 закрепляется в сверлильном патроне 2, установленном на валу электродвигателя 3. Последний своей цилиндрической поверхностью с помощью хомутов 4 прижимается к поверхностям призмы 5, закрепленной на массивном основании 6.

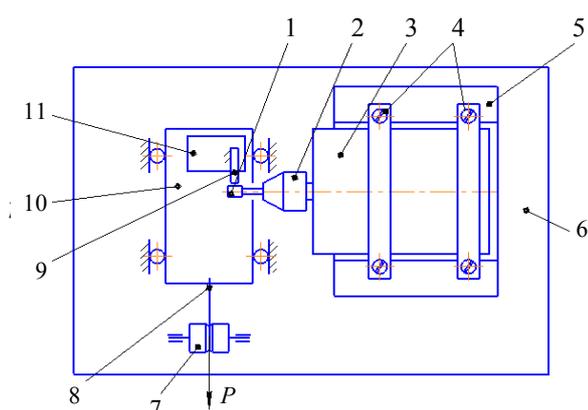


Рис. 3. Схема устройства по определению режущей способности испытуемых стоматологических фрез

Fig. 3. Scheme of device for determining cutting ability of tested dental cutters

Такой способ закрепления электродвигателя позволяет осуществлять необходимые регулировочные перемещения фрезы в осевом направлении перед началом испытаний. Обрабатываемый образец в виде пластины 9 закрепляется в винтовом зажиме 11 таким образом, чтобы его часть (порядка 7–10 мм) из него выступала. Винтовой зажим неподвижно смонтирован на подвижной каретке 10 шариковых направляющих качения, допускающих его перемещение в горизонтальном направлении с минимальным трением. Для создания усилия прижима образца к рабочей части испытуемой фрезы используется тросо-блочная система с аттестованными грузами. Один конец тонкой проволоки 8 прикреплен к подвижной каретке шариковых направляющих, далее проволока проходит через вращающийся в подшипнике качения блок 7, прикрепленный к основанию, а на втором конце проволоки подвешивается аттестованный груз (на рисунке он не показан), масса которого соответствует усилию прижатия образца к испытуемой фрезе.

Положение испытуемой фрезы 1 относительно обрабатываемого образца 2 приведено на рис. 4.

Подлежащие фрезерованию образцы изготавливались из акриловой пластмассы (далее акрила) и двух видов гипса – α -гипса, β -гипса, т. е. из материалов, широко применяемых в ортопедической стоматологии [2].

Во всех экспериментах частота вращения фрезы была постоянной и составляла 3000 мин^{-1} . Также постоянными были продолжительность фрезерования образца (30 с) и статическое усилие прижима фрезы к образцу (4 Н).

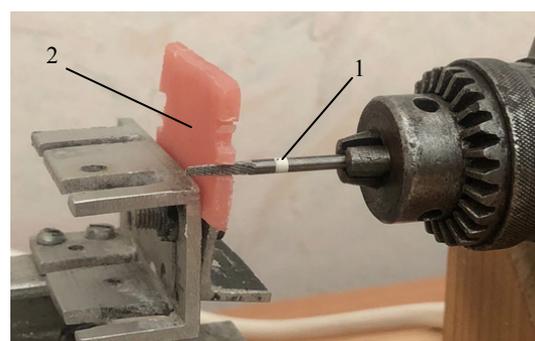


Рис. 4. Фотография положения испытуемой фрезы относительно обрабатываемого образца

Fig. 4. Photograph of tested cutter position relative to processed sample

Режущая способность испытуемой фрезы оценивалась по объему V удаляемого ею материала образца за 30 с фрезерования. Значение V (мм^3) определялось как произведение ширины S профрезерованного паза на образце, его глубины h и толщины образца b

$$V = Shb.$$

Ширина паза S и его глубина h измерялись на малом инструментальном микроскопе ММИ-2, а толщина образца b – с помощью микрометра МК-25-0,01. Им же измерялся диаметр рабочей части фрезы в ее исходном, в затупленном состоянии и после модифицирования затупленной поверхности фрезы. Для получения поверхности фрезы в затупленном состоянии осуществлялось фрезерование ею образца из электрокорунда в течение 30–40 с.

Эксперименты проводились с использованием фрез при трех состояниях их рабочей поверхности: в исходном; в затупленном и после модифицирования изношенной поверхности при различных режимах выполнения этой операции, в частности при разных значениях U и n .

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

На рис. 5 представлена диаграмма зависимости объема V удаленного материала образцов за 30 с их обработки фрезой в исходном и изношенном состояниях рабочей поверхности и после ее модифицирования при разных значениях напряжения U накопительного конденсатора и постоянном количестве наносимых на нее лунок n , равном 150.

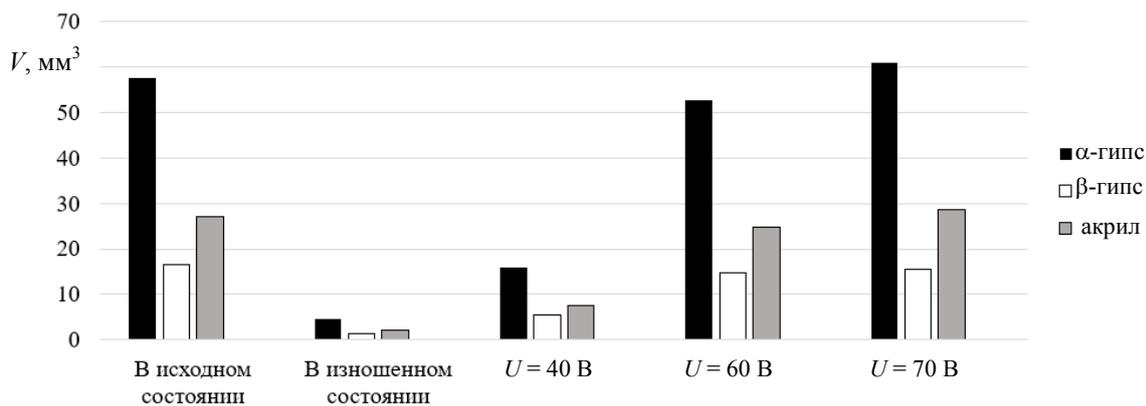


Рис. 5. Диаграмма зависимости объема удаленного материала образцов за 30 с их обработки фрезой в исходном и изношенном состояниях рабочей поверхности и после ее модифицирования при разных значениях U накопительного конденсатора и $n = 150$

Fig. 5. Dependence diagram for removed material volume in samples for 30 s of their processing with mill in initial and worn-out states of working surface and after its modification for different U -values of storage capacitor and $n = 150$

Из сравнительного анализа приведенных данных следует отметить следующие основные положения. Во всех случаях наибольшее значения V наблюдается при обработке α-гипса, существенно меньшее – при обработке акрила, а наименьшее – при обработке β-гипса. Объясняется это тем, что β-гипс имеет наибольшую твердость по сравнению с α-гипсом и акрилом [10]. Применение операции модифицирования изношенной поверхности фрезы приводит к увеличению объема удаляемого ею материала образца, т. е. к повышению ее режущей способности.

С увеличением напряжения U накопительного конденсатора в процессе выполнения модифицирования изношенной поверхности фрезы ее режущая способность при обработке образцов возрастает, т. е. значение V во всех случаях увеличивается.

Для количественной оценки влияния состояния рабочей поверхности испытываемой фрезы (изношенной и модифицированной) на ее режущую способность воспользуемся коэффициентом ее относительной режущей способности $k_{p,c}$, определяемым отношением объема V_M удаленного материала фрезой с изношенной и модифицированной рабочей поверхностью к объему материала $V_{исх}$, удаленного фрезой в ее исходном (заточенном) состоянии, значение которого принимается за 100 %:

$$k_{p,c} = V_M / V_{исх} \cdot 100 \%$$

В табл. 1 приведены рассчитанные значения коэффициента $k_{p,c}$ при обработке образцов фрезой с изношенной поверхностью и модифицированной поверхностью при различных значениях U накопительного конденсатора.

Таблица 1

Значения коэффициента $k_{p,c}$ при обработке образцов фрезой с изношенной и модифицированной поверхностями при различных значениях напряжения
Values of coefficient $k_{p,c}$ during processing of samples with mill having worn-out and modified surfaces at various voltage values

Материал образца	Коэффициент $k_{p,c}$ при обработке образца фрезой, %			
	с изношенной поверхностью	после модифицирования изношенной поверхности при U , В		
		40	60	70
α-гипс	7,8	27,5	91,4	105,7
β-гипс	7,8	32,9	90,3	93,6
Акрил	7,8	27,4	91,4	105,8

Из представленных в табл. 1 данных видно, что при обработке всех материалов фрезой в изношенном состоянии рабочей поверхности коэффициент $k_{p,c}$ имеет постоянное значение, равное 7,8 %. В результате модифицирования поверхности фрезы величина коэффициента $k_{p,c}$ возрастает и тем значительнее, чем выше напряжение U накопительного конденсатора. При обработке гипса и акрила при $U = 70$ В $k_{p,c} > 100$ %, т. е. режущая способность модифицированной поверхности фрезы оказалась

на 5,7 и 5,8 % больше, чем у рабочей поверхности фрезы в исходном (заточенном) состоянии.

Механизм влияния напряжения U накопительного конденсатора на режущую способность модифицированной изношенной поверхности фрезы заключается в следующем. С повышением U возрастает энергия электрического разряда, воздействующего на обрабатываемую поверхность, что приводит к формированию на ней лунки большего размера, включая наплывы металла по ее краю, выходящие за исходный контур изношенных зубьев фрезы. Данное положение наглядно иллюстрируется фотографией единичной лунки 1 (рис. 6), полученной на изношенной поверхности фрезы 3.

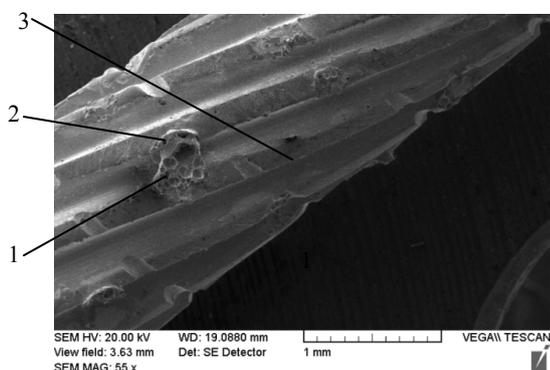


Рис. 6. Фотография единичной лунки, полученной на изношенной поверхности фрезы (увеличение $\times 55$)

Fig. 6. Photograph of single well obtained on worn-out surface of cutter (magnification $\times 55$)

Как видно (рис. 6), по краю лунки располагаются наплывы 2 застывшего металла, часть из которых выступает за контур изношенной поверхности фрезы. В результате эти наплывы на модифицированной поверхности фрезы выполняют роль своеобразных малоразмерных режуще-деформирующих элементов. Поэтому, чем выше энергия разряда, тем больше становится высота наплывов металла (аналог режу-

щего зуба), а соответственно выше режущая способность модифицированной изношенной поверхности фрезы. Данное положение подтверждается результатами измерения диаметра фрезы в исходном и изношенном состояниях и после модифицирования при различных значениях U и при $n = 150$, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Диаметр испытуемой фрезы
при различных состояниях ее рабочей поверхности

Diameter of tested cutter
with different states of its working surface

Рабочая поверхность фрезы	Диаметр d , мм
В исходном состоянии	2,05
В изношенном состоянии	1,92
После модифицирования изношенной поверхности при U , В:	
40	1,97
60	2,03
70	2,08

Из представленных данных следует, что в результате существенного изнашивания режущих зубьев фрезы диаметр ее рабочей части уменьшился на 0,13 мм. После модифицирования изношенной поверхности фрезы ее диаметр увеличился при $U = 40$ В на 0,05 мм, при $U = 60$ В – на 0,11 мм и при $U = 70$ В – на 0,16 мм. В последнем случае ее диаметр составил 2,08 мм, что на 0,03 мм превышает диаметр рабочей части фрезы в исходном состоянии.

На рис. 7 представлены фотографии рабочей части фрезы при различных ее состояниях.

Помимо изменения напряжения U накопительного конденсатора в процессе модифицирования изношенной поверхности фрезы варьировалось количество воздействующих на нее разрядов, т. е. число n получаемых на ней лунок. Влияние этого технологического параметра на восстановление режущей способности испытуемых фрез отражают данные, представленные на рис. 8, которые получены при $U = 70$ В.

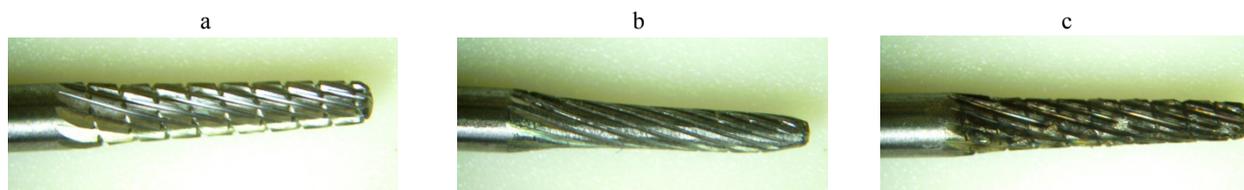


Рис. 7. Фотография рабочей части испытуемой фрезы: а, б – в исходном и изношенном состояниях; с – после электроэрозионного модифицирования изношенной поверхности при $U = 70$ В ($\times 5$)

Fig. 7. Photograph of working part for tested cutter: a, b – in initial and worn-out conditions; c – after electro-erosive modification of worn surface at $U = 70$ V ($\times 5$)

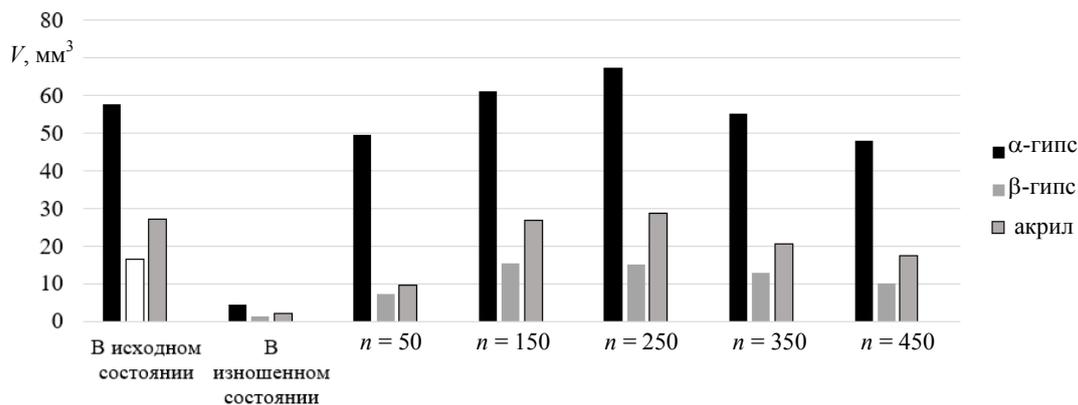


Рис. 8. Диаграмма зависимости объема удаленного материала образцов за 30 с их обработки фрезой в исходном и изношенном состояниях рабочей поверхности и после ее модифицирования при разных значениях n

Fig. 8. Dependence diagram of removed material volume of samples for 30 s of their processing with mill in initial and worn-out states of working surface and after its modification at different values of n

Из анализа экспериментальных данных (рис. 8) следует, что с увеличением n от 50 до 150 значение V для всех обрабатываемых материалов возрастает. С повышением n до 250 значение V для α -гипса и акрила увеличивается, а для β -гипса несколько снижается. При числе лунок на модифицированной поверхности $n = 350$ значение V для всех обрабатываемых материалов уменьшается, и эта тенденция сохраняется с увеличением n до 450. Таким образом, экспериментально установлено, что существует оптимальный диапазон значений n , при котором обеспечивается наибольшая режущая способность модифицированной поверхности изношенной фрезы. В рассматриваемом случае при $U = 70$ В этот диапазон n составляет от 150 до 250.

Механизм влияния количества лунок на изношенной поверхности фрезы на ее режущую способность заключается в следующем. При прочих равных условиях для обеспечения высокой режущей способности необходимо выполнять операцию модифицирования таким образом, чтобы лунки не перекрывали друг друга. В этом случае наплывы металла по краю единичной лунки сохраняют свою первоначальную форму и имеют наибольшую для данных параметров импульса высоту. Для выполнения условия отсутствия их перекрытия необходимо, чтобы расстояние S_n между центрами соседних лунок превышало, а в лучшем случае было равно размеру наплывов металла d_n на модифицирован-

ной поверхности, т. е. $S_n \geq d_n$. Очевидно, в рассматриваемом случае при изменении n от 50 до 250 лунок сохраняется указанное неравенство, а при $n = 250$ оно приближается к равенству, и модифицированная поверхность приобретает наибольшую режущую способность. При $n > 250$ происходит перекрытие лунок, которое сопровождается уменьшением высоты наплывов металла на модифицированной поверхности, а соответственно снижением ее режущей способности. Это подтверждается результатами измерений диаметра рабочей части фрезы d_ϕ после модифицирования ее поверхности при различном количестве получаемых на ней лунок ($U = 70$ В). Так, при $n = 50$ $d_\phi = 1,98$ мм, при $n = 250$ $d_\phi = 2,08$ мм, при $n = 450$ $d_\phi = 1,97$ мм. Уменьшение диаметра при $n > 250$ связано с перекрытием лунок в процессе модифицирования, что характерно для размерной электроэрозионной обработки [11].

На основе полученных экспериментальных данных, отражающих влияние режимов электроэрозионного модифицирования изношенной поверхности испытуемой стоматологической фрезы на восстановление ее режущей способности, можно определить параметры режимов выполнения операции, при которых обеспечивается наибольшая режущая способность фрезы. В частности, напряжение накопительного конденсатора при его емкости 400 мкФ должно составлять 70 В, а количество наносимых на изношенную поверхность лунок (разрядов) должно быть порядка 200–250.

ВЫВОДЫ

1. С использованием специально созданных устройств разработана методика проведения экспериментальных исследований по количественной оценке влияния режимов модифицирования изношенной рабочей поверхности цилиндрической стальной стоматологической фрезы на восстановление ее режущей способности.

2. Получены экспериментальные данные, отражающие влияние напряжения U накопительного конденсатора при модифицировании изношенной поверхности фрезы на восстановление ее режущей способности: установлено, что с увеличением U в процессе выполнения операции модифицирования изношенной поверхности фрезы ее режущая способность, оцениваемая по объему V удаленного материала за 30 с обработки, возрастает. Наибольшее значение V наблюдается при обработке α -гипса, меньшее – при обработке акрила, а наименьшее – при обработке β -гипса, имеющего наибольшую из этих материалов твердость.

3. Для количественной оценки влияния состояния рабочей поверхности испытуемой фрезы (в исходном, изношенном и модифицированном состояниях) на ее режущую способность введен коэффициент относительной режущей способности $k_{p,c}$, который для фрезы в исходном (заточенном) состоянии принят за 100 %. Установлено, что при обработке всех материалов фрезой в изношенном состоянии рабочей поверхности коэффициент $k_{p,c}$ имеет постоянное значение, равное 7,8. В результате ее модифицирования с повышением напряжения U накопительного конденсатора коэффициент $k_{p,c}$ увеличивается, достигая максимального значения при $U = 70$ В. Причем при обработке α -гипса и акрила величина коэффициента $k_{p,c}$ соответственно составила 105,7 и 105,8 %, т. е. больше, чем у рабочей поверхности фрезы в исходном (заточенном) состоянии, и 93,6 % – при обработке β -гипса.

4. Показано, что с повышением U возрастает энергия электрического разряда, действующего на обрабатываемую поверхность, что приводит к формированию на ней единичной лунки большего размера, включая наплывы металла по ее краю, выходящие за исходный контур изношенных зубьев фрезы. Эти наплы-

вы металла на модифицированной поверхности фрезы выполняют роль своеобразных режущедоформирующих элементов.

5. Экспериментально установлено, что в результате модифицирования изношенной поверхности фрезы ее диаметр за счет образовавшихся на ней наплывов металла увеличивается и тем больше, чем выше напряжение U накопительного конденсатора. Так, при диаметре изношенной поверхности фрезы 1,92 мм после ее модифицирования при $U = 40$ В он увеличился до 1,97 мм, при $U = 60$ В до 2,03 мм и при $U = 70$ В до 2,08 мм при диаметре фрезы в исходном состоянии 2,05 мм.

6. Получены экспериментальные данные, отражающие влияние количества лунок n , наносимых на изношенную поверхность фрезы в процессе ее модифицирования, на восстановление ее режущей способности. Установлено, что при $U = 70$ В с увеличением n от 50 до 250 режущая способность модифицированной поверхности фрезы возрастает, а при дальнейшем увеличении n , вплоть до 450, она снижается, т. е. существует оптимальный диапазон n , в котором обеспечивается наибольшая режущая способность модифицированной поверхности фрезы.

7. Выявлено, что в процессе модифицирования изношенной поверхности фрезы необходимо обеспечивать условие отсутствия перекрытия формируемых на ней лунок, т. е. расстояние между центрами соседних лунок должно быть больше или равно размеру наплывов металла по их краям. В этом случае наплывы металла сохраняют свою первоначальную форму и имеют наибольшую при данных параметрах импульса высоту, благодаря чему обеспечивается более высокая, чем при перекрытии лунок, режущая способность модифицированной поверхности фрезы.

8. На основании обобщенного анализа полученных экспериментальных данных определены рациональные режимы модифицирования изношенной рабочей поверхности стоматологической фрезы, обеспечивающие наибольшее (до 96–105 %) восстановление ее режущей способности: напряжение накопительного конденсатора емкостью 400 мкФ должно составлять 70 В, количество равномерно наносимых на обрабатываемую поверхность лунок без их перекрытия должно быть в диапазоне 200–250.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сабитов, В. Х. Медицинские инструменты / В. Х. Сабитов. М.: Медицина, 1985. 175 с.
2. Инструменты стоматологические вращающиеся. Методы испытаний: ГОСТ 30213–94. Введ. 01.07.1996. М.: ТКБ 279 «Зубоврачебное дело», 1996. 8 с.
3. Наук, П. Е. Разработка и исследование технологии и оборудования для изготовления острия инъекционных игл / П. Е. Наук. Одесса, 1984. 215 с.
4. Киселев, М. Г. Формирование поверхности с частично регулярным микрорельефом методом электроэрозионной обработки / М. Г. Киселев, С. Г. Монич, Д. Г. Лапутина // Механика машин, механизмов и материалов. 2017. № 1. С. 64–70.
5. Теоретическое обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. 2012. № 3. С. 3–10.
6. Фотеев, Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. М.: Машиностроение, 1980. 184 с.
7. Серебrenицкий, П. П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование / П. П. Серебrenицкий. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2007. 228 с.
8. Вяжущие гипсовые. Технические условия: ГОСТ 125–79. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 12 с.
9. Влияние электроконтактной обработки поверхности самореза на условия его вкручивания в образцы из различных материалов и выкручивания из них / М. Г. Киселев [и др.] // Наука и техника. 2015. № 5. С. 3–9.
10. Козырь, Д. В. Исследование параметров единичных лунок, полученных в результате электроэрозионной обработки с использованием плазменного электрода инструмента / Д. В. Козырь // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Т. 2, № 4. С. 350–357.
11. Елисеев, Ю. С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю. С. Елисеев, Б. П. Саушкин; под ред. Б. П. Саушкина. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2010. 437 с.

Поступила 30.10.2019
 Подписана в печать 14.05.2020
 Опубликовано онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Sabitov V. Kh. (1985) *Medical Instruments*. Moscow, Meditsina Publ. 175 (in Russian).
2. *State Standard 30213–94. Rotary Dental Tools. Test Methods*. Moscow, Tariff Classification Manual 279 “Zubovrachebnoe delo”, 1996. 8 (in Russian).
3. Nauck P. E. (1984) *Development and Investigation of Technology and Equipment for Manufacturing Injection Needle Point*. Odessa. 215 (in Russian).
4. Kiselev M. G., Monich S. G., Laputina D. G. (2017) Surface Forming with Partly Regular Microrelief with Electrical Discharge Machining. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, (1), 64–70 (in Russian).
5. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Moscalenok A. V., Bogdan P. S. (2012) Theoretical Substantiation of Rational Parameters of Electric-Mode Processing Wire Tool. *Vestnik GGTU imeni P. O. Sukhogo = Bulletin of the GSTU named after P. O. Sukhoy*, (3), 3–10 (in Russian).
6. Foteev N. K. (1980) *EDM Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 184 (in Russian).
7. Serebrenitskii P. P. (2007) *Modern EDM Technologies and Equipment*. Saint-Petersburg, Baltic State Technical University. 228 (in Russian).
8. *State Standard 125–79. Gypsum Binders. Technical Specifications*. Moscow, IPC Publishing House of Standards, 2002. 12 (in Russian).
9. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Monich S. G., Bogdan P. S. (2015) Influence of Self-Tapping Screw Electro-Arc Machining on its Twisting-in in Specimens made of Various Materials and Twisting-Out Procedure. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 3–9 (in Russian).
10. Kozyr D. V. (2013) Study of Parameters of Single Holes Obtained as a Result of EDM Using a Plasma Electrode Tool. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki = Izvestiya Tula State University*, 2 (4), 350–357 (in Russian).
11. Eliseev Yu. S., Saushkin B. P. (2010) *Electroerosive Processing of Aerospace Equipment*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 437 (in Russian).

Received: 30.10.2019
 Accepted: 14.05.2020
 Published online: 30.07.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-297-304>

УДК 681.7.023.72

Технологические особенности формообразования плоского инструмента для обработки аксиконов

Докт. техн. наук, проф. А. С. Козерук¹⁾, асп. Р. О. Диас Гонсалес^{1,2)}, инж. А. А. Сухоцкий¹⁾, кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова¹⁾, В. О. Кузнецик¹⁾

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

²⁾Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо (Мерида, Венесуэла)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Обосновано, что для управления процессом формообразования плоских поверхностей по методу свободного притирания целесообразно выбирать такие наладочные параметры станка, как диаметр инструмента и частота его вращения, величина амплитуды возвратно-вращательного движения детали по инструменту (или наоборот) и частота этого движения, величина рабочего усилия. Проведено математическое моделирование закономерностей процесса абразивной обработки плоских поверхностей в условиях свободного притирания на рычажных станках. Получена формула расчета скорости скольжения в выбранных опорных точках на обрабатываемой поверхности с учетом давления в их окрестности. Определены закономерности срабатывания детали, в качестве которой в предлагаемой технологии получения аксиконов используется правильная пластина в зависимости от сочетания и величины выбранных наладочных параметров технологического оборудования. Обоснована самоорганизация процесса обработки по методу свободного притирания. Выполнен расчет чувствительности кинематического срабатывания к изменению режимов обработки и определена эффективность этих режимов с точки зрения производительности процесса. Отмечено, что увеличение диаметра инструмента, как одного из эффективных наладочных параметров при управлении процессом формообразования, осуществить на практике затруднительно, поскольку это требует замены инструментов, каждый из которых необходимо предварительно настраивать по особой, довольно трудоемкой методике. С увеличением частоты вращения инструмента и амплитуды его колебательных движений происходит усиленный сьем материала на периферии обрабатываемой поверхности, а с возрастанием колебательных движений, наоборот, более интенсивно срабатывается центральная зона детали.

Ключевые слова: аксикон, свободное притирание, стрелка прогиба, формообразование, абразивная обработка, параметр чувствительности, исполнительный механизм

Для цитирования: Технологические особенности формообразования плоского инструмента для обработки аксиконов / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 297–304. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-297-304>

Technological Features of Forming Flat Tool for Processing Axicons

A. S. Kozeruk¹⁾, R. O. Dias Gonzalez^{1,2)}, A. A. Sukhotzkiy¹⁾, M. I. Filonova¹⁾, V. O. Kuznechik¹⁾

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

²⁾Instituto Universitario Politecnico Santiago Marino (Merida, Venezuela)

Abstract. It has been substantiated that in order to control the process of forming flat surfaces while using a free grinding method it is advisable to choose such machine setup parameters as a tool diameter and its rotation frequency, an amplitude of the reciprocating movement of the part along the tool (or vice versa) and frequency of this movement, as well as the value of the working force. Mathematical modeling of patterns for abrasive processing of flat surfaces in the conditions of free

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

grinding on lever machines has been carried out in the paper. A formula has been obtained for calculating a sliding speed at selected reference points on the surface to be treated while taking into account the pressure in their vicinity. Patterns of the part operation have been determined, for which a correct plate is used in the proposed axicon production technology with due account of the combination and size of the selected setup parameters for processing equipment. Self-organization of the processing process has been substantiated while using a free grinding method. Sensitivity of a kinematic response to a change in processing modes and efficiency of these modes in terms of process performance have been determined in the paper. It has been noted that an increase in a tool diameter, as one of the effective adjustment parameters for controlling the shaping process, is difficult to implement in practice, since this requires replacement of tools, each of which must be pre-configured while using a special rather time-consuming technique. The paper reveals that with an increase in the tool rotation frequency and an amplitude of its oscillatory movements, there is an increased removal of material on the periphery of the surface being machined, and with an increase in vibrational movements, on the contrary, the central zone of the part is more intensively activated.

Keywords: axicon, free grinding, deflection arrow, shaping, abrasive processing, sensitivity parameter, actuator

For citation: Kozeruk A. S., Dias Gonzalez R. O., Sukhotzkiy A. A., Filonova M. I., Kuznechik V. O. (2020) Technological Features of Forming Flat Tool for Processing Axicons. *Science and Technique*. 19 (4), 297–304. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-297-304> (in Russian)

Введение

Для обработки традиционных оптических деталей (линз, призм, пластин) в настоящее время применяют в основном метод свободного притирания как один из наиболее точных и не требующих прецизионного технологического оборудования. В [1] обосновано, что этот метод может быть использован также для получения деталей с рабочей конической поверхностью (аксиконов), образующая которой должна быть строго прямолинейной. Для обеспечения последнего требования заготовку конической детали притирают к инструменту, плоскостность которого поддерживается правильником в виде стеклянной пластины специальной конструкции.

Технология обработки плоских поверхностей

Предлагаемый метод доводки плоской поверхности представляет собой притирание двух тел через слой абразивной суспензии, причем контакт между этими телами обеспечивается силовым, а не геометрическим замыканием (метод свободного притирания) [2]. В результате такого притирания контактирующие поверхности приобретают либо плоскую, либо сферическую форму, причем кривизна поверхностей управляется изменением наладочных параметров технологического оборудования, к которым относятся: диаметр инструмента d_n и частота его вращения ω_n , величина амплитуды возвратно-вращательного (колебательного) движения детали по инструменту (или наоборот) L и частота этого движения ω_2 , величина рабочего усилия p [3]. Причем на стадии шлифования

регулируют, как правило, несколько из этих параметров, что ускоряет съем припуска с заготовки, а в процессе полирования – только один, обеспечивая плавное изменение геометрической формы обрабатываемой поверхности и создавая тем самым условия для более точного определения момента достижения заданных параметров качества детали [4].

В настоящее время эффективные наладочные параметры станка и их оптимальные значения в каждом конкретном случае определяет оператор исходя из своего опыта и интуиции [5]. Такой подход требует дополнительных затрат непроизводительного времени на предварительные экспериментальные исследования. Эту трудоемкую операцию в классическом технологическом процессе оптического приборостроения предлагается заменить инженерными расчетами, направленными на определение наиболее выгодных наладочных параметров станка и их значений исходя из технологической наследственности заготовки детали, определяемой характеристики распределения припуска на обрабатываемой поверхности. С этой целью проведено математическое моделирование закономерностей процесса абразивной обработки плоских поверхностей в условиях свободного притирания на рычажных станках. Моделирование включало в себя формализацию специализированного технологического оборудования, его рабочей зоны и процесса формообразования на этом оборудовании плоской поверхности инструмента для обработки конической детали. В итоге получена формула для расчета скорости скольжения инструмента v в выбранных по методике [6] опорных точках на обрабатываемой поверхности и давле-

ния p в их окрестности. С учетом этих величин по формуле Ф. Престона [7] определяли срабатывание u детали, в качестве которой в предлагаемой технологии получения аксионов использовалась так называемая правильная пластина

$$u = k \int_0^T v p dt, \quad (1)$$

где k – технологический коэффициент, зависящий от марки стекла, зернистости и концентрации абразивной суспензии, материала инструмента, температуры окружающей среды и других факторов; t – время обработки.

Результаты исследований и их анализ

В процессе численных исследований закономерностей обработки принимали, что интенсивность съема материала детали пропорциональна параметру $Q = v\rho$. При этом определяли значения каждого из наладочных параметров станка, обеспечивающих как равномерное распределение Q по всей обрабатываемой поверхности, что необходимо на стадии ее выхаживания после достижения заданной точности, так и преобладание этого параметра как в центральной, так и в краевой зонах детали. Два последних случая на практике используются в начальной стадии обработки в зависимости от характера распределения припуска: с преобладанием в краевой (общая «яма») или центральной (общий «бугор») зонах заготовки детали.

В процессе определения значений наладочных параметров станка, при которых распределение параметра Q принимает необходимый характер, применяли следующую методику. Учитывая производственную практику оптического приборостроения [8], а также принятые диаметры инструмента и детали, назначали следующие средние значения режимов обработки: $\omega_n = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, где ω_d – частота вращения детали.

Первоначально выявляли оптимальную величину амплитуды L , при которой Q принимает одинаковое значение в центре и на краю детали, что соответствует равномерному съему припуска по обрабатываемой поверхности. Таким же образом определяли наиболее выгодные величины каждого из рассматриваемых наладочных параметров станка при средних значениях остальных из них.

Полученные результаты расчетов приведены на рис. 1, где кривые 2, 5, 8, 11, 14 характеризуют закономерности обработки, при которой происходит равномерный съем материала детали по всей ее исполнительной поверхности. В рассматриваемом случае такая обработка имела место для следующих значений наладочных параметров станка: $L = 197 \text{ мм}$, $d_n = 247 \text{ мм}$, $\omega_2 = 3,3 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n = 5,8 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,72$. Однако в начальной стадии величину параметров процесса формообразования следует назначать с учетом технологической наследственности заготовки. В частности, если припуск преобладает по периферии последней, то необходимо устанавливать следующие режимы обработки: $L = 221 \text{ мм}$, $d_n = 270 \text{ мм}$, $\omega_2 = 1,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n = 18,5 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,48$ (рис. 1, кривые 3, 6, 9, 12, 15), а в случае, когда требуется обеспечить усиленный съем материала в центральной зоне заготовки, целесообразно применять параметры: $L = 160 \text{ мм}$, $d_n = 218 \text{ мм}$, $\omega_2 = 6,8 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n = 2,7 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,99$ (рис. 1, кривые 1, 4, 7, 10, 13).

Характерным для зависимостей на рис. 2 является неравномерное распределение параметра Q на обрабатываемой поверхности. Такое изменение Q свидетельствует о том, что пути трения точек детали, находящихся в круговом кольце со средним радиусом, составляющим, как видно из рис. 1, примерно $0,25d_d$, достигают больших значений по сравнению с точками центральной и краевой зон. Эта закономерность объясняется особенностями метода свободного притирания двух тел, максимальная площадь перекрытия которых имеет место именно в упомянутых круговых кольцах. Однако на практике отмеченный максимум параметра Q автоматически нивелируется за счет того, что увеличение путей трения в той или иной зоне обрабатываемой поверхности приводит к усилению съема припуска в данной зоне, уменьшая тем самым активную площадь ее контакта с инструментом. Это, в свою очередь, вызывает перераспределение рабочего усилия в области сопряжения притирающихся поверхностей: оно возрастает по периферии обсуждаемой области, увеличивая интенсивность съема припуска. Следовательно, имеет место самоорганизация процесса обработки по методу свободного притирания, который относится к прецизионному.

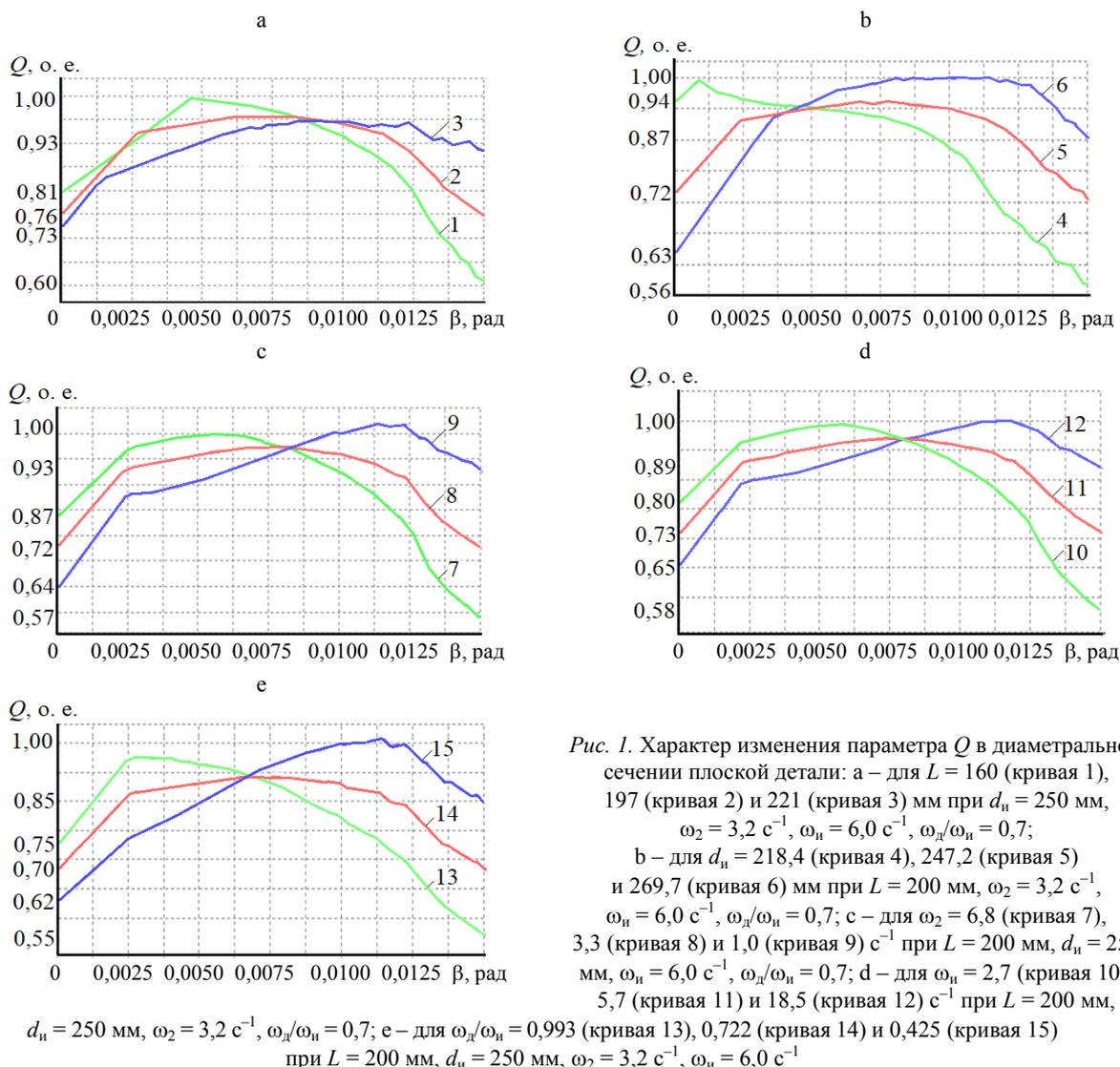


Рис. 1. Характер изменения параметра Q в диаметральной сечении плоской детали: а – для $L = 160$ (кривая 1), 197 (кривая 2) и 221 (кривая 3) мм при $d_{и} = 250$ мм, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{и} = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_{и} = 0,7$; б – для $d_{и} = 218,4$ (кривая 4), 247,2 (кривая 5) и 269,7 (кривая 6) мм при $L = 200$ мм, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{и} = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_{и} = 0,7$; в – для $\omega_2 = 6,8$ (кривая 7), 3,3 (кривая 8) и 1,0 (кривая 9) с^{-1} при $L = 200$ мм, $d_{и} = 250$ мм, $\omega_{и} = 6,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_{и} = 0,7$; д – для $\omega_{и} = 2,7$ (кривая 10), 5,7 (кривая 11) и 18,5 (кривая 12) с^{-1} при $L = 200$ мм, $d_{и} = 250$ мм, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_d/\omega_{и} = 0,7$; е – для $\omega_d/\omega_{и} = 0,993$ (кривая 13), 0,722 (кривая 14) и 0,425 (кривая 15) при $L = 200$ мм, $d_{и} = 250$ мм, $\omega_2 = 3,2 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{и} = 6,0 \text{ с}^{-1}$

Fig. 1. Nature of change in parameter Q within diametrical section of flat part: а – for $L = 160$ (curve 1), 197 (curve 2) and 221 (curve 3) mm with $d_{и} = 250$ mm, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_{и} = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_{и} = 0.7$; б – for $d_{и} = 218.4$ (curve 4), 247.2 (curve 5) and 269.7 (curve 6) mm with $L = 200$ mm, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_{и} = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_{и} = 0.7$; в – for $\omega_2 = 6.8$ (curve 7), 3.3 (curve 8) and 1.0 (curve 9) s^{-1} with $L = 200$ mm, $d_{и} = 250$ mm, $\omega_{и} = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_{и} = 0.7$; д – for $\omega_{и} = 2.7$ (curve 10), 5.7 (curve 11) and 18.5 (curve 12) s^{-1} with $L = 200$ mm, $d_{и} = 250$ mm, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_{и} = 0.7$; е – for $\omega_d/\omega_{и} = 0.993$ (curve 13), 0.722 (curve 14) and 0.425 (curve 15) with $L = 200$ mm, $d_{и} = 250$ mm, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_{и} = 6.0 \text{ s}^{-1}$

Особенностью выполненных исследований являлось то, что в процессе их проведения наладочные параметры станка изменяли на величину, при которой Q принимало одинаковые отклонения ΔQ от его распределения, обеспечивающего устранение как общей «ямы», так и общего «бугра». Такой подход позволил рассчитать чувствительность параметра Q к изменению режимов обработки и эффективность этих режимов с точки зрения производительности процесса.

