

НАУКА и ТЕХНИКА



Science and Technique V. 16, No 3
(2017)

Международный
научно-технический журнал

International
Scientific and Technical Journal

Серия 1. Машиностроение
Серия 3. Электронные системы
Серия 6. Экономика промышленности

Series 1. Mechanical Engineering
Series 3. Electronic Systems
Series 6. Economy in Industry

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

Published from January 2002
Publication frequency – bimonthly

Учредитель
Белорусский национальный
технический университет

Founder
Belarusian National
Technical University

Журнал включен в базы данных:

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

The Journal is included in the following databases:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

- Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И.,
Оковитый В. В., Асташицкий В. М.**
Получение композиционного керамического
материала для газотермического напыления 181
- Киселев М. Г., Богдан П. С., Крышнев М. М.,
Семенович В. П.**
Влияние электроэрозионной обработки
изношенной поверхности рабочей части
стального зубного бора на восстановление
его режущей способности 189
- Vasilevich Yu. V., Dounar S. S.**
Finite Element Method Analysis
of Centreless-Lunette Turning of Heavy Shafts
(Василевич Ю. В., Довнар С. С.)
Анализ методом конечных элементов
бесцентрово-люнетного точения крупных валов) 196
- Ловейкин В. С., Почка К. И.**
Синтез кулачкового приводного механизма
роликовой формовочной установки
с комбинированным режимом движения
по ускорению третьего порядка 206
- Козерук А. С., Филонов И. П., Филонова М. И.,
Власовец Н. С., Мальпика Д. Л.**
Технологические особенности процесса
одновременной двусторонней обработки
высокоточных линз малой жесткости 215

CONTENTS

Mechanical Engineering

- Okovity V. A., Panteleenko F. I.,
Okovity V. V., Astashinsky V. M.**
Production of Composite Ceramic Material
for Thermal Spraying 181
- Kiselev M. G., Bohdan P. S., Kryshnev M. M.,
Semenkovich V. P.**
Influence of Electrical Discharge Machining
for Worn-Out Surface of Steel Dental Borer
Working Part on Restoration
of its Cutting Ability 189
- Vasilevich Yu. V., Dounar S. S.**
Finite Element Method Analysis
of Centreless-Lunette Turning of Heavy Shafts 196
- Loveykin V. S., Pochka K. I.**
Synthesis of Camshaft Driving Mechanism
in Roller Molding Installation
with Combined Motion Mode According
to Acceleration of Third Order 206
- Kozeruk A. S., Filonov I. P., Filonova M. I.,
Vlasovetz N. S., Malpika D. L.**
Technological Distinctive Features Pertaining
to Process of Simultaneous Two-Sided Machining
of High-Precision Lenses Having Low Stiffness . . . 215

Гершань Д. Г. Влияние состава топлива, содержащего бутанол, на показатели рабочего процесса дизеля	225
Жук А. Н., Качанов И. В., Филипчик А. В. Технология реверсивно-струйной очистки стальных листов от коррозии перед лазерной резкой	232
Миронова М. Н. Экспериментальная апробация интеллектуальной системы для управления точностью механической обработки	242
Девоино О. Г., Пантеленко А. Ф. Исследование износостойких покрытий из диффузионно легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой	249

Электронные системы

Лобатый А. А., Степанов В. Ю. Параметрическая идентификация стохастической системы неградиентным случайным поиском	256
--	-----

Экономика промышленности

Ци Ци, Алексеев Ю. Г., Дудко Н. А. Функционирование зоны развития новых и высоких технологий «Китайско-сингапурский индустриальный парк Сучжоу»	262
---	-----

Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv

Редакционная коллегия

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

Hershan D. G. Effect of Fuel Composition Containing Butanol on Working Process Parameters of Diesel Engine	225
Zguk A. N., Kachanov I. V., Filipchik A. V. Technology of Reverse-Blast Corrosion Cleaning of Steel Sheets Prior to Laser Cutting	232
Mironova M. N. Experimental Approbation of Intellectual System for Machining Accuracy Control	242
Devoino O. G., Panteleenko A. F. Investigation on Wear-Resistant Coatings from Diffusion-Alloyed Austenitic Steel Obtained by Plasma Spraying and Subsequent Laser Processing	249

Electronic Systems

Lobaty A. A., Stepanov V. Y. Parametric Identification of Stochastic System by Non-Gradient Random Searching	256
--	-----

Economy in Industry

Ji Qi, Aliakseyeu Yu. G., Dudko N. A. Operation of New and High-Tech Development Zone – “China-Singapore Suzhou Industrial Park”	262
--	-----

Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev

Editorial Board

<i>V. V. BABITSKY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>V. G. BASHTOVOI (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>A. V. BYELI (Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>V. P. BOYKOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>S. V. BOSAKOV (Republican Unitary Scientific-Research Enterprise for Construction “Institute BelNIIS”, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>Yu. V. VASILEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),</i>
<i>O. G. DEVOINO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),</i>

К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 П. И. ДЯЧЕК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 М. З. ЗГУРОВСКИЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
 Р. Б. ИВУТЬ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
 М. Г. КИСЕЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 Я. Н. КОВАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 В. В. КОЗЛОВСКИЙ (Минский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Минск, Республика Беларусь),
 В. М. КОНСТАНТИНОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 Н. В. КУЛЕШОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 С. Н. ЛЕОНОВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 С. А. МАСКЕВИЧ (Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь),
 Э. И. МИХНЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 НГУЕН ТХУ НГА (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
 М. ОПЕЛЯК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
 О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 P. I. DYACHEK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 M. Z. ZGUROVSKY (National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine),
 R. B. IVUT (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 A. S. KALINICHENKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
 M. G. KISELEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 Ya. N. KOVALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 V. V. KOZLOVSKIY (Minsk Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Minsk, Republic of Belarus),
 V. M. KONSTANTINOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 N. V. KULESHOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 S. N. LEONOVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 S. A. MASKEVICH (International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus),
 E. I. MIHNEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 NGUYEN THU NGA (Institute of Energy Science of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Republic of Vietnam),
 M. OPELYAK (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
 O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

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

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

Ответственный секретарь редакции

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

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

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

Executive Secretary of Editorial Staff

V. N. Guryanchyk

Address

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

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<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 25.05.2017. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2017

Получение композиционного керамического материала для газотермического напыления

Канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾,
асп. В. В. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Разработан композиционный керамический материал для газотермического напыления, позволяющий повысить износостойкость покрытия за счет введения в состав высокохромистой стали и молибдена, получить оптимальную пористость в исходной шихте при синтезе композиций $\text{FeCrMo-MoS}_2/\text{CaF}_2/\text{C-TiC}$, улучшить технологические параметры порошков и тем самым повысить коэффициент использования порошка при напылении, удешевить технологию нанесения износостойких покрытий. Приведены характеристики и параметры разработанного материала и покрытия на его основе. Методика основана на комплексных металлографических, рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследованиях структурных элементов композиционных плазменных покрытий. Главными составляющими композиционных частиц являются твердые растворы на основе железа, карбиды титана, включения твердой смазки в виде дисульфида молибдена, фтористого кальция, углерода. Наличие таких частиц порошков создает предпосылки получения из них износостойких покрытий, которые эффективны при молекулярно-механическом и абразивном изнашивании в неблагоприятных условиях трения (граничная смазка или отсутствие смазочного материала, повышенные температурные воздействия). Рассматриваемые порошки характеризуются сложной геометрической формой и развитым поверхностным рельефом частиц. Наблюдается стабильное распределение твердой карбидной фазы в объемах напыленных материалов и отсутствуют поверхностные зоны с дефицитом включений TiC, что положительно влияет на работоспособность исследуемых износостойких покрытий. Плазменные покрытия, напыленные из порошков $\text{FeCrMo-MoS}_2\text{-TiC}$ по технологии, разработанной авторами, имеют лучшую износостойкость при сухом трении по стали 45 (износ покрытия меньше в 1,2 раза, нагрузка задира больше в 1,2 раза), чем покрытие, полученное из порошка $\text{Ni80Cr20 - 12 \% MoS}_2 - 50 \% \text{TiC}$. При этом прочность сцепления покрытий возрастает в 1,23 раза, а стоимость порошка уменьшается в 1,5 раза. Таким образом, плазменные износостойкие покрытия из композиционных порошков $\text{FeCrMo-MoS}_2/\text{CaF}_2/\text{C-TiC}$ перспективны для восстановления и упрочнения стальных деталей, эксплуатирующихся при неблагоприятных условиях трения.

Ключевые слова: плазменные керамические покрытия, твердые растворы, карбид титана, включения твердой смазки, эксплуатационные характеристики, прочность сцепления, пористость, износостойкость

Для цитирования: Получение композиционного керамического материала для газотермического напыления / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 181–188. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-181-188

Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

Address for correspondence

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

Production of Composite Ceramic Material for Thermal Spraying

V. A. Okovity¹, F. I. Panteleenko¹, V. V. Okovity¹, V. M. Astashinsky²

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

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A composite ceramic material has been developed for thermal spraying that permits to increase wear resistance due to introduction of high-chromium steel and molybdenum in its structure, to obtain optimum porosity in the starting charge material while synthesizing FeCrMo–MoS₂/CaF₂/C–TiC compositions, to improve technological parameters of powders and thereby increase coefficient of powder usage in spraying, to reduce cost of wear-resistant coating technology. The paper presents characteristics and parameters of the developed material and coating which is based on it. Methodology is based on complex metallographical, X-ray diffraction and electron microscopy investigations of structural elements of composite plasma coatings. Main components of composite particles are solid solutions based on iron, titanium carbides, solid lubricant inclusions in the form of molybdenum disulfide, calcium fluoride, carbon. Presence of such powder particles predetermines obtaining wear-resistant coatings which are rather efficient in case of molecular and mechanical and abrasive wear-out under disadvantageous friction conditions (boundary lubrication or absence of lubrication material, elevated temperature actions). The contemplated powders are characterized by complex geometric shape and developed surface relief of particles. There has been observed a stable distribution of hard carbide phase in volumes of deposited materials and absence of superficial zone with deficit of TiC inclusions that positively influence on working capacity of the investigated wear-resistant coatings. Plasma coatings which have been deposited with the help of FeCrMo–MoS₂–TiC powders in accordance with the technology developed by authors have better wear resistance in case of dry friction in a steel 45 (coating wear-out is less by 1.2-fold; scoring load is higher by 1.2-fold) than a coating which has been obtained with the help of Ni80Cr20 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC powder. In such a case coating adhesive strength is increased by 1.23-fold and powder cost lower is decreased by 1.5-fold. Thus plasma wear-resistant coatings obtained while using FeCrMo–MoS₂/CaF₂/C–TiC composite powders are considered as prospective for restoration and hardening of steel parts which are operating under disadvantageous friction conditions.

Keywords: plasma ceramic coatings, solid solutions, titanium carbide, solid lubricant inclusions, operational characteristics, adhesive strength, porosity, wear resistance

For citation: Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. (2017) Production of Composite Ceramic Material for Thermal Spraying. *Science and Technique*. 16 (3), 181–188. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-181-188 (in Russian)

Введение

Наряду с неоспоримыми преимуществами карбидной керамики с включениями твердой смазки в металлической матрице на никелевой основе ей присущ ряд серьезных недостатков, значительно снижающих эффективность данной технологии [1–3]:

- высокая стоимость, обусловленная применением дорогостоящего металла основы – никеля. Значительный комплекс защитных свойств покрытий зачастую избыточен. Их использование оправдано только для условий одновременного воздействия изнашивания, агрессивных сред и высоких температур. Когда определяющим ресурс детали является только изнашивание, порошки карбидной керамики с включениями твердой смазки в металлической матрице на никелевой основе надо заменять на более дешевые, в том числе порошки карбидной керамики с включениями твердой смазки в металлической матрице на основе железа [4–8];

- низкая трещиностойкость при нанесении порошков карбидной керамики с включениями

твердой смазки в металлической матрице на никелевой основе на стальные детали обусловлена высоким коэффициентом линейного расширения при нагреве – $(14,4–16,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;

- высокая чувствительность к технологическим режимам напыления покрытия. Требуемый комплекс свойств покрытия наличествует только при сохранении однородной мелкодисперсной структуры исходного порошка. Даже незначительный перегрев резко снижает качество покрытия;

- трудоемкость последующей механической обработки порошков карбидной керамики с включениями твердой смазки в металлической матрице на никелевой основе;

- высокий коэффициент трения в условиях сухого трения скольжения; покрытия склонны к схватыванию и задирам.

Таким образом, хрупкость, трещиностойкость, износостойкость, обрабатываемость, экономические факторы часто ограничивают применение порошков карбидной керамики с включениями твердой смазки в металлической матрице на никелевой основе.

Разработки авторов статьи дают возможность повысить износостойкость покрытия за счет введения в материал высокохромистой стали и молибдена, получить оптимальную пористость в исходной шихте при синтезе композиций FeCrMo–MoS₂/CaF₂/C–TiC, улучшить технологические параметры порошков и тем самым повысить коэффициент их использования при напылении, удешевить технологию нанесения износостойких покрытий. Добавка Mo в связующее FeCr способствует улучшению смачивания расплавом связующего карбидов титана при СВС-процессе (самораспространяющийся высокотемпературный синтез – СВС) получения композиционного порошка.

Технология формирования композиционного керамического материала

Для проверки возможности получения СВС-порошков с компонентами твердой смазки в металлической матрице на основе железа осуществлен синтез композиций, содержащих Mo и Fe (рис. 1). Проведены исследования порошков следующего состава: FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC; FeCr30Mo3 – 12 % CaF₂ – 50 % TiC; FeCr30Mo3 – 12 % C – 50 % TiC. Для получения указанных композиций использовали дисперсные материалы: титан, высокохромистую сталь, молибден, хром, технический углерод, дисульфид молибдена MoS₂, фтористый кальций CaF₂.

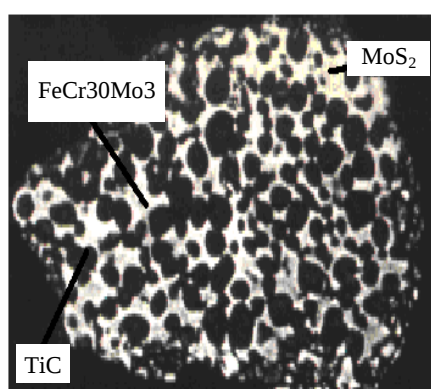


Рис. 1. Микроструктура композиционного порошка FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

Fig. 1. Micro-structure of composite powder FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC, obtained while using method of self-propagating high-temperature synthesis

Синтез композиций осуществлялся в реакторе в атмосфере аргона (при давлении 1 бар) при комнатной температуре в режиме самораспространения без подвода энергии от внешнего источника. Взаимодействие компонентов инициировали вольфрамовой спиралью. С целью обеспечения стабильности протекания процесса синтеза содержание компонента матрицы составляло не менее 40 вес. %. Смешивание исходных компонентов происходило в шаровой мельнице, измельчение продуктов синтеза – в щековой дробилке. Экспериментальный реактор оснащен токоподводами с вольфрамовой спиралью для инициирования процесса. Анализ размеров частиц, формы и рельефа поверхности синтезированных композиционных порошков осуществляли с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Препарирование порошков для исследований в СЭМ проводили двумя способами: свободной насыпкой на предметное стекло и диспергированием в ультразвуке с последующим нанесением порошка на предметное стекло. Изучение структуры частиц композиционных порошков выполняли путем металлофизического анализа шлифов их поперечного сечения. Для этого использовали микроскопы Unimet (Япония) и MeF-3 (Австрия).

Согласно данным металлографического анализа, основными составляющими композиционных частиц являются твердые растворы на основе железа, карбиды титана, включения твердой смазки в виде дисульфида молибдена, фтористого кальция, углерода. Наличие упомянутых составляющих частиц порошков создает предпосылки получения из них износостойких покрытий, которые эффективны при молекулярно-механическом и абразивном изнашивании в неблагоприятных условиях трения (граничная смазка или отсутствие смазочного материала, повышенные температурные воздействия). Рассматриваемые порошки характеризуются сложной геометрической формой и развитым поверхностным рельефом частиц. Размеры частиц при свободной насыпке и диспергировании ультразвуком соответственно находятся в пределах: композиция FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC – 15–220 мкм, 0–40 мкм; FeCr30Mo3 – 12 % CaF₂ – 50 % TiC – 15–240 мкм, 0–50 мкм; FeCr30Mo3 – 12 % C – 50 % TiC – 10–230 мкм, 0–40 мкм.

Заметное отличие размеров композиционных частиц при свободной насыпке и диспергировании ультразвуком свидетельствует о склонности порошков к образованию комков. Это связано с гигроскопичностью порошков, их сложной формой и рельефом. Склонность к образованию комков снижает «текучесть» порошковых материалов и их технологичность при газотермическом напылении покрытий. Поэтому для улучшения технологических параметров порошков была осуществлена их сфероидизация посредством введения частиц порошка в плазменный факел распылителя мощностью 20–30 кВт и распылением в среде аргона, последующим плакированием. Экспериментальные зависимости скорости перемещения фронта горения от пористости исходной шихты для СВС-процесса показаны на рис. 2 (влияние пористости исходной шихты для СВС-процесса на скорость перемещения фронта горения).