Согласно [9], чувствительность σ определяли из соотношения

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta N}, \quad (2)$$

где

$$\Delta N = \frac{|N' - N_0|}{N_0}; \quad (3)$$

N_0, N' – значения наладочных параметров станка, при которых происходит равномерный съём припуска с обрабатываемой поверхности и которые устанавливают при исправлении общей «ямы» и общего «бугра».

Эффективность наладочных параметров технологического оборудования k [9] рассчитывали по формуле

$$k = \left| Q_{\text{ц}} - Q_{\text{кр}} \right|, \quad (4)$$

где $Q_{\text{ц}}$, $Q_{\text{кр}}$ – значения Q в центре и на краю заготовки, которые получаются для режимов обработки, применяемых в случае неравномерного распределения припуска на обрабатываемой поверхности.

Результаты расчета чувствительности σ приведены в табл. 1, а эффективности k , вычисленные по графикам рис. 1, в табл. 2.

Таблица 1

Значения чувствительности σ Sensitivity values σ

Исправление макропогрешности в виде			
общей «ямы»		общего «бугра»	
Наладочный параметр	σ	Наладочный параметр	σ
$d_{\text{и}}$	2,000	$d_{\text{и}}$	2,174
L	1,523	L	0,800
$\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$	0,425	$\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$	0,380
ω_2	0,233	ω_2	0,306
$\omega_{\text{и}}$	0,072	$\omega_{\text{и}}$	0,151

Таблица 2

Значения эффективности k Efficiency values k

Исправление макропогрешности в виде			
общей «ямы»		общего «бугра»	
Наладочный параметр	k	Наладочный параметр	k
ω_2	0,29	$d_{\text{и}}$	0,38
$d_{\text{и}}$	0,24	ω_2	0,30
$\omega_{\text{и}}$	0,24	$\omega_{\text{и}}$	0,22
$\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$	0,23	L	0,21
L	0,20	$\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$	0,20

Анализ табл. 1 показывает, что максимальная чувствительность параметра Q к регулированию режимов обработки имеет место при изменении величины диаметра инструмента в случае исправления макропогрешности как в виде общей «ямы», так и общего «бугра». Остальные наладочные параметры станка расположены в последовательности: L , $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$, ω_2 , $\omega_{\text{и}}$ (для усиления съема материала по периферии заготовки детали) и L , $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$, $\omega_{\text{и}}$, ω_2 (для повышения интенсивности обработки в ее центральной зоне).

Сравнительный анализ закономерностей изменения Q на рис. 1 и данных табл. 2 позволяет заключить, что для исправления макропогрешности в виде общей «ямы» наладочные параметры станка целесообразно изменять следующим образом: уменьшать ω_2 , $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$ и уве-

личивать $d_{\text{и}}$, $\omega_{\text{и}}$, L . Однако необходимо учитывать, что повышение частоты вращения подвижных звеньев технологического оборудования приводит к усилению его вибрации, которая в свою очередь вызывает рост количества и размеров локальных (местных) погрешностей на исполнительной поверхности детали [10]. И поскольку эти погрешности являются несимметричными, т. е. неустранимыми в процессе сборки и юстировки оптических приборов, для усиления съема материала по периферии детали целесообразно уменьшать ω_2 или увеличивать L . Что же касается увеличения диаметра инструмента, как одного из эффективных наладочных параметров в рассматриваемом случае, то его осуществление на практике затруднительно, поскольку требует замены инструментов, каждый из которых нужно предварительно настраивать по особой, довольно трудоемкой методике.

При необходимости исправить макропогрешность в виде общего «бугра» процессом обработки целесообразно управлять следующим образом: уменьшать $d_{\text{и}}$, $\omega_{\text{и}}$, L и увеличивать ω_2 , $\omega_{\text{д}}/\omega_{\text{и}}$. Однако с учетом динамики станка (зазоров в его подвижных звеньях, вызывающих локальные погрешности) и нецелесообразности изменять величину диаметра инструмента из отмеченного можно рекомендовать выполнять уменьшение $\omega_{\text{и}}$ и L .

Для проверки соответствия результатов численных исследований, представленных на рис. 1, реальному процессу обработки проведены эксперименты, которые сводились к шлифованию пластины диаметром 230 мм из оптического стекла марки К8. В качестве обрабатываемого применяли инструмент со связанным абразивом в виде плоского алмазного шлифовальника на медной связке с фракцией алмазных зерен 14/10. Марка алмаза – АСМ, концентрация 10 %. Продолжительность шлифования составляла 6 мин в каждом сеансе. Рабочее усилие 2 Н. Охлаждающей жидкостью служил эмульсол. В процессе шлифования контролировали плоскостность обрабатываемой поверхности, которую определяли по величине стрелки прогиба. Для этого использовали сферометр часового типа с микронной индикаторной головкой, закрепленной в кольце с наружным диаметром 120 мм. Шлифование производили на рычажном полировально-доводочном станке модели ЗПД-320. Исходная стрелка прогиба h

на стеклянной пластине составляла 12 мкм «ямы» в каждом эксперименте.

Результаты исследований закономерностей изменения h как функции увеличивающихся и уменьшающихся параметров процесса обработки представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Анализ этих рисунков показывает, что с увеличением d_n , L , ω_n и отношения ω_d/ω_n (рис. 2, кривые 1–4) наблюдается уменьшение h , т. е. происходит усиленный сьем материала на периферии обрабатываемой поверхности, а с возрастанием ω_2 , наоборот, более интенсивно срабатывается центральная зона детали (рис. 2, кривая 5). При уменьшении рассматриваемых наладочных параметров станка имеет место обратная закономерность изменения h : в случае регулирования величин d_n , L , ω_n и отношения ω_d/ω_n происходит увеличение h (рис. 3, кривые 2–5), а уменьшение ω_2 приводит к усилению съема материала на периферии детали (рис. 3, кривая 1). Эти экспериментальные данные коррелируют с результатами теоретических исследований.

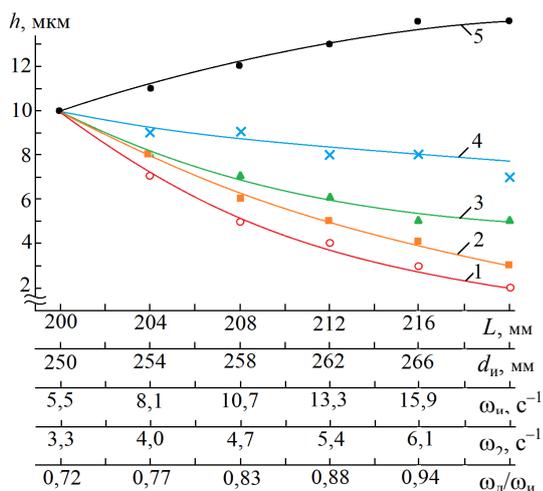


Рис. 2. Характер изменения стрелки прогиба плоской поверхности детали в зависимости от значения увеличивающихся: d_n при $\omega_n = 6,0 \text{ c}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 3,2 \text{ c}^{-1}$ (кривая 1); L при $d_n = 250 \text{ мм}$, $\omega_n = 6,0 \text{ c}^{-1}$, $\omega_2 = 3,2 \text{ c}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 2); ω_n при $d_n = 250 \text{ мм}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 3,2 \text{ c}^{-1}$ (кривая 3); ω_d/ω_n при $d_n = 250 \text{ мм}$, $\omega_n = 6,0 \text{ c}^{-1}$, $\omega_2 = 3,2 \text{ c}^{-1}$ (кривая 4); ω_2 при $d_n = 250 \text{ мм}$, $L = 200 \text{ мм}$, $\omega_n = 6,0 \text{ c}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 5)

Fig. 2. Nature of change in arrow of flat surface deflection for a part, depending on value of increasing: d_n with $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$ (curve 1); L with $d_n = 250 \text{ mm}$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 2); ω_n with $d_n = 250 \text{ mm}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$ (curve 3); ω_d/ω_n with $d_n = 250 \text{ mm}$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$ (curve 4); ω_2 with $d_n = 250 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 5)

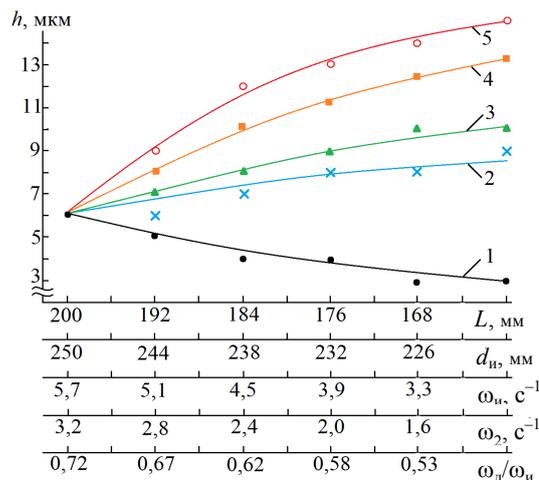


Рис. 3. Характер изменения стрелки прогиба плоской поверхности детали в зависимости от значения уменьшающихся: ω_2 при $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_n = 6,0 \text{ c}^{-1}$, $L = 200 \text{ мм}$, $d_n = 250 \text{ мм}$ (кривая 1); ω_d/ω_n при $\omega_2 = 3,2 \text{ c}^{-1}$, $\omega_n = 6,0 \text{ c}^{-1}$, $L = 200 \text{ мм}$, $d_n = 250 \text{ мм}$ (кривая 2); ω_n при $\omega_2 = 3,2 \text{ c}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $L = 200 \text{ мм}$, $d_n = 250 \text{ мм}$ (кривая 3); L при $\omega_2 = 3,2 \text{ c}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_n = 6,0 \text{ c}^{-1}$, $d_n = 250 \text{ мм}$ (кривая 4); d_n при $\omega_2 = 3,2 \text{ c}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_n = 6,0 \text{ c}^{-1}$, $L = 200 \text{ мм}$ (кривая 5)

Fig. 3. Nature of change in arrow of flat surface deflection for a part, depending on value of decreasing: ω_2 with $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $L = 200 \text{ mm}$, $d_n = 250 \text{ mm}$ (curve 1); ω_d/ω_n with $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $L = 200 \text{ mm}$, $d_n = 250 \text{ mm}$ (curve 2); ω_n with $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $L = 200 \text{ mm}$, $d_n = 250 \text{ mm}$ (curve 3); L with $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $d_n = 250 \text{ mm}$ (curve 4); d_n with $\omega_2 = 3.2 \text{ s}^{-1}$, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_n = 6.0 \text{ s}^{-1}$, $L = 200 \text{ mm}$ (curve 5)

Проведена также серия экспериментов, направленных на исследование закономерностей обработки, определяемых показателями σ и k . В случае σ для каждого регулируемого наладочного параметра технологического оборудования выявляли такое значение ΔN , при котором исходная стрелка прогиба (величиной 12 мкм) поверхности детали в процессе ее шлифования в течение определенного времени достигала одинакового значения (в рассматриваемом случае 4 мкм). Шлифование выполняли алмазным инструментом, характеристики которого приведены выше. Рабочее усилие, как и ранее, составляло 2 Н.

На стадии рассмотрения показателя k проводили аналогичные эксперименты, но при этом определяли продолжительность обработки, за время которой исходная стрелка прогиба величиной 12 мкм достигала значения 4 мкм. Полученные результаты представлены на рис. 4, 5.

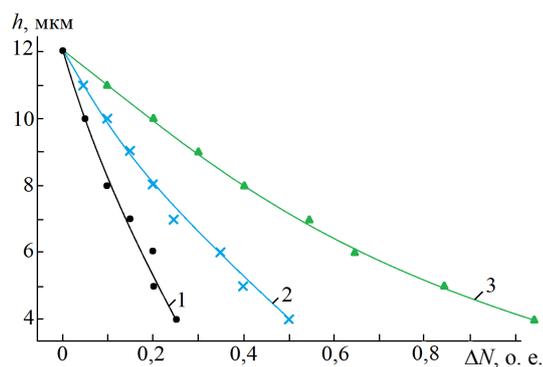


Рис. 4. Характер изменения стрелки прогиба плоской поверхности детали в зависимости от относительной величины: L при $d_n = 250$ мм, $\omega_n = 6,0$ с⁻¹, $\omega_2 = 3,2$ с⁻¹, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 1); ω_2 при $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_n = 6,0$ с⁻¹, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 2); ω_n при $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 3,2$ с⁻¹ (кривая 3)

Fig. 4. Nature of change in arrow of flat surface deflection for a part, depending on relative value: L with $d_n = 250$ mm, $\omega_n = 6.0$ s⁻¹, $\omega_2 = 3.2$ s⁻¹, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 1); ω_2 with $d_n = 250$ mm, $L = 200$ mm, $\omega_n = 6.0$ s⁻¹, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 2); ω_n with $d_n = 250$ mm, $L = 200$ mm, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 3.2$ s⁻¹ (curve 3)

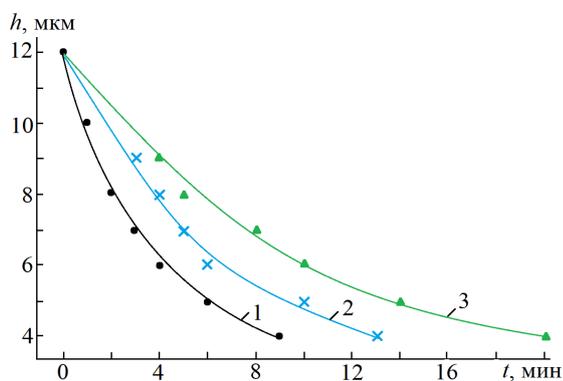


Рис. 5. Характер изменения стрелки прогиба плоской поверхности детали в зависимости от продолжительности шлифования в случае изменений: ω_2 при $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_n = 6,0$ с⁻¹, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 1); ω_n при $d_n = 250$ мм, $L = 200$ мм, $\omega_d/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 3,2$ с⁻¹ (кривая 2); L при $d_n = 250$ мм, $\omega_n = 6,0$ с⁻¹, $\omega_2 = 3,2$ с⁻¹, $\omega_d/\omega_n = 0,7$ (кривая 3)

Fig. 5. Nature of change in arrow of flat surface deflection for a part, depending on duration of grinding in case of changes: ω_2 with $d_n = 250$ mm, $L = 200$ mm, $\omega_n = 6.0$ s⁻¹, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 1); ω_n with $d_n = 250$ mm, $L = 200$ mm, $\omega_d/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 3.2$ s⁻¹ (curve 2); L with $d_n = 250$ mm, $\omega_n = 6.0$ s⁻¹, $\omega_2 = 3.2$ s⁻¹, $\omega_d/\omega_n = 0.7$ (curve 3)

Из рис. 4 следует, что изменение амплитуды ω_n колебательного движения выходного

звена исполнительного механизма станка на величину $\Delta N = 0,25$ приводит к уменьшению стрелки прогиба h на 8 мкм (рис. 4, кривая 1). Однако для достижения такого же эффекта при управлении процессом обработки посредством регулирования частоты вращения ω_2 входного звена исполнительного механизма станка ΔN необходимо изменять соответственно на 0,50 и 1,05 (рис. 4, кривые 2, 3).

Если же оценивать эффективность наладочных параметров станка, т. е. время, по истечении которого стрелка прогиба уменьшается с принятой в рассматриваемом случае величины 12 мкм до 4 мкм, то это время для, например, L , ω_2 , ω_n , распределяется следующим образом: для ω_2 – 9 мин, для ω_n – 13 мин, для L – 19 мм (рис. 5, кривые 1, 2, 3 соответственно).

Полученные экспериментальные зависимости на рис. 4, 5 согласуются с результатами численных исследований, изложенных в табл. 1, 2.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных теоретических исследований определены режимы работы станка для абразивной обработки плоских деталей по методу свободного притирания, обеспечивающие равномерный съем материала по всей поверхности заготовки детали, а также позволяющие усилить интенсивность обработки как в центральной, так и в краевой ее зонах.

2. Вычисленный параметр чувствительности интенсивности съема материала с плоской поверхности к изменениям режимов обработки в условиях свободного притирания показал, что максимум чувствительности наблюдается при управлении процессом формообразования посредством изменений в первую очередь величин диаметра инструмента и амплитуды возвратно-вращательного движения выходного звена исполнительного механизма станка, из которых на практике более приемлемым является использование второго фактора.

3. Рассчитанные значения эффективности наладочных параметров технологического оборудования позволили выявить наиболее выгод-

ные из них для исправления макропогрешностей в виде как общей «ямы», так и общего «бугра». С учетом влияния динамических характеристик станка на точность обработки и высокую трудоемкость изготовления инструмента, для усиления съема припуска по периферии детали в качестве регулируемого параметра процесса формообразования в условиях свободного притирания можно рекомендовать, как наиболее эффективное, уменьшение частоты вращения входного звена исполнительного механизма станка или увеличение амплитуды возвратно-вращательного движения его выходного звена. В то же время с целью обеспечения более интенсивной обработки центральной зоны детали следует уменьшать частоту вращения инструмента или величину упомянутой амплитуды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кинематический анализ способа, повышающего точность обработки конических поверхностей / А. С. Козерук [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2020. Т. 65, № 2. С. 197–204. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>.
2. Семибратов, М. Н. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов, В. Г. Зубаков, С. К. Штандель. М.: Машиностроение, 1978. 416 с.
3. Сулим, А. М. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 303 с.
4. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель; под ред. М. Н. Семибратова. М.: Машиностроение, 1985. 368 с.
5. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.
6. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: Вуз-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
7. Preston, E. W. The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines / E. W. Preston // Journal of the Society of Glass Technology. 1927. No 11. P. 214–256.
8. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
9. Технологические особенности процесса одновременной двусторонней обработки высокоточных линз

малой жесткости / А. С. Козерук [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 215–224. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224>.

10. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. Минск: ДизайнПРО, 1995. 208 с.

Поступила 10.10.2019

Подписана в печать 11.02.2020

Опубликована онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Kozeruk A. S., Dias Gonsales R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Varopai E. N. (2020) Kinematic Analysis of the Method Increasing the Accuracy of Treatment of Conic Surfaces. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 65 (2), 197–204 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>.
2. Semibratov M. N., Zubakov V. G., Shtandel S. K. (1978) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 416 (in Russian).
3. Sulim A. M. (1969) *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 303 (in Russian).
4. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 368 (in Russian).
5. Kozeruk A. S. (1997) *Managing Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices Based on Mathematical Modeling*. Minsk. 317 (in Russian).
6. Kozeruk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, Vuz-UNITI Publ. 176 (in Russian).
7. Preston E. W. (1927) The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society of Glass Technology*, (11), 214–256.
8. Bardin A. N. (1963) *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
9. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Filonova M. I., Vlasovet N. S., Malpika D. L. (2017) Technological Distinctive Features Pertaining to Process of Simultaneous Two-Sided Machining of High-Precision Lenses Having Low Stiffness. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 16 (3), 215–224 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224>.
10. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeruk A. S. (1995) *Form Control of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices*. Minsk, DizaynPRO Publ. 208 (in Russian).

Received: 10.10.2019

Accepted: 11.02.2020

Published online: 30.07.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-305-310>

UDC 621.436.068.4

Ensuring Requirements for Emissions of Harmful Substances of Diesel Engines

G. M. Kuharonak¹⁾, D. V. Kapskiy¹⁾, V. I. Berezun²⁾

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

²⁾JSC AMKODOR, Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Abstract. The purpose of this work is to consider the requirements for emissions of harmful substances of diesel engines by selecting design and adjustment parameters that determine the organization of the workflow, and the exhaust gas cleaning system, taking into account the reduction of fuel consumption. Design elements and geometric characteristics of structures for a turbocharged diesel engine of Д-245 series produced by JSC HMC Minsk Motor Plant (4ЧН11/12.5) with a capacity of 90 kW equipped with an electronically controlled battery fuel injection have been developed: exhaust gas recirculation along the high pressure circuit, shape and dimensions of the combustion chamber, the number and angular arrangement of the nozzle openings in a nozzle atomizer, and inlet channels of the cylinder head. Methods for organizing a workflow are proposed that take into account the shape of the indicator diagrams and affect the emissions of nitrogen oxides and dispersed particles differently. Their implementation allows us to determine the boundary ranges of changes in the control parameters of the fuel supply and exhaust gas recirculation systems when determining the area of minimizing the specific effective fuel consumption and the range of studies for the environmental performance of a diesel engine. The paper presents results of the study on the ways to meet the requirements for emissions of harmful substances, obtained by considering options for the organization of working processes, taking into account the reduction in specific effective fuel consumption, changes in the average temperature of the exhaust gases and diesel equipment. To evaluate these methods, the following indicators have been identified: changes in specific fuel consumption and average temperature of the toxicity cycle relative to the base cycle, the necessary degree of conversion of the purification system for dispersed particles and NO_x. Recommendations are given on choosing a diesel engine to meet Stage 4 emission standards for nitrogen oxides and dispersed particles.

Keywords: requirements, emissions, harmful substances, installation, model, research, design parameters, ecology, toxicity cycle, process, fuel efficiency

For citation: Kuharonak G. M., Kapsky D. V., Berezun V. I. (2020) Ensuring Requirements for Emissions of Harmful Substances of Diesel Engines. *Science and Technique*. 19 (4), 305–310. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-305-310>

Обеспечение требований к выбросам вредных веществ дизелей

Докт. техн. наук, проф. Г. М. Кухарёнок¹⁾, докт. техн. наук Д. В. Капский¹⁾,
канд. техн. наук В. И. Березун²⁾

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

²⁾ОАО «АМКОДОР» – управляющая компания холдинга» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Рассмотрены требования к выбросам вредных веществ дизелей путем выбора конструктивных и регулировочных параметров, определяющих организацию рабочего процесса, и системы очистки отработавших газов с учетом снижения расхода топлива. Разработаны элементы и геометрические характеристики конструкций для дизеля с турбонаддувом серии Д-245 производства ОАО «УКХ «Минский моторный завод» (4ЧН11/12,5) мощностью 90 кВт, оснащенного аккумуляторной системой впрыска топлива с электронным управлением (система рециркуляции отработавших газов по контуру высокого давления, форма и размеры камеры сгорания, количество и угловое расположение сопловых отверстий распылителя форсунки и впускные каналы головки блока цилиндров). Предложены способы организации рабочего процесса, учитывающие форму индикаторной диаграммы, по-разному влияющие на выбросы оксидов азота и дисперсных частиц. Их реализация позволяет определить граничные диапазоны изменения регулировочных параметров систем топливоподачи и рециркуляции отработавших газов при определении области минимизации удельного эффективного расхода топлива и диапазона изучения экологических показателей дизеля. Приведены результаты исследования способов обеспечения требований к выбросам вредных веществ, полученные путем рассмотрения вариантов организации рабочих процессов с учетом снижения удельного эффективного расхода

Адрес для переписки

Кухарёнок 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

топлива, изменения средней температуры отработавших газов и комплектации дизеля. Для оценки этих способов выделены показатели: изменение удельного расхода топлива и средней температуры цикла токсичности по отношению к базовому циклу, необходимая степень конверсии системы очистки по дисперсным частицам и NO_x . Даны рекомендации по выбору комплектации дизеля для обеспечения норм Stage 4 по выбросам оксидов азота и дисперсных частиц.

Ключевые слова: требования, выбросы, вредные вещества, установка, модель, исследования, конструктивные параметры, экология, цикл токсичности, процесс, топливная экономичность

Для цитирования: Кухарёнок, Г. М. Обеспечение требований к выбросам вредных веществ дизелей / Г. М. Кухарёнок, Д. В. Капский, В. И. Березун // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 305–310. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-305-310>

Introduction

Constant tightening of the requirements for diesel engines, directed the vector of development of the world engine-building towards improving environmental performance [1–8]. For a diesel engine, the greatest difficulty is the reduction of emissions of nitrogen oxides (NO_x) and particulate matter (PM), the maximum level of which is determined by the requirements of the technical regulations of the Customs Union. The reduction of emissions of harmful substances (BBB) is due to the finding of a compromise between the degree of complication of the diesel engine design and the efficiency of exhaust gas cleaning (OG) [1–3].

The decisive influence on emissions of harmful substances and fuel-economic indicators of a diesel engine is provided by the adjustment parameters: fuel injection pressure P_{in} , injection advance angle θ and exhaust gas recirculation rate ρ [9–11]. However, the range shift of the effective values of the variable parameters is determined by the basic design parameters of the engine. The use of battery injection

systems allows flexible control of the injection pressure and the injection advance angle without complicating the design, and together with the HORG system, they allow the design parameters of the engine to be coordinated for different operating modes.

The purpose of this work is to ensure the requirements for emissions of harmful substances of diesel engines by selecting design and adjustment parameters that determine the organization of the workflow, and the exhaust gas cleaning system, taking into account the reduction of fuel consumption.

Main part

A test facility for complex research of diesels workflows and NO_x and PM emission estimation has been worked out (Fig. 1). Its peculiar features are the following: automation of measurement and data smoothing processes, on-line monitoring of the eye diagram changes, the beginning of injection and injection duration, recycle rate control of CO_2 concentration in engine exhaust of the inlet gas [12–16].

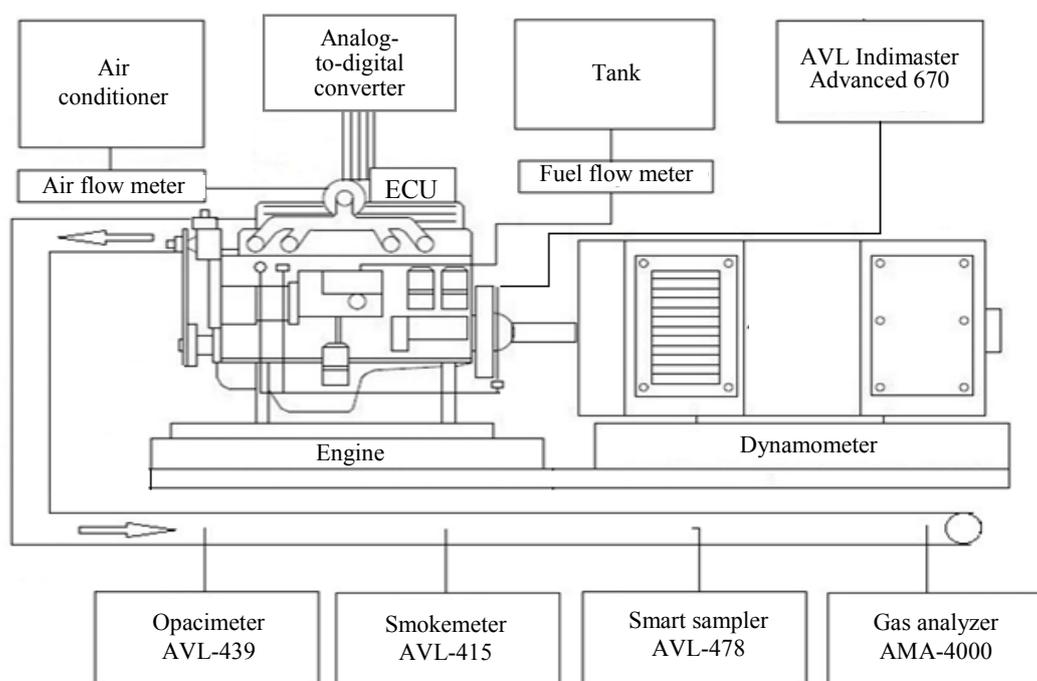


Fig. 1. Test facility lay-out

The test facility meets all the international UNO requirements (Rules No 24, 49, 96).

An investigating methodology has been developed. According to it, for the efficient use of time and labor cost reduction the sequence of parameter changes P_{in} , θ and ρ in providing an operating mode speed and torque = const was defined by the saturated plan of the experiment, which allows to express the acquired results in terms of quadratic regression equations. The required engine power was compensated for changing the quantity of the injection rate. For engine trend monitoring in order to reject misleading tests data while carrying out experimental research the verification of fuel-economic and ecological figures was provided on the chosen in advance control point with the equal fuel-injection equipment alignments and the degree of EGR.

The reproducibility of measurements was provided by systematic equipment calibration and check-out. Studies were conducted on the choice of design parameters with regard to improving environmental performance and reduce specific fuel consumption g_e . The following were configuration parameters study has been carried out with account for ecological performance improvement and corrected car economy (g_e) on the basis of a produced by Minsk Motor Plant 90 kWt turbocharged diesel (D-245 production number) which is equipped with the electronic fuel injection system. The following characteristics have been investigated: the shape of the combustion chamber, angular placement of the spray sparger, its configuration and the quantity of its nozzle holes, swirl ratio of inlet ports of the engine cylinder head, gas distribution

phases and the way of exhaust gas recirculation organization [17–24]. As a result, regulated EGR contoured by high pressure with the chill of circulated exhaust gas has been chosen. The developed elements of the configuration are in Fig. 2.

It has been revealed that the adjustment parameters P , θ and ρ which are changing in the engine's working process, play a crucial role in the working process organization that provides upholding ecological safety standards.

To carry out computational studies, a combined mathematical model of the diesel engine working process with the EGR system has been developed, based on the first law of thermodynamics, including the method of calculating the combustion process N. F. Razleitseva with refined coefficients, and the resulting empirical dependencies for calculating emissions of dispersed particles and exhaust gas temperature after the turbocharger [25–28]. To check the adequacy of the mathematical model, the calculation results for the nominal mode were compared with experimental data.

The compliance of the calculated form of the indicator diagram (ID) according to Fisher's criterion [5], which is the quotient of dividing the estimate of the variance of the S_D inadequacy by the estimate of the error of the single observation S_e , was performed

$$F = \frac{S_D / \varphi_n}{S_e / \varphi_d},$$

where φ_n – number of degrees of freedom of numerator; φ_d – number of degrees of freedom of denominator.

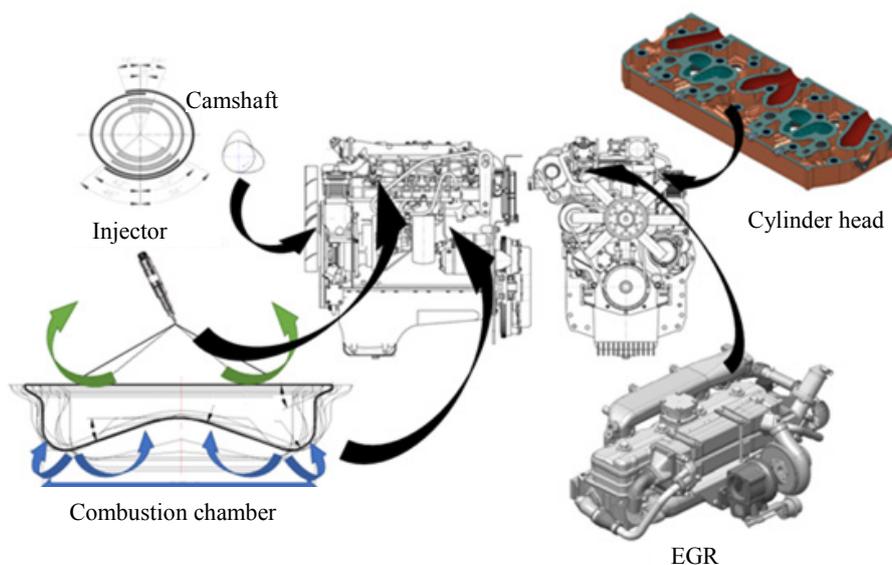


Fig. 2. Developed elements of the study object configuration

The observed value $F = 1.08 < F_{cr} = 1.16$ for statement performance probability $P_b = 0.95$ provides support for the model adequacy.

Dispersion numbers of the effective marker in examining the calculation sufficiency NO_x , PM and T'_r do not drop lower than 94 %. It testifies to the high statistical significance of characteristic curve for its calculation.

As a result, three means of the workflow organization have been singled out which influence NO_x and RM emission in different ways [29]. These means are determined by the type of ID that are shown in Fig. 3.

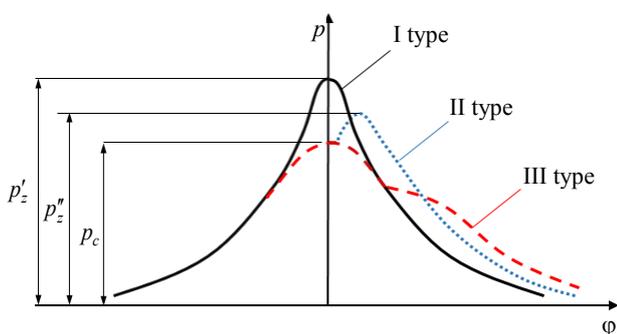


Fig. 3. Indicator diagrams

The first type (I type) is a one-humped ID depicting the ratio of peak combustion pressure to compressive pressure $p_z/p_c > 1$; II type is a double-humped ID depicting $p_z/p_c > 1$ and III type is a double-humped ID depicting $p_z/p_c \leq 1$ (with an indistinct peak p_z).

Calculated analyses of PM and NO_x emission adjustment parameters according to the saturated plan of the experiment for each NRSC ecological cycle mode have been conducted [12]. The margin limits of the variation range have been chosen according to the working processes in the area of the ID (three types). The variation range of P and ρ has been limited by the fuel consumption rate of the initial related type stage along with the correlated ecological parameters. As an additional restricting parameter the exhaust gas temperature after the turbocharger T'_r has been taken, which has been restricted with account of the study subject technical specifications. The margin limits of the adjustment parameters allow to define the minimization area g_e as well.

In order to choose the fuel supply parameters and the exhaust fume recycle rate the simulation data has been analyzed as well as the obtained regression dependence with regard of the ID type. Taking into consideration generally accepted

emission reduction strategies for each peak of NRSC cycle target-oriented approaches to solving the problems have been searched for. For the peak of the ecological cycle H-100 substantiation of combustion process parameters data is in Fig. 4. The data analysis has been performed in the following three directions:

- 1) minimization g_e ($g_{e\min}$);
- 2) PM minimization (PM_{\min});
- 3) NO_x minimization ($NO_{x\min}$).

For the first direction the following parameters have been chosen: $P_{in} = 160$ MPa, $\theta = 10$ degrees and $\rho = 0.12$ if emitted $NO_x = 6.07$ g/(kW·h), $PM = 0.04$ g/(kW·h) and $g_e = 214.2$ g/(kW·h).

While calculating the whole body of data the results of the search for NO_x and PM minimization determine nonrational parameters from the point of view of fuel-economic figures. It shows itself in the choice of extreme settings of the working process in the range under consideration.

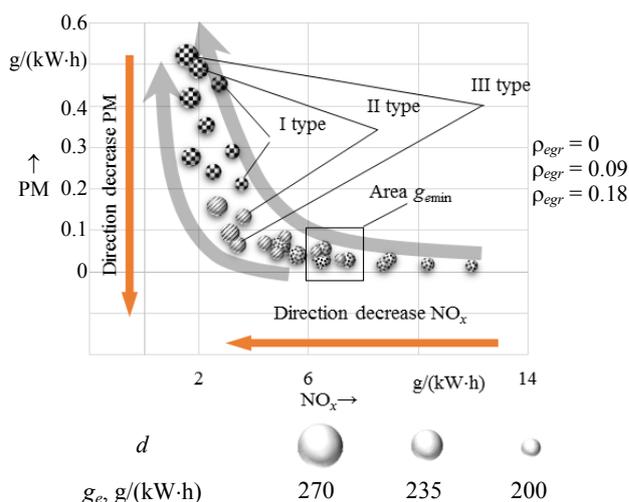


Fig. 4. PM- NO_x diagram for nominal conditions

Consequently, for the 2nd and 3rd directions the solutions have been searched for in limiting fuel consumption in relation to the data of the 1st direction ($g_{e\min}$). To minimize PM the search for solutions was made in the following two ways: NO_x increasing and NO_x decreasing by means of imposing an additional boundary condition. The simulated result of the three directions of the emission reduction strategy for the cycle H-100 is depicted in the paper. As percentage in Fig. 5 fuel consumption variation is expressed.

In the proposed variant of decision making organization the parameters of fuel consumption degradation tend to organize the working process with

the initial stage of the indicator diagram and a transition from type I to type III. This is reflected in the fact of θ decrease while P_m is maintained at the upper variation limit. The difference in NO_x and PM minimization consists only in the fact that in the former case ρ is in the value range of 0.16, but in the latter case it approximates 0.