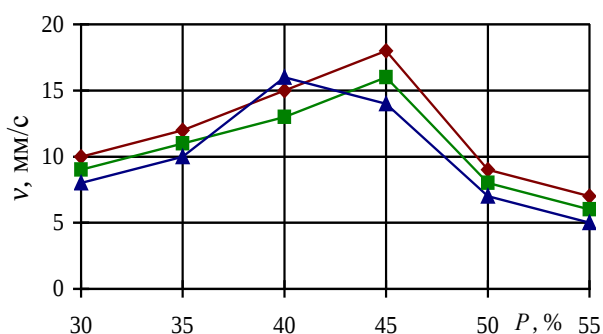


Рис. 2. Экспериментальные зависимости скорости перемещения фронта горения от пористости исходной шихты при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе:

- ♦— FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC;
- FeCr30Mo3 – 12 % CaF₂ – 50 % TiC;
- ▲— FeCr30Mo3 – 12 % C – 50 % TiC

Fig. 2. Experimental dependences of velocity for combustion front propagation on porosity of initial furnace charge with self-propagating high-temperature synthesis:

- ♦— FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC;
- FeCr30Mo3 – 12 % CaF₂ – 50 % TiC;
- ▲— FeCr30Mo3 – 12 % C – 50 % TiC

Как видно из рис. 2, при высокой пористости исходной шихты не достигается тесного контакта между ее частицами. В результате уменьшаются температуропроводность, удельное тепловыделение и глубина реагирования, замедляется перемещение фронта горения. Заметное увеличение указанных параметров и

улучшение конечных продуктов синтеза имеют место при уменьшении значений пористости шихты до 40–45 %. Дальнейшее снижение пористости вызывает уменьшение скорости перемещения фронта горения.

С учетом вышеизложенного зависимость скорости, температуры горения и глубины превращений от пористости шихты имеет экстремальный характер с максимумом при $P = 40\text{--}45\%$. Указанная пористость исходной шихты является оптимальной при синтезе композиций FeCrMo–MoS₂/CaF₂/C. Для сфероидизации частицы полученного композиционного порошка вводили в плазменную струю и производили их распыление в стальной цилиндр длиной 1 м, заполненный аргоном. Степень сфероидизации определяли по форм-фактору частиц (степень несферичности, значение «1» соответствует сфере) методом оптической металлографии. Морфология частиц до и после сфероидизации показана на рис. 3, 4.

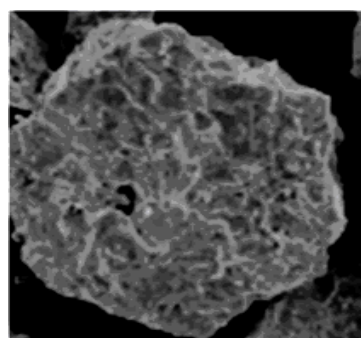


Рис. 3. Морфология частиц FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC до сфероидизации

Fig. 3. Morphology of particles FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC up to spheroidizing

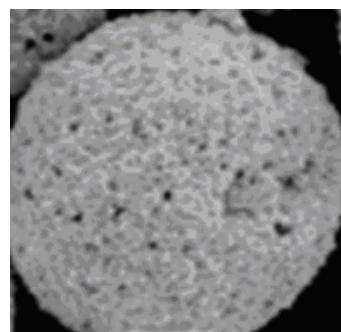


Рис. 4. Морфология частиц FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC после сфероидизации

Fig. 4. Morphology of particles FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC after spheroidizing

Мощность плазменной струи изменяли от 20 до 30 кВт. При мощности плазменной струи менее 20 кВт более 60 % частиц имели форм-фактор меньше 0,7, при мощности плазменной струи 30 кВт более 90 % частиц имели форм-фактор 0,9–1,0. Для мощности плазменной струи более 30 кВт повышение величины форм-фактора частиц незначительно.

Проводили плазменное напыление износостойких покрытий из порошков Ni80Cr20 – 12MoS₂ – 50 % TiC [9]; FeCr30Mo3 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC; FeCr30Mo3 – 12 % CaF₂ – 50 % TiC; FeCr30Mo3 – 12 % C – 50 % TiC на образцы из стали 45 [10]. Покрытия наносили на установке плазменного напыления на воздухе APS фирмы «Плазма-Техник АГ» в режимах, приведенных в табл. 1. Пористость покрытий определяли металлографическим методом на поперечных шлифах покрытий. Количественные оценки параметров находили как усредненные по пяти измерениям. Прочность сцепления определяли на отрывной машине Instron. Испытания на трение и износ проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме: колодочки с покрытием – азотированная сталь (сталь 45). Триботехнические испытания выполняли в условиях трения в отсутствии смазочного материала при нагрузке в паре трения 5 МПа в течение 10 ч.

Микроструктура плазменных покрытий из порошков FeCrMo–MoS₂ – 50 % TiC, полученных методом СВС с избыточной карбидной фазой и включениями твердой смазки в железной матрице, приведена на рис. 5, где заметна равномерность распределения включений твердой смазки в покрытии. Это создает предпосылки эффекта самосмазывания поверхностей трения в паре с износостойким покрытием, нане-

сенным на одну из деталей трибосопряжения. Касаясь структуры анализируемого покрытия в целом, необходимо отметить, что наряду с включениями твердой смазки она сформирована из карбидов титана (TiC), связующим элементом является твердый раствор на основе железа. Добавка Мо в связующее FeCr способствует улучшению смачивания расплавом связующего карбидов титана при СВС-процессе получения композиционного порошка. В результате связи и когезионная прочность частиц порошка и покрытия из него возрастают. С учетом механизма изнашивания трибосопряжений можно утверждать, что такая структура способствует снижению интенсивности изнашивания покрытия при микроконтактном схватывании поверхностей трения и абразивном воздействии на них.

Структура покрытия из композиционного порошка FeCrMo – 12 % CaF₂ – 50 % TiC показана на рис. 6. Как видно из рисунка, включения твердой смазки CaF₂ распределены по всему объему частиц порошка. В отличие от MoS₂, включения CaF₂ крупнее и структура частиц порошка более дискретная. При распылении композиционного материала, содержащего фторид кальция, формируется покрытие с теми же характеристиками износостойкости, что и в случае нанесения композиции FeCrMo – 12 % MoS₂ – 50 % TiC. Мелкодисперсные карбиды титана способствуют увеличению твердости напыленного материала, уменьшаются степень пластической деформации и площадь фактического контакта поверхности трения покрытия, снижаются вероятность микроконтактного схватывания и интенсивность молекулярно-механического изнашивания трибосопряжения.

Таблица 1

Режимы плазменного напыления износостойких покрытий
Modes of plasma spraying of wear-resistant coatings

Распыляемый материал	Режим напыления				
	Ток дуги плазматрона, А	Напряжение дуги, В	Дистанция напыления, мм	Расход	
				плазмообразующего газа – водорода, л/мин	распыляемого порошка, кг/ч
Ni80Cr20 – 12,5 % MoS ₂ – 50 % TiC	400	75	100	8	3,0
FeCr30Mo3 – 12 % MoS ₂ – 50 % TiC	400	75	100	8	3,0
FeCr30Mo3 – 12 % CaF ₂ – 50 % TiC	450	75	110	9	3,5
FeCr30Mo3 – 12 % C – 50 % TiC	450	75	110	9	3,5

Примечание. Расход плазмообразующего газа – аргона 50 л/мин.

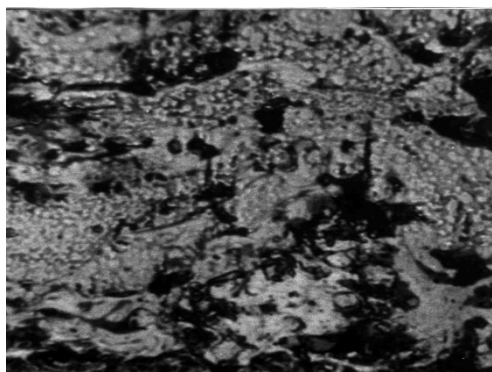


Рис. 5. Микроструктура плазменных покрытий из порошков FeCrMo – MoS₂ – 50 % TiC, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

Fig. 5. Micro-structure of plasma coatings from powders из порошков FeCrMo – MoS₂ – 50 % TiC, obtained while using method of self-propagating high-temperature synthesis

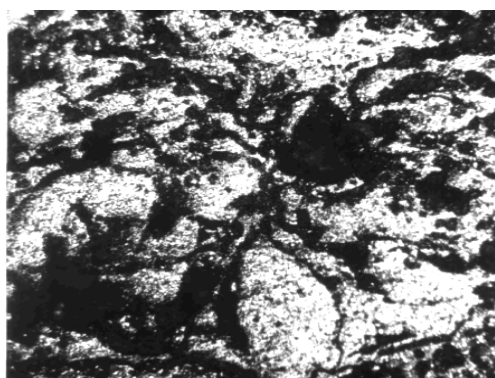


Рис. 6. Структура покрытия из композиционного порошка FeCrMo – 12 % CaF₂ – 50 % TiC

Fig. 6. Structure of coating made of composite powder FeCrMo – 12 % CaF₂ – 50 % TiC

Для количественной оценки равномерности распределения карбидной фазы, от которой также зависит работоспособность износостойких покрытий, металлографический анализ образцов дополняли замерах микротвердости напыленных материалов. Результаты замеров представлены в табл. 2. Анализируя данные таблицы, необходимо отметить, что имеют место достаточно стабильные пределы изменения микротвердости в поясах замеров по длине поперечных сечений напыленных материалов. При этом верхним пределам соответствуют рабочие поверхностные зоны покрытий.

Таким образом, наблюдается стабильное распределение твердой карбидной фазы в объемах напыленных материалов и отсутствуют поверхностные зоны с дефицитом включений TiC, что положительно влияет на работоспособность исследуемых износостойких покрытий. Сравнительные характеристики свойств износостойких покрытий, полученные по применяемым покрытиям [9] и разработанному авторами покрытию [10], приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, плазменные покрытия, напыленные из порошков FeCrMo–MoS₂–TiC по технологии, разработанной авторами, имеют лучшую износостойкость при сухом трении по стали 45 (износ покрытия меньше в 1,2 раза, нагрузка задира больше в 1,2 раза), чем покрытие, полученное из порошка Ni80Cr20 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC. При этом прочность сцепления покрытий увеличивается в 1,23 раза, а стоимость порошка уменьшается в 1,5 раза.

Таблица 2

Микротвердость напыленных покрытий
Micro-hardness of sprayed coatings

Покрытие	Микротвердость, МПа				
	Пояс замеров по длине поперечного сечения покрытия				
	1	2	3	4	5
Ni80Cr20 – 12 % MoS ₂ – 50 % TiC (прототип)	5264–7282	4144–6649	5202–7065	4342–7662	5827–6919
FeCr30Mo3 – 12 % MoS ₂ – 50 % TiC	5196–7641	4878–6851	5462–7765	6911–8045	6253–7547
FeCr30Mo3 – 12 % C – 50 % TiC	5047–8144	5394–8576	4911–8221	5281–8537	5179–8406
FeCr30Mo3 – 12 % CaF ₂ – 50 % TiC	4466–7137	4773–7522	4346–7236	4669–7514	4135–7386

Таблица 3

Сравнительные характеристики свойств покрытий

Comparative property characteristics of coatings

Способ получения материала	Стоимость 1 кг, дол. США	Прочность сцепления, МПа	Пористость, %	Сухое трение по стали 45	
				Износ покрытия, мкм	Нагрузка задира, кг
Ni80Cr20 – 12 % MoS ₂ – 50 % TiC	240	35,2	8,2–11,4	7,2	6,6
FeCr30Mo3 – 12 % MoS ₂ – 50 % TiC	160	43,4	7,5–11,7	6,0	7,9

ВЫВОДЫ

1. Разработанный композиционный керамический материал позволяет повысить износостойкость покрытия за счет введения в состав материала высокохромистой стали и молибдена, получить оптимальную пористость в исходной шихте при синтезе композиций FeCrMo–MoS₂/CaF₂/C–TiC, улучшить технологические параметры порошков и тем самым повысить коэффициент использования порошка при напылении, удешевить технологию нанесения износостойких покрытий. Добавка Mo в связующее FeCr способствует улучшению смачивания расплавом связующего карбидов титана при СВС-процессе получения композиционного порошка.

2. Основными составляющими композиционных частиц являются твердые растворы на основе железа, карбиды титана, включения твердой смазки в виде дисульфида молибдена, фтористого кальция, углерода. Наличие упомянутых составляющих частиц порошков создает предпосылки получения из них износостойких покрытий, которые эффективны при молекулярно-механическом и абразивном изнашивании в неблагоприятных условиях трения (граничная смазка или отсутствие смазочного материала, повышенные температурные воздействия). Рассматриваемые порошки характеризуются сложной геометрической формой и развитым поверхностным рельефом частиц.

3. Наблюдается стабильное распределение твердой карбидной фазы в объемах напыленных материалов и отсутствуют поверхностные зоны с дефицитом включений TiC, что положительно влияет на работоспособность исследуемых износостойких покрытий. Плазменные покрытия, напыленные из порошков FeCrMo–

MoS₂–TiC по технологии, разработанной авторами, имеют лучшую износостойкость при сухом трении по стали 45 (износ покрытия меньше в 1,2 раза, нагрузка задира больше в 1,2 раза), чем покрытие, полученное из порошка Ni80Cr20 – 12 % MoS₂ – 50 % TiC. При этом прочность сцепления покрытий увеличивается в 1,23 раза, а стоимость порошка уменьшается в 1,5 раза. Таким образом, плазменные износостойкие покрытия из композиционных порошков FeCrMo–MoS₂/CaF₂/C–TiC перспективны для восстановления и упрочнения стальных деталей, эксплуатирующихся при неблагоприятных условиях трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильюшенко, А. Ф. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов / А. Ф. Ильюшенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. Минск: Беспринт, 2005. 253 с.
2. Витязь, П. А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильюшенко, А. И. Шевцов. Минск: Белорус. наука, 2006. 435 с.
3. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В. А. Оковитый [и др.] // Порошковая металлургия. Минск: Бел. наука, 2008. Вып. 31. С. 156–162.
4. Разработка композиционного материала на основе многофункциональной керамики для плазменного напыления / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 2. С. 43–47.
5. Оковитый, В. А. Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки / В. А. Оковитый // Сварочное производство. 2002. № 6. С. 41–43.
6. Триботехнические испытания образцов аморфизированных плазменных композиционных покрытий с включением твердой смазки / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник Брестского гос. техн. ун-та. Машиностроение. 2008. Вып. 4. С. 2–6.
7. Керамический материал системы оксид титана – оксид алюминия – твердая смазка / В. А. Оковитый [и др.] // Вестник Белор. нац. техн. ун-та. 2011. 2011. № 1. С. 16–20.

8. Способ получения тугоплавких соединений на основе карбида титана и устройство для его осуществления: пат. 1834845 СССР: С 01В 31/30 / В. А. Дрозденко, В. И. Ратников, В. К. Прокудина, В. И. Дрозденко, В. А. Петренко, Л. А. Бутенко, В. М. Прозоров; дата публ.: 15.08.1993.
9. Способ получения порошкового материала: пат. № 2066295 Рос. Федерации: С 01В 31/30 / А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская, В. М. Шкиро, Н. С. Махонин, Б. Н. Штатов; дата публ.: 10.09.1996.
10. Способ получения композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий: пат. 12435 Респ. Беларусь: МПК С 04В 35/56 / В. А. Оковитый, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов, С. Б. Соболевский; дата публ. 30.10.2009.
11. Оковитый, В. А. Оптимизация процесса напыления износостойких покрытий на основе многофункциональной керамики / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко // Процессы обработки металлов. 2015. № 2 (67). С. 46–54.

Поступила 17.10.2016

Подписана в печать 28.12.2016

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Ilyushchenko A. F., Okovity V. A., Shevcov A. I. (2005) *Formation of Plasma Wear-Resistant Coatings Based on Composite Self-Lubricating Materials*. Minsk, Besprint Publ. 253 (in Russian).
2. Vityaz P. A., Ilyushchenko A. F., Shevcov A. I. (2006) *Fundamentals for Deposition of Wear-Resistant, Corrosion-Resistant and Heat-Protective Coatings*. Minsk, Belarusskaya Nauka Publ. 435 (in Russian).
3. Okovity V. A., Shevcov A. I., Panteleenko F. I., Ilyushchenko T. A., Okovity V. V. (2008) Obtaining of Composite Ceramic Material for Application of Wear-Resistant Coatings. *Poroshkovaya Metallurgiya* [Powder Metallurgy]. Minsk, Belarusskaya Nauka Publ. (31), 156–162 (in Russian).
4. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinski V. M., Okovity V. V. (2015) Development of Composite Materials on the basis of Multi-Functional Ceramics for Plasma Spraying. *Uprochnjajushhie Tehnologii i Pokrytija* [Strengthening Technologies and Coatings], (2), 43–47 (in Russian).
5. Okovity V. A. (2002) Plasma Wear-Resistant Coatings with Inclusion of Solid Lubricant. *Svarochnoye Proizvodstvo* [Welding Engineering], (6), 41–43 (in Russian).
6. Okovity V. A., Shevcov A. I., Ilyushchenko A. F., Devoino O. G., Panteleenko F. I., Okovity V. V. (2008) Tribotechnical Tests of Samples of Amorphized Plasma Composite Coatings with Inclusion of Solid Lubricant. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Mashinostroyenie* [Bulletin of Brest State Technical University. Mechanical Engineering], (4), 2–6 (in Russian).
7. Okovity V. A., Devoino O. G., Panteleenko F. I., Okovity V. V. (2011) Ceramic Material of Titanium-Oxide-Aluminium-Oxide-Solid Lubricant System. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (1), 16–20 (in Russian).
8. Drozdenko V. A., Ratnikov V. I., Prokudina V. K., Drozdenko V. I., Petrenko V. A., Butenko L. A., Prozorov V. M. (1993) *Method for Producing Refractory Compounds Based on Titanium Carbide and a Device for its Implementation*. Patent USSR No 1834845 (in Russian).
9. Merzhanov A. G., Borovinskaya I. P., Shkiro V. M., Mahonin N. S., Shatalov B. N. (1996) *Method for Obtaining of Powder*. Patent of Russian Federation No 2066295 (in Russian).
10. Okovity V. A., Ilyushchenko A. F., Shevtsov A. I., Sobolevsky S. B. (2009) *Method for Obtaining of Composite Ceramic Material Used for Deposition of Wear-Resistant Coatings*. Patent Republic of Belarus No 12435 (in Russian).
11. Okovity V. A., Panteleenko F. I. (2015) Optimization of Spraying Process for Wear-Resistant Coatings on the Basis of Multi-Functional Ceramics. *Protsessy Obrabotki Metallov* [Metalworking Processes], 67 (2), 46–54 (in Russian).

Received: 17.10.2016

Accepted: 28.12.2016

Published online: 30.05.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-189-195

УДК 621.9.048

Влияние электроэрозионной обработки изношенной поверхности рабочей части стального зубного бора на восстановление его режущей способности

Докт. техн. наук, проф. М. Г. Киселев¹⁾, асп. П. С. Богдан¹⁾, магистрант М. М. Крышнев¹⁾, студ. В. П. Семенкович¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Дана экспериментальная оценка эффективности применения электроэрозионной обработки (модифицирования) изношенной цилиндрической рабочей поверхности стального бора с целью восстановления ее режущей способности. Приведены сведения о стальных зубных борах, включая их конструкции и основные этапы изготовления. Отмечено, что для таких боров максимальный ресурс машинного времени составляет порядка девяти минут, после чего изношенные боры далее не используются, а утилизируются. На основании анализа предшествующих исследований, касающихся применения электроэрозионного модифицирования поверхности проволочного, ленточного и дискового инструментов, обоснована перспективность восстановления режущей способности изношенной рабочей поверхности стального бора путем ее электроэрозионной обработки с целью его дальнейшего использования в стоматологической практике и производстве зуботехнических изделий. Приведены сведения о методике экспериментальных исследований, включая описание устройства для электроэрозионного модифицирования изношенной рабочей поверхности бора, а также устройства определения его режущей способности по интенсивности резания им образца из текстолита. Экспериментально установлено, что в результате электроэрозионного модифицирования изношенной рабочей поверхности бора на ней формируются лунки, имеющие по краям наплывы металла, выходящие за исходный контур поверхности, высота которых увеличивается с повышением в процессе модифицирования напряжения на накопительном конденсаторе, что приводит к увеличению диаметра обработанной поверхности бора. Наплывы металла оправдано рассматривать как своеобразные режущие элементы (зубы) на модифицированной поверхности бора, придающие его изношенной поверхности режущую способность. Установлено, что электроэрозионное модифицирование изношенной поверхности бора позволяет восстановить ее режущую способность по отношению к первоначальной при напряжении 75 В на 33,3 %, а при 120 В – на 43,0 %. Это свидетельствует о достаточно высокой эффективности предлагаемого способа восстановления режущей способности изношенной поверхности стальных зубных боров.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, режущая способность, восстановление, зубной бор, износ, режущие элементы, текстолит, микрорельеф, наплывы

Для цитирования: Влияние электроэрозионной обработки изношенной поверхности рабочей части стального зубного бора на восстановление его режущей способности / М. Г. Киселев [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 189–195. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-189-195

Influence of Electrical Discharge Machining for Worn-Out Surface of Steel Dental Borer Working Part on Restoration of its Cutting Ability

М. Г. Kiselev¹⁾, P. S. Bohdan¹⁾, M. M. Kryshnev¹⁾, V. P. Semenkovich¹⁾

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

Abstract. The paper presents an experimental evaluation of the efficiency for application of electrical discharge machining (EDM) (modification) for worn-out cylindrical working surface of steel boron in order to restore its cutting ability. Basic data on steel

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

dental borers including their designs and main manufacturing stages are given in the paper. It has been noted that maximum resource of machining-cycle time for such borers is about 9 minutes and after that they are sent for recycling. In accordance with the analysis of previous investigations on application of EDM surface modification for wire, band and disk tools prospects for cutting ability restoration of the worn-out steel borer working surface has been substantiated in the paper. The restoration has been carried out with help of electrical discharge machining in order to ensure its further application in dental practice treatment and while manufacturing dental products. The paper provides basic information on methodology for experimental investigations including description of a device for electrical discharge modification of worn-out borer working surface and a device for determination of its cutting ability through cutting intensity of fabric-based laminate specimen. It has been established experimentally that the electrical discharge modification of worn-out borer working surface results in dimple formation on its surface which have metal flows along the edges. The flows override an initial surface contour and dimple height is increasing when storage capacitor voltage becomes higher due to modification process that leads to an increase in diameter of borer machined surface. Metal flows can be considered as specific cutting elements (teeth) on the modified borer surface that provide give the cutting ability to its worn-out surface. It has been ascertained that electrical discharge modification of the worn-out borer surface makes it possible to restore its cutting ability in relation to its initial ability by 33.3 % with 75 V voltage and in case of 120 V voltage the ability is increased by 43.0 %. It is evidence that the proposed method for restoration of cutting ability of worn-out steel dental borer surface is considered as rather efficient one.

Keywords: electrical discharge machining, cutting ability, restoration, dental borer, wear, cutting elements, fabric-based laminate, micro-relief, flows

For citation: Kiselev M. G., Bohdan P. S., Kryshnev M. M., Semenov V. P. (2017) Influence of Electrical Discharge Machining for Worn-Out Surface of Steel Dental Borer Working Part on Restoration of its Cutting Ability. *Science and Technique*. 16 (3), 189–195. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-189-195 (in Russian)

Введение

Зубной бор представляет собой вращающийся многолезвийный инструмент, предназначенный для обработки (препарирования) твердых тканей зубов и челюстных костей [1–3]. Он состоит из рабочей части (головки) 1, шейки 2 и хвостовика 3 (рис. 1), служащего для закрепления бора в стоматологическом наконечнике.

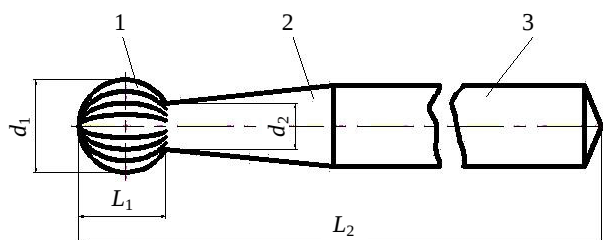


Рис. 1. Конструкция зубного бора:

d_1 – диаметр рабочей части (головки); d_2 – диаметр шейки;
 L_1 – длина рабочей части; L_2 – общая длина бора

Fig. 1. Dental borer design:

d_1 – diameter of working part (head); d_2 – diameter of neck;
 L_1 – length of working part; L_2 – total borer length

В зависимости от применяемого стоматологического наконечника боры разделяются для работы с прямым, угловым и турбинным наконечниками. Хвостовики боров для углового наконечника имеют на свободном конце проточку и лыску для фиксации в нем. Диаметр хвостовика бора для прямого и углового наконечников составляет 2,35 мм, а для турбинного – 1,60 мм. Боры для прямого наконечника

имеют установленную длину 44,00 мм, для углового – 17,22 и 27,00 мм, для турбинного – 22,00 мм.

По форме рабочей части боры подразделяются на шаровидные, цилиндрические, конические, обратноконические, колесообразные с продольной, торцевой, поперечной, угловой или комбинированной насечкой, образующей режущие зубья. Изготавливают боры из прутков высокопрочной хромированной стали ХВ5. Технологический процесс их производства включает четыре основные операции: токарную, зубофрезерную, термическую и финишную. Токарная операция, выполняемая на автоматах продольного точения, – это фасонирование рабочей части, обточка шейки, проточка канавки замковой части (для угловых боров) и обрезание в размер со снятием фаски. Фрезерная операция включает фрезерование зубьев на рабочей части боров, а также лыски на хвостовой части угловых боров. В зависимости от формы рабочей части бора ее осуществляют на фрезерных автоматах различных конструкций, а в качестве инструмента используют специальные двухугловые и дисковые фрезы. Термообработка включает закалку рабочей части и шейки боров с последующим отпуском с обеспечением твердости 61–66 HRC. Финишная обработка заключается в удалении с помощью гибкого полировального круга заусенцев с последующим электрохимическим полированием.

Согласно ГОСТ 22090.1–93 «Инструменты стоматологические вращающиеся», для сталь-

ных боров полный установленный ресурс машинного времени должен быть не менее 9 мин. Следует подчеркнуть, что изношенные боры, т. е. потерявшие режущую способность, в дальнейшем не используются, а утилизируются. Вместе с тем, как показали результаты предшествующих исследований [4–6], путем электроэрозионной обработки (модифицирования) поверхности инструментов, применяемых для распиливания различных материалов (проволока, штрипса, отрезной диск), ей можно придать режущую способность. Поэтому представляется перспективным проводить такую обработку для модифицирования изношенной поверхности рабочей части стальных боров с целью восстановления ее режущей способности, а соответственно их дальнейшего использования. В этой связи цель работы заключалась в экспериментальной оценке влияния электроэрозионной обработки изношенной поверхности стальных зубных боров на степень восстановления ее режущей способности.

Методика проведения экспериментальных исследований

Объектом исследования являлся стальной зубной бор с цилиндрической рабочей частью (головкой), предназначенный для работы с прямым стоматологическим наконечником (рис. 2). Исходный диаметр головки бора, на которой выполнены шесть режущих лезвий, составляет 2,17 мм при длине рабочей части 5,50 мм и общей длине бора 44,00 мм.

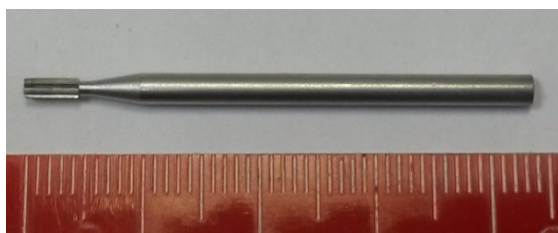


Рис. 2. Фотография зубного бора, примененного в исследованиях

Fig. 2. Photo of dental borer applied in research

Определение режущей способности бора осуществляли с помощью созданного устройства, принципиальная схема которого и фотография общего вида представлены на рис. 3.

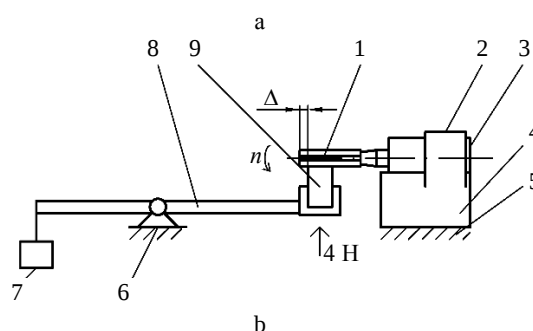


Рис. 3. Принципиальная схема устройства для определения режущей способности бора (а) и фотография его рабочей зоны (б)

Fig. 3. Schematic diagram of device for determination of borer cutting ability (a) and photo of its working area (b)

Отметим, что данное устройство (рис. 3) реализует схему испытаний режущей способности боров в соответствии с требованиями ГОСТ 30213–94. Испытуемый бор 1 закрепляется в стоматологическом наконечнике 3, который с помощью хомута 2 своей цилиндрической поверхностью прижимается к поверхности призмы 4, неподвижно установленной на основании 5 устройства. На основании также закреплен кронштейн 6, в котором на опорах вращения установлен качающийся рычаг 8. На одном конце рычага закреплена пластина из текстолита 9 толщиной 1,5 мм, а на другом – аттестованные грузы 7, создающие усилие прижима пластины к режущей поверхности бора, равное 4 Н.

Частоту вращения бора контролировали с помощью лазерного тахометра testo 465, и во всех экспериментах ее значение поддерживалось постоянным и составляло 5000 мин^{-1} . Предварительно при отпущенном хомуте стоматологический наконечник перемещался в призме в осевом направлении таким образом, чтобы торец бора располагался относительно поверхности текстолитовой пластины на расстоянии $\Delta = 1,0 \text{ мм}$, после чего хомут зажимался.

Затем включали привод вращения стоматологического наконечника, текстолитовая пластина прижималась с заданным усилием к режущей поверхности вращающегося бора, и в этот же момент запускали секундомер. По истечении 30 с процесс обработки останавливали, текстолитовую пластину выводили из контакта с бором и переустанавливали на рычаге таким образом, чтобы на ней можно было прорезать паз другим испытуемым бором, который бы располагался относительно предыдущего на расстоянии не менее 5 мм.

Режущую способность бора оценивали по значению интенсивности резания (i) им текстолитовой пластины, которое определяли отношением площади F полученного на ней пропила ко времени обработки $t = 30$ с, т. е. $i = F/t$ (мм²/с). Значение F находили как произведение толщины пластины $b = 1,5$ мм на глубину h полученного на ней пропила ($F = bh$). Величину h измеряли с помощью малого инструментального микроскопа ММИ-2 с точностью ± 5 мкм.

Испытаниям подвергались боры в исходном состоянии их рабочей поверхности (новые), в изношенном состоянии рабочей поверхности и боры, изношенная рабочая поверхность которых была модифицирована путем электроэрозионной обработки. Изношенная рабочая поверхность бора получалась в результате обработки новым бором образца из гранита. Диаметральные размеры рабочей поверхности боров при трех ее указанных состояниях измеряли с помощью микрометра МР-25 0,001 с ценой деления 1 мкм.

Электроэрозионное модифицирование изношенной рабочей поверхности бора осуществляли с помощью созданного устройства, схема и фотография общего вида которого представлены на рис. 4.

На стальной плите 1 (рис. 4) смонтирован электродвигатель 8 (ДСМ 2-П-220), с валом которого посредством эластичной муфты 7 соединен хвостовик обрабатываемого бора 4. Последний установлен в призме 3 и прижимается к ее поверхности с помощью пружинного прижима 6. Плита установлена на диэлектрическом (деревянном) основании 2. В качестве электрода-инструмента используется тонкая, толщиной 0,1 мм, стальная пластина 5, которой

вручную сообщается периодическое колебательное движение, направленное перпендикулярно изношенной поверхности бора. Электрод-инструмент и бор включены в электрическую цепь, состоящую из источника постоянного тока ИП, накопительного конденсатора C и токоограничивающего резистора R . В процессе сближения электрода-инструмента с обрабатываемой поверхностью бора на расстояние, соответствующее минимальной величине межэлектродного промежутка (МЭП), между ними происходит электрический разряд, вызывающий формирование на ней лунки, имеющей наплывы застывшего металла, выходящие за исходный контур поверхности. Именно эти наплывы металла образуют на модифицированной поверхности своеобразные режущие элементы, способные снимать стружку с материалов, уступающих по твердости металлу наплывов [6–10].

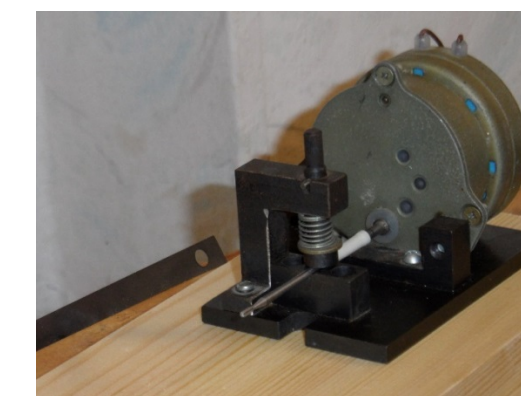
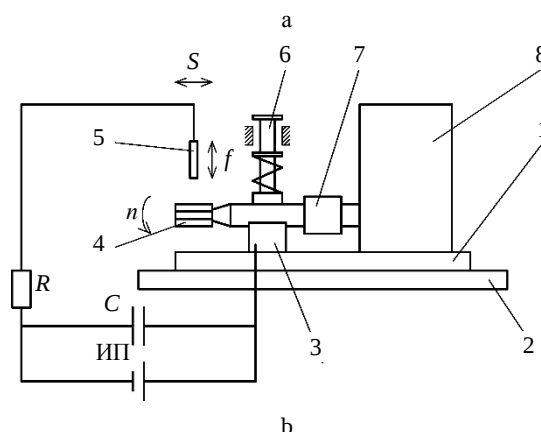


Рис. 4. Схема устройства для электроэрозионного модифицирования изношенной рабочей поверхности бора (a) и фотография общего вида устройства (b)

Fig. 4. Diagram of device for electrical discharge modification of worn-out borer working surface (a) and photo of device general view (b)

В процессе модифицирования бору сообщается вращательное движение с частотой $n = 3 \text{ мин}^{-1}$, а электроду-инструменту – колебательное движение с частотой $f \approx 1 \text{ Гц}$. Для обработки всей изношенной поверхности бора пластине дополнительно сообщается движение S вдоль его оси. При этом обеспечивается условие, чтобы формируемые на поверхности бора лунки не перекрывали друг друга. В процессе проведения эксперимента использовали прямую полярность, т. е. анодом являлся бор, диэлектрическая жидкость не применялась. Модифицирование осуществляли при двух значениях напряжения U на накопительном конденсаторе: 75 и 120 В.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Фотографии режущей части исследуемого бора при трех ее состояниях – исходном, изношенном и после электроэрозионного модифицирования изношенной поверхности – представлены на рис. 5.