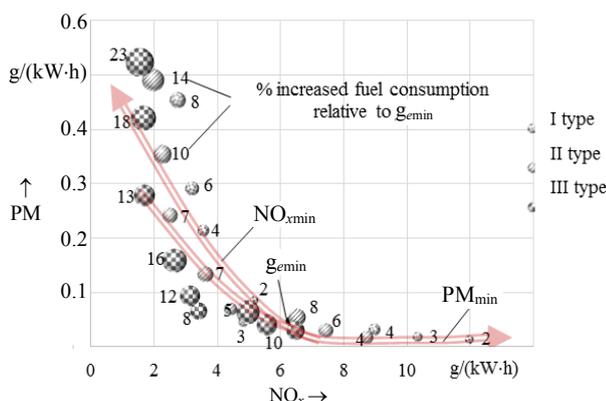


Fig. 5. Dimensions of ecological indices improvement for nominal operation conditions

In the areas of the obtained values, a study was conducted on ways to reduce diesel emissions, for the evaluation of which the following indicators were highlighted:

Δg_e – is the change in fuel consumption in relation to the base cycle;

ΔT_{avr} – is the change in the average temperature of the toxicity cycle relative to the base cycle;

C_{PM} , C_{NO_x} – is the required degree of conversion of the purification system for PM and NO_x to achieve the standards of Stage 4, defined as the ratio of the difference between the values of “raw” and normalized emissions to the value of “raw” emissions.

Five stages of workflows calculation have been identified with account for fuel consumption with load increase, toxicity level factor weight and the presence of the EGR system (Tab. 1).

Table 1

NO_x and PM emission reduction strategies data

Calculation stage	NO_x , g/(kW·h)	PM, g/(kW·h)	Δg_e , %	ΔT_{avr} , K	C_{PM}	C_{NO_x}	EGR
1	8.1	0.031	–	–	0.20	0.95	+
2	5.1	0.089	10.9	54	0.70	0.92	+
3	13.1	0.014	2.4	4	–	0.97	–
4	7.7	0.025	2.4	4	–	0.95	+
5	2.5	0.265	12.0	81	0.91	0.83	+

At the first stage to compose the basic toxicity level for each mode the workflow settings

have been chosen which provide g_e minimization. The summary NO_x and PM emission indicators have been 8.100 g/(kW·h) and 0.031 g/(kW·h) respectively. At the same time the exhaust gas temperature according to the toxicity level constitutes 647 K.

At the 2nd and 3rd stages a PM reduction strategy has been fulfilled involving the use of EGR system and its excluding. As a result, for the engine configuration without the EGR system the cycle with NO_x and PM of 13.1 g/(kW·h) and 0.014 g/(kW·h) has been obtained respectively. It allows to meet PM Stage 4 regulations without the use of the EGR system. Herewith, Δg_e is 2.4 %, but the ΔT_{avr} increase is 4 K. For the engine configuration without the EGR system NO_x and PM emission constitutes 5.100 g/(kW·h) and 0.089 g/(kW·h) respectively, Δg_e is 10.9 % and the ΔT_{avr} increase is 54 K.

At the 4th calculation stage the strategy of meeting PM reduction within the framework of Stage 4 regulations was considered with the opportunity to reduce NO_x by using the EGR system. The PM value of 0.025 g/(kW·h) within a cycle has been successful with the NO_x emission of 7.7 g/(kW·h) and with the ΔT_{avr} increase of 4 K together with the Δg_e increase of 2.4 %.

At the 5th calculation stage a NO_x reduction strategy has been fulfilled. The cycle obtained provided NO_x and PM with 2.500 g/(kW·h) and 0.265 g/(kW·h) respectively, Δg_e has increased by 12 % and ΔT_{avr} – by 81 K.

The choice of the emission reduction strategies was made with regard of fuel consumption and the reduction of engine configuration elements. Especially appealing are the strategies within the framework of PM Stage 4 regulations (variants 3 and 4).

CONCLUSIONS

1. The design parameters of the combustion chamber, cylinder head, nozzle and exhaust gas recirculation system of diesel engine are defined, allowing to organize the flow of the working process, taking into account the improvement of environmental and fuel-economic indicators.

2. Methods of workflow organization are proposed that differ in the shape of the indicator diagram, allowing to determine the range of changes in the parameters of fuel supply control and exhaust gas recirculation during each toxicity cycle mode.

3. Methods to meet the requirements for emissions of harmful substances from a diesel engine, differing in the priority of fuel efficiency with increasing load, the weighting factors of the toxic cycle, the exhaust gas temperature after the turbocharger and the degree of conversion of the exhaust gas cleaning system are investigated.

REFERENCES

1. Markov V. A., Bashirov R. M., Gabitov I. I. (2002) *Diesel Exhaust Toxicity*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 376 (in Russian).
2. Grekhov L. V., Ivaschenko N. A., Markov V. A. (2004) *Fuel Equipment and Diesel Control Systems*. Moscow, Legion-Avtodata Publ. 344 (in Russian).
3. Basshuysen R., Schäfer F. (2015) *Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. Wiesbaden, Vieweg & Sohn Verlag. 1032. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-04678-1>.
4. 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).
5. Parsadanov I. V. (2003) *Improvement of Quality and Competitiveness of Diesel Engines Based on the Fuel and Environmental Criterion*. Kharkov, Publishing Centre of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". 244 (in Russian).
6. Kulchitskii A. R. (2000) *Toxicity of Automotive and Tractor Engines*. Vladimir, Publishing House of Vladimir State University. 256 (in Russian).
7. Eurasian Economic Commission (2012) TR TS 031/2012. *On the Safety of Agricultural and Forestry Tractors and their Trailers*. Minsk, Ekonomenergo Publ. 60 (in Russian).
8. Heck R., Farrauto R., Galati S. (2009) *Catalytic Air Pollution Control*. NY, John Wiley&Sons. 391. <https://doi.org/10.1002/9781118397749>.
9. Kukharonak H. M., Berezun V. I. (2013) Diesel Emission Reduction. *Improvement of Traffic and Transport Organization for Passengers and Goods*. Minsk, Belarusian National Technical University, 314–323 (in Russian).
10. Berezun V. I. (2013) High-Performance Energy-Efficient Engines for Off-Road Vehicles. *Problemy i Perspektivy Razvitiya Transportnykh Sistem i Stroitel'nogo Kompleksa: Materialy III Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii*. [Problems and Prospects for Development of Transport Systems and Building Complex: Materials of the III International Scientific and Practical Conference]. Gomel, Belarusian State University of Transportation, 157–158 (in Russian).
11. *Dieselmotor-Management*. 3rd ed. [Diesel Engine Control Systems]. Robert Bosch GmbH, 2002. 480 (in German).
12. Kukharonak H. M., Berezun V. I. (2018) Influence of Fuel Supply and Exhaust Gas Recirculation on Emissions of Harmful Substances from Diesel Engines. *Avtomobil'nyi Transport* [Automobile Transport], (42), 5–11 (in Russian).
13. Kukharonak H. M., Marchuk A. N. (2010) Experimental Setup for Studying Starting Qualities of Diesel Engines with Electronic Fuel Supply Control. *Visnik Skhidno-ukraïns'kogo Natsional'nogo Universitetu imeni Volodymyra Dalya = Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, (6), 80–84 (in Russian).
14. *Concerto Software Version 3.7*. Graz: AVL List, 2004. 916.
15. *Smoke Value Measurement with the Filter-Paper-Method*. Graz: AVL List, 2004. 112.
16. *Product Guide AVL SMART SAMPLER 478*. Graz: AVL List, 2004. 176. A. N.
17. Kukharonak H. M., Petruchenko A. N., Berezun V. I. (2014) *Diesel Engine Emissions Reduction*. Moscow, Novoe Znanie Publ. 220 (in Russian).
18. Kukharonak H. M., Sevizdral S. P., Berezun V. I. (2012) Provision of Environmental Indicators of Euro-4 and Euro-5 Level for Automobile Diesels of the Minsk Motor Plant. *Vesti Avtomobil'no-Dorozhnogo Instituta = Bulletin of Automobile and Highway Institute*, 14 (1), 95–105 (in Russian).
19. Sevizdral S. P., Berezun V. I. (2013) State of the Issue and Prospects for the Development of Engine-Building in the Republic of Belarus. *Zhurnal Assotsiatsii Avtomobilnykh Inzhenerov* [Journal of Association of Automotive Engineers], 83 (6), 6–7 (in Russian).
20. Kukharonak H. M., Berezun V. I. (2014) Selection of Parameters for System of Diesel Engine Exhaust Gas Recirculation. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (1), 57–63 (in Russian).
21. Kukharonak H. M., Petruchenko A. N., Berezun V. I. (2014) Choice of Diesel Engine Combustion Chamber shape. *Vestnik SevGTU. Mashinoprioborostroenie i Transport* [Bulletin of Sevastopol National Technical University. Engineering and Transport], (152), 65–68 (in Russian).
22. Kukharonak H. M., Berezun V. I. (2014) Choice of Shape for Combustion Chamber of Diesel Engine with Low Injection Intensity. *Sovershenstvovanie Organizatsii Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozok Passazhirov i Gruzov. Sbornik Nauchnykh Trudov: po Rezul'tatam Ezhegodnoi Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii* [Improvement in Organization of Traffic and Transport of Passengers and Goods. Collection of Scientific Papers: According to the Results of the Annual International Scientific-Practical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 180–184 (in Russian).
23. Berezun V. I. (2014) Study of Methods for Organizing Exhaust Gas Recirculation. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy 12 Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 12th International Science and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, BNTU, 56–57 (in Russian).
24. Berezun V. I. (2013) Performance Indicators for High Power Density Engines. *Sovershenstvovanie Organizatsii Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozok Passazhirov i Gruzov. Sbornik Nauchnykh Trudov* [Improvement in Organization of Traffic and Transport of Passengers and Goods. Collection of Scientific Papers]. Minsk, BNTU, 333–337 (in Russian).
25. Razleytsev N. F. (1980) *Modeling and Optimization of the Combustion Process in Diesel Engines*. Kharkov, Vishcha Shkola Publ. 169 (in Russian).
26. Hiroyasu H., Kadota T., Arai M. (1983) Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions. Part 1. Combustion Modeling. *Bulletin of the JSME*, 26 (214), 569–575. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.26.569>.
27. Kukharonak H. M. (1999) *High Speed Diesel Workflow. Methods and Means of Improvement*. Minsk, Belarusian State Polytechnical Academy. 180 (in Russian).
28. Kukharonak H. M., Hershman D. G. (2011) Modeling of Characteristics for Fuel Jets and Parameters for Diesel Combustion Chamber. *Vestnik BNTU* [Bulletin of Belarusian National Technical University], (4), 35–39 (in Russian).
29. Kukharonak H. M. (2018) Improvement of Diesel Engine Workflow. *Izobretatel* [Inventor], 217 (1), 37–40 (in Russian).

Received: 09.07.2019

Accepted: 15.10.2019

Published online: 30.07.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-311-319>

УДК 535.14:621.375.826

Природа деградации полупроводниковых лазеров с электронным накачиванием энергии. Теоретические предпосылки

Докт. физ.-мат. наук А. С. Гаркавенко¹⁾, докт. техн. наук, проф. В. А. Мокрицкий²⁾,
докт. техн. наук, доц. О. В. Маслов²⁾, канд. техн. наук А. В. Соколов²⁾

¹⁾Фирма «Гайстескрафт» (Корнвестхайм, Германия),

²⁾Одесский национальный политехнический университет (Одесса, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В статье отмечено, что при достижении определенных критических значений плотности мощности лазерного излучения в полупроводниковых лазерах с электронным накачиванием энергии, изготовленных из монокристаллов ряда соединений, имеет место катастрофическая деградация. Она сопровождается механическим разрушением поверхности торцов резонатора, необратимым падением мощности излучения и увеличением порога генерации. Причем при катастрофической деградации полупроводниковых лазеров под действием собственного излучения в монокристалле происходят существенные изменения кристаллической структуры: плотность дислокаций достигала более 10^{12} – 10^{15} см⁻². Показано, что исходная плотность дислокаций и критическая плотность мощности собственного излучения обратно пропорциональны. Таким образом, процесс деградации полупроводниковых лазеров прямо связан с генерацией и размножением дислокаций во время работы лазера. При критических значениях плотности лазерного излучения и плотности дислокаций происходит механическое разрушение кристаллической решетки кристалла. Для выяснения предложенного механизма деградации полупроводниковых лазеров необходимо учесть влияние дислокаций на оптические свойства полупроводников. Обычно это влияние рассматривается следующим образом. Дислокации вызывают появление поля локальных деформаций и, кроме того, образуют области пространственного заряда, которые окружают ядро дислокации в виде заряженной трубки. Предлагается модель исследуемого явления: в ядре дислокации возникают большие напряжения, ведущие к смещению отдельных атомов и деформации решетки кристалла. Деформация решетки в ядре дислокации приводит к локальному изменению ширины запрещенной зоны. Это изменение порядка 10^{-2} эВ для винтовой дислокации и 10^{-1} эВ для краевой. Механизм данного изменения состоит в том, что упомянутая деформация приводит к множественному разрыву электронных связей и увеличению в ядре дислокации концентрации электронов примерно до 10^{18} см⁻³. Разработанная аналитическая модель механизма деградации позволит производить выбор полупроводника и оценку режима работы лазера в условиях повышенной мощности излучения.

Ключевые слова: дислокация, лазер, деградация, полупроводник, излучение

Для цитирования: Природа деградации полупроводниковых лазеров с электронным накачиванием энергии. Теоретические предпосылки / А. С. Гаркавенко [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 311–319. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-311-319>

Nature of Degradation in Semiconductor Lasers with Electronic Energy Pumping. Theoretical Background

A. S. Garkavenko¹⁾, V. A. Mokritsky²⁾, O. V. Maslov²⁾, A. V. Sokolov²⁾

¹⁾Gaisteskraft Firm (Kornwestheim, Germany),

²⁾Odessa National Polytechnic University (Odessa, Ukraine)

Abstract. Catastrophic degradation takes place in case of reaching critical values of laser radiation density power in semiconductor lasers with electronically pumped energy made from single crystals of some compounds. It has been accompanied

Адрес для переписки

Мокрицкий Вадим Анатольевич
Одесский национальный политехнический университет
просп. Шевченко, 1,
65044, г. Одесса, Украина
Тел.: +38 048 734-86-36
mokrickiy37@gmail.com

Address for correspondence

Mokritsky Vadim A.
Odessa National Polytechnic University
1, Shevchenko Ave.,
65044, Odessa, Ukraine
Tel.: +38 048 734-86-36
mokrickiy37@gmail.com

by mechanical destruction of the surface at resonator ends, an irreversible decrease in radiation power and an increase in generation threshold. Moreover, during the catastrophic degradation of semiconductor lasers under the action of intrinsic radiation, significant changes in the crystal structure occur within the single crystal: dislocation density reaches a value more 10^{12} – 10^{15} cm^{-2} . It has been shown that initial density of dislocations and critical power density of the intrinsic radiation are inversely proportional. Thus, the degradation process of semiconductor lasers is directly related to generation and multiplication of dislocations during laser operation. Mechanical destruction of a crystal lattice occurs at critical values of laser radiation power and dislocation density. To clarify the proposed mechanism for the degradation of semiconductor lasers, it is necessary to take into account an effect of dislocations on optical properties of semiconductors. Typically, this effect is considered as follows: dislocations cause an appearance of a local deformation field and, in addition, form space-charge regions that surround a dislocation core in the form of a charged tube. The paper proposes a model of the phenomenon under study: large stresses arise in the dislocation core, leading to a displacement of individual atoms and deformation of the crystal lattice. Lattice deformation in the dislocation core leads to a local change in the width of a forbidden band. This change value is about 10^{-2} eV for a screw dislocation and 10^{-1} eV for a boundary dislocation. The mechanism of this change is that aforementioned deformation leads to a multiple rupture of electronic bonds and an increase in the electron concentration in the dislocation core to approximately value 10^{18} cm^{-3} . The developed analytical model of the degradation mechanism allows to perform selection of a semiconductor and estimation of a laser operating mode under conditions of increased radiation power.

Keywords: dislocation, laser, degradation, semiconductor, radiation

For citation: Garkavenko A. S., Mokritsky V. A., Maslov O. V., Sokolov A. V. (2020) Nature of Degradation in Semiconductor Lasers with Electronic Energy Pumping. Theoretical Background. *Science and Technique*. 19 (4), 311–319. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-311-319> (in Russian)

Введение

Изучение процессов деградации источников когерентного излучения и возможных путей их устранения представляет собой фундаментальную проблему лазерной техники. Ее решение определяет практическое применение лазеров в различных областях науки и техники, увеличение их срока службы, надежности и стабильности выходных параметров в режиме максимальной мощности. Однако в настоящее время нет единого теоретического представления о механизмах деградации, а экспериментальные результаты разных авторов порой противоречивы. В случае полупроводников эти трудности усугубляются неоднородностью кристаллов, которые содержат большое количество примесей и дефектов структуры, обладают низкой механической прочностью. Кроме того, им свойственно различное поглощение энергии: собственное, экситонное, примесное, на свободных носителях и колебаниях решетки. Все это снижает оптическую прочность материала и усложняет изучение физических причин деградации лазеров.

Основная часть

В статье содержатся результаты исследования процессов деградации полупроводниковых сред с разной степенью оптической однородности под воздействием собственного лазерного

излучения. Исследования проводились на модифицированных с помощью радиационных технологий оптически однородных кристаллах арсенида галлия и сульфида кадмия с флуктуациями показателя преломления Δn в диапазоне 10^{-1} – 10^{-4} [1–3]. Выделены два механизма деградации – разрушение кристалла и зеркала резонатора под действием собственного мощного излучения и постепенное снижение мощности в процессе длительной работы лазера. Картина разрушения имела следующий характер: деградация оптически менее однородных кристаллов (с флуктуациями показателя преломления в диапазоне 10^{-1} – 10^{-4}) сопровождается механическим разрушением поверхности торцов резонатора, объема кристалла и связанным с этим необратимым падением мощности излучения и увеличением порога генерации [4]; деградация более оптически однородных кристаллов ($\Delta n \sim 10^{-5}$ – 10^{-6}) связана с эффектом самофокусировки лазерного пучка и в данной статье рассматриваться не будет. Величина критической плотности мощности $P_{кр}$ при $T = 80$ К в образцах первого типа в кристаллах CdS составляет $\sim(0,2\text{--}3,0)$ МВт/см², в кристаллах GaAs $\sim(2,0\text{--}15,0)$ МВт/см². При таких значениях плотности мощности излучения плотность дислокаций в этих образцах достигает величины $N^0 \geq (10^{15}\text{--}10^{17})$ см⁻², что и обуславливает механическое разрушение кристаллической решетки кристалла. Подобный вы-

вод об определяющем влиянии дислокаций на деградацию подтверждается результатами экспериментальных исследований (рис. 1) [4, 5].

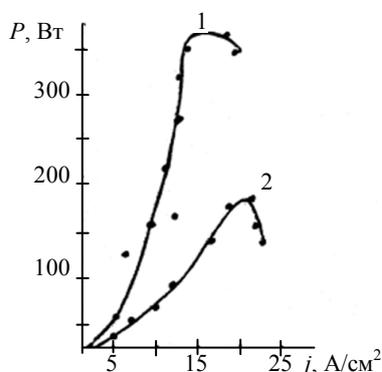


Рис. 1. Зависимость мощности лазерного излучения от плотности тока накачки для оптически однородных кристаллов GaAs для $T = 80$ К при:
1 – $N_d = 1,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\Delta n \sim 10^{-4}$; 2 – $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $\Delta n \sim 10^{-3}$

Fig. 1. Dependence of laser radiation power on pump current density for optically homogeneous GaAs crystals with $T = 80$ K at: 1 – $N_d = 1.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\Delta n \sim 10^{-4}$; 2 – $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $\Delta n \sim 10^{-3}$

Для выяснения предложенного механизма деградации полупроводниковых лазеров необходимо учесть влияние дислокаций на оптические свойства полупроводников. Обычно это влияние рассматривается следующим образом. Дислокации вызывают появление поля локальных деформаций и, кроме того, образуют области пространственного заряда, которые окружают ядро дислокации в виде заряженной трубки [6]. На изменение локальной концентрации свободных электронов влияет как поле деформации, так и потенциал, создаваемый заряженной трубкой. Дислокации, рассеивая электроны, влияют на время релаксации электронного импульса и тем самым на поглощение излучения свободными носителями заряда. При плотности дислокаций 10^7 см^{-2} изменение коэффициента поглощения составит не более 10^{-2} см^{-1} [7]. Отсюда следует, что якобы влияние дислокаций на оптические свойства полупроводников незначительно.

Однако этот вывод неверен, поскольку он не учитывает, что поля локальных деформаций, вызванные дислокациями, влияют на электронные параметры кристалла не только тем, что они вызывают рассеяние электронов, но и тем, что приводят к локальным изменениям ширины

запрещенной зоны [6]. Такие изменения обуславливают прямое взаимодействие исходных дислокаций с собственным излучением лазера, при котором на них поглощается значительная доля световой мощности (рис. 1) [8]. Сказанное выше указывает на то, что процесс деградации полупроводникового лазера прямо связан с генерацией и размножением дислокаций во время его работы.

Предлагается следующая модель исследуемого явления. Как известно, возникающие в ядре дислокации напряжения очень велики и ведут к смещению отдельных атомов и деформации решетки кристалла [8]. Деформация решетки в ядре дислокации приводит к локальному изменению ширины запрещенной зоны [6]

$$\Delta E_1 = E_g \frac{\Delta d}{d}, \quad (1)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны полупроводникового кристалла; d – период решетки.

Механизм этого изменения состоит в том, что упомянутая деформация, связанная с винтовой дислокацией, приводит к сильному перекрытию электронных волновых функций и, следовательно, к значительному возрастанию проводимости внутри дислокационной трубки, а деформация, связанная с краевой дислокацией, ведет к множественному разрыву электронных связей и опять же к увеличению концентрации электронов до $N \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, область, заключенная внутри ядра, ведет себя подобно участку полупроводника с вырожденной концентрацией носителей заряда. Это, в свою очередь, приводит к эффекту Бурштейна – Мосса, т. е. к локальному увеличению ширины запрещенной зоны на ΔE_2 по порядку величины, равному ΔE_1 :

$$\Delta E = \Delta E_1 = \Delta E_2 = \left(1 + \frac{m_e}{m_h}\right) (E_F - E_{co} - 4kT), \quad (2)$$

где E_{co} – дно зоны проводимости; m_e , m_h – эффективные массы электронов и дырок соответственно; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; E_F – энергия Ферми.

Отмеченное увеличение будет порядка 10^{-2} эВ для винтовой дислокации и 10^{-1} эВ для краевой. Таким образом, когда лазер начинает работать, находящиеся в кристалле исходные дис-

локации не смогут поглощать лазерное излучение из-за того, что локальная ширина запрещенной зоны в ядре дислокации E'_g больше ширины запрещенной зоны полупроводникового кристалла E_g и энергии лазерного кванта $\hbar\omega_0$:

$$E'_g = (E_g + \Delta E) > \hbar\omega_0. \quad (3)$$

Однако в процессе работы лазера плотность мощности лазерного излучения внутри резонатора увеличивается со временем и приближается к критической $P_1 \approx P_{кр}$. Напряженность электрического поля в лазерном луче ε становится значительной и определяется формулой [4]

$$\varepsilon = \left(\frac{4\pi P_{кр}}{c} \right)^{1/2} \cdot 3 \cdot 10^2 \text{ В/см}, \quad (4)$$

где c – скорость света в вакууме.

Величина ε для полупроводниковых лазеров изменяется в пределах $(10^3 - 10^5)$ В/см. Под влиянием этого поля сдвигается край собственного поглощения в ядре дислокации в сторону меньшей энергии фотонов, т. е. более длинных волн. Другими словами, локальная ширина запрещенной зоны в ядре дислокации уменьшается на величину [8]

$$\Delta E = 3 \sqrt{\frac{(e\hbar)^2}{m_e}}, \quad (5)$$

где e – заряд электрона; \hbar – постоянная Планка.

Например, для сдвига $\Delta E \sim 10^{-2}$ эВ требуется напряженность поля $\varepsilon = 5 \cdot 10^4$ В/см. Таким образом, при больших плотностях мощности лазерного излучения происходит компенсация изменений ширины запрещенной зоны в ядре дислокации. После компенсации ширина запрещенной зоны в ядре дислокации и полупроводниковом кристалле становится практически одинаковой

$$E'_g \cong E_g \leq \hbar\omega_0. \quad (6)$$

При этом ядро дислокации начинает интенсивно поглощать излучение за счет разрешенных прямых переходов, поскольку в полупро-

водниковых лазерах используются только прямозонные материалы. Коэффициент поглощения α_0 при таких переходах [9]

$$\alpha_0 = \frac{2e^2(2M)^{3/2}}{\pi^3 cm_0^2 \hbar^3 n \omega_0} |P_{ij}(0)|^2 (\hbar\omega_0 - E_g)^{1/2}, \quad (7)$$

где $M = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}$ – приведенная масса; m_0 – масса электрона в вакууме; n – показатель преломления кристалла; $|P_{ij}(0)|^2 = \langle j | \vec{\varepsilon}_{ij} \vec{Y} | i \rangle$ – дипольный матричный элемент; $\vec{Y} = -e \sum \vec{r}$ – дипольный момент; $\vec{\varepsilon}_{ij}$ – вектор поляризации излучения.

Формулу (7) можно преобразовать к виду

$$\alpha_0 = \frac{3,38 \cdot 10^3}{n} \left(\frac{m_e}{m_h} \right)^{1/2} \frac{E_g}{\hbar\omega_0} (\hbar\omega_0 - E_g)^{1/2}. \quad (8)$$

В прямозонных полупроводниках значение коэффициента α_0 может достигать $\sim (10^3 - 10^5)$ см⁻¹. Поток энергии излучения, поглощенный ядром дислокации, равен

$$\alpha_0 n \hbar\omega_0 = \alpha_0 P, \quad (9)$$

где n – число фотонов, попавших на поверхность ядра дислокации в единицу времени; P – мощность излучения лазера.

В равновесных условиях упругая энергия краевой дислокации равна энергии лазерного излучения, поглощенной ее ядром:

$$\alpha_0 \hbar\omega_0 = \frac{\mu b^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad (10)$$

где μ – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; b – величина вектора Бюргерса; r_1 – расстояние, на которое распространяется деформация; r_2 – радиус ядра дислокации.

Если дислокация не закреплена и может свободно двигаться, то поглощенная ею энергия идет на изменение скорости ее распространения по кристаллу, т. е. на ускорение дислокации. Дислокации, движущиеся с большой скоростью, имеют достаточную кинетическую энергию для образования других дислока-

ций, т. е. становятся источниками их размножения [10]. Критическое значение скорости, при которой это происходит, $v \sim 0,6c_t$, где $c_t = (\mu/\rho_0)^{1/2}$ – скорость распространения поперечной звуковой волны (волны сдвига); ρ_0 – плотность кристалла. Если же линия дислокации по каким-либо причинам закреплена с обоих концов, то напряжение, необходимое для ее изгиба до радиуса R , составит [10]

$$\sigma = \frac{0,5\mu b}{R}. \quad (11)$$

Используя (11), запишем (10) в виде

$$\sigma = \frac{2\pi(1-\nu)\alpha_0\hbar\omega_0}{bR \ln \frac{r_1}{r_2}}. \quad (12)$$

Из формулы (12) видно, что энергия излучения, поглощенная ядром закрепленной дислокации, идет на создание источника Франка – Рида, который генерирует другие дислокации. Даже при небольшой плотности таких дислокаций ($N_d \sim (10^2 - 10^3) \text{ см}^{-2}$) начинается процесс быстрого их размножения. С учетом других источников размножения, названных выше, он перерастает со временем в лавинообразный (каскадный). Это приводит к деградации полупроводникового лазера и к его механическому разрушению.

Фотоны, поглощенные ядрами малоподвижных дислокаций, являются резонансными с частотой ω_0 . Однако после того, как сформировалась дислокационная лавина, движущаяся с большой скоростью, благодаря эффекту Доплера частота поглощенных фотонов отклоняется от основной (резонансной) частоты. Коэффициент поглощения в данном случае

$$\alpha(\omega) = \alpha_0 Q(\omega), \quad (13)$$

где $Q(\omega) = \frac{\Gamma/2\pi}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2/4}$ – форма спектральной линии; Γ – ширина спектральной линии.

Вероятность поглощения определяется формулой

$$w(\vec{r}) = \int_0^\infty \exp[-\alpha(\omega)\vec{r}] Q(\omega) d\omega. \quad (14)$$

Подставляя (13) в (14) с учетом того, что $\alpha_0 r \gg 1$, найдем

$$w(r) = (\pi\alpha_0 r)^{-1/2}.$$

Вероятность того, что фотон поглотится в единице телесного угла в пределах от r до $r + dr$, имеет вид

$$R(r) = -\frac{1}{4\pi r^2} \frac{dw(r)}{dr} = (4\pi)^{-3/2} r^{-7/2} \alpha_0^{-1/2}.$$

Изменение плотности дислокаций $N_d^0(\vec{r}, t)$ при развитии дислокационной лавины определяется следующими процессами: генерацией дислокаций за счет поглощения на них собственного лазерного излучения, генерацией дислокаций за счет избыточной энергии их ускоренного движения и источников Франка – Рида, а также их диффузией и подвижностью. Уравнение для лавинного нарастания плотности дислокаций имеет вид

$$\frac{\partial N_d^0(\vec{r}, t)}{\partial t} = qvN_d^0(\vec{r}, t) + D\nabla^2 N_d^0(\vec{r}, t) - v\nabla N_d^0(\vec{r}, t) + \alpha_0 v \int R|\vec{r} - \vec{r}'| N_d^0(\vec{r}', t) d\vec{r}', \quad (15)$$

где q – число дислокаций, образуемых ускоренно движущимися дислокациями на единице длины пробега; v – скорость движения лавины.

Решение уравнения (15) с начальным условием $N_d^0(\vec{r}, 0) = \delta(\vec{r})$ (где $\delta(\vec{r})$ – дельта-функция Дирака) имеет вид

$$N_d^0(\vec{r}, t) = \frac{e^{(q+\alpha_0)vt}}{2\pi} \int_0^\infty \frac{k^2 \sin(k\vec{r}_0)}{\vec{r}_0} \times \exp\left[-k^2 D + \alpha_0 v (k/\alpha_0)^{1/2}\right] t dk, \quad (16)$$

где \vec{r}_0 – радиус-вектор, имеющий компоненты $(x, y, z - vt)$.

Поскольку скорость дислокационной лавины достаточно велика, коэффициентом диффузии D в экспоненте под интегралом в формуле (16) можно пренебречь. Тогда

$$N_d^0(\vec{r}, t) = \frac{e^{(q+\alpha_0)vt}}{2\pi} \int_0^\infty \frac{k^2 \sin(k\vec{r})}{\vec{r}_0} \exp\left[\alpha_0 v (k/\alpha_0)^{1/2}\right] t dk. \quad (17)$$

Из показателя экспоненты под интегралом найдем радиус лавины

$$r_{\pi} \sim \frac{1}{k} \sim \alpha_0 v^2 t^2.$$

Примем, что дислокационная лавина распространяется вдоль оси x резонатора лазера, и поскольку ее распространение ограничено размерами кристалла, заменим верхнюю границу в интеграле на $1/L_0$ (L_0 – длина лазерного резонатора). Используя тот факт, что

$$\frac{k^2 \sin(kx)}{x} = \pi k^2 \delta(x, k),$$

где $\delta(x, k)$ – дельта-функция Дирака, и известное соотношение $\int \delta(x, \xi) f(\xi) d\xi = f(x)$, найдем, что:

$$\int_0^{1/L_0} \frac{k^2 \sin(k\bar{r}_0)}{\bar{r}_0} \exp(\alpha_0^{1/2} v t k^{1/2}) dk = \frac{\pi}{L_0^2} \exp\left[\left(\sqrt{\alpha_0/L_0}\right) v t\right]. \quad (18)$$

Подставляя (18) в (17), найдем окончательно

$$N_{\pi}^0(x, t) = \frac{1}{2L_0^2} \exp\left[\left(q + \alpha_0 + \sqrt{\alpha_0/L_0}\right) v t\right]. \quad (19)$$

Из (19) видно, что экспоненциальная связь между плотностью дислокаций $N_{\pi}^0(x, t)$ и параметрами α_0, q, L_0, v, t определяет лавинообразный характер ее развития в кристалле.

Примем, что дислокационная лавина движется как единое целое и скорость любой дислокации в ней равна скорости движения лавины. Однородное напряжение сдвига на ядре дислокации $\sigma_{yz} = 10^{-3} \mu \frac{v}{c_t}$ равно давлению собственного излучения лазера на ядро дислокации

$$p = \frac{nP}{cS},$$

где n – показатель преломления кристалла; c – скорость света в вакууме; S – площадь поверхности ядра дислокации.

Тогда, приравнивая величины $\sigma_{yz} = p$, найдем скорость движения дислокации под действием светового давления

$$v = \frac{10^3 n c_t P}{\mu c S}.$$

Оценим эту величину для лазера на GaAs. При $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с, $n = 3,6$, $\mu = 10^{12}$ дин/см², $c_t = 4,3 \cdot 10^5$ см/с, $P = 1$ МВт, $v = 4,1 \cdot 10^5$ см/с получим почти скорость звука, т. е. $v \sim c_t$. Однако при мощностях излучения лазера ~ 10 МВт и выше, v будет значительно превышать скорость звука c_t ($v = 4,1 \cdot 10^6$ см/с и выше), и дислокационная лавина преодолевает звуковой барьер.

В этой связи разделим процесс деградации (образования трещин) полупроводникового лазерного кристалла на две части.

1. Когда мощность излучения меньше или равна 1 МВт и соответственно скорость дислокационной лавины меньше или равна поперечной скорости звука в кристалле $v \leq c_t$.

2. Когда мощность излучения больше 1 МВт и соответственно скорость дислокационной лавины больше поперечной скорости звука $v > c_t$, т. е. дислокационная лавина преодолевает звуковой барьер в области сверхзвуковых скоростей.

Анализ части 1. Благодаря взаимодействию формирующейся дислокационной лавины с мощным когерентным лазерным излучением ее движение становится макроскопически когерентным и сверхтекучим. Это означает, что лавина может беспрепятственно (силами электронного и фононного трения пренебрегаем) перемещаться по кристаллу. Незатухающее движение ее обеспечивается когерентностью фаз винтовых и краевых дислокаций. Если бы это движение было затухающим, то из-за возникающих сил трения испускались бы фононы и рассеивались электроны и упорядоченное в результате когерентности движение перешло бы в неупорядоченное тепловое. Кинетическую энергию E_2 такого движения можно описать формулой

$$E_2 = \frac{mv^2}{2} + E_0 + E_F + \bar{p}\bar{v},$$

где $E_0 = c_p p$ – энергия фонона; p – импульс фонона; E_F – энергия Ферми, характерная энергия

электрона в вырожденных полупроводниках; m – масса лавины.

В результате затухания E_2 меньше, чем первоначальная энергия лавины $E_1 = mv^2/2$ (до затухания). Следовательно:

$$E_0 + E_F + \bar{p}\bar{v} < 0 \text{ или } c_t p + E_F + \bar{p}\bar{v} < 0. \quad (20)$$

Величина $(c_t p + E_F)$ существенно положительна, следовательно, если $v < c_t$, неравенство (20) не может быть удовлетворено. Это означает, что испускание фонона и рассеяние электрона запрещены законами сохранения и, согласно (20), сверхтекучее движение дислокационной лавины сохраняется вплоть до скоростей $v \sim c_t$. Иными словами, кинетическая энергия такой дислокационной лавины не преобразуется в энергию теплового движения, что обеспечивает ей большую стабильность, и ее движение становится похожим на движение солитона.

Известно [11], что при движении дислокации в кристалле скорость звука c_t играет роль, аналогичную скорости света c в специальной теории относительности. Двигаясь по оси x со скоростью v , дислокация сокращается в направлении этой оси в $(1 - v^2/c_t^2)^{1/2}$ раз. При этом она расширяется в других направлениях. Таким образом, в движущейся дислокационной лавине с радиусом $r_{л} \sim \alpha_0 v^2 t^2$ происходит слияние одноименных (например, краевых) дислокаций, которое приводит к зарождению микротрещин. Окончательному разрушению кристалла предшествует происходящее в течение некоторого времени развитие многих разветвленных каналов микротрещин. Они возникают в результате движения дислокационной лавины, которая является пространственно-временным скоплением дислокаций. Если приложенное под воздействием дислокационной лавины напряжение σ больше теоретической прочности кристаллической решетки на сдвиг σ_m , то энергетическое условие образования зародышевой микротрещины имеет вид [12]

$$l_{кр} > a, \quad (21)$$

где $l_{кр} = \eta E / \sigma^2$ – критическая длина микротрещины; E – модуль Юнга; a – радиус действия

межатомных сил; η – коэффициент поверхностного натяжения микротрещины.

Перепишем (21) в виде

$$\frac{\eta E}{\sigma^2} > a, \text{ отсюда } \sigma > \sqrt{\frac{\eta E}{a}}.$$

Поскольку $\sigma > \sigma_m > \frac{\mu}{30} \sim \sqrt{\frac{\eta E}{a}}$, получим

$$\eta \sim \frac{\mu^2 a}{9 \cdot 10^2 E}.$$

Приняв a порядка постоянной решетки, найдем численную оценку η . Так, для GaAs (где $a = 5,65 \cdot 10^{-8}$ см; $E = 5 \cdot 10^{11}$ дин/см²) $\eta \sim 1,2 \cdot 10^2$ г·с⁻². В свою очередь, лавинообразное размножение микротрещин приводит к лавинообразному характеру роста макротрещин со скоростью, равной средней скорости процесса разрушения (деградации) кристалла [4]:

$$v^0 = N^0 \omega^0 \exp\left[\left(\gamma E_p - 2\eta l^2\right) / kT\right], \quad (22)$$

где N^0 – число напряженных связей на длине 1 см; ω^0 – частота собственных тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке; γ – безразмерный коэффициент, характеризующий самоускорение процесса разрыва межатомных связей; l – длина макротрещины; E_p – энергия разрыва межатомных связей в решетке; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Экспоненциальный характер зависимости (22) еще раз подчеркивает лавинообразное развитие макротрещин. Следует отметить, что предельная скорость роста макротрещин $v_{пр}^0$ стремится к постоянной величине, характеризующей окончательную катастрофическую деградацию лазерного кристалла:

$$v^0 \rightarrow v_{пр}^0 \approx 0,5 \sqrt{\frac{E}{2\rho_0(1+v)}},$$

где v – коэффициент Пуассона.

Анализ части 2. Поскольку коэффициент фононного трения B_p обратно пропорционален третьей степени скорости звука $B_p \sim \frac{1}{c_t^3}$, он

оказывается слишком малым. Коэффициент электронного трения обратно пропорционален второй степени скорости звука [13] $B_e \sim \frac{1}{c_t^2}$ и также будет достаточно мал. Поэтому при движении дислокационной лавины как целого со скоростью $v > c_t$ силами фононного и электронного трения можно пренебречь. При этом при преодолении звукового барьера возникают ударные звуковые волны Маха (устойчивые волны сжатия), которые распространяются в среде не размываясь. Исходя из законов сохранения, проведем простой расчет скачка давления Δp , возникающего на ударном фронте такой волны.

Рассмотрим участок фронта ударной волны площадью S в момент времени t . Давление перед фронтом волны обозначим через p_1 . За фронтом ударной волны давление и плотность среды изменяются скачком, принимая значения p_2 и $\rho > \rho_0$ соответственно. По закону сохранения массы

$$(\rho - \rho_0)Sdx = \rho S c_t dt, \quad (23)$$

где $dx/dt = v_\phi$ – скорость перемещения фронта ударной волны.

Тогда из (23) получим

$$v_\phi = \frac{\rho c_t}{\rho - \rho_0}. \quad (24)$$

По второму закону динамики импульс силы равен изменению количества движения

$$c_t \rho_0 S dx = (p_2 - p_1) S dt = \Delta p S dt.$$

Отсюда

$$v_\phi = \frac{\Delta p}{\rho_0 c_t}. \quad (25)$$

Приравнявая (24) и (25), найдем Δp

$$\Delta p = \frac{\rho_0 \rho c_t^2}{\rho - \rho_0}. \quad (26)$$

Считая, что $\rho \gg \rho_0$, получим оценку этой величины для GaAs

$$\Delta p = \rho_0 c_t^2 \sim 9 \cdot 10^{11} \text{ дин/см}^2.$$

Естественно, что при увеличении мощности лазерного излучения, как уже упоминалось выше, растет и скорость дислокационной лавины, а соответственно ρ , а также, согласно (26), скачок давления в ударной волне. Из (25), заменив c_t на v^0 (формула (22)) и используя (24), найдем длину макротрещин l , возникающих внутри кристалла под действием ударной волны:

$$l = \frac{1}{\sqrt{2\eta}} \left(\gamma E_p - kT \ln \frac{c_t}{N^0 \omega^0} \right)^{1/2}.$$

Фронт ударной звуковой волны Маха распространяется под углом θ к зеркалам резонатора лазера ($\sin \theta = c_t/v$), в качестве которых служат полированные торцы полупроводникового кристалла площадью S_0 . Составляющая силы такой волны, ортогональная к зеркалам, имеет вид

$$F_x = F_0 \sin \theta = \left(\frac{v^2}{c_t^2} - 1 \right) \frac{\mu b^3 \sin \theta}{2\pi d},$$

где d – расстояние между плоскостями скольжения.

Соответственно скачок давления на зеркалах

$$\Delta p = \left(\frac{v^2}{c_t^2} - 1 \right) \frac{\mu b^3 c_t}{2\pi d v S_0}.$$

Такой скачок давления приводит к механическим разрушениям поверхности торцов резонатора.

ВЫВОД

Дислокационная лавина – это качественно новое явление, возникающее под действием собственного лазерного излучения внутри резонатора лазера. Оно приводит к разрушению решетки полупроводникового кристалла путем возникновения микро- и макротрещин. Следствие этого – необратимое падение мощности излучения и увеличение порога генерации, т. е. практически полная деградация лазера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаркавенко, А. С. Смена механизмов излучения в лазерах с электронной накачкой на основе оптически однородных, радиационно легированных кристаллов GaAs / А. С. Гаркавенко // 36. наук. праць Військового інституту КНУ імя Т. Шевченка. 2011. Вип. 32. С. 15–21.
2. Ионизационный отжиг полупроводниковых кристаллов. Часть первая. Теоретические предпосылки / А. С. Гаркавенко [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 4. С. 50–55.
3. Гаркавенко, А. С. Тонкая структура спектров лазерного излучения при электронной накачке радиационно модифицированных оптически однородных нелегированных кристаллов GaAs / А. С. Гаркавенко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2011. № 5. С. 27–30.
4. Ионизационный отжиг полупроводниковых кристаллов. Часть вторая. Эксперимент / А. С. Гаркавенко [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 5–6. С. 51–56.
5. Гаркавенко, А. С. Радиационная модификация физических свойств широкозонных полупроводников и создание на их основе лазеров большой мощности / А. С. Гаркавенко. Львов: ЗУКЦ, 2012. С. 30–34.
6. Матаре, Г. Электроника дефектов в полупроводниках / Г. Матаре. М.: Мир, 1974. 240 с.
7. Гиппиус, А. А. Влияние дислокаций на электрические и оптические свойства полупроводников / А. А. Гиппиус, А. Н. Колесник // Дислокации и физические свойства полупроводников. Л.: Наука, 1967. С. 156–189.
8. Гаркавенко, А. С. О деградации полупроводниковых лазеров / А. С. Гаркавенко // Журнал радиосвязи, радиовещания и телевидения. 2000. Т. 21, № 1. С. 65–68.
9. Зеегер, К. Физика полупроводников / К. Зеегер. М.: Мир, 1977. 320 с.
10. Хирт, Дж. Теория дислокаций / Дж. Хирт, И. Лоте. М.: Атомиздат, 1972. 280 с.
11. Коттрел, А. Теория дислокаций / А. Коттрел. М.: Мир, 1969. 310 с.
12. Меламедов, М. М. Физические основы надежности / М. М. Меламедов. Л.: Энергия, 1970. 300 с.
13. Судзуки, Т. Динамика дислокаций и пластичность / Т. Судзуки, Х. Есианага, С. Такеути. М.: Мир, 1989. 320 с.

Поступила 06.06.2018

Подписана в печать 12.02.2019

Опубликована онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Garkavenko A. S. (2011) Change of Emission Mechanisms in E-Pumped Lasers Based on Optically Homogeneous, Radiation-Doped GaAs Crystals. *Zbirnik Naukovikh Prats' Viis'kovogo Institutu Kiivs'kogo Natsional'nogo Universitetu imeni Tarasa Shevchenka* [Collection of Scientific Papers of Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv]. Kyiv, (32), 15–21 (in Russian).
2. Garkavenko A. S., Mokritskii V. A., Banzak O. V., Zavadskii V. A. (2014) Ionization Annealing of Semiconductor Crystals. Part 1. Theoretical Background. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature = Technology and Design in Electronic Equipment*, (4), 50–55 (in Russian).
3. Garkavenko A. S. (2011) Fine Structure of Laser Spectrum at Electron-Beam Pumping Based on Radiation-Modified Optically Homogeneous Crystals of Un-Doped GaAs. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature = Technology and Design in Electronic Equipment*, (5), 27–30 (in Russian).
4. Garkavenko A. S., Mokritskii V. A., Banzak O. V., Zavadskii V. A. (2014) Ionization Annealing of Semiconductor Crystals. Part 2. The Experiment. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature = Technology and Design in Electronic Equipment*, (5–6), 51–56 (in Russian).
5. Garkavenko A. S. (2012) Radiation Modification of the Physical Properties of Wide Bandgap Semiconductors and Creation on their Basis of High-Power Lasers. Lvov, West-Ukrainian Consulting Center, 30–34 (in Russian).
6. Mataré H. (1971) *Defect Electronics in Semiconductors*. John Wiley & Sons Inc. 150.
7. Gippius A. A., Kolesnik A. N. (1967) Effect of Dislocations on Electrical and Optical Properties of Semiconductors. *Dislocations and Physical Properties of Semiconductors*. Leningrad, Nauka Publ., 156–189 (in Russian).
8. Garkavenko A. S. (2000) On Degradation of Semiconductor Lasers. *Zhurnal Radiosvyazi, Radioveshchaniya i Televideniya* [Journal of Radio Communication, Broadcasting and Television], 21 (1), 65–68 (in Russian).
9. Seeger K. (1973) *Semiconductor Physics*. Springer-Verlag Vienna. 514. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-4111-3>.
10. Hirth J., Lothe J. (1982) *Theory of Dislocations*. NY, Wiley. 857.
11. Cottrell A. (1969) *Theory of Dislocations*. Moscow, Mir Publ. 310 (in Russian).
12. Melamedov M. M. (1970) *Physical Fundamentals of Reliability*. Leningrad, Energy Publ. 300 (in Russian).
13. Suzuki T., Yoshinaga H., Takeuchi S. (1991) *Dislocation Dynamics and Plasticity*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 228. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75774-7>.

Received: 06.06.2018

Accepted: 12.02.2019

Published online: 30.07.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-320-328>

УДК 681.62:62-192

Исследование надежности основных узлов и устройств высекальных прессов для производства упаковки

Магистр техн. наук, асп. Н. С. Кохненко¹⁾,
доктора техн. наук, профессора И. И. Карпунин²⁾, В. В. Кузьмич²⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Условия эксплуатации машин сказываются на темпах износа даже однотипных их узлов. Сроки работы однотипных узлов и машин не одинаковы, и поэтому числовые выражения эксплуатационной надежности будут вероятностными величинами. Неполное восстановление первоначальных свойств узла, небрежный ремонт, неудовлетворительное обслуживание обычно приводят к тому, что любая деталь, независимо одна от другой, может определять надежность машины (узла). Это особенно важно учитывать при производстве упаковки во избежание брака. Эксплуатационная надежность современных машин, состоящих из сотен, а иногда и тысяч деталей, процессы изнашивания которых находятся в сложной взаимосвязи, зависит от ряда факторов. Исследование надежности основных узлов и устройств оборудования – актуальная задача. Успешная эксплуатация полиграфических машин возможна только при условии четкой организации профилактических работ, обеспечивающих подготовку их к печатанию и послепечатной обработке. Высокопроизводительная техника, такая как высекальные прессы, должна регулярно обследоваться, настраиваться и поддерживаться в таком состоянии, чтобы на выходе получать стандартные результаты. В статье исследована надежность основных узлов и устройств высекальных прессов на основе расчета вероятности отказов. Вычисления проводились по аналогии с расчетом вероятности событий по дереву отказов. Построены диаграммы отказов устройств и узлов высекальных прессов. На основе анализа вероятности отказов основных узлов и устройств построены графики остаточного ресурса функционирования оборудования на его жизненном цикле.

Ключевые слова: отказ, вероятность отказа, узел, устройство, дерево отказа, остаточный ресурс, диаграмма, жизненный цикл

Для цитирования: Кохненко, Н. С. Исследование надежности основных узлов и устройств высекальных прессов для производства упаковки / Н. С. Кохненко, И. И. Карпунин, В. В. Кузьмич // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 320–328. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-320-328>

Study of Reliability for Main Components and Devices of Die-Cutting Presses for Packaging

N. S. Kohnenko¹⁾, I. I. Karpunin²⁾, V. V. Kuz'mich²⁾

¹⁾Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A large variety of machine operating conditions leads to a difference in the wear rate even for their units being of the same type. Operational time terms of single-type units and machines are not the same, and therefore, numerical expressions of operational reliability will be probabilistic values. Incomplete restoration of original properties of a unit, a negligent repair, a poor maintenance usually lead to the fact that any of several parts independently one from another can determine reliability of a machine (a unit). This is especially important to consider when manufacturing packaging in order to avoid

Адрес для переписки
Карпунин Иван Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 14,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-48
oup@bntu.by

Address for correspondence
Karpunin Ivan I.
Belarusian National Technical University
14, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-48
oup@bntu.by

rejects. The operational reliability of modern machines consisting of hundreds, and sometimes thousands of parts, wear processes of which are in a complex relationship, depends on a number of factors. A study on reliability of main components and equipment devices is an urgent task. Successful operation of printing equipment is possible only if there is a clear organization of preventive work, ensuring preparation of printing machines for printing and post-printing processing. High-performance equipment, such as die-cutting presses, should be regularly inspected, adjusted and maintained in such a way as to obtain standard results at the output. The paper has studied reliability of main components and devices of die-cutting presses based on calculation of failure probability. Calculations have been carried out by analogy with the calculation of the probability of events in the fault tree. Failure diagrams of devices and units of die-cutting presses have been built in the paper. Based on the analysis of the failure probability for main components and devices, graphs of residual life for equipment operation on its life cycle have been constructed in the paper.

Keywords: failure, failure probability, unit, device, failure tree, residual resource, diagram, life cycle

For citation: Kohnenko N. S., Karpunin I. I., Kuz'mich V. V. (2020) Study of Reliability for Main Components and Devices of Die-Cutting Presses for Packaging. *Science and Technique*. 19 (4), 320–328. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-320-328> (in Russian)

Введение

По сравнению с другим оборудованием длительного использования, таким как автотранспортная техника, сельскохозяйственные машины, металлообрабатывающие станки, полиграфические машины имеют свои специфические особенности, влияющие на организацию в типографии технического обслуживания (ТО) и проведение ремонта [1]. Это связано с тем, что полиграфическое оборудование в соответствии с особенностями технологического процесса при производстве упаковки может отличаться [2]:

- конструктивными особенностями;
- большой номенклатурой типов и моделей в каждом технологическом процессе;
- малым объемом выпуска отдельных видов и моделей;
- сложным составом;
- высокой точностью изготовления основных узлов и механизмов машин;
- нетранспортабельностью, вызывающей необходимость организации ТО и ремонта непосредственно на месте эксплуатации.

Исследование надежности основных узлов и устройств полиграфического оборудования – актуальная задача. Авторы статьи изучили на-

дежность основных узлов и устройств высекального оборудования на основе расчета вероятности отказов.

Автоматические высекальные машины (штанцагрегаты) – наиболее часто используемое оборудование для высокопроизводительной высеки картонного и гофрокартонного края при изготовлении упаковки (коробок, ящиков и др.) [3, 4]. Машины работают по принципу «плоской» высеки и позволяют в одном цикле из предварительно запечатанной прямоугольной заготовки получить на выходе высеченную по контуру и отбигованную картонную развертку, которую затем нужно только скрепить скобой, склеить либо защелкнуть на клапан (коробка с самоскладным дном), чтобы получить готовую продукцию – картонные коробки, используемые для упаковки.

Конфигурация высекального пресса (рис. 1.) зависит от конкретного назначения, но в общем случае в его состав входят [5]:

секция подачи. Существуют две разновидности: вакуумно-роликовая и вакуумная для работы с гофро- и микрогофрокартоном (верхние вакуумные захваты).

Выбор типа подачи происходит при заказе оборудования исходя из свойств используемых материалов и формата машины.

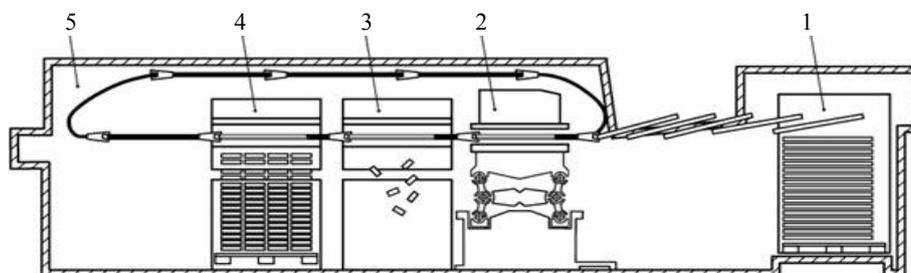


Рис. 1. Схема высекального автомата: 1 – самонаклад; 2 – секция высеки (штанцевальная); 3 – секция отделения облоя; 4 – секция разделения заготовок, приемное устройство; 5 – секция обрезки и удаления кромки захватов

Fig. 1. Die cutting machine scheme: 1 – feeder; 2 – die cutting (punching) section; 3 – waste-stripping section; 4 – blanks separation section, receiving device; 5 – section for trimming and edge removal of grippers

Данная секция управляет каждым отдельным листом и выравнивает его относительно штанцевальных инструментов с помощью механической или динамической приводки [6, 7];

секция высечки, основной узел, отвечающий за качество высечки и ресурс работы машины. Плосковысекальный пресс может дополнительно укомплектовываться устройством позиционирования и быстрой смены штанцеформ для экономии времени;

секция удаления облоя. Внутренние обрезки и иногда боковая и задняя кромки удаляются с использованием верхнего и центрального инструментов и в ряде случаев – нижними выталкивателями.

приемная секция;

периферийные устройства, такие как разделители и паллетизаторы.

Общая схема высекального пресса может выглядеть как упрощенное дерево отказов (рис. 2) [8].

В состав типовой системы могут входить устройство загрузки, самонаклад, несколько секций флексопечати с сушкой и контролем качества, секция плоской высечки, устройство для отделения отходов и разделитель/паллетизатор. Эту конфигурацию можно создать путем добавления нескольких секций флексопечати и периферийных устройств к центральному плосковысекальному прессу или посредством объединения автономной печатной машины с плосковысекальным прессом и добавления периферийных устройств. Во многих моделях высечка сочетается с горячим тиснением.

Основная часть

Для анализа надежности узлов и устройств высекальных прессов была собрана и отсортирована информация, зафиксированная в журналах регистрации отказов оборудования на полиграфических предприятиях. Эти данные на первом этапе обработки вводились в электронные таблицы Excel и отсортировывались по годам наблюдения и маркам высекальных машин. По каждому виду оборудования была установлена наработка на отказ, т. е. технический параметр, характеризующий надежность оборудования и отражающий продолжительность работы устройства между отказами. Для расчетов принимался экспоненциальный закон распределения, так как ранее исследования такого оборудования показали, что жизненный цикл высекальных прессов подчиняется данному распределению.

Расчеты устройств и узлов проводили по аналогии с расчетом вероятности событий по дереву отказов [8]. События в дереве отказов связаны со статистической вероятностью, иными словами, вероятность каждого события оценивается на практике. Нижними звеньями событий будем считать узлы высекальных прессов (рис. 2). По формулам для экспоненциального распределения рассчитаем средние значения вероятности каждого узла прессов, а затем по ним построим диаграмму вероятности отказов узлов, на которой наглядно отображается вклад каждого узла в простои машины. Данная диаграмма представлена на рис. 3, а вероятности отказов узлов – в табл. 1.



Рис. 2. Схема высекального пресса

Fig. 2. Die cutting press scheme

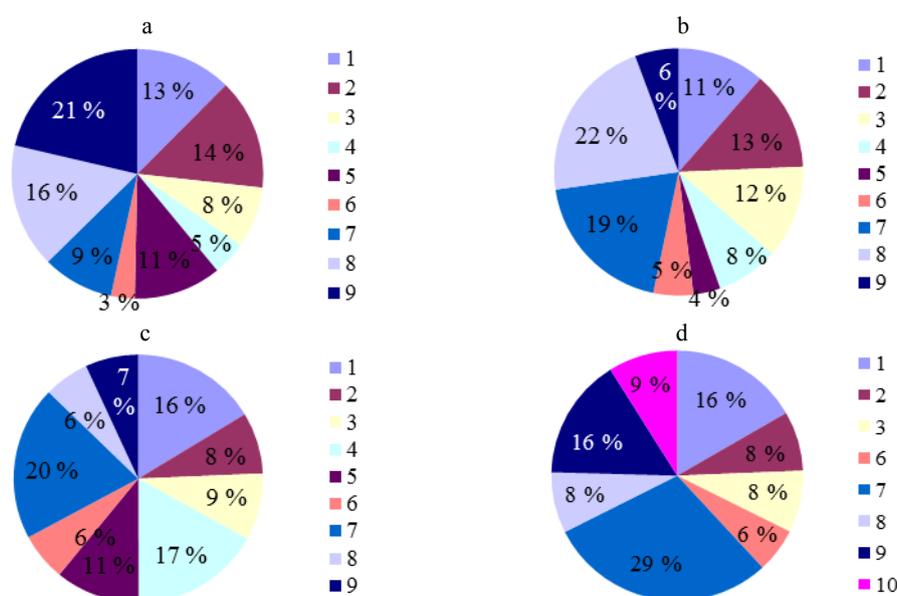


Рис. 3. Диаграмма отказов узлов высекальных прессов: а – BOBST EXPERTCUT 106 apraprapr LER; б – BOBST SP 102-E II; в – YAWA MW 1050 YC; д – YAWA TYM 1050 S; 1 – самонаклад; 2 – стол равнения; 3 – секция высечки; 4 – секция удаления облоя; 5 – секция разделения заготовок; 6 – выклад (приемка); 7 – цепь с тоскалками; 8 – электрооборудование; 9 – компьютерное управление; 10 – блок нанесения фольги

Fig. 3. Failure diagram of die-cutting press units: а – BOBST EXPERTCUT 106 apraprapr LER; б – BOBST SP 102-E II; в – YAWA MW 1050 YC; д – YAWA TYM 1050 S; 1 – feeder; 2 – splice table; 3 – die cutting section; 4 – flash removal section; 5 – blanks separation section; 6 – display (acceptance); 7 – longing chain; 8 – electrical equipment; 9 – computer control; 10 – foil coating unit

Таблица 1

Вероятность отказов для основных узлов высекальных прессов

Failure probability for main die-cutting press units

Год наблюдения	Само-наклад	Стол равнения	Секция высечки	Секция удаления облоя	Секция разделения заготовок	Выклад (приемка)	Цепь с тоскалками	Электрооборудование	Компьютерное управление	Блок нанесения фольги
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
BOBST EXPERTCUT 106 apraprapr LER										
2013	$1,236 \cdot 10^{-2}$	$1,476 \cdot 10^{-2}$	–	–	$1,411 \cdot 10^{-2}$	–	–	$1,714 \cdot 10^{-2}$	$2,333 \cdot 10^{-2}$	–
2014	$5,280 \cdot 10^{-3}$	$5,460 \cdot 10^{-3}$	$3,550 \cdot 10^{-3}$	$1,645 \cdot 10^{-3}$	$3,600 \cdot 10^{-3}$	$2,549 \cdot 10^{-3}$	–	–	$1,619 \cdot 10^{-2}$	–
2015	$3,270 \cdot 10^{-3}$	$8,500 \cdot 10^{-3}$	–	–	$2,760 \cdot 10^{-3}$	–	–	$5,051 \cdot 10^{-3}$	$5,515 \cdot 10^{-3}$	–
2016	$5,480 \cdot 10^{-3}$	$6,590 \cdot 10^{-3}$	$2,750 \cdot 10^{-3}$	–	$3,760 \cdot 10^{-3}$	$1,157 \cdot 10^{-3}$	$3,891 \cdot 10^{-3}$	$8,811 \cdot 10^{-3}$	$1,359 \cdot 10^{-2}$	–
2017	$1,100 \cdot 10^{-2}$	$8,020 \cdot 10^{-3}$	$8,050 \cdot 10^{-3}$	$3,656 \cdot 10^{-3}$	$9,690 \cdot 10^{-3}$	–	$7,233 \cdot 10^{-3}$	$8,000 \cdot 10^{-3}$	$5,964 \cdot 10^{-3}$	–
BOBST SP 102-E II										
2010	$2,139 \cdot 10^{-2}$	$7,801 \cdot 10^{-2}$	$3,077 \cdot 10^{-2}$	$1,676 \cdot 10^{-2}$	–	–	$5,714 \cdot 10^{-2}$	$5,517 \cdot 10^{-2}$	–	–
2011	$2,028 \cdot 10^{-2}$	$4,076 \cdot 10^{-2}$	$4,645 \cdot 10^{-2}$	$8,316 \cdot 10^{-3}$	–	$1,082 \cdot 10^{-2}$	$6,473 \cdot 10^{-2}$	$2,015 \cdot 10^{-2}$	$1,302 \cdot 10^{-2}$	–
2012	$2,151 \cdot 10^{-2}$	$2,145 \cdot 10^{-2}$	$2,835 \cdot 10^{-2}$	$1,238 \cdot 10^{-2}$	$1,093 \cdot 10^{-2}$	$1,587 \cdot 10^{-2}$	$4,432 \cdot 10^{-2}$	$7,065 \cdot 10^{-2}$	$1,741 \cdot 10^{-2}$	–
2013	$2,486 \cdot 10^{-2}$	$1,571 \cdot 10^{-2}$	$4,587 \cdot 10^{-3}$	$9,281 \cdot 10^{-3}$	$6,928 \cdot 10^{-3}$	$1,879 \cdot 10^{-2}$	$2,426 \cdot 10^{-2}$	$4,021 \cdot 10^{-2}$	$9,368 \cdot 10^{-3}$	–
2014	$2,190 \cdot 10^{-2}$	$7,229 \cdot 10^{-3}$	$4,280 \cdot 10^{-3}$	$1,542 \cdot 10^{-2}$	$1,020 \cdot 10^{-2}$	$1,214 \cdot 10^{-2}$	$2,584 \cdot 10^{-2}$	$2,825 \cdot 10^{-2}$	$7,712 \cdot 10^{-3}$	–
2015	$1,405 \cdot 10^{-2}$	$5,703 \cdot 10^{-3}$	$6,849 \cdot 10^{-3}$	$1,681 \cdot 10^{-2}$	$3,623 \cdot 10^{-3}$	$3,226 \cdot 10^{-3}$	$1,383 \cdot 10^{-2}$	$3,518 \cdot 10^{-2}$	–	–
2016	$2,890 \cdot 10^{-2}$	$1,146 \cdot 10^{-2}$	$1,143 \cdot 10^{-2}$	$2,488 \cdot 10^{-2}$	–	$4,076 \cdot 10^{-3}$	$1,575 \cdot 10^{-2}$	$2,273 \cdot 10^{-2}$	$4,071 \cdot 10^{-3}$	–
2017	$1,902 \cdot 10^{-2}$	$1,471 \cdot 10^{-2}$	$9,980 \cdot 10^{-3}$	$1,781 \cdot 10^{-2}$	$1,541 \cdot 10^{-3}$	$3,322 \cdot 10^{-3}$	$6,785 \cdot 10^{-2}$	$5,351 \cdot 10^{-2}$	$1,276 \cdot 10^{-2}$	–
YAWA MW 1050 YC										
2010	$9,836 \cdot 10^{-2}$	$1,754 \cdot 10^{-2}$	$10,092 \cdot 10^{-2}$	$9,516 \cdot 10^{-2}$	$3,810 \cdot 10^{-2}$	–	$5,435 \cdot 10^{-2}$	–	$4,286 \cdot 10^{-2}$	–
2011	$1,639 \cdot 10^{-2}$	$2,439 \cdot 10^{-2}$	$1,791 \cdot 10^{-2}$	$2,486 \cdot 10^{-2}$	$7,418 \cdot 10^{-2}$	$2,273 \cdot 10^{-2}$	$2,579 \cdot 10^{-2}$	$2,376 \cdot 10^{-2}$	$2,427 \cdot 10^{-2}$	–
2012	$7,960 \cdot 10^{-2}$	$8,753 \cdot 10^{-2}$	$2,421 \cdot 10^{-2}$	$9,064 \cdot 10^{-2}$	$10,204 \cdot 10^{-2}$	$3,226 \cdot 10^{-2}$	$7,495 \cdot 10^{-2}$	$5,231 \cdot 10^{-2}$	$5,114 \cdot 10^{-2}$	–
2013	$4,412 \cdot 10^{-2}$	$1,130 \cdot 10^{-2}$	$3,101 \cdot 10^{-2}$	$6,061 \cdot 10^{-3}$	$1,702 \cdot 10^{-2}$	$6,397 \cdot 10^{-3}$	$7,435 \cdot 10^{-2}$	$7,905 \cdot 10^{-3}$	$1,061 \cdot 10^{-2}$	–
2014	$3,628 \cdot 10^{-2}$	$1,327 \cdot 10^{-2}$	$6,593 \cdot 10^{-3}$	–	$1,186 \cdot 10^{-3}$	$9,174 \cdot 10^{-3}$	$2,539 \cdot 10^{-2}$	$4,992 \cdot 10^{-3}$	–	–
2015	$3,838 \cdot 10^{-2}$	$1,386 \cdot 10^{-2}$	$1,047 \cdot 10^{-2}$	–	–	$1,770 \cdot 10^{-2}$	$3,486 \cdot 10^{-2}$	–	$4,060 \cdot 10^{-3}$	–
2016	$4,986 \cdot 10^{-2}$	$8,715 \cdot 10^{-3}$	–	–	$2,242 \cdot 10^{-3}$	$2,116 \cdot 10^{-2}$	$3,234 \cdot 10^{-2}$	$5,038 \cdot 10^{-3}$	$1,126 \cdot 10^{-2}$	–
2017	$6,539 \cdot 10^{-2}$	$3,374 \cdot 10^{-2}$	$4,171 \cdot 10^{-3}$	–	$1,695 \cdot 10^{-2}$	$3,404 \cdot 10^{-2}$	$18,588 \cdot 10^{-2}$	$2,110 \cdot 10^{-2}$	$1,389 \cdot 10^{-2}$	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
YAWA TUM 1050 S										
2010	–	$1,307 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	–	–	–	$4,082 \cdot 10^{-2}$	–
2011	$1,182 \cdot 10^{-2}$	$9,434 \cdot 10^{-3}$	$2,597 \cdot 10^{-2}$	–	–	$1,818 \cdot 10^{-2}$	$6,266 \cdot 10^{-2}$	$2,486 \cdot 10^{-2}$	$5,570 \cdot 10^{-2}$	$1,724 \cdot 10^{-2}$
2012	$8,460 \cdot 10^{-3}$	$2,732 \cdot 10^{-3}$	$1,795 \cdot 10^{-2}$	–	–	$1,969 \cdot 10^{-3}$	$12,105 \cdot 10^{-2}$	$1,630 \cdot 10^{-2}$	$2,155 \cdot 10^{-2}$	$2,179 \cdot 10^{-2}$
2013	$3,968 \cdot 10^{-2}$	$9,828 \cdot 10^{-3}$	$1,026 \cdot 10^{-2}$	–	–	$2,235 \cdot 10^{-2}$	$7,062 \cdot 10^{-2}$	$1,114 \cdot 10^{-2}$	$1,437 \cdot 10^{-2}$	$1,859 \cdot 10^{-2}$
2014	$2,604 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	–	$5,319 \cdot 10^{-3}$	$7,817 \cdot 10^{-2}$	$1,818 \cdot 10^{-2}$	$1,966 \cdot 10^{-2}$	$1,099 \cdot 10^{-2}$
2015	$3,974 \cdot 10^{-2}$	$9,485 \cdot 10^{-3}$	–	–	–	$3,945 \cdot 10^{-3}$	$4,523 \cdot 10^{-2}$	–	–	$1,132 \cdot 10^{-2}$
2016	$2,455 \cdot 10^{-2}$	$2,985 \cdot 10^{-2}$	$1,021 \cdot 10^{-3}$	–	–	$5,479 \cdot 10^{-3}$	$4,432 \cdot 10^{-2}$	$1,783 \cdot 10^{-3}$	$1,205 \cdot 10^{-2}$	$1,583 \cdot 10^{-2}$
2017	$4,262 \cdot 10^{-2}$	$1,509 \cdot 10^{-2}$	$1,117 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	$3,987 \cdot 10^{-2}$	$5,900 \cdot 10^{-3}$	$1,754 \cdot 10^{-2}$	$7,407 \cdot 10^{-3}$

Как видно из рис. 3, максимальное количество отказов наблюдается у цепи с тоскалками, на самонакладе и столе равнения. Это говорит о том, что минимальной надежностью у высекальных прессов обладает устройство ввода.

Секция выкладки (приемки) обладает максимальной надежностью по сравнению со всеми узлами высекальных машин, отказы данной категории не превышают 6 %.

Как и в печатных машинах, большую роль в управлении играют компьютерные (датчики) и электрические устройства [9]. Кроме того, датчики играют огромную роль в секции высеки, так как отвечают за давление, температуру, точность штанцевального процесса. Вероятность данных причин отказов представлена на рис. 4.

Как видно из рис. 4, самое большое количество отказов управления наблюдается у самонаклада и приемного устройства. Часто срабатывают датчики равнения листа, довода листа до боковых упоров, заполнения приемного лотка и т. д. В прессе YAWA TUM 1050 S максимальная вероятность отказов наблюдается в блоке тиснения фольгой, т. е. штанцевальном модуле. Минимальное количество отказов у цепи с тоскалками, штанцевальной секции и секции удаления облоя.

Таким образом, по аналогии с печатными машинами, проанализировав все основные узлы устройств высекальной машины, можно найти вероятность отказов основных устройств печатных прессов и построить диаграмму надежности.

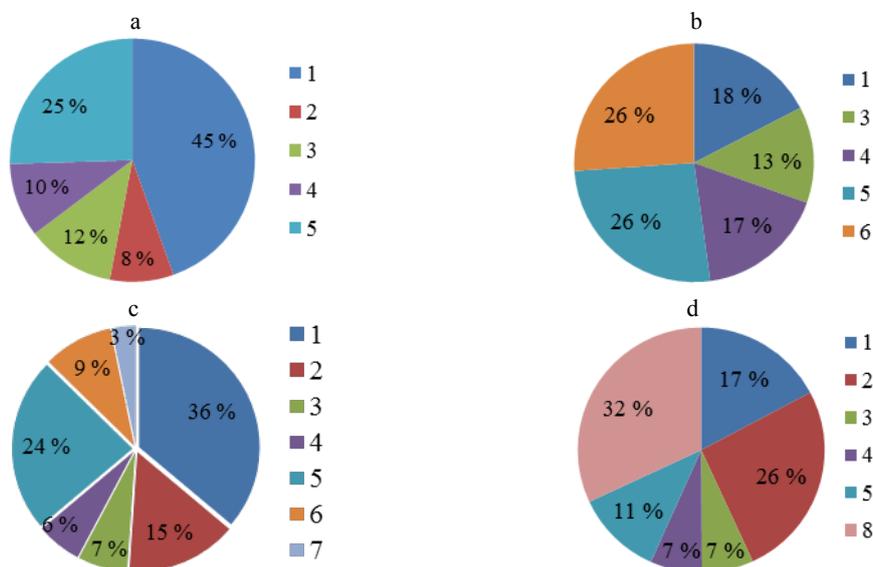


Рис. 4. Диаграмма отказов компьютерного управления высекальных прессов:

а – BOBST EXPERTCUT 106 аграрпр LER; б – BOBST SP 102-E II; в – YAWA MW 1050 YC; д – YAWA TUM 1050 S; 1 – самонаклад; 2 – стол равнения; 3 – цепь с тоскалками; 4 – штанцевальная секция; 5 – приемное устройство (выклад); 6 – секция разделения заготовок; 7 – секция удаления облоя; 8 – блок нанесения фольги

Fig. 4. Computer control failures diagram of die-cutting presses:

а – BOBST EXPERTCUT 106 аграрпр LER; б – BOBST SP 102-E II; в – YAWA MW 1050 YC; д – YAWA TUM 1050 S; 1 – feeder; 2 – splice table; 3 – longing chain; 4 – punching section; 5 – receiving device (display); 6 – blanks separation section; 7 – flash removal section; 8 – foil coating unit

Расчетные формулы для основных устройств выглядят следующим образом (связь «ИЛИ» [8]):

1) устройство ввода материала

$$P_{C1} = 1 - (1 - P_{C11})(1 - P_{C12})(1 - P_{C13}), \quad (1)$$

где P_{C11} , P_{C12} , P_{C13} – вероятность отказа само-наклада, стола равнения и цепи с тоскалками соответственно;

2) устройство высечки

$$P_{C2} = 1 - (1 - P_{C21})(1 - P_{C22})(1 - P_{C23}), \quad (2)$$

где P_{C21} , P_{C22} , P_{C23} – вероятность отказа штанцевания, тиснения фольгой и дополнительных устройств соответственно;

3) приемное устройство

$$P_{C3} = 1 - (1 - P_{C31})(1 - P_{C32})(1 - P_{C33})(1 - P_{C34}), \quad (3)$$

где P_{C31} , P_{C32} , P_{C33} , P_{C34} – вероятность отказа выкладки, разделения заготовок, приемно-выводного устройства и дополнительных устройств соответственно;

4) устройство ввода материала

$$P_{C4} = 1 - (1 - P_{C41})(1 - P_{C42}), \quad (4)$$

где P_{C41} , P_{C42} – вероятность отказа компьютерных сбоев и электрооборудования соответственно.

Вероятность отказов узла и устройства удаления облоя равноценна, так как в данном случае узел является устройством.

В табл. 2 представлена вероятность отказов основных устройств высекальных машин, а на рис. 5 – процентная вероятность отказов.

Согласно рис. 5, самая большая вероятность отказов наблюдается у устройства ввода материалов на высечку – почти 50 %. У высекальных машин BOBST второе место по отказам занимает причина управления прессами, в то время как у автоматов YAWA нет явного устройства, занимающего второе место. Все остальные устройства отказывают приблизительно с одинаково равной вероятностью, которая колеблется в пределах 5–23 %.