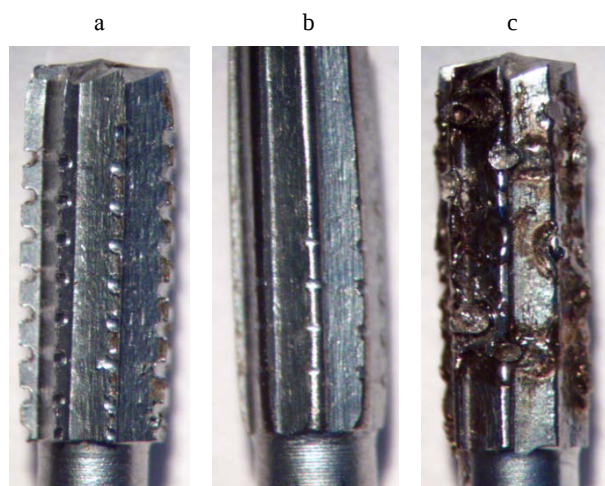


Рис. 5. Фотография режущей части испытуемого бора:
а, b – в исходном и изношенном состоянии;
с – после электроэрозионного модифицирования изношенной поверхности

Fig. 5. Photo of cutting part of borer under test:
a – initial state; b – worn-out state;
c – after electrical discharge modification

Как видно на рис. 5, на изношенной поверхности бора практически отсутствуют режущие лезвия, которые имеет поверхность бора в ее исходном состоянии. В результате их изнаши-

вания диаметр режущей части бора уменьшился по сравнению с исходным. После электроэрозионного модифицирования изношенной поверхности бора на ней отчетливо видны лунки с наплывами металла, которые выходят за исходный контур поверхности. В результате диаметр поверхности увеличивается на удвоенную высоту этих наплывов. Численные значения диаметра режущей части бора при различных ее состояниях приведены в табл. 1.

Таблица 1

Диаметры режущей поверхности бора
при различных ее состояниях
Diameters of borer cutting surface
at its various states

Состояние режущей поверхности	Диаметр режущей поверхности, мм
Исходное состояние (в состоянии поставки)	2,17
Изношенное состояние	1,95
Модифицированная изношенная поверхность при U :	
75 В	2,09
120 В	2,15

Из анализа приведенных данных следует, что в результате изнашивания диаметр режущей поверхности бора уменьшился по сравнению с исходным на 0,22 мм. После электроэрозионного модифицирования изношенной поверхности при $U = 75 \text{ В}$ ее диаметр увеличился на 0,14 мм, а при $U = 120 \text{ В}$ – на 0,20 мм и достиг 2,15 мм, что практически соответствует диаметру режущей поверхности в исходном состоянии (2,17 мм). Такое увеличение диаметра изношенной поверхности бора после ее электроэрозионного модифицирования связано с формированием на ней наплывов металла, выходящих за ее исходный контур. При этом с увеличением напряжения накопительного конденсатора в процессе модифицирования поверхности средняя высота этих наплывов металла возрастает. Так, при $U = 75 \text{ В}$ значение высоты составляет 0,07 мм, а при $U = 120 \text{ В}$ – 0,10 мм. Объясняется это тем, что с повышением напряжения возрастает энергия электрического разряда, что приводит к увеличению размеров получаемой на поверхности бора лунки, включая высоту образовавшихся по ее краю наплывов металла.

Как уже отмечалось, эти наплывы металла можно рассматривать как своеобразные режущие элементы (зубья) на модифицированной поверхности бора, придающие его изношенной поверхности режущую способность. Это подтверждается полученными экспериментальными данными (рис. 6), отражающими влияние состояния режущей поверхности бора на интенсивность резания им текстолитовой пластины.

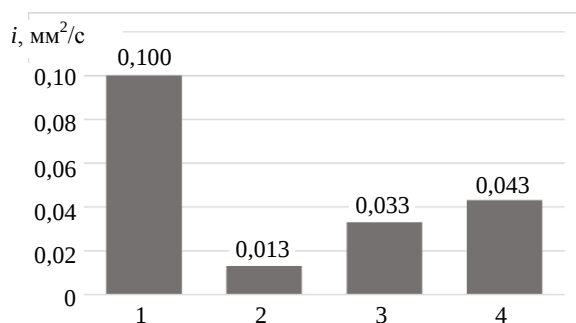


Рис. 6. Значение интенсивности резания текстолитовой пластины бором с различным состоянием режущей поверхности: 1, 2 – в исходном и изношенном состоянии; 3, 4 – модифицированная изношенная поверхность при $U = 75$ В и $U = 120$ В соответственно

Fig. 6. Value of intensity for cutting textolite plate with borer having various cutting surface states: 1 – initial state; 2 – worn-out state; 3, 4 – modified worn-out surface at $U = 75$ V and $U = 120$ V, respectively

Из рис. 6 видно, что наибольшую интенсивность резания ($i = 0,100$ мм²/с) обеспечивает бор в исходном состоянии его режущей поверхности, а наименьшую ($i = 0,013$ мм²/с) – бор с изношенной режущей поверхностью. В результате электроэрозионного модифицирования поверхности при $U = 75$ В значение интенсивности резания увеличилось до $i = 0,033$ мм²/с, а при $U = 120$ В – до $0,043$ мм²/с. Если значение i , соответствующее исходному состоянию режущей поверхности бора, принять за 100 %, модифицирование ее изношенной поверхности позволяет восстановить ее режущую способность при $U = 75$ В на 33,3 %, а при $U = 120$ В – на 43,0 %. В то время как интенсивность резания изношенной поверхностью составляет всего 13,3 % от значения i , принятого за 100%. Если оценить эффективность операции модифицирования по отношению к интенсивности резания изношенной поверхностью бора, то ее применение позволяет повысить этот показате-

тель при $U = 75$ В в 2,5 раза, а при $U = 120$ В – в 3,3 раза. Возрастание эффективности влияния модифицирования изношенной поверхности бора на восстановление ее режущей способности с повышением напряжения на накопительном конденсаторе обусловлено увеличением высоты образующихся на ней наплывов металла, что в первом приближении аналогично увеличению высоты зубьев на поверхности инструмента. А это повышает его режущую способность.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа результатов предшествующих исследований по применению электроэрозионного модифицирования поверхности инструментов, применяемых для распиливания различных материалов с целью придания ей режущей способности, обоснована перспективность восстановления режущей способности изношенной поверхности зубных боров путем ее электроэрозионной обработки.

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по влиянию операции электроэрозионного модифицирования изношенной рабочей поверхности бора на восстановление ее режущей способности, включающая устройство для выполнения этой операции, а также устройство определения режущей способности бора по значению интенсивности резания им образцов из текстолита.

3. Экспериментально установлено, что в результате электроэрозионного модифицирования изношенной рабочей поверхности бора на ней формируются лунки, имеющие по краям наплывы металла, выходящие за исходный контур поверхности, высота которых увеличивается с повышением напряжения U на накопительном конденсаторе, что приводит к увеличению диаметра обработанной поверхности. Так, при $U = 75$ В ее диаметр увеличился на 0,14 мм при высоте наплывов 0,07 мм, а при $U = 120$ В – на 0,20 мм при их высоте 0,10 мм и стал практически равным диаметру рабочей поверхности бора в исходном состоянии.

4. Показано, что наплывы металла оправдано рассматривать как своеобразные режущие элементы (зубья) на модифицированной поверхности бора, придающие его изношенной поверхности режущую способность. Установ-

лено, что электроэрозионное модифицирование изношенной поверхности бора позволяет восстановить ее режущую способность по отношению к первоначальной при $U = 75$ В на 33,3 %, а при $U = 120$ В – на 43 %, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности предлагаемого способа восстановления режущей способности изношенной поверхности стальных зубных боров.

5. Учитывая положительные результаты, полученные в ходе проведенных предварительных экспериментов, следует продолжить исследования по изучению процесса электроэрозионного модифицирования изношенной поверхности зубных боров различных видов с целью разработки простой в эксплуатации и малозатратной в освоении технологии восстановления режущей способности этих широко применяемых в стоматологии инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тургунов, Е. М. Хирургические инструменты / Е. М. Тургунов, А. А. Нурбеков. Караганда, 2008. 48 с.
2. Островерхов, Г. Е. Оперативная хирургия и топографическая анатомия / Г. Е. Островерхов, Ю. М. Бомаш, Д. Н. Лубоцкий. Курск: КГМУ, 1996. 738 с.
3. Применение штрипс с модифицированной поверхностью для распиливания зубной ткани / М. Г. Киселев [и др.] // Приборостроение-2013: Материалы 6-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 ноября 2013 г. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев (предс.) [и др.]. Минск, 2013. С. 310–311.
4. Экспериментальная оценка режущей способности штрипс с модифицированной путем электроконтактной обработки рабочей поверхностью / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. Т. 28, № 3. С. 64–68.
5. Эффективность применения электроконтактной обработки поверхности проволоочного инструмента с целью придания ей режущей способности / М. Г. Киселев [и др.] // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. 2013. № 11. С. 73–77.
6. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса формирования лунки на обрабатываемой поверхности при однократном электроэрозионном воздействии / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. № 1. С. 76–81.
7. Артамонов, Б. А. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. / Б. А. Артамонов. М.: Высш. шк., 1983. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента. 247 с.
8. Коваленко, В. С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / В. С. Коваленко. Киев: Вища шк., 1975. 236 с.
9. Методика и оборудование для оценки режущей способности проволоочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Метрология и приборостроение. 2012. № 1. С. 23–25.

10. Влияние скорости вращения рабочей поверхности отрезного диска в процессе ее электроэрозионной обработки на режущую способность инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2016. № 2. С. 58–62.

Поступила 10.01.2017

Подписана в печать 21.03.2017

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Turgunov E. M., Nurbekov A. A. (2008) *Surgical Instruments*. Karaganda. 48 (in Russian).
2. Ostroverkhov G. E., Bomash Yu. M., Lubotsky D. N. (1996) *Operative Surgery and Topographic Anatomy*. Kursk, Kursk State Medical University. 738 (in Russian).
3. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Bogdan P. S., Krinichev V. S. (2013) Application of Strips with Modified Surface for Dental Tissue Sawing. *Priborostroyeniye-2013: Materialy 6-j Mezhdunar. Nauch.-Tehn. Konf. [Priborostroyeniye-2013. Proceedings of the 6th International Scientific and Technical Conference]*, Minsk, Belarusian National Technical University, 310–311 (in Russian).
4. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Gabec V. L., Bogdan P. S. (2014) Experimental Evaluation of Cutting Capability for Strips with Working Surface Modified by Electro-Discharge Machining. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials]*, (3), 64–68 (in Russian).
5. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Moskalenko A. V., Bogdan P. S. (2013) Effectiveness of Application of Contact-Initiated Machining of the Surface of Wire Instrument to Give it Cutting. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. B [Bulletin of Polotsk State University. Ser. B]*, (11), 73–77 (in Russian).
6. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Monich S. G., Moskalenko A. V., Bogdan P. S. (2014) Theoretical and Experimental Investigations for Pit Formation Process on the Machined Surface while Using Single Electric Erosion Action. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials]*, (1), 76–81 (in Russian).
7. Artamonov B. A. (1983) *Electro-Physical and Electrochemical Methods for Material Working. Vol. 1. Material Working while Using Instruments*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 247 (in Russian).
8. Kovalenko V. S. (1975) *Electro-Physical and Electrochemical Methods for Material Working*. Kiev, Vishcha Shkola Publ. 236 (in Russian).
9. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Novikov A. A., Moskalenko A. V., Bogdan P. S. (2012) Methodology and Equipment for Assessment of Cutting capability for Wire Instrument. *Metrologiya i Priborostroyeniye [Metrology and Instrumentation]*, (1), 23–25 (in Russian).
10. Kiselev M. G., Drozdov A. V., Bogdan P. S., Sentemova D. V. (2016) Influence of Rotation Velocity of Cutoff Disk Working Surface on Instrument Cutting Capability During the Process of its Electric Corrosion Machining. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials]*, (2), 58–62 (in Russian).

Received: 10.01.2017

Accepted: 21.03.2017

Published online: 30.05.2017

Finite Element Analysis of Centreless-Lunette Turning of Heavy Shaft

Yu. V. Vasilevich¹⁾, S. S. Dounar¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Abstract. Dynamics of heavy lathe tool to be renovated has been simulated in the paper. Original turning scheme concerns finish-machining of large rotor shafts. High-positioned parts and a milling head may create dynamic problems. For this very reason FEM-simulation has been carried in static, modal and harmonic arrangements. A carrying system for shaft support consists of a bed, a support, a tool and a tailstock. A headstock is not involved in the given turning scheme. It has emerged that static and dynamic rigidity for a support is 3–4-fold less than for a shaft. Tool rigidity is decreasing from 186.5 to 11.9 N/μm when passing from statics to turning rather close to support resonance. Twelve resonance modes have been evaluated in the paper. Two modes have been considered as dangerous. These modes are “shaft swinging in lunettes” (M1, 26.7 Hz) and “support pecking” (M3, 54.4 Hz). The paper shows excessive mechanical compliance of the bed that has insufficiently rigid ribbing and through holes. Bed filling with polymer concrete is moderately effective. Transition from two-lunette (2L) scheme of shaft support to three-lunette (3L) scheme makes it possible to increase significantly rigidity in statics (by 2.09-fold) but there is a limited effect dynamics. Heights of resonance peaks are decreasing not more than 1.32-fold for M1, M3. Effect of dynamic damping has been revealed in case when high support closes with a middle lunette. The support serves as a dynamic damper. Measures for strengthening of machine tool carrying system have been analyzed in the paper. It has been established that swinging of a shaft which is to be machined according to M1 is badly blocked by passive and mechanical means. It is better to bypass a resonance while setting cutting modes. “Support pecking” resonance (M3) can be raised in the zone of high frequencies and at the same time it is possible to decrease its amplitude. This effect can be obtained while using all strengthening measures. Partial strengthening has rather low efficiency. While using a heavy machine tool three ranges are recommended for milling and turning: pre-resonance (<20 Hz), inter-resonance (35–45 Hz) and super-resonance (>65 Hz). The last range is preferable due to super-resonance damping of the shaft and the support as well. The next design step is to add triangle connecting rods or caissons for the bed.

Keywords: finite element method [FEM] analysis, rotation, lathe machine, rotor, rigidity, resonance, frequency response characteristic, vibration, lunette, concrete

For citation: Vasilevich Yu. V., Dounar S. S. (2017) Finite Element Analysis of Centreless-Lunette Turning of Heavy Shaft. *Science and Technique*. 16 (3), 196–205. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-196-205

Анализ методом конечных элементов бесцентрово-люнетного точения крупных валов

Докт. физ.-мат. наук, проф. Ю. В. Василевич¹⁾, канд. техн. наук, доц. С. С. Довнар¹⁾

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

Реферат. Смоделирована динамика тяжелого токарного станка после планируемой реновации. Оригинальная схема точения касается чистовой обработки крупных роторных валов. Высокорасположенные детали и фрезерная головка могут создавать динамические проблемы. Поэтому проведено МКЭ-моделирование в статической, модальной и гармонической постановках. Несущая система для удержания вала состояла из станины, суппорта, инструмента и задней бабки. Передняя бабка в данной схеме точения не участвовала. Оказалось, что статическая и динамическая жесткость для суппорта в 3–4 раза меньше, чем для вала. Жесткость на инструменте снижается с 186,5 до 11,9 Н/мкм при переходе от статики к точению вблизи резонанса суппорта. Оценено двенадцать резонансных мод. Две моды признаны наиболее опасными. Это «раскачка вала в люнетах» (M1, 26,7 Гц) и «клевки суппорта» (M3, 54,4 Гц). Показана избыточная податливость станины, имеющей недостаточно жесткое оребрение и сквозные отверстия. Заполнение станины полимербетоном умеренно эффективное. Переход от двухлюнетной (2L) схемы поддержки вала к трехлюнетной (3L)

Адрес для переписки

Довнар Станислав Станиславович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-58
dovnar@bntu.by

Address for correspondence

Dounar Stanislav S.
Belarusian National Technical University
9 B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-58
dovnar@bntu.by

дает хороший рост жесткости в статике (в 2,09 раза), но ограниченный эффект в динамике. Высоты резонансных пиков снижаются не более чем в 1,32 раза для М1 и М3. Обнаружен эффект динамического гашения при сближении высокого суппорта со средним люнетом. Суппорт выступает динамическим демпфером. Проанализированы меры усиления несущей системы станка. Установлено, что раскочка обрабатываемого вала по М1 плохо блокируется пассивно-конструктивными средствами. Резонанс лучше обходить при назначении режимов резания. Резонанс М3 «клевки суппорта» можно поднять в область высоких частот и одновременно снизить его амплитуду. Это достигается применением сразу всех мер усиления. Частичное усиление малоэффективно. Для фрезерования и точения на тяжелом станке рекомендованы три диапазона: дорезонансный (<20 Гц), межрезонансный (35–45 Гц) и зарезонансный (>65 Гц). Последний диапазон предпочтителен из-за зарезонансного демпфирования как вала, так и суппорта. Следующим конструктивным шагом должно стать добавление в станину треугольных связей или кессонов.