Таблица 2

Вероятность отказов для основных устройств печатных машин
Failure probability for main devices of printing machines

Год наблюдения	Устройство ввода материала	Устройство высечки	Устройство удаления облоя	Приемное устройство	Управление высекальной машиной
BOBST EXPERTCUT 106 apraprapr LER					
2013	$2,694 \cdot 10^{-2}$	–	–	$1,411 \cdot 10^{-2}$	$0,040 \cdot 10^{-2}$
2014	$1,071 \cdot 10^{-2}$	$3,550 \cdot 10^{-3}$	$1,646 \cdot 10^{-3}$	$6,140 \cdot 10^{-3}$	$1,606 \cdot 10^{-2}$
2015	$1,174 \cdot 10^{-2}$	–	–	$2,756 \cdot 10^{-3}$	$1,051 \cdot 10^{-2}$
2016	$1,587 \cdot 10^{-2}$	$2,751 \cdot 10^{-3}$	–	$4,912 \cdot 10^{-3}$	$2,215 \cdot 10^{-2}$
2017	$2,560 \cdot 10^{-2}$	$8,048 \cdot 10^{-3}$	$3,656 \cdot 10^{-3}$	$9,693 \cdot 10^{-3}$	$1,387 \cdot 10^{-2}$
BOBST SP 102-E II					
2010	$14,490 \cdot 10^{-2}$	$0,030 \cdot 10^{-2}$	$0,017 \cdot 10^{-2}$	–	$0,054 \cdot 10^{-2}$
2011	$11,818 \cdot 10^{-2}$	$4,539 \cdot 10^{-2}$	$8,282 \cdot 10^{-3}$	$1,076 \cdot 10^{-2}$	$3,263 \cdot 10^{-2}$
2012	$8,358 \cdot 10^{-2}$	$2,795 \cdot 10^{-2}$	$1,230 \cdot 10^{-2}$	$2,644 \cdot 10^{-2}$	$8,430 \cdot 10^{-2}$
2013	$6,277 \cdot 10^{-2}$	$4,576 \cdot 10^{-3}$	$9,238 \cdot 10^{-3}$	$2,539 \cdot 10^{-2}$	$4,837 \cdot 10^{-2}$
2014	$5,349 \cdot 10^{-2}$	$4,271 \cdot 10^{-3}$	$1,530 \cdot 10^{-2}$	$2,209 \cdot 10^{-2}$	$3,532 \cdot 10^{-2}$
2015	$3,303 \cdot 10^{-2}$	$6,826 \cdot 10^{-3}$	$1,667 \cdot 10^{-2}$	$6,826 \cdot 10^{-3}$	$3,457 \cdot 10^{-2}$
2016	$5,457 \cdot 10^{-2}$	$1,137 \cdot 10^{-2}$	$2,457 \cdot 10^{-2}$	$4,068 \cdot 10^{-3}$	$2,645 \cdot 10^{-2}$
2017	$9,659 \cdot 10^{-2}$	$9,930 \cdot 10^{-3}$	$1,765 \cdot 10^{-2}$	$4,851 \cdot 10^{-3}$	$6,412 \cdot 10^{-2}$
YAWA MW 1050 YC					
2010	$15,655 \cdot 10^{-2}$	$10,092 \cdot 10^{-2}$	$9,516 \cdot 10^{-2}$	$3,738 \cdot 10^{-2}$	$4,195 \cdot 10^{-2}$
2011	$6,440 \cdot 10^{-2}$	$1,775 \cdot 10^{-2}$	$2,455 \cdot 10^{-2}$	$9,236 \cdot 10^{-2}$	$4,690 \cdot 10^{-2}$
2012	$21,501 \cdot 10^{-2}$	$2,392 \cdot 10^{-2}$	$8,665 \cdot 10^{-2}$	$12,567 \cdot 10^{-2}$	$9,828 \cdot 10^{-2}$
2013	$12,170 \cdot 10^{-2}$	$3,053 \cdot 10^{-2}$	$6,043 \cdot 10^{-3}$	$2,315 \cdot 10^{-2}$	$1,835 \cdot 10^{-2}$
2014	$7,220 \cdot 10^{-2}$	$6,571 \cdot 10^{-3}$	–	$1,031 \cdot 10^{-2}$	$4,980 \cdot 10^{-3}$
2015	$8,342 \cdot 10^{-2}$	$1,042 \cdot 10^{-2}$	–	$1,754 \cdot 10^{-2}$	$4,052 \cdot 10^{-3}$
2016	$8,691 \cdot 10^{-2}$	–	–	$2,313 \cdot 10^{-2}$	$1,617 \cdot 10^{-2}$
2017	$26,288 \cdot 10^{-2}$	4,162	–	$4,971 \cdot 10^{-2}$	$3,439 \cdot 10^{-2}$
YAWA TYM 1050 S					
2010	$1,299 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	$4,000 \cdot 10^{-2}$
2011	$8,049 \cdot 10^{-2}$	$4,229 \cdot 10^{-2}$	–	$1,802 \cdot 10^{-2}$	$7,740 \cdot 10^{-2}$
2012	$13,084 \cdot 10^{-2}$	$3,896 \cdot 10^{-2}$	–	$1,967 \cdot 10^{-3}$	$3,714 \cdot 10^{-2}$
2013	$11,319 \cdot 10^{-2}$	$2,843 \cdot 10^{-2}$	–	$2,210 \cdot 10^{-2}$	$2,519 \cdot 10^{-2}$
2014	$9,896 \cdot 10^{-2}$	$1,093 \cdot 10^{-2}$	–	$5,305 \cdot 10^{-3}$	$3,713 \cdot 10^{-2}$
2015	$9,013 \cdot 10^{-2}$	$1,126 \cdot 10^{-2}$	–	$3,937 \cdot 10^{-3}$	–
2016	$9,400 \cdot 10^{-2}$	$1,671 \cdot 10^{-2}$	–	$5,464 \cdot 10^{-3}$	$1,374 \cdot 10^{-2}$
2017	$9,297 \cdot 10^{-2}$	$1,841 \cdot 10^{-2}$	–	–	$2,317 \cdot 10^{-2}$

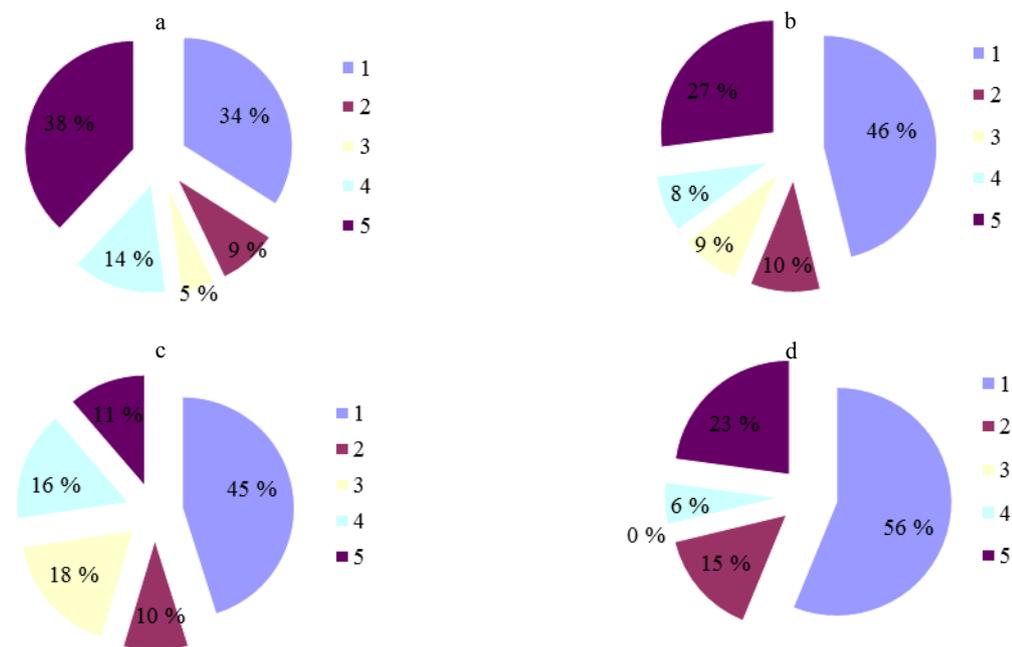


Рис. 5. Диаграмма отказов основных устройств высекальных прессов: а – BOBST EXPERTCUT 106 apraprapr LER; б – BOBST SP 102-E II; в – YAWA MW 1050 YC; д – YAWA TYM 1050 S; 1 – устройство ввода материала; 2 – устройство высечки; 3 – устройство удаления облоя; 4 – приемное устройство; 5 – управление высекальной машиной

Fig. 5. Failure diagram of main devices for die-cutting presses: а – BOBST EXPERTCUT 106 apraprapr LER; б – BOBST SP 102-E II; в – YAWA MW 1050 YC; д – YAWA TYM 1050 S; 1 – material input device; 2 – die-cutting device; 3 – flash removal device; 4 – receiving device; 5 – die-cutting machine control

Также на рис. 5 можно заметить, что модели YAWA MW 1050 YC и YAWA TYM 1050 S отличаются по конструкции, у последней есть блок нанесения фольги, но при этом отсутствует устройство удаления облоя.

Сравним найденные головные значения вероятности со значениями вероятности отказов, найденными по законам распределения [10, 11]. Вероятности отказов высекальных прессов сведены в табл. 3. Расчет осуществляли по следующей формуле:

$$P_{C0} = 1 - (1 - P_{C1})(1 - P_{C2})(1 - P_{C3})(1 - P_{C4})(1 - P_{C5}), \quad (5)$$

где $P_{C1}, P_{C2}, P_{C3}, P_{C4}, P_{C5}$ – вероятность отказа секций ввода материала и высечки, приемного устройства, управления и секции отделения облоя соответственно.

Если сравнить вероятности в табл. 3, то самая заметная разница в вычислении показателей наблюдается у высекального пресса BOBST EXPERTCUT 106 apraprapr LER (70 %), причем самое большое различие вероятностей в 2017 г. У остального высекального оборудования разница составляет 12–30 %.

При сравнении физического и нормативного сроков эксплуатации выявлено, что физический срок эксплуатации машин BOBST EXPERTCUT 106 apraprapr LER и BOBST SP 102-E II составляет 25 лет, YAWA MW 1050 YC – 20 лет, а YAWA TYM 1050 S – 21 год.

Таблица 3

Вероятности отказов высекальных прессов
Failure probability of die-cutting presses

Год наблюдения	Вероятность по дереву/ Вероятность по законам распределения							
	BOBST EXPERTCUT 106 apraprapr LER		BOBST SP 102-E II		YAWA MW 1050 YC		YAWA TYM 1050 S	
2010	–	–	0,228	0,296	0,367	0,344	0,053	0,121
2011	–	–	0,201	0,251	0,225	0,285	0,202	0,223
2012	–	–	0,216	0,288	0,448	0,513	0,197	0,239
2013	0,079	0,136	0,143	0,213	0,188	0,196	0,179	0,230
2014	0,039	0,050	0,125	0,174	0,092	0,162	0,147	0,166
2015	0,025	0,049	0,095	0,146	0,113	0,161	0,104	0,138
2016	0,045	0,111	0,116	0,165	0,122	0,141	0,126	0,172
2017	0,060	0,198	0,182	0,301	0,326	0,371	0,130	0,189

Основные устройства высекальных машин имеют другие сроки физической эксплуатации (рис. 6) [12].

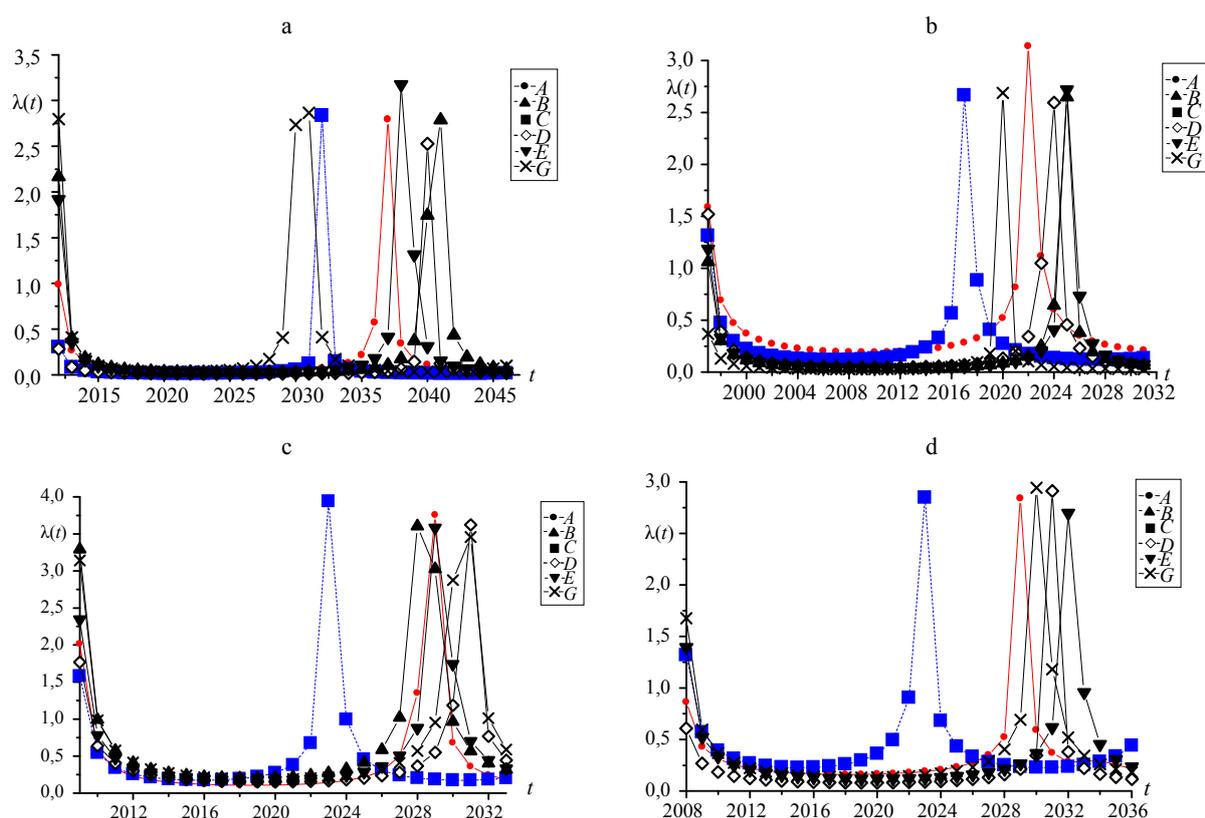


Рис. 6. Функции интенсивности отказов: а – BOBST EXPERTCUT 106 aprarapr LER; б – BOBST SP 102-E II; в – YAWA MW 1050 YC; д – YAWA TYM 1050 S; А – машины; В – устройство удаления облоя; С – устройство ввода материала; D – устройство высечки; E – приемное устройство; G – управление высекальной машиной

Fig. 6. Failure rate functions: а – BOBST EXPERTCUT 106 aprarapr LER; б – BOBST SP 102-E II; в – YAWA MW 1050 YC; д – YAWA TYM 1050 S; А – cars; В – flash remover; С – material input device; D – die-cutting device; E – receiving device; G – die-cutting machine control

Из рис. 6 видно, что самый малый физический срок эксплуатации наблюдается у устройства ввода, и только у высекального прессы BOBST EXPERTCUT 106 aprarapr LER данный срок еще меньше для управления высекальной машиной. В свою очередь, устройства штанцевания, удаления облоя, вывода материалов имеют более продолжительный срок эксплуатации, чем сами высекальные машины.

Устройство ввода BOBST EXPERTCUT 106 aprarapr LER имеет меньший физический срок эксплуатации, чем у всей машины, на 5 лет, а управление машиной – меньше на 6 лет. Устройство ввода у BOBST SP 102-E II выйдет из эксплуатации раньше на 5 лет, у YAWA MW 1050 YC – на 7 лет, у YAWA TYM 1050 S – на 6 лет. Остальные же устройства высекальных прессы имеют надежность выше на 1–4 года, чем надежность всей машины. Таким образом, минимальной надежностью обладает устройство ввода высекальных прессы.

ВЫВОДЫ

1. Из анализа исследований надежности основных узлов высекальных прессы (BOBST и YAWA) следует, что самая большая вероятность отказов наблюдается у устройства ввода материалов на высечку ($\approx 50\%$). У высекальных машин BOBST второе место по отказам занимает причина управления прессами, в то время как у автоматов YAWA нет явного устройства, занимающего второе место. Все остальные устройства отказывают приблизительно с одинаковой вероятностью, которая колеблется в пределах 5–23%. Если снизить отказы ввода материала в высекальный пресс, то машины могут продлить свой срок службы на 5–7 лет.

2. По итогам наблюдения за основными устройствами и узлами полиграфического оборудования можно отметить, что надежность машины сильно зависит от надежности одной детали или одного сопряжения деталей с наименьшим сроком работы. Неточный ремонт одного из

основных устройств снижает надежность машины, и наоборот, точная и четкая работа узлов увеличивает надежность и работоспособность агрегата.

3. Наличие огромного парка полиграфического оборудования требует высококвалифицированного сервисного обслуживания для установки, технического обслуживания, ремонта и контроля над техническим состоянием машин и устройств. Своевременная диагностика, качественный ремонт, правильные условия эксплуатации машины приведут к более продолжительному сроку службы полиграфического оборудования и улучшат качественные показатели получаемой упаковки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Организация полиграфического производства / Г. В. Миронова [и др.]. М.: МГУП имени Ивана Федорова, 2011. 344 с.
2. Техническое обслуживание [Электронный ресурс] // Моя библиотека. Режим доступа: <https://mybiblioteka.ru/3-12600.html>. Дата доступа: 14.04.2018.
3. Вирченко, А. И. Брошуровочно-переплетное оборудование / А. И. Вирченко, А. А. Сивогорлый. Минск: БГТУ, 2003. 216 с.
4. Бобров, В. И. Технология и оборудование отделочных процессов / В. И. Бобров, Л. Ю. Сенаторов. М.: МГУП имени Ивана Федорова, 2008. 434 с.
5. Машины для вырубki и тиснения [Электронный ресурс] // Полиграфическая библиотека Марселя Шарифуллина. Режим доступа: <http://www.marsel.ru/articles/yawa.html>. Дата доступа: 07.04.2018.
6. Автоматические высекальные машины. Типовое построение [Электронный ресурс] // POST-PRESS.NET. Режим доступа: <http://post-press.net/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B8%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D1%81%D0%B5%D0%BA%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D1%8B>. Дата доступа: 07.04.2018.
7. Печать и отделка в линию [Электронный ресурс] // BOBST. Режим доступа: <https://www.bobst.com/amru/#.W8Muzrg3i98>. Дата доступа: 10.04.2018.
8. Голуб, Н. С. Построение деревьев отказов печатной технологии / Н. С. Голуб, В. В. Кузьмич // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2018. № 1. С. 61–66.
9. Голуб, Н. С. Надежность основных узлов печатных машин Roland / Н. С. Голуб // Научные стремления. 2018. № 23. С. 64–68.
10. Теоретическая оценка надежности печатного оборудования на стадиях его жизненного цикла / М. И. Кулак [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 4. Принт- и медиатехнологии. 2013. № 9. С. 27–32.

11. Голуб, Н. С. Надежность кондитерского упаковочного оборудования / Н. С. Голуб, М. И. Кулак // Труды БГТУ. Сер. 4. Принт- и медиатехнологии. 2014. № 9. С. 36–40.
12. Голуб, Н. С. Model of Failure of Printing and Packaging Equipment at the Stage of Decommissioning / Н. С. Голуб // Технология і техніка друкарства. 2018. Т. 59, № 1. С. 61–66.

Поступила 21.11.2018

Подписана в печать 12.02.2019

Опубликована онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. Mironova G. V., Ershov A. K., Osipova G. I., Speranskaya N. M. (2011) *Organization of Printing Production*. Moscow, Moscow State University of Printing Arts of Ivan Fedorov. 344 (in Russian).
2. Maintenance. *My Library*. Available at: <https://mybiblioteka.ru/3-12600.html>. (Accessed 14 April 2018) (in Russian).
3. Virchenko A. I., Sivogorly A. A. (2003) *Bookbinding Equipment*. Minsk, Belarusian State Technological University. 216 (in Russian).
4. Bobrov V. I., Senatorov L. Yu. (2008) *Technology and Equipment of Finishing Processes*. Moscow, Moscow State University of Printing Arts of Ivan Fedorov. 434 (in Russian).
5. Machines for Cutting and Stamping. *Printing Library of Marcel Sharifullin*. Available at: <http://www.marsel.ru/articles/yawa.html>. (Accessed 7 April 2018) (in Russian).
6. Automatic Cutting Machines. Typical Construction. *POST-PRESS.NET*. Available at: [https://post-press.net/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B8%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D1%81%D0%B5%D0%BA%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D1%8B](http://post-press.net/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B8%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D1%81%D0%B5%D0%BA%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D1%8B). (Accessed 7 April 2018) (in Russian).
7. Printing and Finishing in Line. *BOBST*. Available at: <https://www.bobst.com/amru/#.W8Muzrg3i98>. (Accessed 10 April 2018) (in Russian).
8. Golub N. S., Kuzmich V. V. (2018) Building Failure Trees of Printed Technology. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta Tekhnologii i Dizaina. Seriya 1: Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki* [Bulletin of Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Series 1. Natural and Technical Sciences], (1), 61–66 (in Russian).
9. Golub N. S. (2018) Reliability of Main Components of “Roland” Printing Machines. *Nauchnye Stremleniya = Scientific Aspirations*, (23), 64–68 (in Russian).
10. Kulak M. I., Trusevich N. E., Sakulevich T. A., Kharitonchik I. V. (2013) Theoretical Assessment of Reliability of Printing Equipment at Stages of its Life Cycle. *Trudy BGTU. Ser. 4. Print- i Mediatekhnologii = Proceedings of BSTU. Series 4. Print- and Media Technologies*, (9), 27–32 (in Russian).
11. Golub N. S., Kulak M. I. (2014) Reliability of Pastry Packaging Equipment. *Trudy BGTU. Ser. 4. Print- i Mediatekhnologii = Proceedings of BSTU. Series 4. Print- and Media Technologies*, (9), 36–40 (in Russian).
12. Golub N. S. (2018) Model of Failure of Printing and Packaging Equipment at the Stage of Decommissioning. *Tekhnologii i Tekhnika Drukarstva = Technology and Technique of Typography*, 59 (1), 61–66 (in Russian).

Received: 21.11.2018

Accepted: 12.02.2019

Published online: 30.07.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-329-338>

УДК 624.94

Адаптивный задний комбинированный фонарь транспортного средства с несменными источниками света

Канд. физ.-мат. наук, доц. С. П. Сернов¹⁾, канд. техн. наук Д. В. Балохонов¹⁾,
канд. техн. наук, доц. Т. В. Колонтаева¹⁾, инж. А. В. Исаев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В настоящее время из-за возрастания средней скорости движения транспортных средств для обеспечения их заметности сила света их светотехнического оборудования постоянно увеличивается, что может привести к ослеплению остальных участников дорожного движения, особенно в темное время суток. Однако если не увеличивать силу света фонарей, то транспортное средство не будет заметно в сложных дорожных условиях (туман, осадки, пыль), что приведет к аварии. Для устранения этого противоречия разработана принципиально новая модульная конструкция адаптивного заднего комбинированного фонаря транспортного средства с несменными источниками света на основе единичных мощных светодиодов и эффективной вторичной оптики большого диаметра. Конструкция предусматривает использование встроенного микроконтроллера для управления силой света своих огней в зависимости от условий внешней освещенности, динамики торможения автомобиля и состояния поверхности рассеивателя фонаря с возможностью передачи данных по CAN-шине. Благодаря встроенному микроконтроллеру разработанный фонарь пригоден для установки на транспортные средства без бортового компьютера. Это позволяет обеспечить заметность транспортного средства и избежать ослепления остальных участников дорожного движения. Конструкция адаптивного фонаря отличается малой толщиной (до 40 мм), высокой световой эффективностью (не менее 85 %) и надежностью. Проведенные светотехнические испытания показали, что он полностью соответствует Правилам ООН № 6, 7, 23, 38, 48. Проведено сравнение конструкции с имеющимися аналогами иностранного производства, которое показало, что разработанный фонарь потребляет меньше энергии (на 30 %) и имеет меньшую вероятность отказа за счет использования мощных светодиодов в качестве источника света.

Ключевые слова: адаптивные сигнальные системы автомобилей, задний фонарь, светодиоды, вторичная оптика, CAN

Для цитирования: Адаптивный задний комбинированный фонарь транспортного средства с несменными источниками света / С. П. Сернов [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 329–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-329-338>

Vehicle Adaptive Rear Combination Light with Non-Replaceable Light Sources

S. P. Sernov¹⁾, D. V. Balokhonov¹⁾, T. V. Kolontaeva¹⁾, A. V. Isaev¹⁾

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

Abstract. Currently, due to the increase in the average speed of vehicles to ensure their visibility, the luminous intensity of their lighting equipment is constantly increasing, that can lead to blindness of other road users, especially at night. On the other hand, if you do not increase the luminous intensity of lanterns, a vehicle will not be noticeable in difficult road conditions (fog, rain, dust) and it can cause an accident. To eliminate this contradiction, a fundamentally new modular design of the adaptive rear combined vehicle light with non-replaceable light sources based on single powerful light emitting diodes and effective secondary optics of large diameter has been developed in the paper. The design provides for the use of an integrated microcontroller to control luminous intensity of its lights, depending on the conditions of external illumination, braking dynamics of a car and surface condition of a lamp diffuser with the possibility of transmitting data via a CAN-bus. Thanks to the built-in microcontroller, the developed flashlight is suitable for installation on vehicles without an on-board computer. These properties allow the flashlight to ensure visibility of a vehicle, and to avoid blinding the remaining road users. The design of the adaptive lamp is small in thickness (up to 40 mm), high luminous efficiency (at least 85 %) and reliability. The conducted lightning tests have shown that the developed lamp fully complies with UN Regulation No 6, 7, 23, 38, 48.

Адрес для переписки

Балохонов Дмитрий Валентинович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-26
balokhonov@bntu.by

Address for correspondence

Balokhonov Dmitry V.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-26
balokhonov@bntu.by

The design has been compared with existing analogues of foreign production, which showed that such a lamp consumes less energy (30 %) and has a lower probability of failure due to the use of high-power LEDs used as a light source.

Keywords: vehicle adaptive signaling systems, rear light, led, secondary optics, CAN

For citation: Sernov S. P., Balokhonov D. V., Kolontaeva T. V., Isaev A. V. (2020) Vehicle Adaptive Rear Combination Light with Non-Replaceable Light Sources. *Science and Technique*. 19 (4), 329–338. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-329-338> (in Russian)

Введение

Средняя скорость движения современных транспортных средств постоянно увеличивается, поэтому обеспечение их заметности на дороге является жизненной необходимостью. Согласно статистике, не менее 30 % ДТП приходится на «догоняющие» столкновения, число которых многократно возрастает в неблагоприятных погодных условиях и зависит от внимательности, подготовки, возраста и пола водителей, от скоростного режима движения автомобиля [1]. Это означает, что задние сигнальные фонари транспортных средств имеют определяющее значение для обеспечения заметности транспортного средства.

В [2] содержатся сведения о том, что коэффициент опасности движения (отношение дальности видимости и остановочного пути) практически экспоненциально возрастает в зависимости от скорости движения. Таким образом, сигнальные огни транспортного средства должны быть надежно замечены как минимум на расстоянии остановочного пути транспортного средства, что составляет на скорости 100 км/ч примерно 55 м, безотносительно к яркости окружения и дорожной обстановке (пыль, осадки и т. п.). Например, для стоп-сигнала, одиночного или в составе комбинированного фонаря, осевая сила света должна быть не менее 100 кд.

Однако такая сила света фонарей может привести к ослеплению водителей в темное время суток в ясную погоду. Зная, что среднее время восстановления зрения у водителей в ночное время составляет не менее 0,5 с, можно оценить, что ослепление при резком включении стоп-сигнала и его большой яркости приводит к увеличению остановочного пути практически на 14 м (и это если водитель успеет понять, что ослепивший его огонь был стоп-сигналом, и осуществить торможение, что может занять дополнительно 0,6 с). В то же время при наличии пыли и осадков ночью ослепления не произойдет, а транспортное средство могут вовсе не заметить.

Кроме того, как отмечено в [3, 4], при мигании стоп-сигнала с частотой 1,5–2,0 Гц его заметность лучше, чем у фонарей, работающих в постоянном режиме. Это делает целесообразным создание стоп-сигнала с встроенным аксе-

лерометром, по сигналу которого он будет переходить в импульсный режим работы при резком торможении автомобиля.

Отдельно следует отметить необходимость сравнительно большой площади равномерно излучающей поверхности фонарей, так как это позволяет создать большую силу света при небольшой яркости, лежащей в зоне комфорта [2]. Например, фонарь с осевой силой света 128 кд и площадью излучающей поверхности 64 см² будет комфортно восприниматься водителями, так как его яркость составит лишь 2 кд/см², что находится вблизи оптимальных значений.

Таким образом, задние сигнальные фонари транспортных средств должны менять свою силу света как минимум в зависимости от яркости окружения, состояния своей поверхности (грязь, пыль и т. п.) и наличия/отсутствия осадков, т. е. адаптироваться к условиям окружающей среды. Это значит, что применительно к задним фонарям транспортных средств имеет смысл говорить об адаптивных задних сигнальных оптических системах (adaptive rear signaling systems, ARS).

Требования к адаптивным задним сигнальным фонарям приводятся в Правилах ООН № 48, действующих на территории Беларуси и Евросоюза [5]. В соответствии с этими требованиями адаптация должна осуществляться как минимум к одному из следующих факторов: окружающему освещению, туману, снегопаду, дождю, солевому туману, облаку пыли, загрязнению светоизлучающей поверхности, при условии сохранения предписанного для фонарей соотношения значений яркости в случае изменения силы света. Изменение последней не должно быть резким. Водитель должен иметь возможность включать сигнальные огни в режиме постоянной силы света, а затем возвращать их в режим изменяющейся силы света. Распределение силы света должно быть таким же, как у неадаптивных аналогов.

Для обеспечения безопасности движения изменение силы света адаптивного заднего фонаря должно происходить как можно быстрее, и поэтому лампы накаливания из-за большого времени включения (сотни микросекунд, иногда миллисекунды), малых КПД (порядка 10 %) и времени наработки до отказа (в преде-

лах 5000 ч) в качестве источника света применять нецелесообразно. Вместо них можно использовать светоизлучающие диоды (СИД) или органические светодиоды (OLED), которые обладают весьма малым временем включения (порядка наносекунд) и способны менять свой световой поток пропорционально току инжекции, т. е. допускают управление силой света по питанию.

Однако OLED, в отличие от СИД, не могут обеспечить высокую светоотдачу при достаточном времени наработки до отказа при высоких температурах, что часто встречается в автомобильной технике. Современные OLED способны достичь 8000 ч наработки до 70 % падения светового потока при повышенном токе инжекции и температурах до 60 °С [6]. Кроме того, OLED после определенного срока службы теряют равномерность светящейся поверхности, что можно расценивать как параметрический отказ. Наконец, OLED, как сообщается несколькими источниками, например [7], обладают слишком малой яркостью, поэтому стоп-сигнал на их основе будет иметь площадь около 400 см², что неприемлемо для применения OLED в качестве основного источника света для адаптивных задних фонарей. Наконец, распределение силы света OLED практически равномерное, что при их площади излучающей поверхности делает расчет деталей вторичной оптики для остронаправленных огней (например, стоп-сигналов) крайне сложной задачей.

СИД, в отличие от OLED, обладают значительно большим временем наработки до отказа (до 100000 ч в нормальных условиях и не менее 80000 ч при температуре 60 °С), большим люмен-ваттным соотношением (не менее 100 лм/Вт) [8], имеют встроенное распределение силы света и, самое главное, допускают изготовление в виде практически точечного источника света, что сильно упрощает расчет деталей вторичной оптики и позволяет создать их эффективными (не менее 85 % при работе по принципу полного внутреннего отражения). Все эти свойства вместе делают СИД идеальным источником света для адаптивных задних фонарей транспортных средств.

Существующие конструкции светодиодных сигнальных фонарей (адаптивных и неадаптивных) предполагают использование нескольких кластеров светодиодов, расположенных либо в виде обособленных матриц, либо набора линеек, что и определяет как дизайн изделия в целом, так и особенности визуализации сигнального огня; а их интегральное излучение обеспечивает пространственное распределе-

ние силы света в соответствии с требованиями Правил ООН. Известно множество вариантов построения оптических систем таких фонарей, в которых излучение светодиодов (LED) предварительно трансформируется деталями вторичной оптики в виде системы линз Френеля и микрорефлекторов, при этом световая эффективность огня составляет порядка 60 лм/Вт. Общим недостатком такого решения является необходимость использования большого числа светодиодов, что понижает надежность и повышает стоимость. На рис. 1 представлен светодиодный модуль указателя поворота в фаре автомобиля BMW F10/F11 производства фирмы HELLA.



Рис. 1. Светодиодный модуль указателя поворота в фаре автомобиля BMW F10/F11 производства фирмы HELLA

Fig. 1. LED direction indicator module used in BMW F10/F11 headlight manufactured by HELLA

Источник света в модуле выполнен в виде матрицы из 10 светодиодов, каждый из которых снабжен деталью вторичной оптики, и для улучшения теплоотвода размещается на массивном корпусе из легкого сплава.

Высокие требования по степени защиты от внешних воздействий (IP67 и выше) предполагают герметичность конструкции изделия, что понижает ее надежность в результате перегрева при высоких температурах и приводит к постепенной деградации светодиодов. В случае заднего комбинированного фонаря со стандартным набором сигнальных огней (каждый огонь реализован в виде многосветодиодной матрицы) суммарная рассеиваемая мощность может достигать нескольких десятков ватт, из-за чего светодиоды достаточно быстро (за время порядка 10000 ч) деградируют.

При этом каждый светодиод в кластере, матрице или линии нагружается неравномерно, что приводит к появлению проблемы необходимости «классификации» отказов отдельных светодиодов взаимозависимых огней, известной также как Правило $n - 1$, что стало предметом многократных дискуссий экспертов GTB

и рабочей группы по вопросам освещения и световой сигнализации WP29/GRE. Даже если абстрагироваться от «изменений» внешнего вида фонаря, отказ любого светодиода в матрице следует рассматривать как параметрический отказ при условии, что «оставшиеся» светодиоды в данной конфигурации обеспечивают выполнение требований Правил ООН. Очевидно, что в этом случае производитель обязан подтвердить соответствие фонарей со всевозможными комбинациями отказавших свето-диодов, а если фотометрические требования будут выполнены, то встает вопрос об избыточности числа светодиодов и завышенной стоимости изделия. Сегодня существует компромиссное решение данной проблемы, требующее обеспечения минимальной осевой силы света и наличия контрольного сигнала функционирования огня.

Однако прогресс в технологии изготовления LED уже позволил получить мощные светодиоды со световым потоком не менее 100 лм. Так как оценка минимальных световых потоков, необходимых для обеспечения требуемого распределения силы света основных сигнальных огней заднего фонаря, составляет 50–80 лм, почти любой огонь заднего фонаря может быть выполнен на одном светодиоде с потребляемой мощностью около 3 Вт. Использование одного LED в качестве источника света исключает появление Правила $n - 1$, улучшает надежность изделия, упрощает управление его свойствами (в случае адаптивных задних фонарей).

Остальные конструктивные требования, предъявляемые к адаптивным задним фонарям, помимо перечисленных требований по энергоэффективности и степени защиты, содержат указания по вибро- и ударостойкости, предельным значениям рабочих температур (от минус 60 до плюс 85 °С), по высокой надежности невосстанавливаемого изделия с минимальной габаритной толщиной, не превышающей 40 мм.

Таким образом, актуальной является разработка адаптивного заднего фонаря с характеристиками:

1) задний комбинированный фонарь должен включать следующие огни: стоп-сигнал, габаритный огонь, противотуманный огонь, фару заднего хода, боковой габаритный огонь, указатель поворота. Это позволит использовать его практически для любых транспортных средств;

2) источником света каждого огня фонаря должен служить мощный светодиод, что обеспечит повышенную надежность фонаря и минимальную потребляемую мощность;

3) фонарь должен быть способен адаптироваться как минимум к яркости окружения, состоянию своей поверхности, ускорению транспортного средства, осадкам. Это позволит изделию эффективно работать практически в любой дорожной обстановке;

4) фонарь должен иметь собственные датчики для оценки факторов адаптации и собственную систему управления (например, микроконтроллер). Это позволит устанавливать изделие на любое транспортное средство вне зависимости от вычислительной мощности бортового компьютера и вообще его наличия. Целесообразно предусмотреть возможность передачи фонарем данных о своем состоянии в бортовой компьютер транспортного средства по CAN-шине, чтобы использовать датчики фонаря в качестве дополнительных к штатным датчикам транспортного средства;

5) фонарь должен быть устойчив к вибрации, герметичен, а его рабочая температура должна лежать в пределах от минус 60 до плюс 85 °С. Время наработки до отказа фонаря должно быть сравнимо с временем наработки до отказа источников света, что позволит реализовать фонарь в качестве невосстанавливаемого изделия (несменного источника света). Габаритная толщина фонаря должна быть не более 40 мм, что позволит экономить пространство транспортного средства при установке изделия.

Основная часть

Общий вид конструкции адаптивного заднего комбинированного фонаря представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид адаптивного заднего комбинированного фонаря

Fig. 2. General view of adaptive rear combination lamp

Как видно из рис. 2, каждый огонь фонаря реализован в виде модуля, включающего источник света (мощный светодиод), деталь вторичной оптики для формирования заданного распределения силы света (асферическую неизображающую охватывающую линзу). Каждый модуль снабжен отдельной цепью питания для задания минимального тока инжекции. Такой подход позволяет упростить конструирование, улучшить надежность, увеличить степень унификации для облегчения сборки фонаря и облегчить модернизацию фонаря в будущем.

Требования, предъявляемые к каждому модулю фонаря (каждому его огню), представлены в Правилах ООН. Согласно Правилам ООН № 6, 7 [9, 10], пространственные световые распределения габаритных огней (категории R, R1, R2), стоп-сигналов (категории S1, S2) и указателей поворота (категории 1, 1a, 1b, 2a, 2b) совпадают (рис. 3), а отличаются только значениями осевой силы света и колориметрическими спецификациями.

Для задней фары распределение силы света определяется Правилами ООН № 23 [11] и отличается от распределения силы света остальных огней, как показано на рис. 4.

Из рис. 3, 4 видно, что приведенные стандартные распределения силы света не являются осесимметричными. Однако фонарь возможно применить в том числе на тракторах, которые предусматривают вертикальное монтирование светотехнических изделий, и поэтому огни фонаря должны иметь не стандартное, а осесимметричное распределение силы света, обеспечивающее при этом минимальные значения силы света в заданных Правилами

точках. Переход к осесимметричному распределению силы света связан с некоторыми потерями светового потока по сравнению со стандартным распределением силы света.

Если сравнить распределения силы света задней фары AR и огней R2, S2, 2b, приведенные ранее, то видно, что различие наблюдается в диапазоне углов 20° – 45° , где значения силы света не превышают 25 % осевых. Это означает, что для улучшения унификации можно разработать одну деталь вторичной оптики, которая будет создавать осесимметричное распределение силы света, подходящее для всех огней фонаря, кроме противотуманного.

Сравнение такого «синтетического» распределения силы света со стандартными осесимметричными приводится на рис. 5.

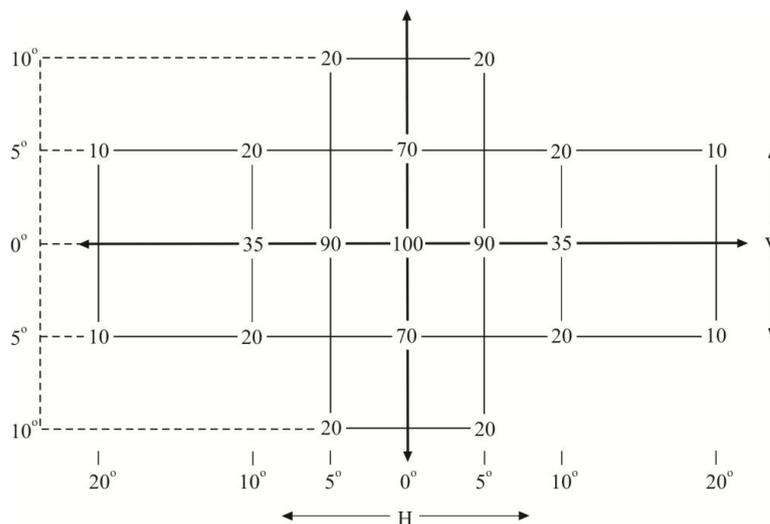


Рис. 3. Распределение силы света габаритных огней (категории R, R1, R2), стоп-сигналов (категории S1, S2) и указателей поворота (категории 1, 1a, 1b, 2a, 2b) (числа показывают процент от осевой силы света)

Fig. 3. Luminous intensity distribution for position lights (categories R, R1, R2), brake lights (categories S1, S2) and direction indicators (categories 1, 1a, 1b, 2a, 2b) (numbers show percentage of axial luminous intensity)

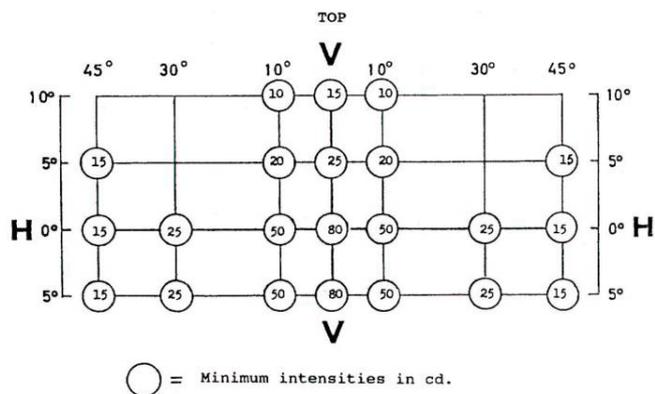


Рис. 4. Распределение силы света задней фары AR (числа показывают минимальную силу света в канделах в обозначенном направлении)

Fig. 4. Luminous intensity distribution for rear light AR (numbers show minimum luminous intensity in candelas in the indicated direction)

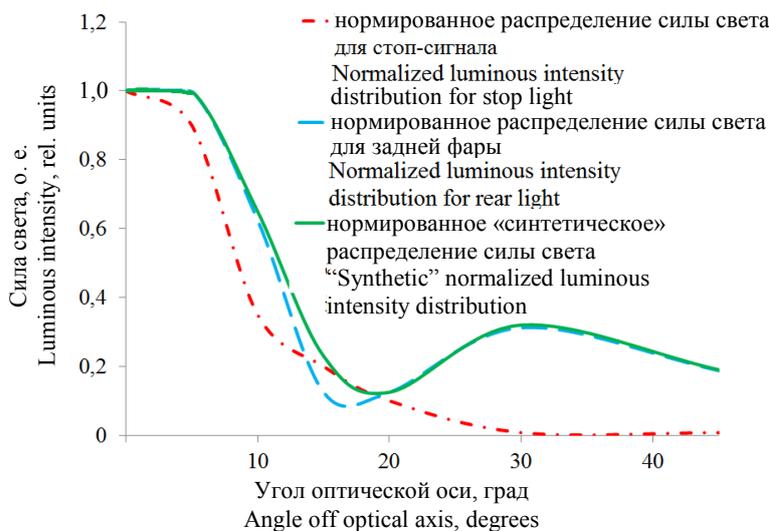


Рис. 5. Сравнение осесимметричных нормированных распределений силы света задней фары, стоп-сигнала с «синтетическим» осесимметричным нормированным распределением силы света

Fig. 5. Comparison of axisymmetric normalized luminous intensity distributions for taillight, brake light with “synthetic” axisymmetric normalized distribution of luminous intensity

Несмотря на возросшие потери при трансформации светового потока, эффективность детали вторичной оптики с «синтетическим» распределением силы света составила по отношению к задней фаре AR 87 %, а для огней R2, S2, 2b – не менее 34 % при многократном улучшении визуализации огней в диапазоне предельных углов видности.

Распределение силы света заднего противотуманного огня, приведенное на рис. 6, определяется Правилами ООН № 38 [12].

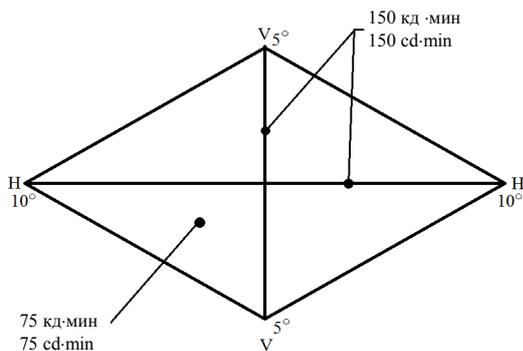


Рис. 6. Распределение силы света заднего противотуманного огня

Fig. 6. Rear fog light distribution

При переходе к осесимметричному распределению силы света у заднего противотуманного огня также происходят потери силы света. Поскольку распределение силы света противотуманного огня более узкое, для него рассчитана деталь вторичной оптики, отличная по форме от остальных. Для расчета профиля всех деталей вторичной оптики фонаря использо-

вался метод накопительного суммирования частичных световых потоков [13].

Для обеспечения адаптивных свойств фонаря разработана система управления, ядром которой является микроконтроллер фонаря. Он управляет работой каждого огня изделия. На основе данных о внешней освещенности, состоянии светопропускающей поверхности изделия и об ускорении транспортного средства с акселерометра микроконтроллер устанавливает ток инжекции через каждый светодиод. Блок питания системы управления обеспечивает стабильное напряжение питания на светодиодах, датчиках и микроконтроллере. Блок защиты системы управления защищает изделие от скачков напряжения и тока в бортовой сети.

Алгоритм работы системы управления позволяет в режиме реального времени, основываясь на данных от датчика дождя и загрязненности поверхности изделия, рассчитывать ток инжекции светодиодов его огней. При этом алгоритм учитывает ускорение транспортного средства: на основе данных с акселерометра при экстренном торможении стоп-сигнал изделия переводится в импульсный режим работы с максимальной силой света, чтобы обеспечить заметность транспортного средства на дороге в любых условиях.

Результаты испытаний адаптивного заднего комбинированного фонаря (стоп-сигнала) на соответствие требованиям Правил ООН приводятся на рис. 7, причем дается распределение света как для режима «день», так и для режима «ночь».

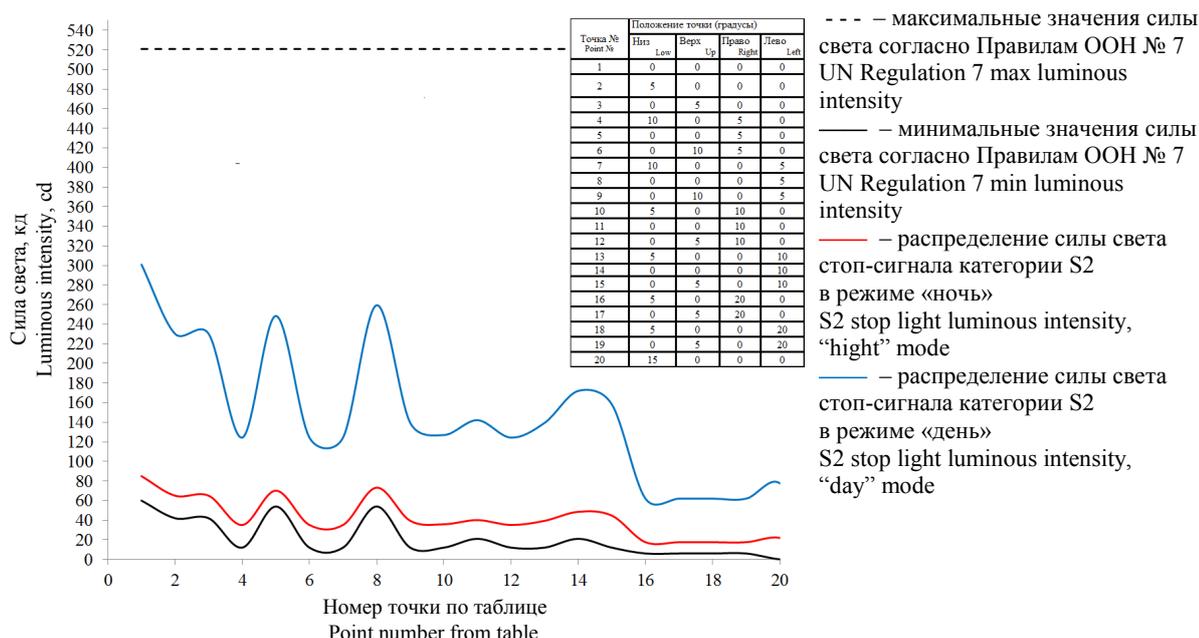


Рис. 7. Результаты испытаний стоп-сигнала адаптивного заднего комбинированного фонаря

Fig. 7. Test results for adaptive rear combination lamp brake light

Из рис. 7 видно, что распределение силы света фонаря как в режиме «день», так и в режиме «ночь» соответствует Правилам ООН. Минимально допустимое значение силы света по всем заданным направлениям выдерживается независимо от режима работы, причем имеется коэффициент запаса для учета возможности повышения температуры фонаря.

Характеристики всех огней адаптивного заднего комбинированного фонаря приведены в табл. 1.

Как видно из рис. 7 и табл. 1, значения осевой силы света перекрывают минимальные требования 60 и 130 кд соответственно, при этом токи инжекции, протекающие через светодиод, не превышают 370 мА, а ток потребления при включении секции стоп-сигнала составляет 80 мА для бортовой сети 24 В. Для двух режимов экстренного торможения (не приведены на рис. 7 и в табл. 1) сила света стоп-сигнала составляет соответственно 400 и 600 кд.

В табл. 2 приведены результаты сравнительных фотометрических испытаний огней разработанного адаптивного заднего комбинированного фонаря и имеющихся аналогов от ведущих мировых производителей при напряжении бортовой сети 24 В. В качестве аналогов выбраны изделия 2VP 340 950-011 (производство фир-

мы HELLA, Германия) и Model 265 (производство J.W. SPEAKER Corporation, США), внешний вид которых приведен на рис. 8.

Таким образом, по потребляемому току и числу светодиодов разработанное изделие превосходит свои аналоги. Можно отметить, что из-за матричной конструкции аналогов их надежность будет меньше, чем разработанного изделия. Кроме того, как следует из приведенных результатов, для огней указателя поворота категории 2b осевая сила света превышает 300 кд, что больше пороговых минимальных значений осевой силы света для передних указателей поворота категорий 1 (175 кд) и 1a (250 кд), устанавливаемых в фарах. Это свидетельствует о возможности применения оптических модулей на основе единичных светодиодов с асферической неизображающей охватывающей линзой в головной оптике, причем по своей эффективности такой модуль эквивалентен 10–15 «желтым» светодиодам.

В табл. 3 приведены электрические и фотометрические характеристики аналогичных задних противотуманных фонарей категории F1 от ведущих мировых производителей: изделия Norm 67101 от HELLA и Model 217 от J.W. SPEAKER.

Таблица 1

Характеристики огней адаптивного заднего комбинированного фонаря
Characteristics of adaptive rear combination lamp lights

Категория огня адаптивного фонаря	Ток через светодиоды, мА	Ток от бортовой сети 24 В, мА	Потребляемая мощность, Вт	Осевая сила света, кд	Осевая сила света, кд, по требованиям Правил ООН
R2	41	13	0,3	30	4–42
S2	370	80	1,9	301	60–730
2b	333	100	2,4	341	50–1000
AR	300	77	1,8	280	80–300
F1	390	84	2,0	243	150–300

Таблица 2

Сравнение разработанного адаптивного заднего комбинированного фонаря с похожими изделиями
Comparison of developed adaptive rear combination lamp with similar products

Категория огня*	Задний адаптивный комбинированный фонарь		HELLA, изделие 2VP 340 950-011		J.W. SPEAKER Corporation, Model 265		Осевая сила света, кд, по требованиям Правил ООН**
	Число светодиодов/ток, мА	Осевая сила света, кд	Число светодиодов/ток, мА	Осевая сила света, кд*	Число светодиодов/ток, мА	Осевая сила света, кд*	
R2/R	1/13	30	15/30	–	8/35	–	4–42
S2/S1	1/80	300	15/210	–	8/200	–	60–730
2b/2a	1/100	341	15/125	–	12/325	–	50–1000
AR	1/77	280	1/230	–	2/350	–	80–300

* В каталогах производителей не указывается.
** Для огней с изменяемой силой света.



Рис. 8. Аналоги адаптивного заднего комбинированного фонаря:
a – HELLA, 2VP 340 950-011; b – J. W. SPEAKER Corporation, Model 265 [14, 15]

Fig. 8. Analogs of adaptive rear combination lamp:
a – HELLA, 2VP 340 950-011; b – J. W. SPEAKER Corporation, Model 265 [14, 15]

Таблица 3

Сравнение параметров заднего противотуманного огня адаптивного заднего комбинированного фонаря с похожими изделиями

Comparison of rear fog light adaptive rear combination lamp with similar devices

Спецификация заднего противотуманного огня категории F1	Адаптивный задний комбинированный фонарь	HELLA, изделие Norm 67101	J.W. SPEAKER Corporation, Model 217	Требования Правил ЕЭК ООН
Ток, А	0,084	–	0,350	–
Потребляемая мощность, Вт	2	3	–	–
Диапазон рабочих напряжений, В	6–36	–	12–24	–
Осевая сила света, кд	243	–	–	150–300

Можно отметить, что потребляемый ток у разработанного изделия практически в 3,5 раза меньше, а потребляемая мощность на 30 % меньше, чем у аналогичных ему изделий, и это при широком диапазоне рабочих напряжений (6–36 В против 12–24 В). При этом сила света заднего противотуманного огня разработанного изделия поддерживается практически постоянной и равной 243 кд в пределах углов $\pm 12^\circ$ при токе потребления 84 мА для бортовой сети 24 В.

ВЫВОДЫ

1. Разработана конструкция адаптивного заднего комбинированного фонаря, отличающаяся высокой надежностью, эффективностью по световому потоку (не менее 85 %), малой потребляемой мощностью (не более 9 Вт в режиме «все огни включены»). Изделие адаптирует свою силу света к освещенности (два режима работы: «день» и «ночь»), состоянию своей поверхности, осадкам, причем это происходит с помощью встроенного микроконтроллера и датчиков. Стоп-сигнал имеет режим экстренного торможения, который резко повышает заметность изделия и включается по сигналу со встроенного акселерометра. Данная конструкция запатентована на территории Республики Беларусь и Российской Федерации [16].

2. Разработан алгоритм функционирования заднего комбинированного фонаря с управлением силой света оптических модулей встроенным микроконтроллером с учетом показаний системы встроенных датчиков внешней освещенности, динамики торможения автомобиля и коэффициента пропускания внешнего рассеивателя и с возможностью управления по CAN-шине, что обеспечивает высокую надежность и функциональность изделия и, как следствие, безопасность транспортного средства.

3. Полученные в ходе испытаний изделия на соответствие Правилам ООН результаты свидетельствуют об эффективности предлагаемой модульной конструкции адаптивного заднего фонаря транспортного средства со светодиодными несменными источниками света, каждый из которых представляет собой единственный мощный светодиод с вторичной оптикой в виде тонкой охватывающей асферической линзы большого диаметра, обеспечивающей высокую эффективность и комфортное зрительное восприятие (визуализацию) сигнальных огней.

4. В качестве факультативных предлагается опция бокового габаритного огня категории SM1, совмещенного со световозвращателем класса IA или фонаря полного габарита на светодиодах для прицепного состава автомобилей.

5. Модульность конструкции позволяет использовать широкую номенклатуру сенсоров, которая может гибко меняться в соответствии с требованиями ТНПА и возможностями заказчиков. Несомненным достоинством предлагаемой конструкции адаптивного заднего комбинированного фонаря является возможность обеспечения индивидуального дизайна, его узнаваемости и брендирования для каждого производителя автомобилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Analyses of Rear-End Crashes and Near-Crashes in the 100-Car Naturalistic Driving Study to Support Rear-Signaling Countermeasure Development [Electronic resource] / S. E. Lee [et al.]. NHTSA, 2007. Mode of access: https://pdfs.semanticscholar.org/a1de/f57ff815ca44a6e1316789cc18c0e988d633.pdf?_ga=2.65642027.403901483.1594051653-1808767238.1593622975. Date of access: 03.12.2019.
2. Кобрина, Н. В. Адаптивные системы заднего сигнального фонаря автомобиля / Н. В. Кобрина // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. 2017. № 12. С. 82–89
3. Study of Perspective Aspects of Equipping Vehicles with an Informative Brake Signaling System (IBSS) [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2004/wp29gre/TRANS-WP29-GRE-52-35e.pdf>. Date of access: 26.10.2011.
4. Schoeneburg, R. Enhancement of Active & Passive Safety by Future Pre-Safe® Systems / R. Schoeneburg, T. Breiting [Electronic resource] // International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. 2005. Mode of access: [https://www.safetynet.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds\[\]=citjournalarticle_245201_38](https://www.safetynet.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds[]=citjournalarticle_245201_38). Date of access: 04.10.2011.
5. Regulation No 48. Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Installation of Lighting and Light-Signalling Devices [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R048r11e.pdf>. Date of access: 03.12.2019.
6. Safaee, A. OLED Development @ OSRAM. Past, Present and Future Topics [Electronic resource] / A. Safaee, T. Wehler. Mode of access: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/02/f34/safaee_oled-design_longbeach_2017.pdf. Date of access: 18.11.2019.
7. Thomas, W. OLED Lighting in Automotive Applications. State of the Art and Future Demands / W. Thomas // Light, Energy and the Environment. 2016. <https://doi.org/10.1364/ssl.2016.ssw3c.2>.
8. Pattison, M. Respond to LED Lighting Efficacy: Status and Directions [Electronic resource] / M. Pattison, M. Hanson, J. Y. Tsao // Comptes Rendus Physique. 2018. Vol. 19, No 3. P. 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.013>.
9. Regulation No 6. Uniform Provisions Concerning the Approval of Direction Indicators for Power-Driven Vehicles and their Trailers. 7 October 2011 [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/>

- trans/main/wp29/wp29regs/R006r5e.pdf. Date of access: 03.12.2019.
10. Regulation No 7. Uniform Provisions Concerning the Approval of Front and Rear Position Lamps, Stop-Lamps and End-Outline Marker Lamps for Motor Vehicles (Except Motor Cycles) and their Trailers [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R007r6e.pdf>. Date of access: 03.12.2019.
 11. Regulation No 23. Uniform Provisions Concerning the Approval of Reversing and Manoeuvring Lamps for Power-Driven Vehicles and their Trailers [Electronic resource]. 20 August 2013. Mode of access: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/r023r4e.pdf>. Date of access: 03.12.2019.
 12. Regulation No 38. Uniform Provisions Concerning the Approval of Rear Fog Lamps for Power-Driven Vehicles and their Trailers. 20 August 2013. Mode of access: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R038r3e.pdf>. Date of access: 03.12.2019.
 13. Метод расчета вторичной оптики несменных источников света адаптивных оптических систем транспортных средств / С. П. Сернов [и др.] // Приборы и методы измерений. 2014. Т. 8, № 1. С. 86–93.
 14. Model 265. LED Signal Light Instruction Sheet [Electronic resource] // J. W. SPEAKER Corporation. Mode of access: <https://www.jwspeaker.com/wp-content/uploads/led-signal-light-model-265-instruction-sheet-6542960b-2016.pdf>. Date of access: 05.12.2019.
 15. Multi-Function LED Combination Realight. Brief Information [Electronic resource] // HELLA. Mode of access: https://www.hella.com/trailer/assets/media_global/LED%20Heckleuchte%20Leuchte%20mit%20Kennleuchte%20EN.pdf. Date of access: 05.12.2019.
 16. Устройство световой сигнализации транспортного средства с несменными источниками света: пат. 2481206 С2 РФ, МПК В60Q 1/30, F21S 8/10 / Д. В. Балохонов, А. А. Журавок, И. Е. Зуйков, Т. В. Колонтаева, А. Г. Савчиц, С. П. Сернов; заявители И. Е. Зуйков, С. П. Сернов. № 2010147641/11; заявл. 22.11.2010; опубл. 10.05.2013.
Поступила 30.12.2019
Подписана в печать 17.03.2020
Опубликована онлайн 30.07.2020
- REFERENCES
1. Lee S. E., Llaneras E., Klauer S., Sudweeks J. (2007) *Analyses of Rear-End Crashes and Near-Crashes in the 100-Car Naturalistic Driving Study to Support Rear-Signaling Countermeasure Development*. Report No. DOT HS 810 846. NHTSA. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/a1de/f57ff815ca44a6e1316789cc18c0e988d633.pdf?ga=2.65642027.403901483.1594051653-1808767238.1593622975>. (Accessed 3 December 2019).
 2. Kобрina N. V. (2017) Adaptive Rear Taillight Systems. *Avtomobil i Elektronika. Suchasni Tekhnologii = Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, (12), 82–89 (in Russian).
 3. *Study of Perspective Aspects of Equipping Vehicles with an Informative Brake Signaling System (IBSS)*. Available at: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2004/wp29gre/TRANS-WP29-GRE-52-35e.pdf>. (Accessed 26 October 2011).
 4. Schoeneburg R., Breitling T. (2005) Enhancement of Active & Passive Safety by Future Pre-Safe® Systems. *International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, 2005. Available at: [https://www.safetylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds\[\]=citjournalarticle_245201_38](https://www.safetylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds[]=citjournalarticle_245201_38). 04.10.2011.
 5. *Regulation No 48. Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Installation of Lighting and Light-Signalling Devices*. Available at: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R048r11e.pdf>. (Accessed 3 December 2019).
 6. Safae A., Wehls T. (2017) OLED Development @ OSRAM. Past, Present and Future Topics. Available at: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/02/f34/safae_oled-design_longbeach2017.pdf. (Accessed 18 November 2019).
 7. Thomas W. (2016) OLED Lighting in Automotive Applications. *Light, Energy and the Environment*. <https://doi.org/10.1364/ssl.2016.ssw3c.2>.
 8. Pattison M., Hanson M., Tsao J. Y. (2018) LED Lighting Efficacy: Status and Directions. *Comptes Rendus Physique*, 19 (3), 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.013>.
 9. *Regulation No 6. Uniform Provisions Concerning the Approval of Direction Indicators for Power-Driven Vehicles and their Trailers*. 7 October 2011. Available at: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R006r5e.pdf>. (Accessed 3 December 2019).
 10. *Regulation No 7. Uniform Provisions Concerning the Approval of Front and Rear Position Lamps, Stop-Lamps and End-Outline Marker Lamps for Motor Vehicles (Except Motor Cycles) and their Trailers*. 22 November 2012. Available at: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R007r6e.pdf>. (Accessed 3 December 2019).
 11. *Regulation No 23. Uniform Provisions Concerning the Approval of Reversing and Manoeuvring Lamps for Power-Driven Vehicles and their Trailers*. 20 August 2013. Available at: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/r023r4e.pdf>. (Accessed 03 December 2019).
 12. *Regulation No 38. Uniform Provisions Concerning the Approval of Rear Fog Lamps for Power-Driven Vehicles and their Trailers*. 20 August 2013. Available at: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R038r3e.pdf>. (Accessed 3 December 2019).
 13. Sernov S. P., Balokhonov D. V., Kolontaeva T. V., Zhuravok A. A. (2014) Vehicular Adaptive Optical Systems Non-Replaceable Light Sources Secondary Optics Calculation Method. *Pribory i Metody Izmerenij = Devices and Methods of Measurements*, 8 (1), 86–93 (in Russian).
 14. Model 265. LED Signal Light Instruction Sheet. *J. W. SPEAKER Corporation*. Available at: <https://www.jwspeaker.com/wp-content/uploads/led-signal-light-model-265-instruction-sheet-6542960b-2016.pdf>. (Accessed 5 December 2019).
 15. *Multi-Function LED Combination Realight. Brief Information*. HELLA. Available at: https://www.hella.com/trailer/assets/media_global/LED%20Heckleuchte%20Leuchte%20mit%20Kennleuchte%20EN.pdf. (Accessed 5 December 2019).
 16. Balokhonov D. V., Zhuravok A. A., Zuykov I. E., Kolontaeva T. V., Savchits A. G., Sernov S. P. (2013) *Device of Vehicle Light Signaling with Permanent Light Sources*. Patent No 2481206 C2 Russian Federation (in Russian).

Received: 30.12.2019

Accepted: 17.03.2020

Published online: 30.07.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-339-348>

UDC 621

Knock Reduction Measures in the Gas Fuelled Internal Combustion Engine

S. Szwaja¹⁾

¹⁾Czestochowa University of Technology (Czestochowa, Republic of Poland)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Abstract. Studies on the influence of applying various technologies for combustion knock reduction have been presented in the paper. Among others, investigation concerning the following: over-expanded cycle, variable valve timing, internal and exhaust gas recirculation, leaning the combustible mixture and cooling the in-cylinder charge were of the interest. The research works were focused on impact of these technologies on both knock intensity reduction, and engine performance and toxic emissions. Results presented in the paper were coming from experimental investigation based on in-cylinder combustion pressure data acquisition. Additionally, knock intensity calculation methods were discussed. They are based on in-cylinder combustion pressure pulsations. Combustion knock intensity expressed by the maximum peak of the in-cylinder pressure pulsations shows a strong negative correlation with both the EGR ratio and relative equivalence ratio – lambda. With respect to a catalytic converter installed on the exhaust pipe line, applying EGR appears as better solution for knock reduction than leaning the combustible mixture because the catalytic converter needs stoichiometric mixture for effective NO_x reduction. Furthermore, application of the over-expanded cycle to the hydrogen or coke gas fueled IC engine significantly reduces intensity of potential knock by 50 % in comparison to Otto cycle for all loads. Additionally, over-expanded cycle contributes to increase in engine thermal efficiency. Summing up, all the presented measures and technologies can be successfully implemented into practice in stationary engines as well as in traction engines, both of them working on either natural gas or gaseous renewable fuels.

Keywords: combustion, knock, heat release rate, hydrogen

For citation: Szwaja S. (2020) Knock Reduction Measures in the Gas Fuelled Internal Combustion Engine. *Science and Technique*. 19 (4), 339–348. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-339-348>

Меры по уменьшению стука в газовом двигателе внутреннего сгорания

С. Швайя¹⁾

¹⁾Ченстоховский технологический университет (Ченстохова, Республика Польша)

Реферат. В статье изучается влияние различных технологий на уменьшение детонации при сгорании. Среди рассматриваемых вопросов следует упомянуть следующие: сверхрасширенный цикл, регулируемые фазы газораспределения, внутренняя рециркуляция и рециркуляция отработанных газов, обеднение горючей смеси и охлаждение заряда в цилиндре. Исследования направлены на изучение влияния используемых технологий на снижение интенсивности детонации, вредных выбросов и работу двигателя. Результаты испытаний получены в ходе экспериментальных исследований, основанных на сборе данных о давлении сгорания в цилиндрах. Кроме того, изучались методы расчета интенсивности детонации. Эти методы основаны на пульсациях давления сгорания в цилиндрах. Интенсивность детонации сгорания, выраженная максимальным пиком пульсаций давления в цилиндре, показывает отрицательную корреляцию с отношением как рециркуляции отработанных газов, так и с отношением относительной эквивалентности – лямбда. Что касается каталитического нейтрализатора, установленного на линии выхлопной трубы, применение рециркуляции отработанных газов представляется лучшим решением для уменьшения детонации с последующим обеднением горючей смеси, поскольку каталитическому нейтрализатору требуется стехиометрическая смесь для эффективного подавления окислов азота. При этом применение чрезмерно расширенного цикла к двигателю внутреннего сгорания, работающему на водороде или коксовом газе, снижает интенсивность потенциальной детонации на 50 % по сравнению с циклом Отто при всех нагрузках. Кроме всего прочего, чрезмерно расширенный цикл способствует увеличению теплового коэффициента полезного действия двигателя. Обобщая результаты исследований, можно сказать, что все предложенные меры и технологии могут быть успешно реализованы на практике в стационарных двигателях, а также в тяговых двигателях, работающих на природном газе или газообразном возобновляемом топливе.

Ключевые слова: горение, стук, скорость выделения теплоты, водород

Для цитирования: Швайя, С. Меры по уменьшению стука в газовом двигателе внутреннего сгорания / С. Швайя // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 339–348. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-339-348>

Адрес для переписки

Швайя Станислав
Ченстоховский технологический университет
ул. Дабровского, 69,
42-201, г. Ченстохова, Республика Польша
Тел.: +48 343 250-524
szwaja@imc.pcz.czest.pl

Address for correspondence

Szwaja Stanislaw
Czestochowa University of Technology
69, Dabrowskiego str.,
42-201, Czestochowa, Republic of Poland
Tel.: +48 343 250-524
szwaja@imc.pcz.czest.pl

Strong environment protection regulations on carbon dioxide emission from vehicles force scientists to work on several liquid and gaseous substances which can substitute fossil fuels. Thus, investigation is concentrated on applying hydrogen or biomass based fuels as alcohols, bio-oils and methane rich gases for this purpose. It was found that alternative fuels can be burnt in both spark ignition and compression ignition engines as it was discussed in. However, burning gaseous renewable fuels in compression ignition engines needs a pilot diesel fuel for combustion initiation. On the other hand, the spark ignited engine features with knock effect occurring at unfavorable operating conditions, particularly in case hydrogen is applied as a fuel. As far as knock comes from auto-ignition of premixed combustible mixture, such phenomena might also be observed in a dual-fuel compression ignition engine fueled with premixed gaseous fuels.

Among other things, combustion knock is one of the most important constraints, which significantly reduces both the performance, torque output and efficiency of the spark ignited (SI) internal combustion (IC) engine. On the other hand, hydrogen as a gaseous fuel for the IC engine, gives it a significant advantage over other commonly used fuels including gasoline, diesel, and ethanol [1]. Thus, mixture of hydrogen and natural gas can be considered as valuable fuel to the SI engine. 20 % H_2 in natural gas mixture is known as hythane and was successfully implemented in test buses. These advantages include potential of near zero emissions of the regulated emissions of carbon monoxide (CO), nitric oxides (NO_x), and hydrocarbons (HC) while simultaneously eliminating carbon dioxide (CO_2) emissions, and greatly improved cold start capability. Hydrogen's combustion properties enable the development of an engine that would meet all current and future emissions standards. It is reported [1, 2] that hydrogen as engine fuel has great potential for improving engine thermal efficiency due to its rapid combustion, which approaches the ideal constant-volume heat release combustion process.

Combustion knock results from the spontaneous ignition of the end gas mixture inside the engine cylinder ahead of the propagating flame [3]. When this abnormal combustion occurs, there is a rapid release of the chemical energy in the

remaining unburned mixture, causing high local pressures and generating propagating pressure waves in amplitude of several hundred (kPa) across the cylinder space. These pressure waves are transmitted through the engine body and results in the combustion ping heard by observers. The large amplitude pressure waves of the hot combusted gases in the cylinder are the primary reason for mechanical engine failure through increased thermal and mechanical stress (Fig. 1). The pressure waves that result from combustion knock occur at frequencies that are acoustic vibration modes of the cylinder geometry. Hence, intensity of combustion knock can be easily calculated on the basis of high frequency oscillations on pressure inside the engine cylinder during combustion. The amplitude of these oscillations can be as high as peak of combustion pressure, so they could increase the in-cylinder pressure twice [4–6]. This combustion causes faster wear of the engine, thus from this point of view is considered as unwelcome combustion phenomenon.

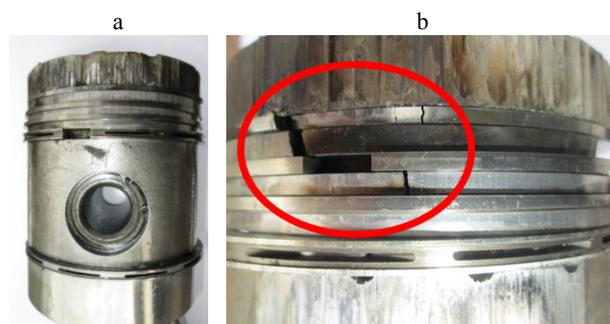


Fig. 1. Piston damaged by the severe knock (a) details on piston rings (b)

Detection of combustion knock is the necessary measure in the modern engine control system to prevent the engine from working with abnormal combustion as combustion knock is. The detection is usually realized by a vibration sensor installed on the engine body. There is almost linear correlation between knock intensity and engine body vibration, thus such monitoring of combustion knock can be easily conducted. Although, running the engine under knock is undesirable due to shortening the engine durability, but working just at the edge of combustion knock can provide favorable conditions for maximum engine performance. It is particularly observed when bad quality fuels are applied. The knock detecting system provides real-time monitoring of the engine and in case of

the knock the control system retards spark timing to eliminate this improper combustion. The best for the engine is to work without the knocking. Thus, prediction of potential combustion knock is the main target of research in the field. It particularly stimulates development in knowledge of knock genesis, knock precursors, fuel properties, cylinder design, etc. Theory and modeling the combustion knock can be valuable tools for computational simulation of engine working cycles and their analysis. Although, several, experimentally determined, correlations between knock intensity and quantities as pre-ignition temperature and ignition lag are satisfactory recognized, but origin of this phenomenon still needs to be theoretically examined in details. Thus, it makes the sub-model of combustion knock more universal and provides opportunity of knock prediction in various engine types as well as experimental models do it for specified engines with limits in working conditions.

Combustion knock occurring in the IC spark ignited engine is a phenomenon, which is sensitive to several quantities. They can influence on knock intensity at various impacts. Several quantities are identified and their impact on the knock is more-less recognized. They can be distinguished as follows:

- temperature of pre-ignition gases – it has significant impact on an induction time (pre-ignition reactions) and strongly impacts on combustion knock [1, 4]. Compression ratio is one of the parameters influencing on the pre-ignition temperature;
- O–H (oxygen to hydrogen) ratio, which might be expressed by the lambda – relative equivalence ratio, which is a factor showing hydrogen active radicals dilution in fresh combustible mixture;
- oxygen dilution in the intake charge – provided by exhaust gas recirculation (EGR);
- presence of hot spots, exhaust residuals – they can work as extra sources for uncontrolled air-fuel ignition;
- initial swirls, intake manifold shape, combustion chamber shape;
- engine load – fuel dose – higher engine load requires higher amounts of fuel delivered to the engine cylinder, hence it provides energy released during combustion and also influences the knock intensity.

Majority of these above mentioned quantities are not independent from each other, for example fuel dose and lambda, that could change the knock. As known through literature survey [1, 2, 7, 8], research on knock reduction in the SI engine by diluting air-fuel combustible mixture is rich of credible results. It is confirmed, that engines working on air-gas lean mixtures are more resistant to knock [7]. Similar impact is observed, while applying EGR. It contributes to remarkable reduction in knock intensity [8]. These both measures can be used to reduce knock intensity in stationary gas fueled engines for heat and power generation. The paper presents measures to effectively reduce combustion knock intensity even to completely eliminate it. Therefore, there are two major effective methods to reduce combustion knock in the engine. Knock can be reduced by either applying EGR or fueling the engine with lean air-fuel mixture. Investigation presented concerns impact of both these measures on reducing combustion knock intensity in the SI reciprocating engine fueled with hydrogen rich gases. Investigation involves hydrogen and natural gas as fuels to the IC engine. Hydrogen addition to methane contributes to increase in laminar flame speed (LFS) of this combustible mixture, that shortens entire combustion duration in the engine cylinder and finally leads to higher engine overall efficiency. Natural gas with a calorific value of 9.7 kW·h/nm³ constitutes a high-value fuel for effective power generation.

Knock intensity determination

As mentioned, knock intensity is determined on the basis of pressure pulsation intensity. Fig. 2 and 3 presents combustion pressure and high-pass filtered pressure pulsations for hydrogen combustion in the SI engine under two various compression ratios (CR) of 10 and 12. As observed, pressure pulsations from Fig. 3 (CR = 12) are several times higher than these from Fig. 2 (CR = 10). Hydrogen as a fuel was not selected by coincidence. It is observed, that pressure pulsations start immediately after combustion development. They are not formed at the end combustion phase as is typical for gasoline knock. As seen in Fig. 4 combustion knock by end-gas self-ignition is accompanied with high MFB (Mass Fraction fuel Burnt) rate.

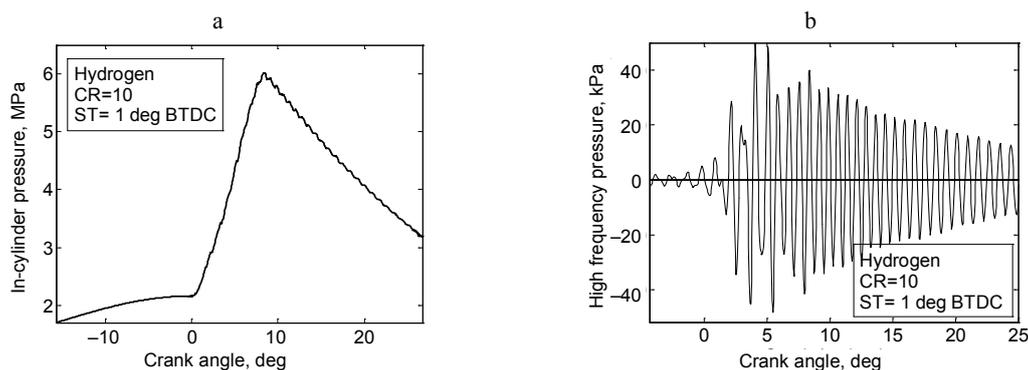


Fig. 2. Plots for engine work cycle at light knock for CR = 10:
a – in-cylinder combustion pressure; b – high frequency pressure of the combustion pressure

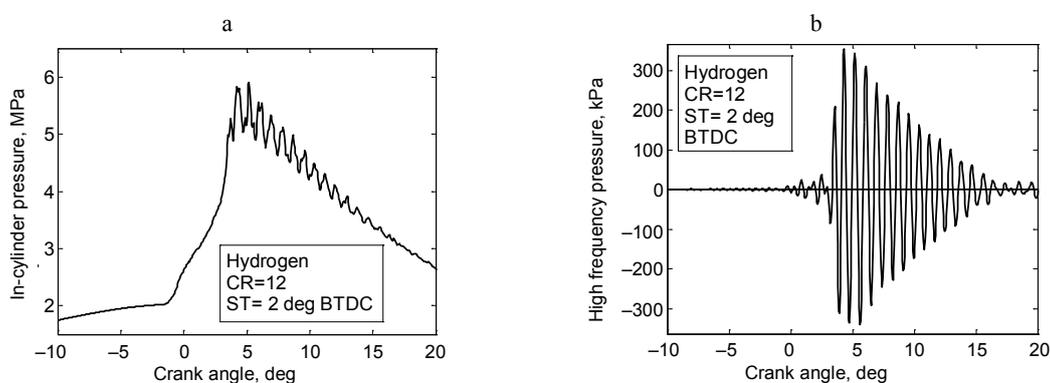


Fig. 3. Plots for engine work cycle at light knock for CR = 10:
a, b – also as in Fig. 2

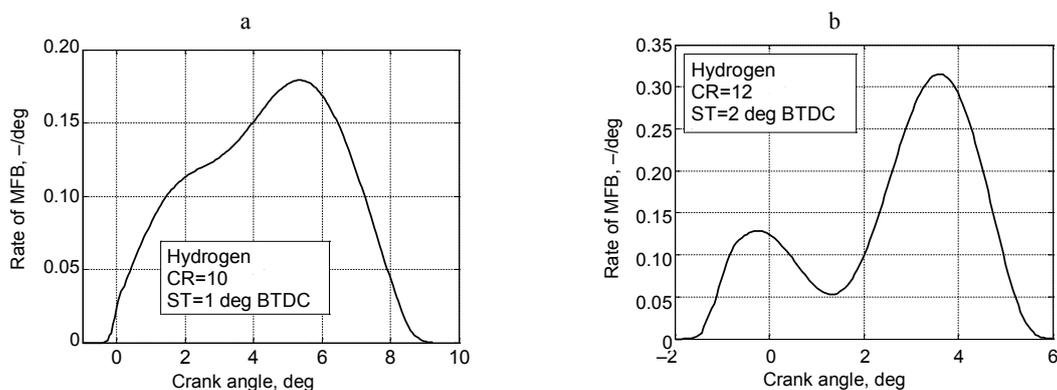


Fig. 4. Rate of MFB for the engine with CR = 10 (a) and CR = 12 (b)

Knock metrics. There are several metrics for in-cylinder pressure pulsations. Here the peak pressure (PP) is proposed as the credible metrics which are easy to be determined. Thus, PP metrics from an individual combustion event as defined as follows

$$PP_i = \max [|HFPO_i(t)|]. \quad (1)$$

And PP for test series can be calculated

$$PP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} PP_i, \quad (2)$$

where PP_i – peak pressure (PP) of the $HFPO_i$ taken from the single combustion event (Fig. 5a); PP – mean of the PP_i (test series usually contains 120 combustion events) (Fig. 5b).

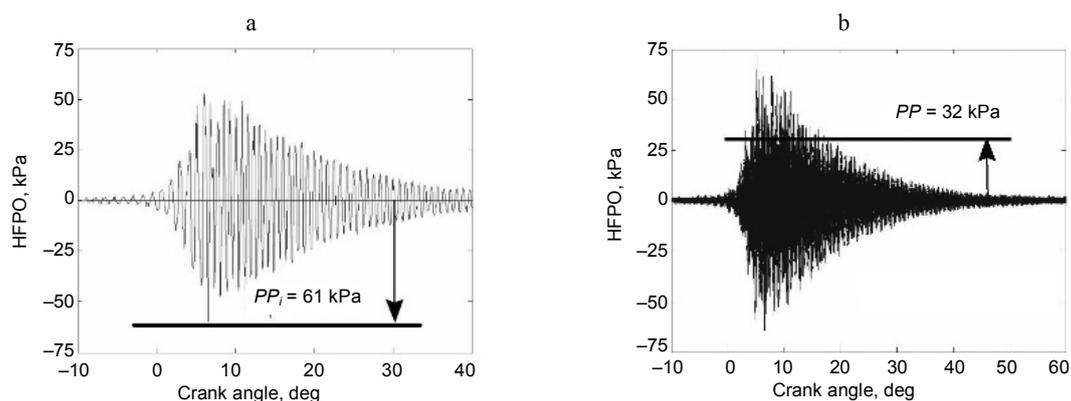


Fig. 5. Graphical interpretation of the PP_i for a single combustion event (a), the PP for a test series consisted of 300 consecutive combustion events (b)

Based on the PP metrics correlation between knock intensity and compression ratio was determined for the hydrogen SI fuelled engine (Fig. 6). As seen, combustion knock to specific limit features with so-called combustion instabilities, which come from unstable combustion. Typical knock as end gas self-ignition defined by Heywood for the gasoline fueled engine starts with its intensity several times higher, as seen for CR over 12 in Fig. 6 [9].