Ключевые слова: анализ методом конечных элементов, вращение, токарный станок, ротор, жесткость, резонанс, амплитудно-частотная характеристика, вибрация, люнет, бетон

Для цитирования: Василевич, Ю. В. Анализ методом конечных элементов бесцентрово-люнетного точения крупных валов / Ю. В. Василевич, С. С. Довнар // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 196–205. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-196-205

Formulation of problem

Article is dedicated to providing rigid holding of very heavy shafts machined in the extra huge lathes (EHL). Such shafts are needed primarily for energy branch. Shafts are main parts of turbine and generator rotor assemblies. Bearing system for holding shaft in lathe is rather specific. It is described below as centreless-lunette scheme of turning (CLT). Statics and dynamics of CLT is not investigated. Research has been provided by computer simulation. Reliable and quite precise finite element analysis (FEA) is used [1].

Simulation was conducted for typical EHL machine tool – lathe 1A670 of KZTS brand. Investigation have been caused by planned serial renovation of these overall and costly machines. Design solutions for EHL are conservative. Composition of lathe to be simulated is rather contemporary. There are two main changes to embody during renovation. At first, centerline “headstock – tailstock” will be rose on 300 mm and maximal machining diameter will reach 2120 mm. Secondly, support will be arranged as tools so milling head. Turn-milling should sharply increase output of lathe. However, shaft will be subjected to high frequency oscillations of cutting force from mill. Simulation should recommend measures for dynamic rigidity providing.

Lathe geometrical model

Machine tool of EHL type (fig. 1a) poses headstock 1 with a spindle unit. Massive faceplate 2 ($\varnothing 2500$ mm, 4.2 ton) is placed on forward end of spindle. It transmits torque to the turned rotor shaft 3. Shaft is hold by lunettes 4. Two lunettes at the shaft ends (4a, 4c) are always presented for investigated scheme. Third, middle lunette 4b is optional. Rear, right end of shaft is sustained by tailstock 5.

Tool 6 is placed onto support 7. Support, headstock, tailstock and lunettes are based on the bed 8.

There are four guideways along axis Z on the bed. Two far guideways (fig. 1b) are for lunette resting. Two near guideways serve for support’s moving (7.9 ton). Tool can moves in the X direction (transversely or radially). Axis Y isn’t used by lathe.

Length of typical steel shaft brought to simulation is equal 8345 mm, diameter – 1204 mm, weight – 31504 kg. Shaft axis goes at 2214 mm above bed. Whole mass of simulated model depends on set and is not less than 120.9 ton. Gravity is taken by foots A (fig. 1b) under the bed. Full length of lathe is 15.94 m.

Structural parts of lathe are hollow and made from cast iron. Filling of hollows by concrete [2, 3] is investigated below as reinforcing measure. Fig. 1c represents concrete blocks 3 inside bed and tailstock 4. They are showed together with shaft 1 and support 2 deformed during one of resonance excitation.

Centreless-lunette scheme of turning

Radial direction is the main to provide accuracy of turning. Finish machining on the EHL has one traditional feature. Spindle do not holds the shaft. Spindle is tied with shaft by floating chuck to translate torque and axial thrust (along Z). There is no centers between stocks and shaft ends. Flexible radial linkage between spindle and shaft is displayed (fig. 1b) as leaf system B.

Lunettes are very objects to fasten shaft radially. Lunettes touch shaft by radial pins (4 pieces) with slipping possibility. Every lunette stands upright near special checking circular band on the shaft. Radial retraction-extension of pins makes shaft axis parallel to guideways on the bed. Headstock is not concerned directly to accuracy (and not taken into account below). Tailstock serves mainly as brace. This is just centerless-lunette scheme of turning.

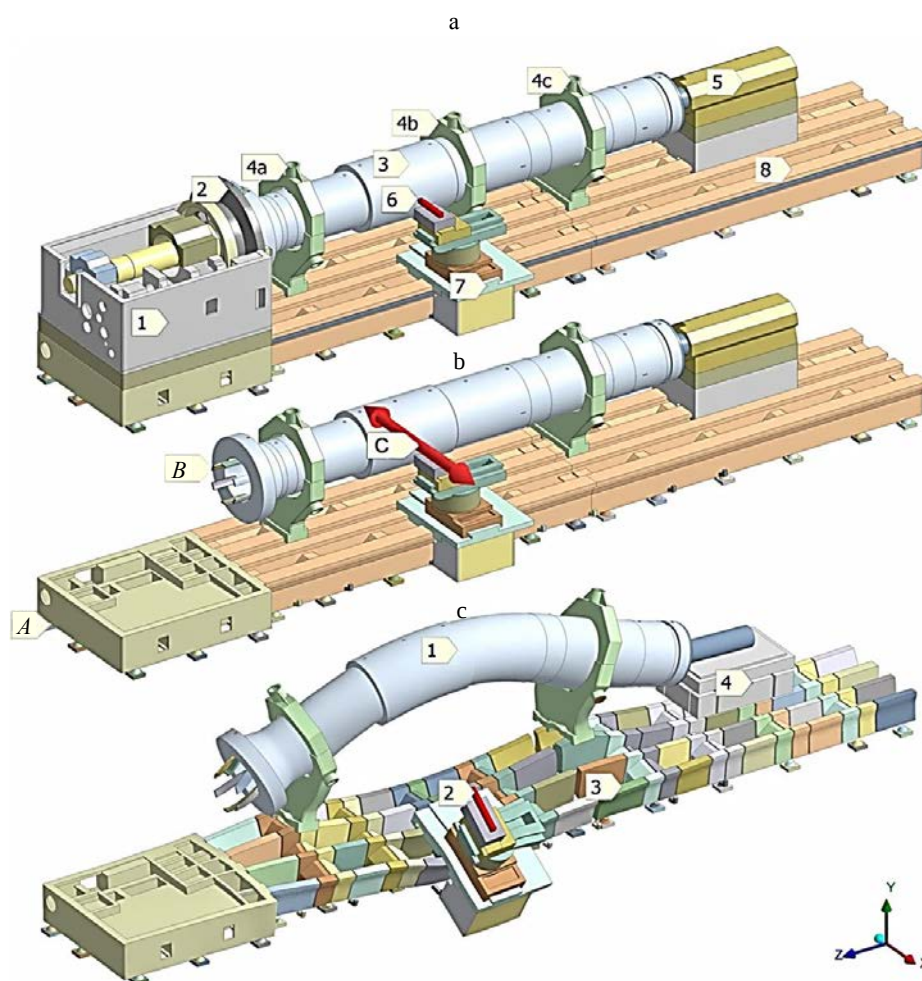


Fig. 1. Lathe (a), centreless-lunette turning (CLT) scheme (b, with mating cutting forces (MCF) as C) and eigenmode M4 resonance with concrete blocks involved (c, 63.99 Hz)

Two lunettes usually hold shaft during turning (scheme 2L – fig. 1b). Third, middle lunette may be added (scheme 3L – fig. 1c). Last scheme is more complicated to adjust straightness and right position of shaft axis.

It is insufficiently to hold long heavy shaft at the ends by headstock and tailstock. No less than two lunettes are need. Holding of shaft by stocks and lunettes altogether has hidden problem. These objects reveal incompatibility of deformations under gravity and cutting forces [4, 5]. Therefore, CLT scheme remains primary for practice.

Boundary conditions and finite element model parameters

Simulation is provided on the basis of accumulated knowledge about machine tool dynamics [5, 6]. Heavy machine tool simulation tech-

nique [7–12] is used. It has approved by natural measurements [1].

Machine tool bears on 39 foots (A at fig. 1b). Vertical rigidity of every foot is high enough $J_y^f = 3600 \text{ N}/\mu\text{m}$ when horizontal rigidity in every direction is smaller $J_{x,z}^f = 1000 \text{ N}/\mu\text{m}$. Simplified form of floating chuck B is fastened from the left to provide axial backing. Radial rigidity of chuck is small and is not taken into account.

Lathe bearing system is loaded by pair of opposite forces (fig. 1b, index C). These MCF are oriented along X as transversal direction is the most important for machining precision. One force is applied to the tool tip and is equal in statics $F_x^{ts} = 1000 \text{ N}$. Second force acts on the small shaft recess opposite to the tool tip. This force $F_x^{ss} = -1000 \text{ N}$. Both forces counterbalance each other in the lathe

scale. Any moment do not created. With that one force acts to the support and second one deforms shaft. Direct link (FEA spring or active contact pair) between shaft and tool (on support) is absent.

Mating forces become sinusoidal in the harmonic simulation: on the tool – $F_x^{tt} = A \sin 2\pi f_t t$, where $A = 1000$ N – force amplitude; f_t – testing frequency in Hz; t – time; on the shaft – $F_x^{ts} = -A \sin 2\pi f_t t$. Frequency interval for harmonic simulation is assigned from 0 to 100 Hz. Damping ratio coefficient is taken equal $\xi = 2\%$. It acts evenly for all bodies.

Rigidity (static or dynamic) has calculated below as ratio of force applied to displacement observed. Points for force acting and displacement registration are coincident for this work. Support and tool rigidities means the same (data calculated for tool tip). Rigidity (sustainability) and flexibility (pliability) are inverse terms.

For example, static rigidity for shaft along X is equal $J_x^{ss} = F_x^{ss} / u_x^s$, where u_x^s – transversal displacement in shaft recess just opposite to tool tip. As for support second force from MCF and tool tip shift are taken.

Rotodynamic effects are absent due to slow shaft spinning in practice (spindle rotational frequency $n_{sp} \leq 2$ s⁻¹). Slow rotation leads to low turning output. That is why question about mill-turning necessity derives. Emphasize, spindle rotation do not simulated here.

There are numerous contact pairs between finite element meshes of machine tool parts. All they are bonded. Free, uncontrolled slipping in the guideways is considered prevented for parts weight. Finite element model is fully linear and scalable.

Main materials for simulation are cast iron (structural parts), steel (lunettes, tailstock quill, tool, toolholder etc.), concrete (polymer concrete).

Mechanical properties are given in tab. 1. Concrete may be switched on or off in hollows. Bonded contact between concrete blocks and inner walls of bed or tailstock is provided anyway.

Table 1

Mechanical properties of model materials

Material	Young's modulus E , MPa	Specific density ρ , kg/m ³	Poisson's coefficient μ
Grey cast iron	130	7200	0,28
Steel	200	7850	0,30
Concrete (mineral or polymer)	30	2300	0,18

Set of parameters above will be called basic variant BV . It means two-lunette shaft holding $2L$ and empty cavities inside structural parts.

Static rigidity for shaft and tool for centerless-lunette of turning

Rigidity data is showed in tab. 2 for BV , three-lunette scheme $3L$, two-lunette scheme with concrete inside bed and tailstock ($2L + C$) and for reference variant $2L + RB$, where two lunettes are based on the infinitely rigid invisible bed.

Ratio coefficient k_x^{ss} is calculated in tab. 2. It shows relation between shaft and support rigidities in transversal direction. Shaft proves always 3–4 time more rigid than support. It partially derives from lofty support appearance – it will be rose at 300 mm in renovation. Meanwhile support rigidity is sufficient (186.5 N/μm). It is far higher from 20 N/μm level. That level is regarded [13–15] as border for self-propelled oscillation popping and cutting stability losing. It leads usually to rough chatter vibration during machining. Value $J_{norm}^{s,d} \geq 20$ N/μm is respected as secure condition for static and dynamic situations.

Table 2

Static rigidity along transversal direction (X) on shaft and support for different variants of shaft holding

Parameter	Variant			
	1 (BV)	2	3	4
	2 lunettes (2L), N/μm	3 lunettes (3L), % to BV	2 lunettes and concrete (2L + C), % to BV	2 lunettes on rigid bed (2L + RB), % to BV
Shaft rigidity J_x^{ss}	778,6	207	145	252
Support (tool) rigidity J_x^{sus}	186,5	133	209	345
Ratio coefficient $k_x^{ss} = J_x^{ss} / J_x^{sus}$	4,17	6,47	2,89	3,05

Scheme 3L increases shaft static rigidity as twice. It derives from middle lunette proximity to point of imaginary measuring. Tool rigidity grows in 1.33 times simultaneously. Hence support and middle lunette interact indirectly through the bed.

Bed reinforcement by concrete pouring (variant 3, tab. 2) enhances support rigidity in 2.09 times. But numerous vertical through holes for chip removing remain opened. Infinitely rigid bed RB rises support rigidity in 3.45 times (variant 4). Difference between variants 3 and 4 pointed out vertical holes as issue for bed flexibility.

One could see holes (fig. 1c) between rows of concrete blocks (near 8, e. g.). Hole squareness excludes triangle links inside bed. Therefore, bed demonstrates shear flexibility even after concrete filling.

Modal analysis

Twenty eigenmodes were located for shaft bearing system in the frequency interval up to 120 Hz. There are axial (Z) and multi-wave resonances in the top half of interval. Though, transversal (X) and vertical (Y) eigenmodes are more significant for accuracy and stability of cutting. Such modes are placed in the bottom half of frequency interval.

There are four eigenmodes to pay attention (tab. 3). They are showed at fig. 2 (eigenmodes M1, M2, M3) and fig. 1c (M4). Here resonant excitations spread in the machine tool scope. So these eigenmodes are called whole-machine ones [8–11]. Resonant system M1–M4 is stable and is revealed as for two-lunette turning so for three-lunette one.

Very low-frequency eigenmode M1 consists in transversal shaft swinging. All lunettes oscillate at the same phase in the XY plane. As seen on fig. 2,

a lunette movement is caused not so much with it bending as with bed deformation. Shift to three-lunette scheme rises M1 frequency only at 19 % (from 26.7 to 31.8 Hz). It indirectly shows dynamic flexibility of bed.

Eigenmode M2 (fig. 2b) presents counter-phase moving of shaft ends 1 and 4 along X (anti-nodes). Single node is placed near point 3. It takes half of sinusoid period. Shaft inaccuracies caused by M2 depends on tool position and will be higher near anti-nodes.

Eigenmode M3 (fig. 2c) reveals pliable behavior of the bed beneath support. Two concerned guideways become strongly deformed. Support gets opportunity for pecking movement in XY plane (mainly along X). Increased support height (additional 300 mm at renovation) promotes oscillation scope.

Eigenmode M4 (fig. 1c) consist of two coordinated movements – vertical “horse-shoe style” shaft bending and transversal support stroke. Such components may create inclined elliptic trajectory for tool. It potentially threaten excitation of self-propelled oscillations (chatter) and losing of cutting stability [5, 6, 13, 14].

Eigenmodes M1 and M3 are most dangerous for its transversal direction (X) implementation. Shaft and tool displacements reflect straightly onto machined radius. Vertical vibrations (Y, shaft bending according M4 e. g.) are tangent to radius and distort it slightly.

Eigenmodes M1 and M3 affect each other weakly. It may conclude by fig. 2a, b. Resonance by M1 spring up into dynamic subsystem “shaft on lunettes” and M3 – in subsystem “support onto bed”. Different factors should be essential for each eigenmode.