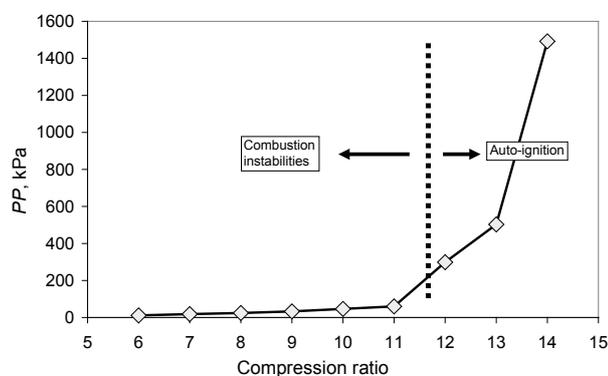


Fig. 6. The averaged intensity PP vs compression ratio for the hydrogen fueled engine and pressure oscillations corresponding to specific compression ratios. Tests were conducted with hydrogen-air stoichiometric mixtures at $ST = 0$ deg

In-cylinder exhaust residuals impact

In-cylinder exhaust gases residuals (ExR) influence on engine in-cylinder combustion progress as diluent. However, exhaust residuals can differ from external EGR with temperature and moisture content. As known, diluent simply lengthens combustion duration, so reduces combustion knock intensity. In this case, higher exhaust residuals

might lead to opposite correlation due to increase in temperature of fresh charge by higher ExR content [10, 11].

Experimental set-up. The tests were conducted on the single cylinder research engine based on Ricardo's Hydra platform. The engine specifications are provided in Tab. 1 [10].

Table 1

Specifications of the single cylinder Hydra engine [10]

Parameter	Description
Base engine	GM Ecotec GEN II LAF
Bore	86.00 mm
Stroke	94.60 mm
Connecting rod length	152.5 mm
Wrist pin offset	0.8 mm
Displacement	0.55 dm ³
Compression Ratio	10.93:1
PFI injection	Methane
Cam Phasing	Dual independent high authority
Engine Control	Prototype for full set-point operation of throttle, fuel, spark, cams, etc.

The engine setup is shown in Fig. 7a. Variable valve overlap was achieved through phasing the intake valve timing relative to a fixed exhaust valve timing. The intake valve cam center line location (ICCL) varies from 90 to 150 crank angle (CA) deg after TDC (top dead center), while the exhaust valve cam centerline location (ECCL) was fixed at 95 CA deg before TDC. The valve profiles are shown in Fig. 7b. Detailed test specifications are provided in Tab. 2.

Specifications of the tests

No	Parameter	Test 1	Test 2
1	Engine speed	1250 rpm	2000 rpm
2	Relative air to fuel ratio "lambda"	1.00...1.04, nearly stoichiometric combustible mixture	1.01...1.04
3	Fixed load NMEP	(450 ± 7) kPa	(450 ± 7) kPa
4	Fixed location for 50 % fuel burnt CA50, to obtain MBT, which is the highest for CA50 of 7°–10° CA after TDC	7.2° ± 0.5° CA	8.1° ± 0.5° CA
5	Data Acquisition	300 consecutive combustion cycles per test	
6	Exhaust emission	The emission were logged for 60 s at sample rate of 1 Hz	

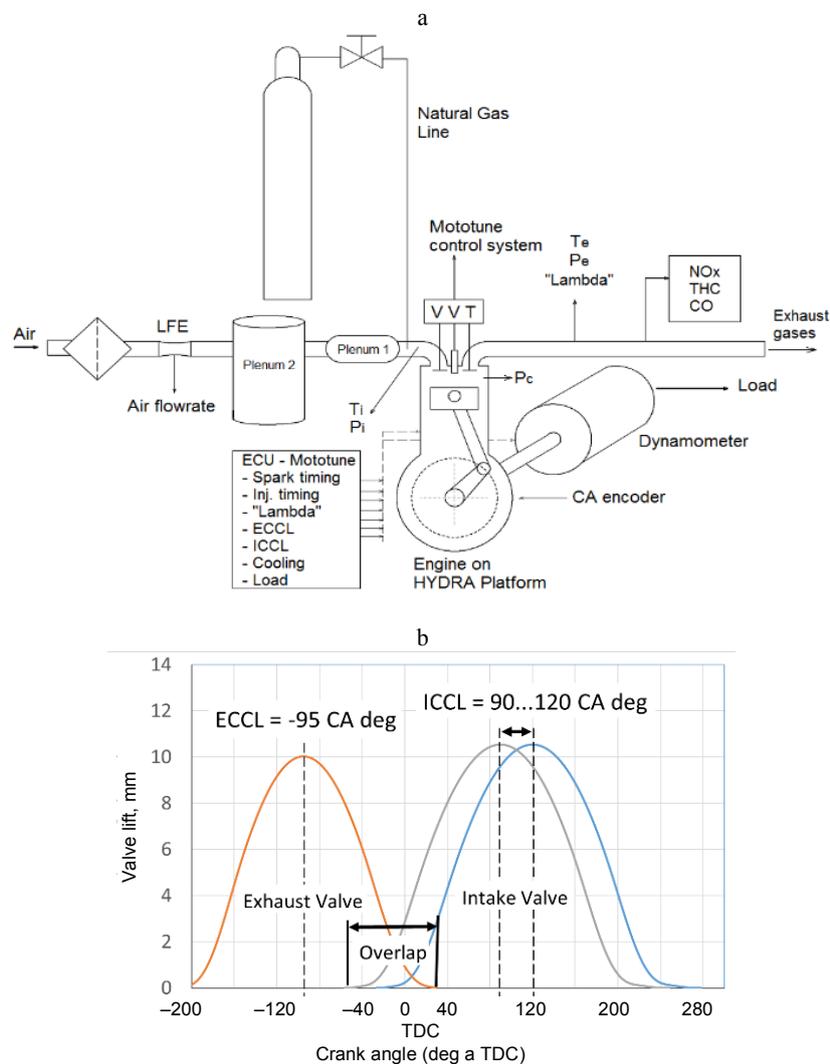


Fig. 7. Hydra engine setup (a), intake and exhaust valve lift profiles (b)

Results and discussion. As observed in Fig. 8 ExR plots are in line with engine overlap. Moreover, higher engine rotational speed (2000 rpm) forces higher exhaust residuals percentage ratio.

Results presented in Fig. 9 confirm that higher ExR contributes to shorter combustion duration, both for these two specific phases: CA0–10 and CA10–90. Hence, temperature impact from higher

ExR on combustion duration is more significant rather than its dilution.

As expected, shorter combustion duration is strictly correlated with higher heat release rate (HRR) as depicted in Fig. 10.

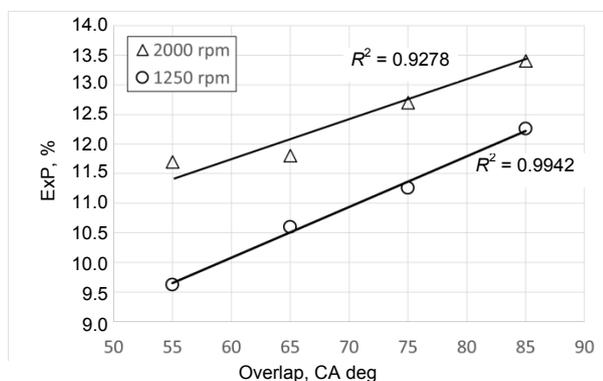


Fig. 8. Correlation between overlap and exhaust residuals (ExR)

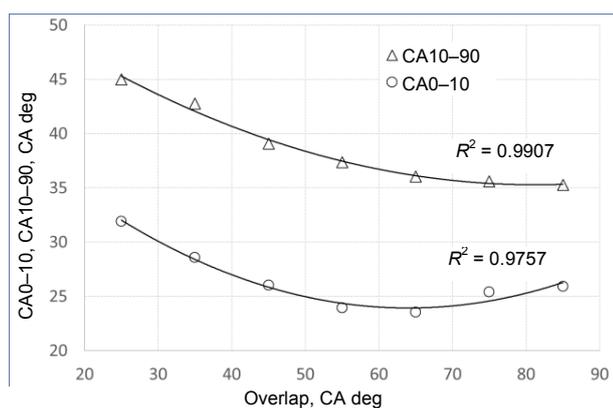


Fig. 9. CA0-10 and CA10-90 combustion phases vs overlap

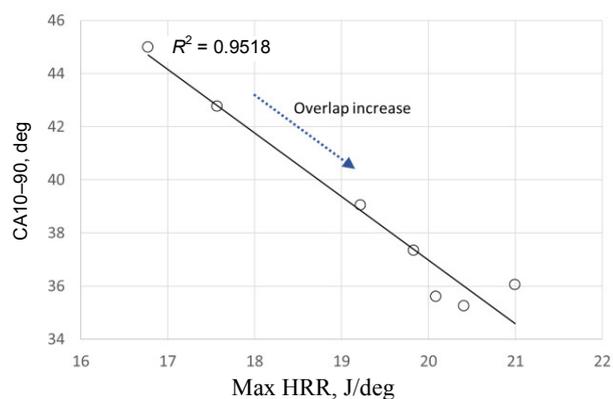


Fig. 10. CA10-90 vs HRR

Knock intensity expressed by metrics PP goes down with higher overlap, as is seen in Fig. 11. The correlation is strongly exponential, hence one can conclude that it is influenced by chemical reac-

tion rate that is affected by both temperature and exhaust residuals content in the fresh charge.

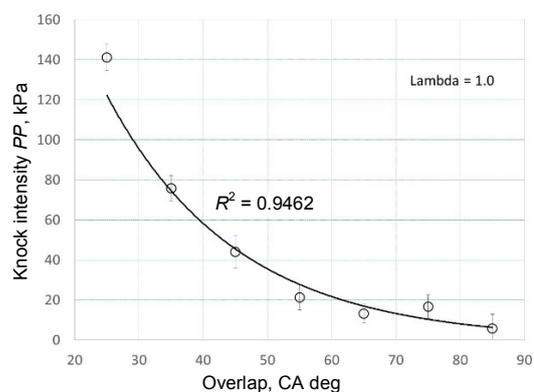


Fig. 11. Knock intensity PP vs overlap

External exhaust gases impact

As mentioned, diluent can reduce knock intensity. Exhaust gases consisted of two major species CO_2 and H_2O can play crucial role in diluting combustible mixture without changing its equivalence ratio (relative equivalence ratio λ). As observed in Fig. 12a, b both higher percentage of EGR and higher ratio of leaning the combustible mixture leads to increase combustion duration [7, 8].

Target of the research works was to answer which measure (EGR or lean mixture) for air-fuel mixture dilution with respect to reducing combustion knock is more effective. To solve this problem, the dilution ratio χ was introduced follow the equation

$$\chi = \frac{n_{st}}{n_{st} + n_{dil}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

where χ – dilution ratio in percentage; n_{st} – number of moles (including fuel and oxidizer) of the stoichiometric air-gas mixture; n_{dil} – number of moles of additional gas working as a diluent.

This dilution ratio χ , expressed as diluent mole percentage, makes it possible to compare knock reduction by EGR with knock reduction by lean mixture.

Dilution ratio defined with the equation (3) depends on lambda – relative air-fuel equivalence ratio in case the diluent is air. Hence, following the equation (3) a lean combustible mixture can be treated as the stoichiometric mixture diluted in extra amounts of air. If EGR is applied for diluting the mixture, then the dilution ratio χ_{dil} is a function of the EGR ratio.

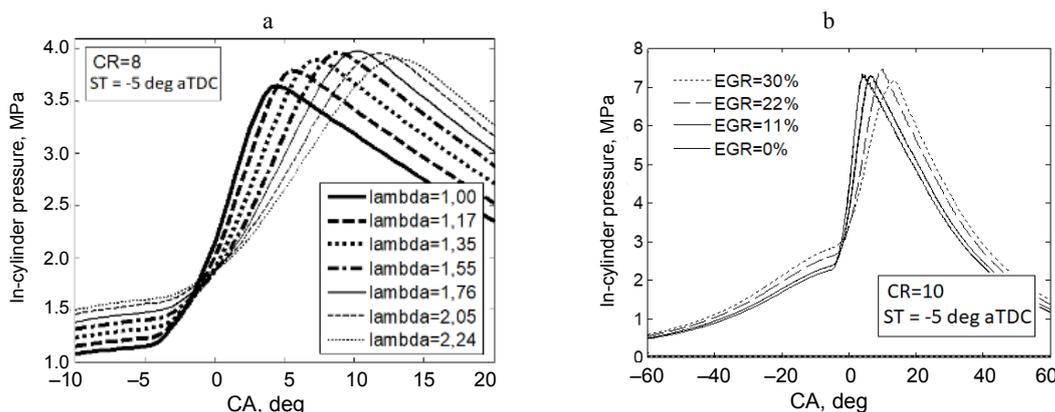


Fig. 12. In-cylinder pressure traces for various lambdas (a) and for various several EGR levels (b) during hydrogen combustion in the CFR engine

In case of applying the EGR as diluent, then the dilution ratio can be expressed as follows:

$$\chi_{EGR} = \frac{n_{st}}{n_{st} + n_{EGR}} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

where n_{st} – number of moles of exhaust gases recirculating to the engine intake port.

Number of moles n_i of each gas can be easily calculated

$$n_i = \frac{m_i}{MW_i}, \quad (5)$$

where m_i – mass of the i agent; MW_i – molar weight of the i agent.

Finally, comparison between EGR and leaning impacts were able to be performed. As depicted in Fig. 13, EGR can be considered as more effective measure to reduce combustion knock rather than leaning the combustible mixture. It can be explained by CO_2 and H_2O presence in the exhaust gases. Unlike additional dilution by O_2 in leaning, both CO_2 and H_2O are hardly active in combustion process.

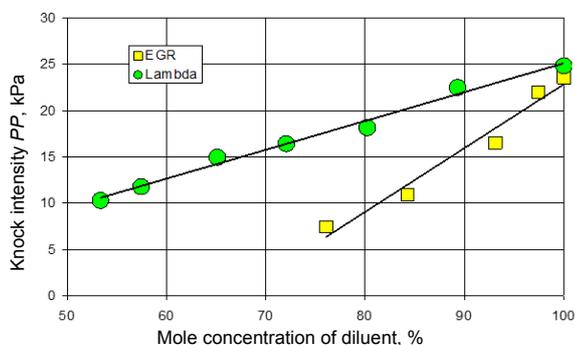


Fig. 13. Knock intensity for EGR and leaning the combustible mixture – comparison vs mole percentage – fuel: hydrogen at ST = -5 deg aTDC

Impact of over-expanded cycle on knock intensity

Investigation in applying over-expanded cycle for both knock and exhaust toxic emissions reduction were described in detail in the works [12–15]. The test bed in the research consists of a single-cylinder spark ignited supercharged engine. The Kistler sensor type 6055 with the Kistler signal charge amplifier type 5011 were used in-cylinder pressure measurements. Pressure in intake manifold was measured by the Motorola MPX 4250 pressure sensor. TDC position and crankshaft positions were measured by the Megatron type MOB 1024/5/BZ/N encoder with resolution of 1024 pulses per revolution. Data measured during the tests were collected with aid of National Instruments data acquisition system NI USB-6251 which was connected to the PC where the data were stored. The over-expanded cycle was achieved by modification of the intake valve timing. In this case the intake valve closure point was located before bottom dead center during intake stroke. It is known as Miller cycle. The test rig specification is presented in Tab. 3.

All measurements were done at wide open throttle conditions in two stages. In the first stage the optimal spark timing was determined for three boost overpressure, in the second stage to find optimal spark timing, the load of the engine was changed by changing a boost overpressure from 0 to 0.6 bar. The excess air ratio λ was maintained constant during the tests and it was close to stoichiometric mixture expressed by $\lambda = 1$.

Test matrix is presented in Tab. 4. The optimal ignition timing was determined for three loads of

the engine which were set by changing the boost overpressure. In each set point of the load the ignition timing was changed from 40 to 20 degree bTDC (before top dead center).

Table 3

Test rig specification	
Parameter	Value
Engine	
Type	4 – stroke, water cooled, spark ignited
Number of cylinders	1 – horizontal
CR	11:1
Rotational speed, rpm	1270
Bore, mm	102
Stroke, mm	120
Displacement, ccm	980
Intake valve opening angle	11° after TDC
	11° after TDC (Miller)
Intake valve closure angle	30° after BDC
	20° before BDC (Miller)
Exhaust valve opening angle	30° after BDC
Exhaust valve closure angle	0° in TDC
Dynamometer	
Synchronous generator, V	3×230
Power, kVA	20
Supercharger	
Type	EATON M65
Boost pressure, bar	0÷1.9

Table 4

Test matrix			
Fuel	Ignition timing, deg bTDC	λ (-)	p_{boost} , bar
Methane (stage I)	Variable from 40 to 20	1.05 ± 0.05	0.0; 0.3; 0.6
Methane (stage II)	Optimal 29	1.05 ± 0.05	0.0÷0.6

Body temperature of the engine was maintained at 70 °C and the temperature of the fresh air after supercharger was maintained at 24 °C. Methane was delivered to the engine by a gas mixer which was installed in the intake manifold. The air/fuel ratio was set according to the measurements of air and fuel flows by rotor flow meters.

On the basis of these data the pressure-volume, pressure-time and engine load vs spark timing plots were made. These data allowed to perform analysis on combustion process and knock occurrence. Fig. 14 presents knock intensity PP vs boosting pressure for the engine working with clas-

sic Otto cycle and the engine with over-expanded cycle (O-E). As one can notice knock is significantly reduced by applying over-expanded Miller cycle to the engine. It is obviously known that knock is also in strict inline correlation with engine load. As presented in Fig. 15, knock intensity increases with increase in engine load for Otto cycle engine unlike the over-expanded cycle engine, where intensity of knock slightly goes down even the engine load increases.

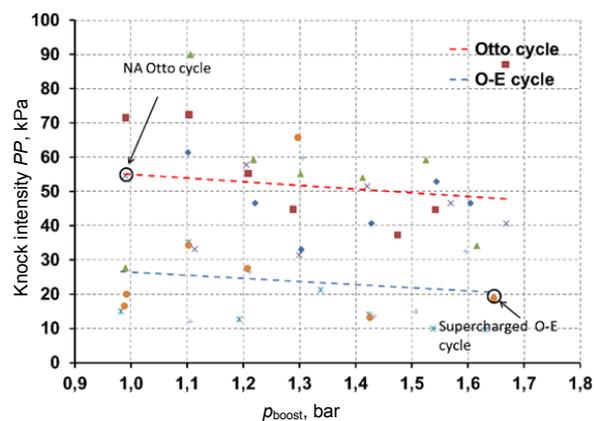


Fig. 14. Knock intensity for Otto and over-expanded Miller cycles vs boosting pressure

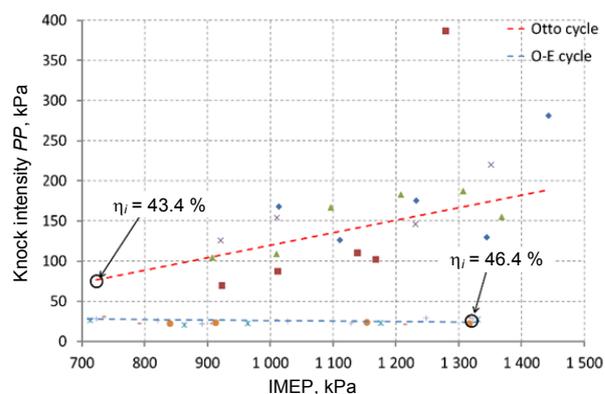


Fig. 15. Knock intensity for Otto and over-expanded Miller cycles vs engine load (IMEP)

The results of the research confirm benefits which come from applying the over-expanded cycle to the supercharged SI IC engine. On the basis of the research the following conclusions can be drawn: the optimal ignition timing does not depend on engine cycle type – classic Otto or over-expanded. Moreover, the optimal value is the same for the Otto cycle and the over-expanded cycle engine. In both versions of the engine, increase in boost pressure does not affect on optimal ignition timing, in all cases ignition timing was 28° before TDC.

CONCLUSIONS

1. High frequency in-cylinder pressure pulsations, generated by improper combustion processes causing knocking, decrease when EGR ratio increases for the conditions examined.

2. Combustion knock intensity expressed by the maximum peak of the in-cylinder pressure pulsations shows a strong negative correlation with the EGR ratio for stoichiometric hydrogen combustion under the conditions examined:

- higher hydrogen dose makes combustion knock more intensive under the same lambda. Then intensified knock significantly shortens combustion duration even if a mass of hydrogen is higher;

- combustion knock intensity decreases when H₂-air mixture becomes leaner. The dependence between lambda and knock intensity *PP* is nearly linear;

- with respect to a catalytic converter installed on the exhaust pipe line, applying EGR appears as better solution for knock reduction than leaning the combustible mixture because the catalytic converter needs stoichiometric mixture for effective NO_x reduction.

3. It can be observed, that for both the naturally aspirated and the boosted engine with boost over-pressure of 0.3 bar a peak combustion pressure is lower for the engine with over-expanded cycle if compared to this one with Otto cycle. For maximum boost pressure of 0.6 bar the peak in combustion pressure is not changed.

4. Application of the over-expanded cycle to the IC engine reduces intensity of potential knock what can be observed. Reduction in pressure pulsations of combustion pressure for over-expanded cycle engine in comparison to Otto cycle engine is approximately 50 % for all loads.

5. Over-expanded cycle contributes to increase in engine thermal efficiency. As determined, this increase was approximately 1.2 % from 40.3 % for the engine with Otto cycle to 41.5 % for the engine with over-expanded cycle.

ACKNOWLEDGMENT

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 691232 – Knocky – H2020-MSCA-RISE-2015/H2020-MSCA-RISE-2015 and the research was additionally co-financed by Polish Ministry of Science and Higher Education within the frame of science support funds for international co-funded projects in 2016–2019.

REFERENCES

1. White C. M., Steeper R. R., Lutz A. E. (2006) The Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engine: a Technical Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31 (10), 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>.
2. Sierens R., Verhelst S. (2010) Experimental Study of a Hydrogen Fuelled Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123 (1), 211–216. <https://doi.org/10.1115/1.1339989>.
3. Heywood J. B. (1988) *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Inc. 930.
4. Szwaja S., Bhandary K. R., Naber J. D. (2007) Comparison of Hydrogen and Gasoline Combustion Knock in a Spark Ignition Engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (18), 5076–5087. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.063>.
5. Naber J. D., Szwaja S. (2007) Statistical Approach to Characterise Combustion Knock in the Hydrogen Fuelled SI Engine. *Journal of Kones – Powertrain and Transport*, 14 (3), 443–450.
6. Brunt M., Pond C., Biundo J. (1998) Gasoline Engine Knock Analysis Using Cylinder Pressure Data. *SAE Technical Paper Series*, 980896. <https://doi.org/10.4271/980896>.
7. Szwaja S., Naber J. D. (2008) Impact of Leaning Hydrogen-Air Mixtures on Engine Combustion Knock. *Journal of Kones – Powertrain and Transport*, 15 (2), 483–492.
8. Szwaja S., Naber J. D. (2007) Exhaust Gas Recirculation Strategy in the Hydrogen SI Engine. *Journal of Kones – Powertrain and Transport*, 14 (2), 457–464.
9. Szwaja S., Naber J. D. (2013) Dual Nature of Hydrogen Combustion Knock. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (28), 12489–12496. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.036>.
10. Szwaja S., Ansari E., Rao S., Szwaja M., Grab-Rogalinski K., Naber J. D., Pyrc M. (2018) Influence of Exhaust Residuals on Combustion Phases, Exhaust Toxic Emission and Fuel Consumption from a Natural Gas Fueled Spark-Ignition Engine. *Energy Conversion and Management*, 165, 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.075>.
11. Yang Z., Rao S., Wang Y., Harsulkar J., Ansari E., Narasimhamurthy N. M., Dice P., Naber J. D., Lonari Y., Szwaja S. (2018) Investigation of Combustion Knock Distribution in a Boosted Methane-Gasoline Blended Fueled SI Engine. *SAE Technical Paper Series*, 2018-01-0215. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0215>.
12. Grab-Rogaliński K., Szwaja S. (2017) Combustion of the Biomethane in an IC Over-Expanded Engine. *2017 International Conference on Green Energy and Applications*. <https://doi.org/10.1109/icgea.2017.7925473>.
13. Grab-Rogalinski K., Szwaja S. (2015) Influence of Intake Valve Closure Angle on IC Engine Indicated Parameters. *Journal of Kones*, 22 (3), 29–35.
14. Grab-Rogalinski K., Szwaja S. (2015) Miller Cycle Application to the Gaseous Supercharged SI Engine. *Combustion Engines*, R.44 3 (162), 881–885.
15. Grab-Rogaliński K., Szwaja S., Tutak W. (2014) The Miller Cycle Based IC Engine Fueled with a CNG/Hydrogen. *Journal of Kones – Powertrain and Transport*, 21 (4), 137–144. <https://doi.org/10.1109/icgea.2017.7925473>.

Received: 08.10.2019

Accepted: 10.12.2019

Published online: 30.07.2020

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-349-355>

UDC 349

Analysis of the Problem of Electric Buses Charging in Urban Transport

A. Czerepicki¹⁾, W. Choromański¹⁾, M. Kozłowski¹⁾, A. Kazinski²⁾

¹⁾Warsaw University of Technology (Warsaw, Republic of Poland),

²⁾Brest State University (Brest, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Abstract. The electric bus is an ecological means of transport. Its operation reduces the negative impact on the environment. The transition to electric urban transport is in line with the concept of sustainable development of the European Union and the Polish “Act on Electromobility and Alternative Fuels”. Today, on the streets of Polish cities, electric buses are increasingly replacing diesel-powered vehicles. The electrification of the bus fleet requires the establishment of an appropriate infrastructure for charging vehicle batteries. Electric chargers are placed at the end stops of the communication lines. When the bus stops at the end of the route, it is possible to partially recharge the energy consumed. The amount of recharged energy depends on many factors, such as the power of the charger, bus stop time, possible waiting time for a free charger, etc. In the event of incomplete replenishment of the consumed energy, the completion of subsequent courses may be endangered. The article proposes an approach to the analysis of the process of charging electric buses at the end stops of the route, taking into account the characteristics of the vehicle battery, the intensity of vehicle traffic, the characteristics of stationary chargers and its quantity. The proposed approach uses queue theory to describe the process of bus charging. The result of the research is the estimation of the use of the chargers in different configurations and the estimation of the state of charge of the bus battery for selected timetables.

Keywords: electric bus, battery charging, electromobility, queue theory, public transport

For citation: Czerepicki A., Choromański W., Kozłowski M., Kazinski A. (2020) Analysis of the Problem of Electric Buses Charging in Urban Transport. *Science and Technique*, 19 (4), 349–355. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-349-355>

Анализ проблемы при зарядке электрических автобусов городского транспорта

А. Черепицкий¹⁾, В. Хороманьский¹⁾, М. Козловский¹⁾, А. Козинский²⁾

¹⁾Варшавский технический университет (Варшава, Республика Польша),

²⁾Брестский государственный университет (Брест, Республика Беларусь)

Реферат. Электрический автобус является экологическим средством передвижения, эксплуатация которого снижает негативное воздействие на окружающую среду. Переход на городской электрический транспорт соответствует концепции сбалансированного развития Евросоюза и Закону об электромобильности и альтернативных видах топлива, принятому в Польше. Сегодня на улицах польских городов все чаще можно увидеть электрические автобусы, которые заменяют дизельные транспортные средства. Электрификация автобусного парка требует создания соответствующей инфраструктуры для зарядки аккумуляторных батарей автобусов путем размещения электрических зарядных устройств на конечных остановках маршрутов. По прибытии на конечный пункт, оборудованный зарядным устройством, автобус может частично восполнить энергию, потраченную на преодоление маршрута. Ее объем зависит от многих факторов, таких как: мощность зарядного устройства, интервал времени перед началом следующего курса, потенциальное ожидание в очереди к зарядному устройству и т. п. В случае неполной подзарядки батареи завершение

Адрес для переписки

Черепицкий Анжей
Варшавский технический университет
ул. Кошыкова, 75,
00-662, г. Варшава, Республика Польша
Тел.: +48 222 34-73-11
a.czerepicki@wt.pw.edu.pl

Address for correspondence

Czerepicki Andrzej
Warsaw University of Technology
75, Koszykowa str.,
00-662, Warsaw, Republic of Poland
Tel.: +48 222 34-73-11
a.czerepicki@wt.pw.edu.pl

автобусом последующих курсов может оказаться под угрозой. Предложено использование теории очередей для анализа процесса обслуживания зарядки электрических автобусов на конечных остановках маршрута с учетом таких параметров, как: характеристика аккумулятора транспортного средства, интенсивность движения на маршруте, мощность и количество стационарных зарядных устройств. Результатами исследования являются оценка возможности применения зарядных устройств на конечных пунктах маршрута в различных конфигурациях, а также оценка состояния заряда аккумуляторной батареи автобуса для выбранных расписаний в зависимости от числа выполненных курсов на маршруте.

Ключевые слова: электрический автобус, аккумулятор, электромобильность, теория очередей, городской транспорт

Для цитирования: Анализ проблемы при зарядке электрических автобусов городского транспорта / А. Черепицкий [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 349–355. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-349-355>

Introduction

Electromobility is a contemporary trend in the development of transport systems in Europe [1]. The concept of sustainable development of the European Union assumes, among other things, the transition of public transport to electric vehicles. In accordance with “A European Strategy for Low-Emission Mobility” [2], the development of transport using alternative fuels, including electricity, is a priority for the coming years. In Poland, the development of ecological means of transport is promoted by the “Act on Electromobility and Alternative Fuels” approved by the government [3].

Electric buses are one of the green means of transport. Using an electric bus as a replacement for a combustion vehicle reduces the negative impact on the environment, among others by reducing greenhouse gas emissions and noise levels. Therefore, on the streets of European cities, electric buses increasingly replace traditional combustion buses [4].

The introduction of electric buses in public transport is related to the development of vehicle charging infrastructure. During operation on the line, the bus consumes electricity. The source of this energy is a battery placed on the bus. Contemporary technologies of the lithium-ion batteries production [5] allow to reach the capacity of the battery, which is enough to perform several trips on the route without recharging the battery. Next, the battery must be recharged in order to ensure a continuous vehicle operation during the working day. It is possible to recharge the battery when the bus is scheduled to stop at the end of the route. The consumed energy is replenished by electric chargers located at the end stops of the route. The amount of energy replenished depends directly on the power of the charger, the type of battery and the charging time.

When designing timetables, various criteria are considered, including route length, number

of stops, intensity of passenger flows, number of vehicles, minimization of transfer times, etc. Optimally designed public transport timetable requires to agree on passengers' expectations and carrier's capabilities. Switching urban bus transport to electric vehicles introduces additional restrictions to the timetable planning system, which are related to the charging time of the electric vehicle. If the bus does not replenish all the energy used for the course while staying at the end of the line, the next course may be threatened by insufficient battery state. The situation becomes more complex if chargers are shared between buses with different lines at common end stops.

Therefore, the use of electric buses instead diesel buses in urban transport requires a preliminary analysis of existing timetables in order to estimate the energy consumption of the bus along the route, the quantity energy supplemented during stopovers depending on the number and characteristics of chargers, and the rules of management of the buses charging process at the routes end stops.

The paper proposes and analyses a model of a system for managing the process of charging electric buses with the use of the queuing theory. The purpose of the model is to estimate the conditions needed for the handling of an urban transport line by electric buses. The input data of the model are the number and power of chargers, and the timetable of bus travel. The estimation of battery state depends on the number of trips made, the estimation of the time of using the chargers and the total power consumption at the end stop.

Problem definition

Let all the lines that will be operated by electric buses be represented by the set $R \in \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$. Each line $r_i \in R$ can be described by the characteristics $r_i = \{s_s, s_f, d\}$, where d – route length; s_s, s_f – starting and ending stops of the line (Fig. 1). The r_i line can start and end at the same stop, i. e. $\exists r_i \in R$ for which $s_s \equiv s_f$. The same end stop may belong

to several lines of communication, i. e. $\exists s_i \in S$ for which $r_n \cup r_k \neq 0$. It is assumed that each line $r_i \in R$ is operated exclusively by electric buses (without combustion engines), which represent the non-empty finite set $A_i = \{a^1_{i_s}, a^2_{i_s}, \dots, a^k_{i_s}\}$. All electric buses are represented by the finite set $A = \{A_1, A_2, \dots, A_p\}$. It is also assumed that one bus serves only one line, i. e. $\forall A_i, A_j \in A, i \neq j \Rightarrow A_i \cap A_j = \{\}$.

The source of energy driving the electric bus is an accumulator battery with a capacity of E_{bat} , kW·h. The electricity used to cross the route of the r_i urban transport line is $E_{route}(r_i)$, kW·h. The value of energy consumption for each route was obtained from experimental measurements or estimated by modelling methods.

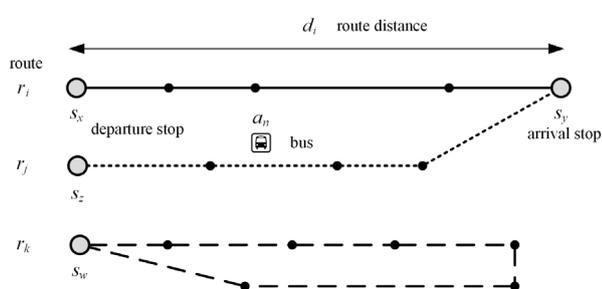


Fig. 1. Examples of configurations of lines and end stops

The energy of the bus battery used for the route is partially replenished when the bus stops at the end of the route. It is assumed that both ends of the route are equipped with loaders. For technical reasons, the possibility of charging the batteries at intermediate stops is excluded: due to the short stopping time and intensive traffic within the city stops, this would create additional problems that would not compensate for the effect of short-term charging. All the chargers placed at the end represent a non-empty set $C(r_i) = \{c_1, c_2, \dots, c_l\}$.

The bus arriving at the route's end occupies the first available charger. If all the chargers are occupied now, the bus is queued up to wait for an available charger. If the estimated waiting time in the queue exceeds the scheduled waiting time at the end, the bus must leave the queue. In this case, the battery is not charged. After releasing any charger, the first bus leaves the queue and starts the charging process. The bus that has recharged battery leaves the stop. The process of bus charging is shown in Fig. 2.

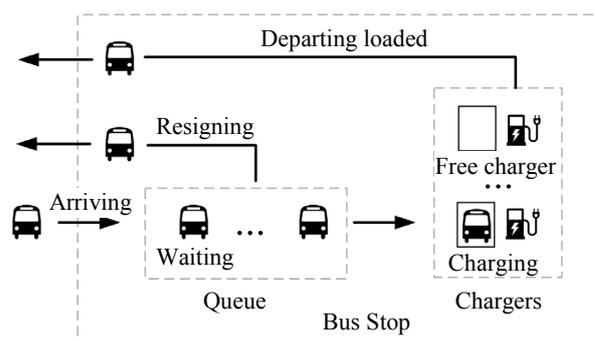


Fig. 2. Charging the bus battery at the end stop

Description of the queuing system

Let's describe the functioning of the electric buses charging system in the terminology of queuing systems. In order to classify the system, the following should be formulated: the process of arriving the buses to the end stop, the process of recharging the battery and the rules of the queue's operation. Let's the average frequency of bus arrivals at the end of the route is λ . For example, $\lambda = 5$ means that in one hour at the end stop of the route arrives 12 buses. The basic factor determining the intensity of λ is the bus timetable. In fact, λ depends on the time of day: in rush hour its value will be maximum. For further calculations, the maximum λ values will be used.

The single $c_i \in \{C\}$ charger provides the bus service channel. At the end stop of the route it is possible to place any number of chargers (greater than zero). It is assumed that all chargers have identical characteristics. The μ intensity of the bus operation process is determined by the number of q chargers and the charging time t_c

$$\mu = \frac{q}{t_c} \tag{1}$$

When the next bus comes to an end, it is possible that all the chargers are occupied. In this case, the bus can resign from charging or stand in a queue. The queue-free system is the simplest way to organize the bus service process. It is also friendly for the driver, who does not wait in the queue and can use this time to relax. However, it has the lowest effectiveness in processing requests. The system with unlimited queue length guarantees that the bus battery will be charged sooner or later. However, it does not ensure that the timetable is respected. In this situation, the best solution

seems to be a queue with a limited waiting time. The bus may resign from waiting in the queue if this may delay the next trip.

Let's describe the states of the queuing system for charging buses at the stop. A set of discrete system states can be defined as $S = \{S_0, S_1, \dots, S_r, \dots, S_k\}$. The initial state of the system is a state S_0 where all chargers are free. The occupation of the first free charger by the bus brings the system to the state of S_1 . Let q be the number of chargers at the stop. Then the states $S_0 \dots S_{q-1}$ represents the situation when the system accepts requests and immediately serves buses that are coming to the stop. The S_q state means that all chargers are occupied. In a system without a queue, the next requests will be rejected, i. e. S_q is the last state of the queue-free system. In systems with a queue, the state S_{q+1} represents the situation when all the chargers are busy and there is one bus waiting in the queue. The maximum number of buses in a queue is limited by the total number of buses on the route – k . Then the last state of the system will be S_k , when all the chargers are busy, and in the queue are waiting $k-q$ buses (Fig. 3).

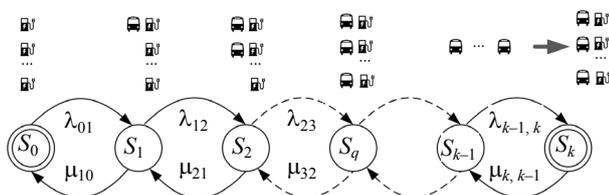


Fig. 3. Diagram of system states

Transitions between states occur at random time points. The system transition time from one state to the next is very small in comparison with the time where system is staying in the S_i . The probability of the system transition from the S_i state to the different S_j state does not depend on the states preceding S_i . For example, the system may go to the S_1 state (one charger is occupied), when the charging bus leaving charger (from S_2), or when the bus arrives to the stop and all chargers are free (from S_0). Therefore, the process of buses handling at the stop can be considered as Markov process [6]. We also assume that the number of buses on the route is very large ($k \gg 1$) and the scheduled intervals of their courses are much smaller than the journey time (otherwise the problem of handling many buses at the end simply does not exist). In this case the number of requests

in a random time interval τ_1 will not depend on the number of requests in another interval τ_2 , provided that the intervals do not overlap: $\tau_1 \cap \tau_2 = \{\}$. So, the process of arrival of the buses at the end stop can be considered as the Poisson's process [7].

Let p_i be the probability that the system is in the S_i state. For so defined SMO it is possible to build a system of Kolmogorov equations for systems with a finite number of states. The sum of all probabilities is $\sum_{i=0}^k p_i = 1$. Accordingly,

the probabilities of each state can be calculated as:

$$p_0 = \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} + \frac{\lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{21}\mu_{10}} + \dots + \frac{\lambda_{k-1,k} \dots \lambda_{12}\lambda_{01}}{\mu_{k,k-1} \dots \mu_{21}\mu_{10}} \right)^{-1};$$

$$p_1 = \frac{p_0 \lambda_{01}}{\mu_{10}};$$

$$p_2 = \frac{p_0 \lambda_{12} \lambda_{01}}{\mu_{21} \mu_{10}};$$

$$\dots$$

$$p_k = \frac{p_0 \lambda_{k-1,k} \dots \lambda_{12} \lambda_{01}}{\mu_{k,k-1} \dots \mu_{21} \mu_{10}}.$$

Assume that the waiting queue of buses works on the FIFO rule. The time that the bus stays at the end stop must not exceed the maximum value, which is determined by the timetable. The bus driver can resign from waiting in the queue if there is a risk of delaying departure for the next trip. Let t_s is the average waiting time in the queue at the stop, after which the bus leaves the queue. In this case, the intensity of the stream of resignation from waiting can be defined as $\nu = 1/t_s$. Let's introduce the channel load coefficient $\rho = \lambda/\mu$ and the resignation coefficients $\beta = \nu/\mu$. Then the probability that all chargers are available will be calculated as:

$$p_0 = \left(1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^n}{n!} \left(\frac{\rho}{n+\beta} + \frac{\rho^2}{(n+\beta)(n+2\beta)} + \dots + \frac{\rho^r}{(n+\beta)(n+2\beta)\dots(n+r\beta)} \right) \right)^{-1}.$$

The probability that i chargers are occupied and there is no bus waiting in the queue will be

$$p_i = p_0 \frac{\rho^i}{i!}, i \in [1...q].$$

The probability for other states of the system, when the queue is not empty, depends also on the intensity of the resignation from waiting

$$p_{q+i} = p_0 \frac{\rho^{q+i}}{q!(q+\beta)(q+2\beta)...(q+i\beta)}, i > 0.$$

The average number of queued vehicles can be calculated as $\bar{w} = \sum_i i p_{n+i}$. Then the average number of resigning buses can be estimated as $R = \bar{w}v$. Absolute throughput of the system (i. e. the average number of buses charged per unit time) will be

$$A = \lambda - \bar{w}.$$

The relative throughput of the system (probability that the next bus will be charged) will be respectively

$$Q = \frac{A}{\lambda} = 1 - \frac{\bar{w}v}{\lambda}.$$

The expected average number of the occupied chargers will be

$$C = \frac{A}{\mu} = \rho - \bar{w}\beta.$$

Calculation of system characteristics using real data

We will calculate the system characteristics using the real data obtained for chosen bus line [8]. The intensity of bus arrivals at the end stop was calculated using timetable at rush hours of the working day: $\lambda = 14$. The average time t_c of the bus stay at the end stop equals 10 minutes. So, the intensity of the vehicles handling process can be calculated from (1) as $\mu = q/t_c = q/(10/60) = 6q$, where q – variable number of chargers. We assume that the average bus waiting time in a queue does not exceed the total waiting time at the end stop of the route and equals $t_s = 10$ min. Then the intensity of the resigning will be $v = \frac{1}{t_s} = 6$. The results

of the calculations are presented in Tab. 1.

We will analyze obtained data. Fig. 4 shows the dependence of the probability of the system staying in the states $p_0 \dots p_4$ from the charger's number q . The probability of p_0 (all chargers are free) increases with increasing q . Of the remaining states of the system, it most often stays in p_1 when exactly one vehicle is in charging. The maximum value $p_1 = 0.36$ is reached for the number of chargers $q = 3$.

Table 1

Calculated characteristics of the system

Number of chargers n	1	2	3	4
Intensity of bus arrivals at end stop λ	14	14	14	14
Intensity of charging process μ	6	12	18	24
Intensity of resigning process v	6	6	6	6
Resignation coefficient $\beta = v/\mu$	1.00	0.50	0.33	0.25
Channel load coefficient $\rho = \lambda/\mu$	2.33	1.17	0.78	0.58
Probability p_0 of the S_0 system state (all chargers are free)	0.10	0.30	0.46	0.56
Absolute throughput A (average number of buses charged per unit time)	5.42	11.28	13.76	13.98
Relative throughput $Q = A/\lambda$	0.39	0.81	0.98	0.99
Average number of occupied chargers $C = A/\mu$	0.90	1.88	2.29	2.33
Average number of queued buses \bar{w}	1.43	0.23	0.01	0.00
Average number of resigned buses R	8.58	2.72	0.24	0.01

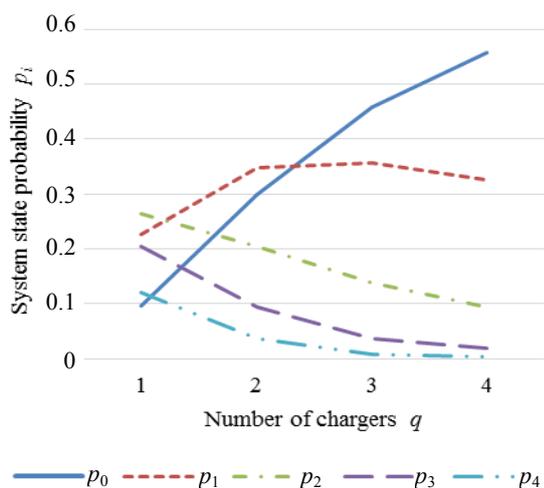


Fig. 4. Probability of the system's states

Fig. 5 shows the average number of queued buses depending on chargers' number. As can be seen, the addition of a second charger significantly reduces the length of the queue. With $q=3$ the queue almost does not exist.

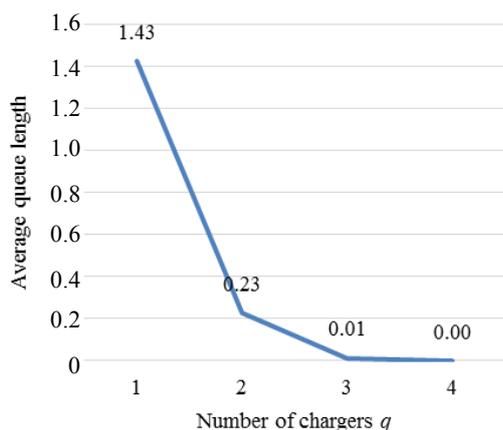


Fig. 5. Average number of queued vehicles

Fig. 6 compares the number of served buses with the number of resigning buses. For one charger about 9 of 14 buses per hour will resign from queue waiting. For two chargers, the absolute throughput of the system $A_{q=2} \approx 11$, i. e. about of 3 buses will resign from queuing. Three chargers will handle all requests.

We will analyze the process of replenishing the energy of the bus battery during a stop at the end of the route. For charging electric vehicles, fast and slow chargers can be used. In the case of public transport, where the bus stopover time is short and the battery capacity is relatively large, fast chargers of 100 to 600 kW must be used to charge the

battery. Such chargers usually use the energy of existing tram or trolleybus networks [9].

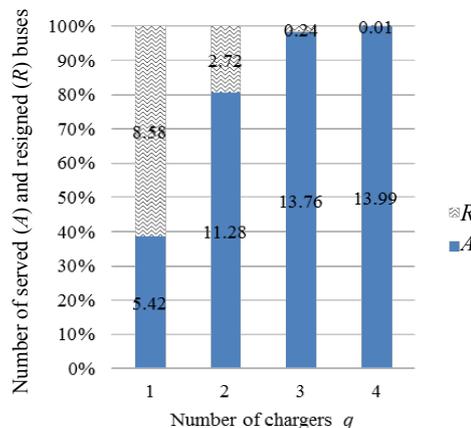


Fig. 6. Comparison of serviced and resigning buses

Let us assume, that the battery capacity of a typical electric bus of 12 m length equal to $C_{bat} = 200$ kW·h, and the time of its full charging $t_{bat} = 2$ h. The average battery energy consumption for the route was estimated using behavioral battery model [10] and amounts to $E_{trac} = 30$ kW·h = 15 % C_{bat} . During charging the bus complements $E_{charge} = C_{bat}/t_{bat} \cdot t_{charge} = 200/2 \cdot 0.166 = 16.66$ kW·h = 8.3 % C_{bat} .

The battery energy should be enough to ensure a continuous running of the electric bus on the line during+ the working day. We assume that the bus will depart on its first trip fully charged. For calculation the expected number of daily trips for the different number of chargers, the relative throughput of the system Q may be used. The expected battery status after n courses can be estimated as $E_{bat}(q, n) = C_{bat} - n(E_{trac} - E_{charge}Q)$.

Tab. 2 shows the state of bus battery as a function of the charger's quantity and journey number.

As can be concluded from the results obtained, if the buses are not charged at the route's end, the battery will be discharged after 7 courses (Fig. 7).

Adding a single charger does not significantly change the situation: due to the low system throughput, most buses will resign from recharging. For two chargers at the end, they will be occupied through 94 % of the time. In this case, 81 % of battery charging requests will be handled and the average number of vehicle journeys will be 12. Increasing the number of chargers to 3 will result in 98 % of requests being handled and the maximum number of journeys approaching to 15. Further increase in the number of chargers will not have noticeable effect.

Table 2

Estimation of bus battery charge state $E_{bat}(q, n)$, %, after n journeys for q chargers

Journey number n	Number of chargers q				
	0	1	2	3	4
0	100	100	100	100	100
1	85	88	92	93	93
2	70	77	84	86	87
3	55	65	75	80	80
4	40	53	67	73	73
5	25	41	59	66	67
6	10	30	51	59	60
7	–	18	42	52	53
8		6	34	45	47
9		–	26	39	40
10			18	32	33
11			9	25	27
12			1	18	20
13			–	11	13
14				4	7
15				–	0

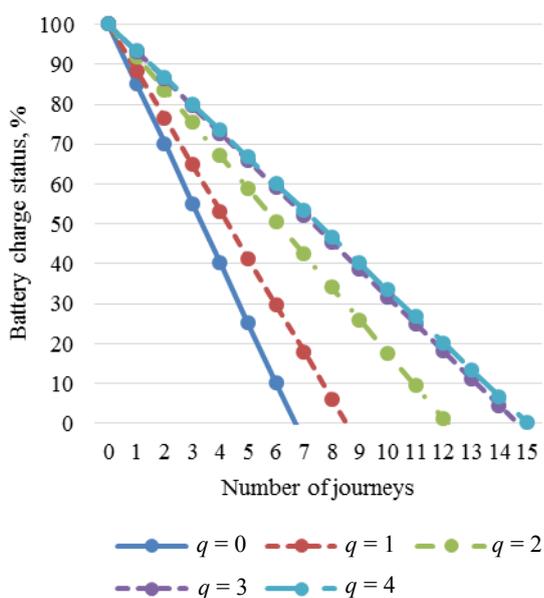


Fig. 7. Estimated number of journeys

So, when planning to handle buses at the end stop of the route in described situation, should be considered 2 or 3 chargers. The final decision may be taken using the function, which should consider the cost of installation, the cost of operation and the required number of vehicle journeys per day. In our case, the planned number of vehicle journeys per day was 12, i. e. the expected result can be reached with $q = 2$ chargers.

CONCLUSION

The article presents issues of planning the service of charging batteries of electric buses in public transport. A queuing theory has been used to describe the system. Based on a timetable, we have determined parameters of incoming bus requests in order to recharge a battery. The efficiency of the bus service process, principles of queue operation and conditions of bus resignation from charging due to a limited waiting time have been determined. We have calculated a mass service system capacity, probability of bus resigning and average queue length for different number of chargers. Introducing the capacity of bus battery and electricity consumption on the route, the average number of bus journeys on the line has been estimated for each configuration of chargers. The obtained theoretical results can be used as a reference point in the design of real bus charging systems and as an input to a computer modeling system of the described problem.

REFERENCES

- Choromański W. (ed.) (2015) Ecomobility. Innovative and Ecological Means of Transport. *Publishing House of Communications and Connectivity*, 1. (in Polish).
- A European Strategy for Low-Emission Mobility (2016). <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/a-european-strategy-for-low>.
- Electromobility and Alternative Fuels Act. Dz. U. (2018) Pos. 317. <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20180000317/T/D20180317L.pdf>.
- ZeEUS eBus Report. An Overview of Electric Buses in Europe (2016). <https://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-ebus-report-internet.pdf>.
- Koniak M., Czerepicky A., Tomczuk P., et al. (2016) Simulation of the Battery Pack Exploitation Based on Real Measurement Data of Applied Chemical Cells. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*, (77), 1–5. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20167712002>.
- Haaggstrom O. (2008) Finite Markov Chains and Algorithmic Applications. *Cambridge University Press*.
- Kingman J. F. C. (1993) Poisson Processes. *Oxford Studies in Probability*. Clarendon Press.
- Municipal Bus Works in Warsaw. Electronic Version of the Timetable. http://www.ztm.waw.pl/rozklad_nowy.php?c=182&l=1.
- Kobos W., Chudzik P. (2017) Supplying the Electric Bus with Energy. *AUTOBUSES – Technology, Operation, Transportation Systems*, 18 (1–2). <https://doi.org/10.24136/atest.2017.006>.
- Koniak M., Kazinski A., Czerepicky A. (2016) Mathematical Model to Estimate the Electrical Parameters of the Autonomous Vehicle Battery. *II International Correspondence Scientific and Practical Conference “Prospects of Transport Complex Development”, 4–6 Oct. 2016. Minsk. Belarus.*

Received: 08.10.2019

Accepted: 10.12.2019

Published online: 30.07.2020

City Delivery Routes Planning Based on the Ant Colony Algorithm

M. Olkhova¹), D. Roslavtsev¹), O. Matviichuk²), A. Mykhalenko¹)

¹)O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine),

²)ANT-Logistics (Dnipro, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Abstract. For any company that sells its products in the networks of city stores, the urgent issue is the optimal delivery of their goods. During routing it is necessary to take into account many restrictions caused by specific conditions of transportation process in the city: number of cargoes, nature of cargoes, delivery time, structure of fleet and its presence, work time of enterprises for load matching, drivers' working hours, loading capacity, road congestion etc. These days, the process of efficient manual routing is difficult because of many restrictions and delivery points wherein it is almost impossible to take into account the road congestion for specific routes. Today's companies are increasingly interested in outsourcing. One of the options for routes planning for enterprises is to use special software products that allow to plan optimal routes according to the chosen criteria and under specific conditions. The process of formation of routes using the Ant Logistics service, based on the Ant Colony optimization algorithm are analysed in the paper. Comparing the two options of forming routes to serve one of the largest retail chains in Kharkiv with the application of Ant Logistics service, it has been elucidated that the application of Ant Colony algorithm is more optimal than the Clarke-Wright algorithm based on delivery routes indicators.

Keywords: freight, city logistics, route, Ant Colony algorithm, transportation costs

For citation: Olkhova M., Roslavtsev D., Matviichuk O., Mykhalenko A. (2020) City Delivery Routes Planning Based on the Ant Colony Algorithm. *Science and Technique*, 19 (4), 356–362. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-356-362>

Планирование маршрутизации по доставке товаров в городе на основе оптимизации муравьиного алгоритма

М. Ольхова¹), Д. Рославцев¹), А. Матвийчук²), А. Михаленко¹)

¹)Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова (Харьков, Украина),

²)АНТ-Логистик (Днепр, Украина)

Реферат. Для любой компании, которая реализует продукцию в сетях городских магазинов, актуальным вопросом является оптимальная доставка своих товаров. При маршрутизации необходимо учитывать множество факторов, связанных с конкретными условиями движения транспорта в городе: количество и характер грузов, сроки доставки, структуру парка и его наличие, согласование графика работы предприятия и пунктов погрузки-разгрузки, длительность рабочего времени, грузоподъемность, загруженность дорог и т. д. В настоящее время эффективная ручная маршрутизация затруднена из-за ряда ограничений и большого количества точек доставки, когда практически невозможно учесть загруженность дорог на конкретных маршрутах. Современные компании все больше заинтересованы в аутсорсинге. Одним из вариантов планирования маршрутов для предприятий является использование специальных программных продуктов, которые позволяют задавать оптимальные маршруты в соответствии с выбранными критериями и в конкретных условиях. В статье проанализирован процесс формирования маршрутов с использованием сервиса Ant Logistics на основе оптимизации муравьиного алгоритма. При сравнении двух вариантов формирования маршрутов для обслуживания одной из крупнейших розничных сетей в Харькове с помощью Ant Logistics установлено, что применение муравьиного алгоритма более оптимально, чем алгоритма Кларка-Райта, что основано на полуреченных показателях работы транспортных средств на маршрутах.

Ключевые слова: груз, городская логистика, маршрут, муравьиный алгоритм, транспортные расходы

Для цитирования: Планирование маршрутизации по доставке товаров в городе на основе оптимизации муравьиного алгоритма / М. Ольхова [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 356–362. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-356-362>

Адрес для переписки

Ольхова Мария
Харьковский национальный университет
городского хозяйства имени А. Н. Бекетова
ул. Маршала Бажанова, 17,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +380 63 261-56-27
olhovamv@gmail.com

Address for correspondence

Olkhova Mariia
O. M. Beketov National University
of Urban Economy in Kharkiv
17, Marshal Bazhanov str.,
61002, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +380 63 261-56-27
olhovamv@gmail.com

The transportation process organization is one of the significant and complex tasks of delivering finished products to the consumer. Manufacturing companies, transport operators need special software to optimize the delivery process. The importance of information technology for finding effective transport solutions is undeniable [1–4]. In developed countries, the using of software is the usual for organizing the delivery process. At the same time, this practice is not widespread in Ukraine today. Despite the growing interest in such software by businesses, their active use is appropriate to the large companies. First of all, this situation is related with the lack of awareness and complexity of providing cost-benefit analysis of the implementation of special software at the level of small and medium-sized enterprises. The influential factors are also the following:

- relatively low cost of salary, including the logistics manager;
- low margin of business income;
- the relatively high cost of using software products that requires an appropriate scale of business.

Organization of delivery in large cities with a large number of receivers, their differences in requirements to the service makes it impossible to provide delivery only by human resources. The organization efficiency of the transportation process is considered in the context of the effectiveness of the solutions offered by special software products, and more precisely the procedures and algorithms on the basis of which such solutions are offered.

Given this, it is relevant to analyze the capabilities of special programmes (procedures and algorithms that underlie their work) that allow to organize the transportation process of goods, determine their advantages and disadvantages from an economic and technological point of view.

The aim of the paper is to present the efficiency analysis of ant colony optimisation algorithm for planning delivery routes based on the using of specialized software products.

In the first stage, we have analyzed the possible algorithms used in planning of vehicle routes. Thus, it is possible to distinguish methods based on natural approaches. In the paper [2] is defined, that the natural systems that have developed for so long are one of the rich sources of inspiration for inventing new intelligent systems. Swarm intelli-

gence is one of the scientific fields that are closely related to natural swarms existing in nature, such as ant colonies, bee colonies, brain and rivers.

The ant colony optimisation algorithm refers to natural computing. Investigations in this field started in the middle of 1990s. The author of the idea was Marco Dorigo, who proposed to simulate the behavior of an Ant Colony [4]. A detailed analysis and relevance of the application of artificial intelligence technics on transportation is presented in the paper [3], in particular the application of hybrid Ant Colony algorithm to manage bus schedule. The use of the processors' parallel computing capability for routing with the Ant Colony algorithm was determined [5].

And one of the oldest approach for optimal routing planning is the Clarke-Wright algorithm. The CW was proposed by Clarke and Wright [6] who introduced the savings concept which is based on the computation of savings for combining two customers into the same route. This method is a widely known heuristic for solving the vehicle routing problem (VRP), and the applications of the Clarke-Wright have continued since it was proposed in 1964 [7].

Comparison of the efficiency of the software using such as Ant Logistics (Ukraine), Maxoptra (Russia), Logist Instrument (Russia), Begunok (Russia) is presented in [8], with cost-benefit analysis of their use.

Let's consider two options of the routes formation: the first is based on the use of Ant Colony algorithm, the second is using the Clarke-Wright method.

The process of forming the routes are considered in Kharkiv while delivering the products in ATB trading network. It is one of the largest retail chains in Ukraine. The ATB sales network is a discounter store offering a wide range of food and non-food product groups at optimum cost. It covers 22 regions in Ukraine, has two distribution centers, more than 1000 stores in 256 settlements, 55 of which are located in Kharkiv. Every day more than 3 million Ukrainians do the shopping at ATB stores. According to the results of 2018, the company's turnover is about to \$ 3.9 billion. For this company, the process of product delivery is one of crucial point. Delivery of goods is carried out by own transport of the company from the distribution centre to the shops, and also from a supplier to the

shops using supplier transport. In this paper the process of delivery of pre-packed cereals from the supplier's distribution center to the ATB network of stores are considered. The average volume of cargo is 11.5 tons per week. The supplier of cereals is LLC "Harprod", located in Kharkiv, 10, Kashtanova street.

Firstly, consider the first option – the ant algorithm. For this purpose, the online freight route service was used – Ant Logistics (Fig. 1).

The server is based on the ant colony optimization algorithm. The following factors can be taken into account when calculating delivery routes: load capacity, vehicle type, cargo type, weight, dimensions, temporary restrictions on cargo, category of roads, direction of movement, singing, speed limitation [9].

The efficiency criterion is the maximum transport loading given that the minimum routes

distance. Formation of the routes was performed in the Ant Logistics online service by the following sequence:

- 1) location information of the distribution center and its parameters;
- 2) the required number of vehicles and their parameters;
- 3) the necessary limits for calculation;
- 4) formed orders according to program requirements;
- 5) custom routes formed for selected vehicles;
- 6) calculating shipping costs for freight to retail shops.

Consider each stage more precisely. Initially, working with the tab page "Warehouse", data input of the distribution center and its address linked it to the map. It is possible to specify the contact person, warehouse operation mode, load time etc. (Fig. 2).

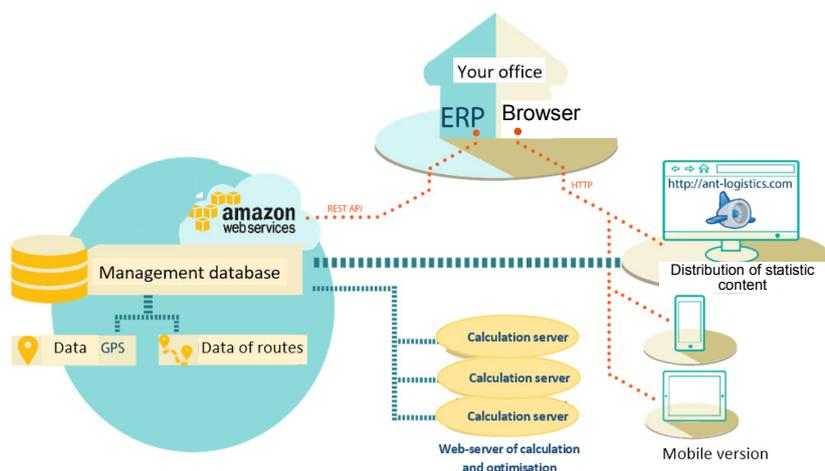


Fig. 1. Structure of Ant Logistics online service

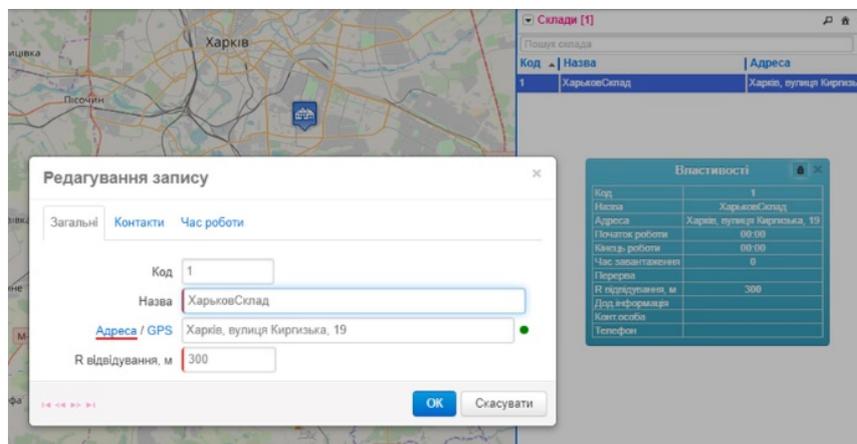


Fig. 2. Data of warehouse

Then worked with the tab page “Vehicle” and input the required number of vehicles. In the properties of each vehicle it is possible to specify the name, nominal and maximum load capacity in tons and meters cubic, average speed of movement, mode of operation of the vehicle, freight forwarder, additional restrictions (Fig. 3). Also, it is possible to specify tariffing at the cost calculation per 1 km or per 1 ton.

Next, in the settings indicated the time of unloading. Accounting cargo in 1 kg (weight) was selected in the tab “Accounting”. The importance of overloading the vehicle is very high.

The next step in the tab “Commodity Groups” is to set the loading/unloading time in the “General group” properties. Thus, the total delivery time of the vehicle at the retail point was calculated by the service according to the following formula:

$$T_{tot} = T_{adm} + \frac{Q_{ord}}{K_{load/unload}}, \quad (1)$$

where T_{adm} – administrative time spent of the vehicle at the retail point, min; Q_{ord} – order size, kg; $K_{load/unload}$ – loading/unloading velocity of vehicle at the retail point or distribution centre, kg/min.

Routes are formed on the basis of Ant Colony optimisation algorithm. The ant characteristics are the following [4]:

(i) Each ant has its own “memory,” which contains the list of the cities $J_{i,k}$ (the taboo list) that should be visited by the k^{th} ant, which is in the i^{th} town;

(ii) ants have their “vision” inversely proportional to the edge length

$$n_{ij} = \frac{1}{D_{ij}}. \quad (2)$$

The vision determines the “greediness” of the ant choice. The closer a graph node, the better its visibility and the higher the agent desire to reach it;

(iii) all ants can catch the pheromone trails, which stimulates the ant desire to pass a given edge. The pheromone density on the edge D_{ij} at the time t is $\tau_{ij}(t)$;

(iv) the probability that an ant chooses the path from the i^{th} node to the j^{th} node is given by the expression:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}(t)]^\beta}, & j \in J_{i,k}; \\ P_{ij,k}(t) = 0, & j \notin J_{i,k}, \end{cases} \quad (3)$$

where α, β – parameters specifying the weights of the pheromone trails and the heuristic coefficients.

The parameters α and β present the relative significance of two factors and their influence on the equation. They determine the ant greediness. At $\alpha = 0$, the ant aspires to choose the shortest edge; at $\beta = 0$, the ant aspires to choose the edge with maximum pheromone density. It is easy to notice that this expression describes a roulette wheel.

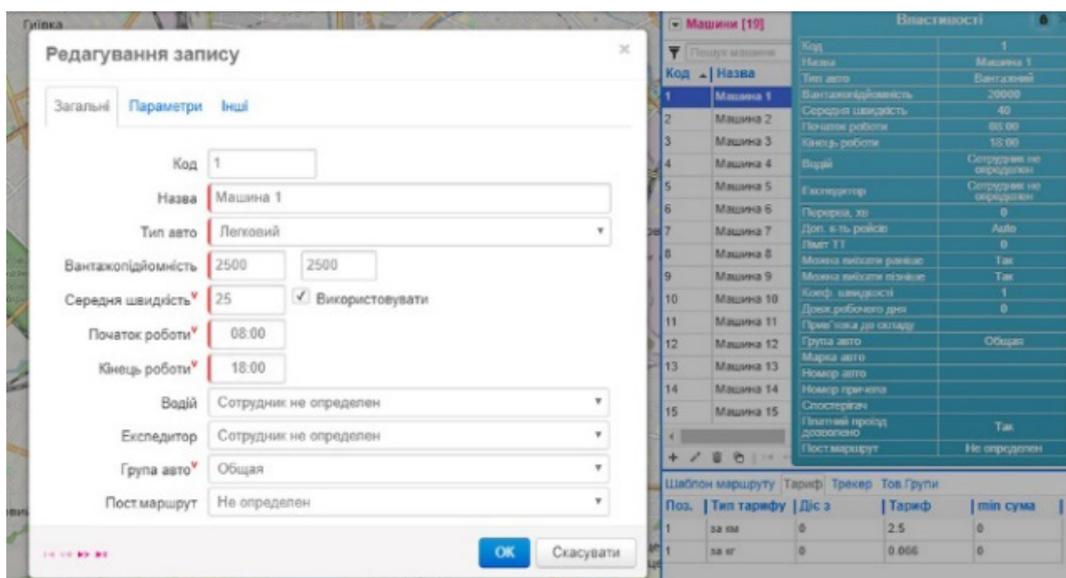


Fig. 3. Data of vehicles

The left panel of Fig. 1 shows a graph and the right panel presents the distribution of the probabilities of the passages from the first node to the others. Here, $\alpha = 1$, $\beta = 1$, and the edge thickness shows the pheromone density on the edge. As α increases, the probability of choosing the edges with a higher pheromone density increases. As β increases, the probability of choosing shorter edges increases and the probability of choosing longer edges decreases.

The probability of choosing the shortest path increases with time, because the pheromone density is inversely proportional to the path length and is specified as:

$$\Delta\tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & (i, j) \in T_k(t); \\ 0, & (i, j) \notin T_k(t), \end{cases} \quad (4)$$

where Q – parameter with the value of order of the optimal path length; $L_k(t)$ – length of the path $T_k(t)$.

Pheromone evaporation is described by the expression

$$\Delta\tau_{ij,k}(t+1) = (1-p)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \tau_{ij,k}(t), \quad (5)$$

where m – number of ants; p – evaporation coefficient ($0 \leq p \leq 1$).

In this case, the initial state of the Ant Colony is specified as follows: the number of agents is equal to the number of graph nodes and each agent has a node from which it starts the tour.

The list of receivers is formed in the Excel file, with the name, location, volume, mode of operation, contacts of the responsible person, etc. After the file is uploaded, the users are automatically linked to the service map using the Open Street Map database. The route is then calculated. Thus, routes were obtained with the parameters entered (Fig. 4.)

It is possible to analyze the performance of transport using interactive dashboard of the analytics: the cost of each vehicle, number of stops etc. (Fig. 5).

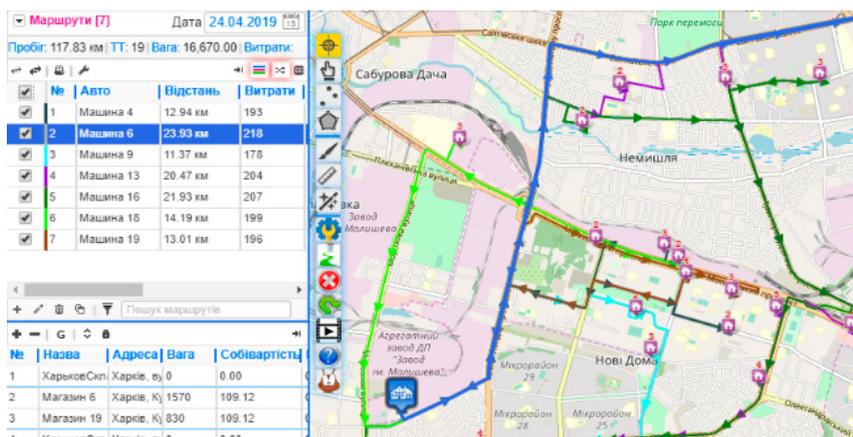


Fig. 4. Routes developed

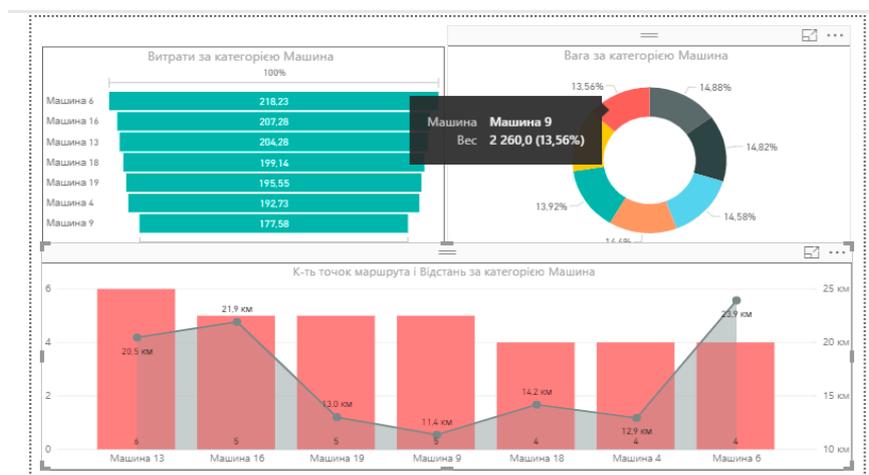


Fig. 5. Interactive dashboard of the analytics

Let's consider the second option of the route formation programme based on the using of the Clarke-Wright algorithm. The program name is VRP. The algorithm of the VRP program is shown in Fig. 6 [10].

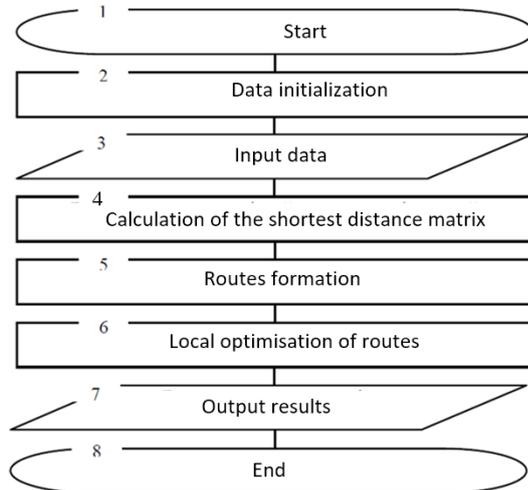


Fig. 6. Routing program algorithm of VRP program

The program takes into account the parameters of the transport network (delays at intersections, velocity, existing schemes of traffic organization), parameters of participants of logistic process (order size, their dislocation, number of orders, working hours), cargo parameters (size, dimensions, physical properties, transportation requirement), vehicle parameters (capacity, dimensions, performance).

In the list of indicators that allow to take into account the specifics of the delivery process both programs are just about identical.

According to the algorithm at the third stage data is input after the initialization. The program is written in Delphi language using the module Net.exe.

Using this VRP program, distribution routes were formed while servicing ATB's retail stores (Fig. 7).

In this case, it was also received 6 delivery routes, but the order of arrival to the shops is different compared to using the Ant Colony algorithm. Therefore, the performance of vehicles is different (Tab. 1).

Table 1

Comparison table of delivery routes indicators

Indicator	Algorithm	
	Ant Colony	Clarke-Wright
Capacity of vehicle, t	2	2
Number of routes	6	6
Routes length total, km	51.12	59.03
Size of cargo, t/week	11.5	11.5
Number of shops	55	55
Total distance, km	306.72	354.19
Delivery time, hour	25.23	28.62
Cargo turnover, t-km	589.27	662.51
Load factor average	0.96	0.93

Comparing the results, it can be concluded that with the use of the Ant algorithm, the total mileage is lower by 13.4 %, the service time less by 11.8 % and the turnover less by 11.0 %. Capacity factor is not significantly different. The obtained figures show that by applying the Ant algorithm it is possible to obtain more rational routes in comparison with the Clarke-Wright method.

Significant advantages of using the Ant Logistics server in the context of practical application is the use of Open Street Map maps, which allows you to get routes for real conditions of transportation. It is also possible to calculate the cost of delivering the cargo, with the cost per 1 ton or per 1 km of mileage for each vehicle or routes for a specific period separately.

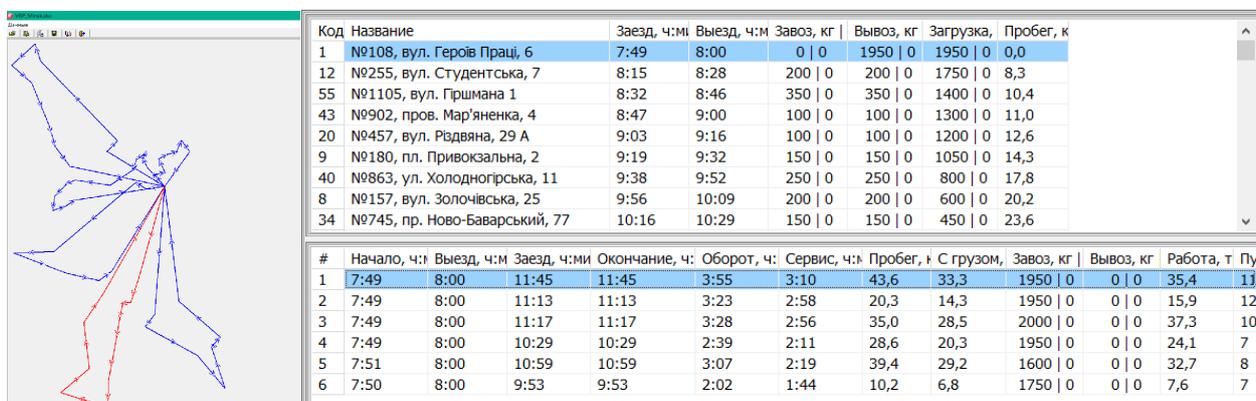


Fig. 7. VRP routing program

The disadvantages of the considered information resources can be attributed to the lack of ability to assess the environmental impact of the proposed solutions. At the same time, this situation is usual for commercial products focused on business.

CONCLUSIONS

1. The application of special software for the organization of delivery process within the city becomes a prerequisite for ensuring the technological and economic efficiency of the transportation process. Technological efficiency is conditioned by the using of the optimal algorithm and, as a rule, provides the best economic performance of the transportation process.

2. Comparing the two options of forming routes to serve one of the largest retail chains in Kharkiv with the application of special software, we elucidate that the application of Ant Colony algorithm is more optimal than the Clarke-Wright algorithm. In particular, the overall mileage is lower by 13.4 %, with more than 10.0 % advantage in terms of service time and turnover.

3. From a practical point of view, the main benefits of special software are the ability to plan, control and re-schedule delivery routes in real time, taking into account road and delivery conditions. The disadvantage can be considered the complexity of economic justification for the feasibility of using special software products, as well as the cost of such service.

REFERENCES

1. *Best Route Planning Software* (2019). Available at: <https://tech.co/fleet-management/best-route-planning-software>.
2. Hosseini H. (2009) The Intelligent Water Drops Algorithm: a Nature-Inspired Swarm-Based Optimization Algorithm. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 1 (1/2), 71. <https://doi.org/10.1504/ijbic.2009.022775>.
3. Abduljabbar R., Dia H., Liyanage S., Bagloee S. (2019) Applications of Artificial Intelligence in Transport: an Overview. *Sustainability*, 11 (1), 189. <https://doi.org/10.3390/su11010189>.
4. Kazharov A., Kureichik V. (2010) Ant Colony Optimization Algorithms for Solving Transportation Problems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 49 (1), 30–43. <https://doi.org/10.1134/s1064230710010053>.
5. Katona G., Lenart B., Juhasz J. (2019) Parallel Ant Colony Algorithm for Shortest Path Problem. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/ppci.12813>.
6. Clark G., Wright J. W. (1964) Scheduling of Vehicles from Central Depot to a Number Delivery Points. *Operations Research*, 12 (4), 568–581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>.
7. Pichpibul T., Kawtummachai R. (2013) A Heuristic Approach Based on Clarke-Wright Algorithm for Open Vehicle Routing Problem. *The Scientific World Journal*, 1 (11). <https://doi.org/10.1155/2013/874349>.
8. Giyasov N. (2019) Calculation of Delivery Routes – Compare Online Systems. *Logist.fm*. Available at: <https://logist.fm/publications/raschet-marshrutov-dostavki-sravnivaem-onlayn-sistemy> (in Russian).
9. *Ant Logistics* (2019) Available at: <https://ant-logistics.com/index.html>.
10. Kush E. I. (2017) Development of Algorithm of Formation of Freight Routes in Logistic System. *Visnik Skhidno-ukraïns'kogo Natsional'nogo Universitetu imeni Volodymyra Dala = Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 4 (234), 128–133 (in Russian).

Received: 08.10.2019

Accepted: 10.12.2019

Published online: 30.07.2020