Table 3

Whole-machine eigenmodes with shaft and support participation

Eigenmode	Eigenmode name	Eigenmode frequency, Hz		
		Basic variant (2L)	Three lunette (3L)	Rigid foots and 2L
M1	Shaft swinging (lunettes in phase)	26,7	31,87	32,78
M2	Shaft end waving (lunettes in antiphase)	49,25	50,45	61,41
M3	Support pecking	54,48	65,41	88,57
M4	Horse-shoe	58,51	80,26	72,59

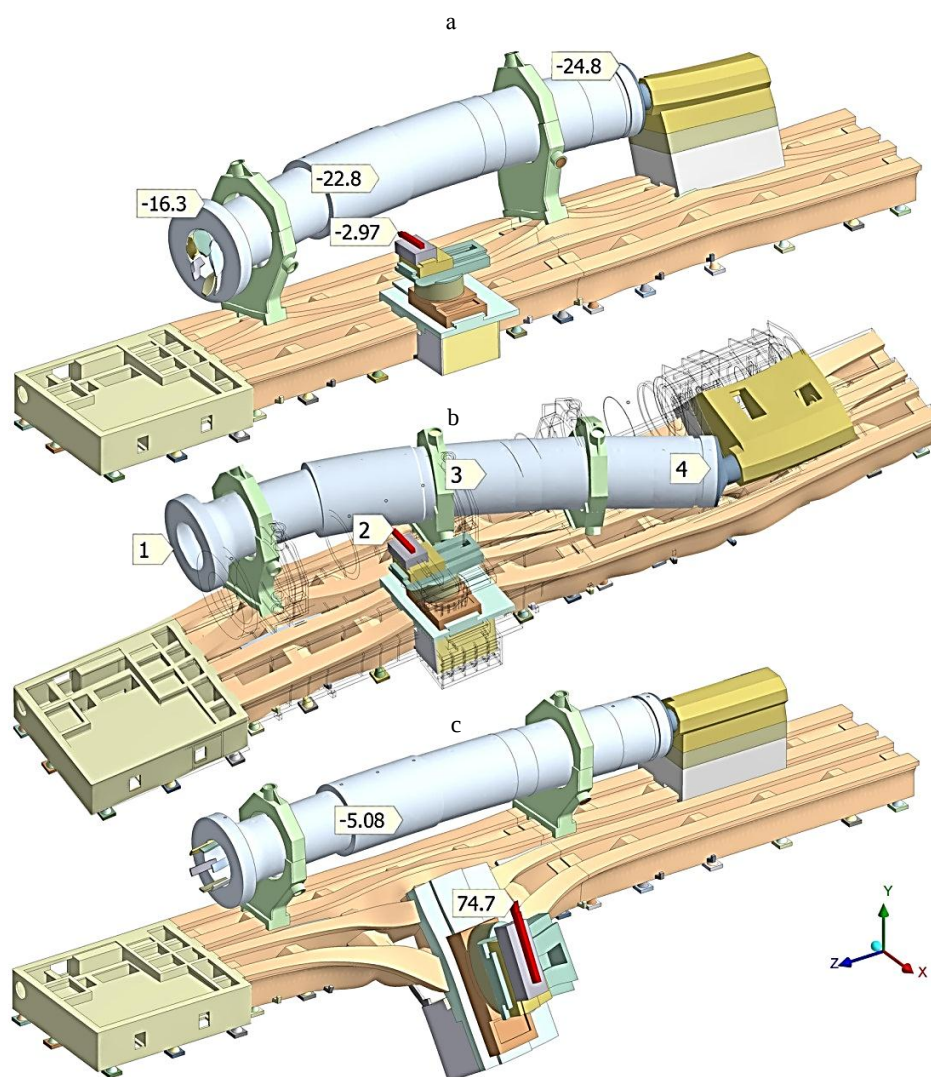


Fig. 2. Resonance excitation by mating cutting forces according to eigenmodes M1 (a, 2L, 26.7 Hz), M2 (b, 3L, 50.45 Hz), M3 (c, 54.48 Hz). Displacements in μm ($\times 45000$)

Harmonic analysis and frequency response function

Resonance is excited by appropriate forces on the basis of some eigenmode. Excitability of eigenmode depends on site and direction of force acted. Mating cutting forces MCF has applied in this work at tool and shaft as described above. Sequence of specific frequency tests gives possibility to create frequency response function (FRF). MCF is the input signal for FRF and displacements (X) of tool tip or shaft (near recession) are the output values.

FRF for basic variant BV is showed at fig. 3. Peaks for M1 “shaft swinging” and M3 “support pecking” are most powerful. Shaft amplitude

reaches $22.95 \mu\text{m}$ in the M1 resonance. Accordingly dynamic rigidity fall in X direction to the level $J_{x,M1}^{sd} = 43.6 \text{ N}/\mu\text{m}$. Resonance M3 is the strongest one (amplitude on tool tip $84.06 \mu\text{m}$). Dynamic rigidity lessens as low as $J_{x,M3}^{td} = 43.6 \text{ N}/\mu\text{m}$. Such level is insufficient for providing turning accuracy and cutting process stability.

Dynamic rigidity lowers relatively to static one in 15–17 times ($\xi = 2\%$) as for shaft (M1) so for support (M3). Shaft remains in 3.5–4.5 times more rigid than support at the M1, M3 peaks. Resonances M2 and M4 manifest themselves as relatively faint and seen mainly FRF curve for shaft. They border from left and right strong “support pecking” resonance M3.

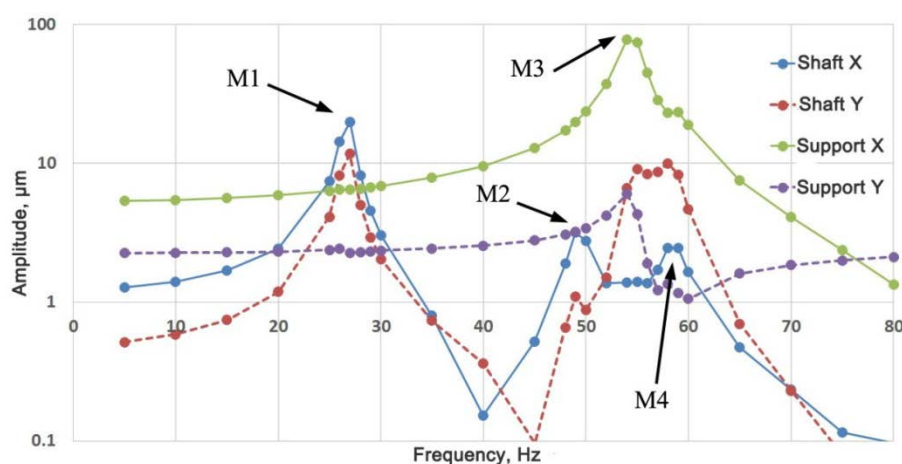


Fig. 3. Frequency response function for shaft and support displacements along axes X and Y under mating cutting forces action along X (BV, logarithmic scale for ordinate)

FRF curve “support Y” goes much more lower than “support X”. Therefore crossing “X-force to Y-displacement” is weak. It is good feature for support dynamic subsystem. Both curves mentioned above poses single peaks M3. Static (pre-resonant) frequency interval extends for support to the left from M3. To the right from M3, support oscillations are quickly damped due to frequency growth in the post-resonant interval.

Shaft FRF’s for X and Y directions are similar. Crossing “X to Y” may be stated. It means force applied to shaft along X excites not only transversal vibrations, but also vertical oscillations. Such conjunction is dangerous for chatter arising.

Shaft FRF’s on fig. 3 have double peak shape. Hence, shaft machining is recommended into one of three “calm” intervals: pre-resonant (<20 Hz, to the left of M1 peak), inter-resonant (35–45 Hz,

between M1 and M2 peaks) and post-resonant (>65 Hz, to the right of M4 peak).

It is important to reinforce dynamically bearing system of lathe. It should develops as resonance peaks lowering and shifting of peaks to the higher frequencies. Let it see how FRF changes for three-lunette scheme of shaft holding (3L, fig. 4).

Middle lunette mounting decreases amplitude of M1 peak in 2.78 times at once, when resonant frequency grows only at 19 %. Additional FEA revealed surprise local effect caused by proximity of support and middle lunette. They both fasten flexible bed guideways. Moreover, support works as tuned mass damper towards lunette. Lunette amplitude grows to 17.34 μm if support were going at left or right. Nevertheless support dynamic rigidity increases no less than 1.32 times if 2L scheme were changed to 3L one.

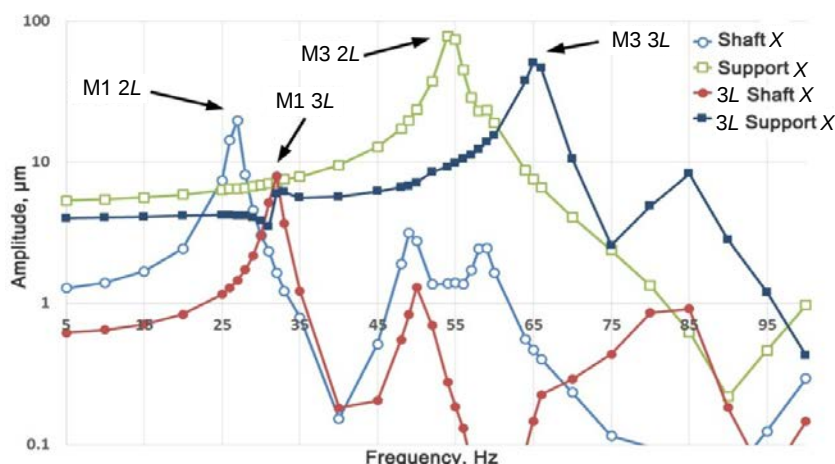


Fig. 4. Frequency response function for shaft and support displacements in case of three-lunette scheme 3L (curves “shaft X”, “support X” are for references and touches to 2L; logarithmic scale for ordinate)

M3 resonant frequency rises at 20 %. Dynamic rigidity on the tool tip increases for 3L scheme in 1.6 times (in case of lunette to support proximity). Rigidity goes up to level 19.15 N/ μ m. It became sufficient for chatter prevention even at resonance.

Three-lunette scheme 3L should be recommended for practice for reasons of dynamics. Its effect will change from moderate to strong depends of support position relatively to lunettes. Scheme is inconvenient in part of lunette alignment.

Reinforcement measures for bearing system

Sequence of measures to hold shaft faster has been simulated. Measure F2 means doubling rigidity of each foot under lathe bed. It was reached by changing modelling material properties. In practice more foots of bigger dimensions may be used.

Measure B2 consist in doubling of Young's modulus for bed material and cast iron of tailstock. It can be fulfilled by changing material from gray cast iron to high-duty iron, steel, thickening walls etc.

Measure L2 suppose Young's modulus doubling for lunettes. Lunette reinforcement may be achieves not only by wall thickening and material redistribution, but by high-strength lightweight materials using (composite e. g.).

Measure C means concrete pouring into bed and tailstock cavities (concrete properties according tab. 1). Measure RB is theoretical – infinitely rigid bed for lunettes and tailstock.

Initial lathe bearing system (BV) has been reinforced through new measures by steps (tab. 4). Final step 6 provides infinitely rigid bed. It shows some limit of reinforcement. Polygon lines (fig. 5) f_1 and f_3 are concerned to resonant frequencies M1 and M3 respectively. Polygons “shaft X M1” and “support X M3” demonstrate resonant amplitudes in transversal direction X.

Reinforcement measure sequence was reshuffled several times compare with tab. 4. All the time each measure gives it inherent effect no way the step to apply. Therefore, synergetic interaction between measures is not notable.

Fig. 5 demonstrates that each reinforcement measure is positive in dynamics sense. Resonant frequencies grow and peaks are weakened. Yet rigidity doubling for foots (step 2) and lunettes (step 4) gives a small effect. All curves are near horizontal at the related ranges 1–2 and 3–4 (especially). Hence, lunette reinforcement is not needed. Foot strengthening is desirable for support rigidity but it is second order measure.

Table 4

Reinforcement steps and measures activated in accumulated manner

Steps of reinforcement	1	2	3	4	5	6
Measures applied (accumulated)	BV	F2	F2 + B2	F2 + B2 + L2	F2 + B2 + L2 + C	L2 + RB

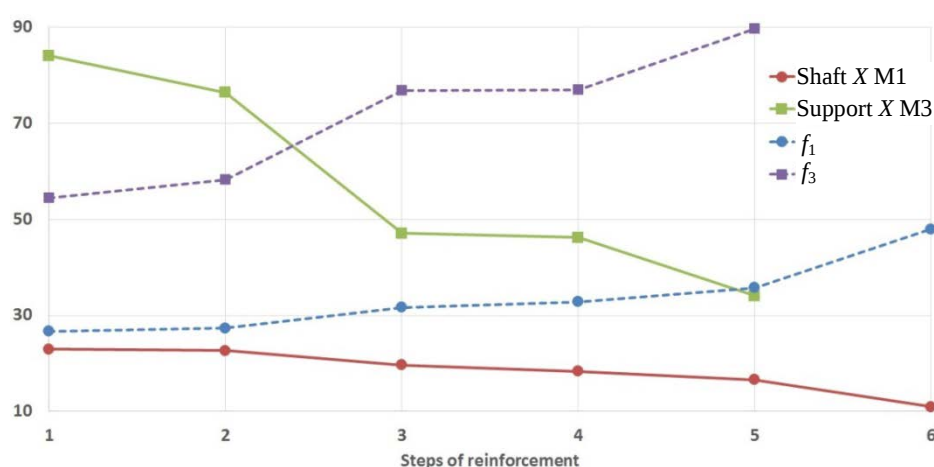


Fig. 5. Amplitude and frequency changing for resonances M1 and M3 according to sequence of reinforcement steps (tab. 4).

Ordinate dimension: μ m – for amplitude polygons “shaft X M1”, “support X M3”;

Hz – for polygons related to resonance frequencies f_1 , f_3

Concrete pouring into bed and tailstock (range 4–5) is rather effective measure. Frequency of M3 “support pecking” resonance enhanced at 16.5 %, vibration amplitude lowers at 1.35 times. However most strong measure is doubling of bed rigidity (2–3). Eigenmode M3 amplitude came down at 1.62 times and resonant frequency rises at 31.8 % at the same time. Therefore bed itself should be reinforced. Chip removing system should be revised for vertical holes closing. These windows gives to bed too more undesirable pliability.

M3 resonance answers to reinforcement measures. Rising at 1.64 times is obtained for frequency f_3 . Tool rigidity increased threefold – from 11.9 to 29.4 N/ μ m. Cutting instability prevented even at the resonant frequency.

“Shaft swinging” resonance M1 reacts to reinforcement weaker. Rigidity elevation in 1.38 times only achieved at range 1–5. Resonant frequency was rose at 1.33 times. Sharp turning of lines before “rigid bed” range 5–6 points out reserves for better shaft holdings. Lathe bed should redesigned as more monolithic with triangle inner links to withstand shear. As for existing bed, it would better to omit M1 resonance by cutting speed correction.

CONCLUSIONS

1. Two excitable resonances M1 “shaft swinging” and M3 “support pecking” are disclosed. Pliability of the bed is main issue for this lathe. Even concrete filling could not definitely helps. Three frequency intervals are recommended for turning and milling at huge lathe: pre-resonant (<20 Hz), inter-resonant (35–45 Hz) and post-resonant (>65 Hz). The last one is more suited for strong post-resonant damping effect, touched as shaft so support with tool.

2. Systematic investigation of reinforcing measures is provided. For essential dynamic rigidity improvement, all reinforcement measures should be applied at the same time, as a set. It gives possibility of stable machining at frequencies near support resonance (M3). Turning-milling near shaft resonance (M1) is possible for three-lunette bearing system.

3. For further developing, inner ribbing system of lathe bed should be redesigned with triangle fins addition. Other way of bed reinforcement is to create caissons inside it and to close all top and side windows.

REFERENCES

1. Zenkevich O., Morgan K. (1983) *Finite Elements and Approximation*. New York, John Wiley & Sons. 328 (Russ. ed.: Zenkevich O., Morgan K. (1986) *Konechnye Elementy i Approksimatsiia*. Moscow, Mir. 312).
2. Brailovsky M. I., Voskoboynik A. G., Voskoboynik A. A. (2010) *Metal Concrete Basic Structures of Metal Cutting Machines*. Kolomna, Voentekhnizdat Publ. 76 (in Russian).
3. Simon M., Grama A. L., Ganea M. (2012) Study of Improving Static Rigidity on Machine Tool Structure Using Concrete Component. *The 6th International Conference INTER-ENG 2012. Interdisciplinarity in Engineering*. Romania, “Petru Maior” University of Tîrgu Mureş, 26–29.
4. Dovnar S. S. (2017) Virtual Investigation of Static Deformations in Rotor Shaft of Super Heavy Turning Lathe. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Mekhanika: Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Sbornik* [Theoretical and Applied Mechanics. International Scientific and Technical Collected Volume]. Minsk, BNTU, (32), 72–78 (in Russian).
5. Kudinov V. A. (1967) *Dynamics of Machine Tools*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 359 (in Russian).
6. Kozlovsky N. A., Zaykin M. P. (1986) *Rigidity and Vibration Resistance in Heavy Milling Machines*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 135 (in Russian).
7. Turomsha V. I., Dovnar S. S., Truskovsky A. S., Shumsky I. I. (2012) Rigidity Balance of Mill-Drill-Bore Machine with Equally-Spaced Location of Spindle Head. *Vestn. Gomel'skogo Gos. Tekhn. Un-ta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University Named After P. O. Sukhoi], (3), 19–29 (in Russian).
8. Dovnar S. S., Yakimovich A. M., Kovaleva, I. L., Shumsky I. I. (2014) Harmonic Analysis of Portals for Heavy “Gantry-Type” Peripheral Milling Machines While Using Finite Element Method. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost'* [Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry], (11), 25–36 (in Russian).
9. Vasilevich Yu. V., Dovnar S. S., Shumsky I. I. (2014) Modal Analysis of Carrying System for Heavy Horizontal Multi-Purpose Machine while Using Finite Element Method. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], (4), 14–24 (in Russian).
10. Vasilevich Yu. V., Dovnar S. S., Truskovsky A. S., Shumsky I. I. (2015) Simulation and Analysis of Dynamics for Carrying System of Mill-Drill-Bore Machine with Mono Column. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], (3), 9–19 (in Russian).
11. Dounar S. S., Sokorov I. O., Truskouski A. S., Shumsky I. I., Karabaniuk I. A. (2015) FEA Analysis of Portal Design

Variants Influence on Dynamics of Portal Machine Tool. *Mashinostroenie: Respublikanskii Mezhvedomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov*. [Mashinostroenie. Republican Interdepartmental Collection of the Scientific Works Proceedings], 29, 14–22 (in Russian).

12. Vasilevich Yu. V., Dounar S. S., Karabaniuk I. A. (2016) Finite-Element Analysis of Influence of Concrete Filling Material on Dynamic Rigidity of Heavy Machine Portal. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], 15 (3), 233–241 (in Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-3-233-241.
13. Lopez de Lacalle L. N., Lamikiz A. (2009). *Machine Tools for High Performance Machining*. Springer. 442. DOI: 10.1007/978-1-84800-380-4.
14. Gradišek J., Kalveram M., Insperger T., Weinert K., Stépán G., Govekara E., Grabec I. (2005) On Stability Prediction for Milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (7–8), 769–781. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.015.
15. Schmitz T., Duncan G. S. (2005) Three Component Receptance Coupling Substructure Analysis for Tool Point Dynamics Prediction. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127 (4), 781–790. DOI: 10.1115/1.2039102.
5. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
6. Козловский, Н. А. Жесткость и виброустойчивость тяжелых фрезерных станков / Н. А. Козловский, М. П. Зайкин. Минск: Наука и техника, 1986. 135 с.
7. Баланс жесткости стойки фрезерно-сверлильно-расточного станка с симметричным расположением шпиндельной бабки / В. И. Туромша [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. 2012. № 3. С. 19–29.
8. Гармонический анализ порталов тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Гентри» с помощью МКЭ / С. С. Довнар [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В: Промышленность. 2014. № 11. С. 25–36.
9. Василевич, Ю. В. Модальный анализ несущей системы тяжелого горизонтального многоцелевого станка с помощью МКЭ / Ю. В. Василевич, С. С. Довнар, И. И. Шумский // Наука и техника. 2014. № 4. С. 14–24.
10. Моделирование и анализ динамики несущей системы фрезерно-сверлильно-расточного станка с моностойкой / Ю. В. Василевич [и др.] // Наука и техника. 2015. № 3. С. 9–19.
11. МКЭ-анализ влияния конструктивных вариантов портала на динамику порталного станка / С. С. Довнар [и др.] // Машиностроение. 2015. № 29. С. 14–22.
12. Василевич, Ю. В. Конечно-элементный анализ влияния бетонного наполнителя на динамическую жесткость портала тяжелого станка / Ю. В. Василевич, С. С. Довнар, И. А. Карабанюк // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 3. С. 233–241.
13. Lopez de Lacalle, L. N. Machine Tools for High Performance Machining // L. N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz. Springer, 2009. 442 p.
14. On Stability Prediction for Milling / J. Gradišek [et al.] // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45, No 7–8. P. 769–781.
15. Schmitz, T. Three Component Receptance Coupling Substructure Analysis for Tool Point Dynamics Prediction / T. Schmitz, G. S. Duncan // *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2005. Vol. 127, No 4. P. 781–790.

Received: 21.11.2016

Accepted: 24.01.2017

Published online: 30.05.2017

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. М.: Мир, 1986. 312 с.
2. Браиловский, М. И. Металлобетонные базовые конструкции металлорежущих станков / М. И. Браиловский, А. Г. Воскобойник, А. А. Воскобойник. Коломна: Воентехиздат, 2010. 76 с.
3. Simon, M. Study of Improving Static Rigidity on Machine Tool Structure Using Concrete Component / M. Simon, A. L. Grama, M. Ganea // The 6th International Conference INTER-ENG 2012. Interdisciplinarity in Engineering. Romania: “Petru Maior” University of Tîrgu Mureş, 2012. P. 26–29.
4. Довнар, С. С. Виртуальное исследование статических деформаций роторного вала в сверхтяжелом токарном станке / С. С. Довнар // Теоретическая и прикладная механика: Междунар. науч.-техн. сб. Минск: БНТУ, 2017. Вып. 32. С. 72–78.

Поступила 21.11.2016

Подписана в печать 24.01.2017

Опубликована онлайн 30.05.2017

Синтез кулачкового приводного механизма роликовой формовочной установки с комбинированным режимом движения по ускорению третьего порядка

Докт. техн. наук, проф. В. С. Ловеikin¹⁾, канд. техн. наук, доц. К. И. Почка²⁾

¹⁾Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины (Киев, Украина),

²⁾Киевский национальный университет строительства и архитектуры (Киев, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. С целью повышения надежности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитаны комбинированный режим возвратно-поступательного движения формовочной тележки и ее кинематические характеристики при этом режиме по ускорению третьего порядка. При определении оптимального комбинированного режима движения по ускорению третьего порядка в качестве критерия режима движения использовано критериальное действие, представляющее собой интеграл по времени с подынтегральной функцией, выражающей энергию ускорений третьего порядка установки. Рассчитаны функции изменения кинематических характеристик формовочной тележки при ее движении из одного крайнего положения в другое, которые соответствуют оптимальному комбинированному режиму движения по ускорениям третьего порядка. С учетом функций перемещения формовочной тележки выведен закон изменения радиуса кулачка приводного механизма установки. Предложена конструкция привода установки в виде кулачкового механизма, построен профиль кулачка для обеспечения комбинированного режима возвратно-поступательного движения формовочной тележки. Использование в установке указанного приводного механизма повышает качество поверхности обрабатываемой бетонной смеси, уменьшает динамические нагрузки в элементах приводного механизма, способствует исчезновению лишних разрушительных нагрузок на рамную конструкцию и соответственно повышению надежности и долговечности установки в целом. Результаты работы могут быть полезны для уточнения и усовершенствования существующих инженерных методов расчета приводных механизмов машин роликового формования как на стадиях проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации, а также использоваться при проектировании или усовершенствовании механизмов с возвратно-поступательным движением исполнительных элементов.

Ключевые слова: установка, формовочная тележка, режим движения, привод, ускорение, кулачок

Для цитирования: Ловеikin, В. С. (2017) Синтез кулачкового приводного механизма роликовой формовочной установки с комбинированным режимом движения по ускорению третьего порядка / В. С. Ловеikin, К. И. Почка // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 206–214. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-206-214 (in Russian)

Synthesis of Camshaft Driving Mechanism in Roller Molding Installation with Combined Motion Mode according to Acceleration of Third Order

V. S. Loveykin¹⁾, K. I. Pochka²⁾

¹⁾National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),

²⁾Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

Abstract. Combined reciprocating motion mode of a mold carriage and its kinematic characteristics while applying this mode and according to acceleration of the third order have been calculated in order to improve reliability and durability of roller molding installation. When calculating optimum combined motion mode according to acceleration of the third order a criteria action has been used as a criterion of the motion mode and it represents a time integral with a sub-integral function that

Адрес для переписки

Почка Константин Иванович
Киевский национальный университет
строительства и архитектуры
просп. Воздухофлотский, 31,
03680, г. Киев, Украина
Тел.: +380 44 248-69-25
Shanovniy@ukr.net

Address for correspondence

Pochka Konstantin I.
Kyiv National University
of Construction and Architecture
31 Povitroflotsky Ave.
03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: +380 44 248-69-25
Shanovniy@ukr.net

expresses energy of accelerations of the third order for the installation. Functions for change of kinematic characteristics of the forming cart when it is moving from one extreme position to another one have been calculated in the paper. The characteristics correspond to the optimum combined motion mode according to the acceleration of the third order. Taking into account functions for movement of the forming cart a law for cam radius change in a driving mechanism of the installation has been created in the paper. Design of the installation drive in the form of camshaft mechanism has been developed and a cam profile has been constructed in order to ensure a combined reciprocating motion mode for a mold carriage. Usage of the mentioned driving mechanism in installation makes it possible to improve quality of the processed concrete mix surface, to decrease dynamic loads in the elements of a driving mechanism, to contribute to disappearance of excessive destructive loads on a framed structure and, respectively, to increase reliability and durability of the installation in general. Results of the investigations can be used for clarification and improvement of the existing engineering calculation methods for driving mechanisms in roller molding machines at a designing stage and in the modes of their actual operation. Working results can be useful in the future in order to specify and improve existing engineering methods for calculation of driving mechanisms in roller molding installations at the design/engineering stage and in the mode of actual operation. Results of the work can be useful while designing or improving mechanisms with reciprocating motion of actuating elements.

Keywords: installation, forming cart, motion mode, drive, acceleration, cam

For citation: Loveykin V. S., Pochka K. I. (2017) Synthesis of Camshaft Driving Mechanism in Roller Molding Installation with Combined Motion Mode according to Acceleration of Third Order. *Science and Technique*. 16 (3), 206–214. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-206-214 (in Russian)

Введение

В существующих установках поверхностного уплотнения железобетонных изделий используется кривошипно-ползунный или гидравлический привод возвратно-поступательного движения формовочной тележки с уплотняющими роликами [1–7]. Во время постоянных пуско-тормозных режимов движения возникают значительные динамические нагрузки в элементах приводного механизма и в элементах формовочной тележки, которые могут привести к преждевременному выходу установки из рабочего состояния.

В существующих теоретических и экспериментальных исследованиях машин роликового формования железобетонных изделий обоснованы их конструктивные параметры и продуктивность [1–3, 8–10]. Вместе с тем недостаточно внимания уделено исследованию действующих динамических нагрузок и режимов движения [4, 8–10], что в значительной мере влияет на работу установки и качество готовой продукции.

Цель исследований – усовершенствование конструкции приводного механизма роликовой формовочной установки для повышения ее надежности и долговечности.

Основная часть

Для роликовой формовочной установки при уплотнении бетонной смеси желательно иметь постоянную скорость возвратно-поступательного движения формовочной тележки на всем участке, что позитивно влияло бы на качество готового изделия. Однако на практике такой

режим движения осуществить невозможно, поскольку в нем отсутствуют участки разбега и торможения, без которых не может быть циклического движения. Поэтому предлагается реализовать данный режим движения формовочной тележки при ее перемещении от одного крайнего положения к другому, в котором были бы участки разгона и торможения с минимальными динамическими нагрузками и участок движения с постоянной скоростью.

Для плавного процесса разгона и торможения формовочной тележки предложено осуществлять их по оптимальному режиму по ускорению третьего порядка. При этом скорость, ускорение и рывок формовочной тележки изменяются плавно, не создавая значительных динамических нагрузок в установке, что в свою очередь позитивно влияет на ее долговечность.

Критериями режима движения механизмов и машин могут быть коэффициенты неравномерности движения и динамичности [11]. В качестве критерия режима движения авторы статьи использовали критериальное действие, являющееся собой интеграл по времени с подынтегральной функцией, которая выражает меру движения либо действие системы. Для оптимального режима разгона и торможения по ускорению третьего порядка критерий оптимальности движения запишем в виде

$$I_z = \int_0^{t_{p,t}} Z dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $t_{p,t}$ – продолжительность процесса разгона либо торможения формовочной тележки; Z – энергия ускорений третьего порядка

$$Z = \frac{1}{2} m \cdot x^{\text{IV}}, \quad (2)$$

m – масса формовочной тележки; x^{IV} – ускорение третьего порядка.

Условием минимума критерия (1) есть уравнение Пуассона

$$\frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{d}{dt} \frac{\partial Z}{\partial \dot{x}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial Z}{\partial \ddot{x}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial Z}{\partial \dddot{x}} + \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial Z}{\partial x^{\text{IV}}} = 0, \quad (3)$$

где x , $\dot{x}$, $\ddot{x}$, $\dddot{x}$ – координата перемещения, скорость, ускорение и рывок тележки.

Из выражения (3) можно записать:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial Z}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial Z}{\partial \ddot{x}} = \frac{\partial Z}{\partial \ddot{x}} = 0; \quad \frac{\partial Z}{\partial x^{\text{IV}}} = m \cdot x; \\ \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial Z}{\partial x^{\text{IV}}} = m \cdot x^{\text{VIII}} = 0. \quad (4)$$

Из (4) получаем дифференциальное уравнение и его решения:

$$x^{\text{VIII}} = 0; \quad x^{\text{VII}} = C_1; \quad x^{\text{VI}} = C_1 t + C_2; \\ \dot{x}^{\text{V}} = \frac{1}{2} C_1 t^2 + C_2 t + C_3; \\ x^{\text{IV}} = \frac{1}{6} C_1 t^3 + \frac{1}{2} C_2 t^2 + C_3 t + C_4; \\ \ddot{x} = \frac{1}{24} C_1 t^4 + \frac{1}{6} C_2 t^3 + \frac{1}{2} C_3 t^2 + C_4 t + C_5; \\ \ddot{x} = \frac{1}{120} C_1 t^5 + \frac{1}{24} C_2 t^4 + \frac{1}{6} C_3 t^3 + \\ + \frac{1}{2} C_4 t^2 + C_5 t + C_6; \\ \dot{x} = \frac{1}{720} C_1 t^6 + \frac{1}{120} C_2 t^5 + \frac{1}{24} C_3 t^4 + \frac{1}{6} C_4 t^3 + \\ + \frac{1}{2} C_5 t^2 + C_6 t + C_7; \\ x = \frac{1}{5040} C_1 t^7 + \frac{1}{720} C_2 t^6 + \frac{1}{120} C_3 t^5 + \\ + \frac{1}{24} C_4 t^4 + \frac{1}{6} C_5 t^3 + \frac{1}{2} C_6 t^2 + C_7 t + C_8,$$

где $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$ – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий; t – время.

Для участка разгона граничные условия принимают следующие значения:

$$t = 0: \quad x = 0; \quad \dot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0;$$

$$t = t_p: \quad \dot{x} = \dot{x}_y; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0; \quad x^{\text{IV}} = 0,$$

где t_p – продолжительность разгона формовочной тележки с состояния покоя до выхода на установившийся режим движения; $\dot{x}_y$ – скорость тележки на установившемся режиме.

Подставив вышеуказанные граничные условия в (5), получим:

$$t = 0: \quad C_8 = 0; \quad C_7 = 0; \quad C_6 = 0; \quad C_5 = 0; \quad (6)$$

$$t = t_p: \quad \begin{cases} \frac{1}{720} C_1 t_p^6 + \frac{1}{120} C_2 t_p^5 + \frac{1}{24} C_3 t_p^4 + \frac{1}{6} C_4 t_p^3 = \dot{x}_y; \\ \frac{1}{120} C_1 t_p^5 + \frac{1}{24} C_2 t_p^4 + \frac{1}{6} C_3 t_p^3 + \frac{1}{2} C_4 t_p^2 = 0; \\ \frac{1}{24} C_1 t_p^4 + \frac{1}{6} C_2 t_p^3 + \frac{1}{2} C_3 t_p^2 + C_4 t_p = 0; \\ \frac{1}{6} C_1 t_p^3 + \frac{1}{2} C_2 t_p^2 + C_3 t_p + C_4 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Решив систему уравнений (7), найдем постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3 и C_4 :

$$C_1 = -7200 \frac{\dot{x}_y}{t_p^6}; \quad C_2 = 4320 \frac{\dot{x}_y}{t_p^5}; \\ C_3 = -1080 \frac{\dot{x}_y}{t_p^4}; \quad C_4 = 120 \frac{\dot{x}_y}{t_p^3}. \quad (8)$$

Подставив определенные постоянные интегрирования (6) и (8) в (5), получаем функции изменения перемещения, скорости, ускорения и рывка формовочной тележки в процессе разгона с состояния покоя до выхода на установившийся режим движения:

$$x_p = x_{0p} + \dot{x}_y \left(-\frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_p^6} + 6 \frac{t^6}{t_p^5} - 9 \frac{t^5}{t_p^4} + 5 \frac{t^4}{t_p^3} \right); \\ \dot{x}_p = \dot{x}_y \left(-10 \frac{t^6}{t_p^6} + 36 \frac{t^5}{t_p^5} - 45 \frac{t^4}{t_p^4} + 20 \frac{t^3}{t_p^3} \right); \\ \ddot{x}_p = 60 \dot{x}_y \left(-\frac{t^5}{t_p^6} + 3 \frac{t^4}{t_p^5} - 3 \frac{t^3}{t_p^4} + \frac{t^2}{t_p^3} \right); \quad (9)$$

$$\ddot{x}_p = 60\dot{x}_y \left(-5\frac{t^4}{t_p^6} + 12\frac{t^3}{t_p^5} - 9\frac{t^2}{t_p^4} + 2\frac{t}{t_p^3} \right),$$

где x_{0p} – координата начального положения центра масс тележки при разгоне.

На установившемся режиме движения формовочной тележки координаты перемещения и скорости ее центра масс описываются уравнениями [11]:

$$x_y = x_{0y} + \frac{(x_{1y} - x_{0y})t}{t_y}; \quad \dot{x}_y = \frac{x_{1y} - x_{0y}}{t_y} = \text{const};$$

$$\ddot{x}_y = 0; \quad \ddot{x}_y = 0, \quad (10)$$

где x_{0y} , x_{1y} – координаты начального и конечного положений центра масс тележки при установившемся движении; t_y – продолжительность установившегося движения.

Для участка торможения граничные условия принимают следующие значения:

$$t = 0: \quad \dot{x} = \dot{x}_y; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0; \quad x = 0;$$

$$t = t_t: \quad x = x_{1t}; \quad \dot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0; \quad \ddot{x} = 0,$$

где t_t – продолжительность торможения с момента установившегося движения до полной остановки; x_{1t} – конечная координата процесса торможения.

Подставив вышеуказанные граничные условия в (5), получим:

$$t = 0: \quad C_7 = \dot{x}_y; \quad C_6 = 0; \quad C_5 = 0; \quad C_4 = 0; \quad (11)$$

$$t = t_t: \quad \begin{cases} \frac{1}{5040}C_1t_t^7 + \frac{1}{720}C_2t_t^6 + \frac{1}{120}C_3t_t^5 + \dot{x}_y t_t + C_8 = x_{1t}; \\ \frac{1}{720}C_1t_t^6 + \frac{1}{120}C_2t_t^5 + \frac{1}{24}C_3t_t^4 + \dot{x}_y = 0; \\ \frac{1}{120}C_1t_t^5 + \frac{1}{24}C_2t_t^4 + \frac{1}{6}C_3t_t^3 = 0; \\ \frac{1}{24}C_1t_t^4 + \frac{1}{6}C_2t_t^3 + \frac{1}{2}C_3t_t^2 = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Решив систему уравнений (12), найдем постоянные интегрирования C_1 , C_2 , C_3 и C_8 :

$$C_1 = -7200\frac{\dot{x}_y}{t_p^6}; \quad C_2 = 2880\frac{\dot{x}_y}{t_p^5};$$

$$C_3 = -360\frac{\dot{x}_y}{t_p^4}; \quad C_8 = x_{1t} - \frac{4}{7}\dot{x}_y t_t. \quad (13)$$

Подставив определенные постоянные интегрирования (11) и (13) в (5), получим функции

изменения перемещения, скорости, ускорения и рывка формовочной тележки в процессе торможения с момента установившегося движения до полной остановки:

$$x_t = x_{1t} - \dot{x}_y \left(\frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_t^6} - 4\frac{t^6}{t_t^5} + 3\frac{t^5}{t_t^4} - t + \frac{4}{7}t_t \right);$$

$$\dot{x}_t = \dot{x}_y \left(-10\frac{t^6}{t_t^6} + 24\frac{t^5}{t_t^5} - 15\frac{t^4}{t_t^4} + 1 \right); \quad (14)$$

$$\ddot{x}_t = 60\dot{x}_y \left(-\frac{t^5}{t_t^6} + 2\frac{t^4}{t_t^5} - \frac{t^3}{t_t^4} \right);$$

$$\ddot{x}_t = 60\dot{x}_y \left(-5\frac{t^4}{t_t^6} + 8\frac{t^3}{t_t^5} - 3\frac{t^2}{t_t^4} \right).$$

В выражениях (9), (10) и (14) координата начального положения центра масс тележки при разгоне x_{0p} и конечная координата процесса торможения x_{1t} отвечают ее крайним положениям, однако неизвестны скорость движения $\dot{x}_y$ формовочной тележки на установившемся режиме, координаты начального x_{0y} и конечного x_{1y} положений центра масс тележки при установившемся движении.

Разделим перемещение S формовочной тележки от одного крайнего положения до другого на три участка: 1 – участок разгона, ему отвечает перемещение S_p ; 2 – участок установившегося движения, ему отвечает S_y ; 3 – участок торможения, ему отвечает S_t . Учитывая зависимости (9), (10) и (14), выражения перемещения на каждом участке можно представить в виде:

$$S_p = \int_0^{t_p} \dot{x}_p dt = \dot{x}_y \int_0^{t_p} \left(-10\frac{t^6}{t_p^6} + 36\frac{t^5}{t_p^5} - 45\frac{t^4}{t_p^4} + 20\frac{t^3}{t_p^3} \right) dt =$$

$$= \dot{x}_y \left(-\frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_p^6} + 6\frac{t^6}{t_p^5} - 9\frac{t^5}{t_p^4} + 5\frac{t^4}{t_p^3} \right) \Big|_0^{t_p} = \frac{4}{7}\dot{x}_y t_p; \quad (15)$$

$$S_y = \int_0^{t_y} \dot{x}_y dt = \dot{x}_y t_y; \quad (16)$$

$$S_t = \int_0^{t_t} \dot{x}_t dt = \dot{x}_y \int_0^{t_t} \left(-10\frac{t^6}{t_t^6} + 24\frac{t^5}{t_t^5} - 15\frac{t^4}{t_t^4} + 1 \right) dt =$$

$$= \dot{x}_y \left(-\frac{10}{7} \cdot \frac{t^7}{t_t^6} + 4\frac{t^6}{t_t^5} - 3\frac{t^5}{t_t^4} + t \right) \Big|_0^{t_t} = \frac{4}{7}\dot{x}_y t_t. \quad (17)$$

Тогда выражение общего перемещения формовочной тележки запишется следующим образом:

$$S = S_p + S_y + S_t = \frac{4}{7} \dot{x}_y t_p + \dot{x}_y t_y + \frac{4}{7} \dot{x}_y t_t = \dot{x}_y \left(\frac{4}{7} t_p + t_y + \frac{4}{7} t_t \right). \quad (18)$$

Для обеспечения уплотнения бетонной смеси формовочной тележкой с постоянной скоростью движения на большей части ее рабочего хода примем время установившегося движения, например, $t_y = \frac{2}{3} t_0$, где t_0 – общее время движения формовочной тележки от одного крайнего положения до другого. Тогда, задавшись условием равенства времени разгона и торможения, их можно определить по соответственным выражениям: $t_p = \frac{1}{6} t_0$ и $t_t = \frac{1}{6} t_0$.

Подставив в (18) $t_p = \frac{1}{6} t_0$; $t_y = \frac{2}{3} t_0$; $t_t = \frac{1}{6} t_0$ и амплитуду перемещения тележки от одного крайнего положения до другого $\Delta x = S$, получим

$$\Delta x = \dot{x}_y \left(\frac{4}{7} \cdot \frac{1}{6} t_0 + \frac{2}{3} t_0 + \frac{4}{7} \cdot \frac{1}{6} t_0 \right) = \frac{6}{7} \dot{x}_y t_0 \Rightarrow \dot{x}_y = \frac{7 \Delta x}{6 t_0}. \quad (19)$$

Координату положения формовочной тележки x_{0y} , которая определяет окончание участка разгона и начало участка установившегося движения, можно найти из (15) и (19)

$$x_{0y} = \frac{4}{7} \dot{x}_y t_p = \frac{4}{7} \cdot \frac{7 \Delta x}{6 t_0} \cdot \frac{1}{6} t_0 = \frac{1}{9} \Delta x, \quad (20)$$

а координату x_{1y} , определяющую окончание участка установившегося движения и начало участка торможения, вычислим из (16), (19) и (20)

$$x_{1y} = x_{0y} + \dot{x}_y t_y = \frac{1}{9} \Delta x + \frac{7 \Delta x}{6 t_0} \cdot \frac{2}{3} t_0 = \frac{8}{9} \Delta x. \quad (21)$$

Подставив выражения (19)–(21) в (9), (10) и (14) и приняв $t_p = \frac{1}{6} t_0$; $t_y = \frac{2}{3} t_0$; $t_t = \frac{1}{6} t_0$, кинематические характеристики формовочной

тележки на участках разгона, установившегося движения и торможения можно представить в виде:

$$\begin{aligned} x_p &= 252 \Delta x \left(-\frac{2160}{7} \cdot \frac{t^7}{t_0^7} + 216 \frac{t^6}{t_0^6} - 54 \frac{t^5}{t_0^5} + 5 \frac{t^4}{t_0^4} \right); \\ \dot{x}_p &= 252 \Delta x \left(-2160 \frac{t^6}{t_0^7} + 1296 \frac{t^5}{t_0^6} - 270 \frac{t^4}{t_0^5} + 20 \frac{t^3}{t_0^4} \right); \\ \ddot{x}_p &= 15120 \Delta x \left(-216 \frac{t^5}{t_0^7} + 108 \frac{t^4}{t_0^6} - 18 \frac{t^3}{t_0^5} + \frac{t^2}{t_0^4} \right); \quad (22) \\ \ddot{\ddot{x}}_p &= 30240 \Delta x \left(-540 \frac{t^4}{t_0^7} + 216 \frac{t^3}{t_0^6} - 27 \frac{t^2}{t_0^5} + \frac{t}{t_0^4} \right); \\ x_y &= \frac{1}{9} \Delta x \left(1 + \frac{21}{2} \cdot \frac{t}{t_0} \right); \quad \dot{x}_y = \frac{7 \Delta x}{6 t_0} = \text{const}; \quad (23) \\ \ddot{x}_y &= 0; \quad \ddot{\ddot{x}}_y = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_t &= \Delta x - \frac{7}{6} \Delta x \left(\frac{466560}{7} \cdot \frac{t^7}{t_0^7} - 31104 \frac{t^6}{t_0^6} + 3888 \frac{t^5}{t_0^5} - \frac{t}{t_0} + \frac{2}{21} \right); \\ \dot{x}_t &= \frac{7}{6} \Delta x \left(-466560 \frac{t^6}{t_0^7} + 186624 \frac{t^5}{t_0^6} - 19440 \frac{t^4}{t_0^5} + \frac{1}{t_0} \right); \quad (24) \\ \ddot{x}_t &= 90720 \Delta x \left(-36 \frac{t^5}{t_0^7} + 12 \frac{t^4}{t_0^6} - \frac{t^3}{t_0^5} \right); \\ \ddot{\ddot{x}}_t &= 272160 \Delta x \left(-60 \frac{t^4}{t_0^7} + 16 \frac{t^3}{t_0^6} - \frac{t^2}{t_0^5} \right). \end{aligned}$$

Приняв амплитуду перемещения формовочной тележки $\Delta x = 0,4$ м и продолжительность ее движения от одного крайнего положения до другого $t_0 = 3$ с, по уравнениям (22)–(24) рассчитаем кинематические характеристики комбинированного режима движения формовочной тележки по ускорению третьего порядка. По результатам вычислений построены графики изменения перемещения (рис. 1а), скорости (рис. 1б), ускорения (рис. 1с) и рывка (рис. 1д) при комбинированном режиме движения формовочной тележки от одного крайнего положения до другого.

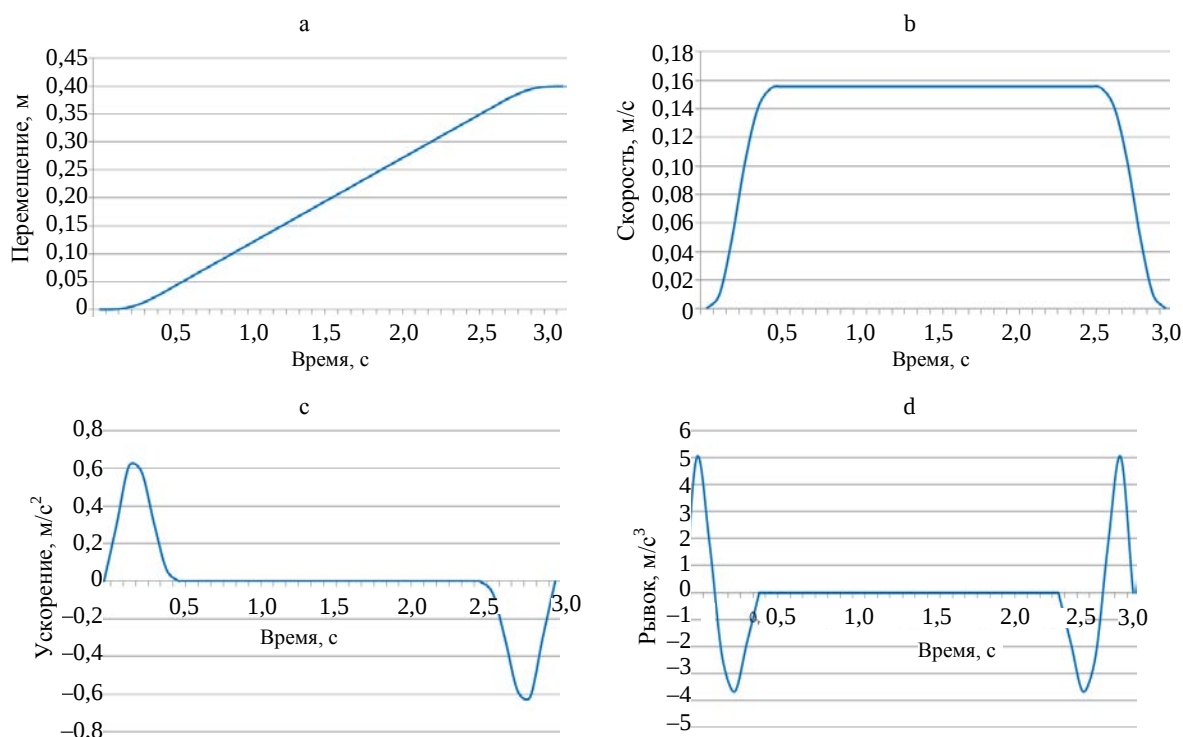


Рис. 1. Изменения перемещения (а), скорости (б), ускорения (с) и рывка (д) при комбинированном режиме движения тележки по ускорению третьего порядка

Fig. 1. Changes in motion (a), speed (b), acceleration (c) and hitch (d) while using combined mode of carriage motion according to acceleration of 3rd order

Преобразовав первые уравнения выражений (22)–(24) для случая, когда начало координат отсчитывается от среднего положения перемещения формовочной тележки, получим:

– на участке разгона

$$x_p = 252\Delta x \left(-\frac{2160}{7} \cdot \frac{t^3}{t_0^3} + 216 \frac{t^2}{t_0^2} - 54 \frac{t}{t_0} + 5 \right) \times \times \frac{t^4}{t_0^4} - \frac{\Delta x}{2}; \quad (25)$$

– на участке установившегося движения

$$x_y = \frac{1}{9} \Delta x \left(1 + \frac{21}{2} \cdot \frac{t}{t_0} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (26)$$

– на участке торможения

$$x_t = \frac{\Delta x}{2} - \frac{7}{6} \Delta x \left(\frac{466560}{7} \cdot \frac{t^7}{t_0^7} - 31104 \frac{t^6}{t_0^6} + 3888 \frac{t^5}{t_0^5} - \frac{t}{t_0} + \frac{2}{21} \right). \quad (27)$$

Закон движения тележки, описанный уравнениями (25)–(27), может быть осуществлен приво-

дом с кулачковым механизмом (рис. 2) возвратно-поступательного движения тележки. При этом движение тележки в одном направлении осуществляется за счет поворота кулачка на половину оборота (т. е. $\varphi = \pi$) и в возвратном направлении еще на половину оборота; полный цикл движения тележки – за один оборот кулачка.

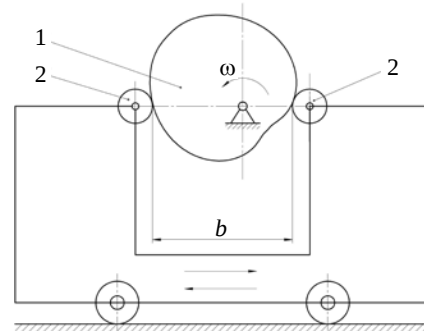


Рис. 2. Схема механизма с кулачковым приводом возвратно-поступательного движения тележки: 1 – кулачок; 2 – толкатель; b – расстояние между толкателями; ω – угловая скорость кулачка

Fig. 2. Scheme of mechanism with cam drive for reciprocating movement of carriage: 1 – cam; 2 – pusher mechanism; b – distance between pusher mechanisms; ω – rate of cam angular motion

Для осуществления описанного закона движения тележки необходимо, чтобы приращение радиуса кулачка соответствовало приращению перемещения тележки. Согласно этому переменный радиус кулачка определяется зависимостями:

– на участке разгона

$$\rho = \frac{b}{2} + 252\Delta x \left(-\frac{2160}{7} \cdot \frac{t^3}{t_0^3} + 216 \frac{t^2}{t_0^2} - 54 \frac{t}{t_0} + 5 \right) \times \left(\frac{t^4}{t_0^4} - \frac{\Delta x}{2} \right); \quad (28)$$

– на участке установившегося движения

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1}{9}\Delta x \left(1 + \frac{21}{2} \cdot \frac{t}{t_0} \right) - \frac{\Delta x}{2}; \quad (29)$$

– на участке торможения

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{7}{6}\Delta x \left(\frac{466560}{7} \cdot \frac{t^7}{t_0^7} - 31104 \frac{t^6}{t_0^6} + 3888 \frac{t^5}{t_0^5} - \frac{t}{t_0} + \frac{2}{21} \right); \quad (30)$$

где b – расстояние между толкателями (рис. 2).

Время t можно исключить из (28)–(30), так как $t = \varphi/\omega$, а $t_1 = \pi/\omega$ (где φ – угловая координата поворота кулачка; ω – угловая скорость кулачка). Поскольку время разгона формовочной тележки определяется зависимостью $t_p = \frac{1}{6}t_0$, то процесс разгона будет осуществляться поворотом кулачка на угол в пределах от $\varphi = 0$ до $\varphi = \pi/6$; время установившегося движения $t_y = \frac{2}{3}t_0$. Тогда установившееся движение тележки обеспечится поворотом кулачка на угол в пределах от $\varphi = \pi/6$ до $\varphi = 5\pi/6$; время торможения $t_t = \frac{1}{6}t_0$. Итак, процесс торможения будет осуществляться поворотом кулачка на угол в пределах от $\varphi = 5\pi/6$ до $\varphi = \pi$. После соответствующих преобразований радиус кулачка, который описывает его профиль, связывается с угловой координатой следующими выражениями:

$$\rho = \frac{b}{2} + 252\Delta x \left(-\frac{2160}{7} \cdot \frac{\varphi^3}{\pi^3} + 216 \frac{\varphi^2}{\pi^2} - 54 \frac{\varphi}{\pi} + 5 \right) \times \left(\frac{\varphi^4}{\pi^4} - \frac{\Delta x}{2} \right), \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{6}; \quad (31)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{1}{9}\Delta x \left[1 + \frac{21}{2} \left(\varphi - \frac{\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} \right] - \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{5\pi}{6}; \quad (32)$$

$$\rho = \frac{b}{2} + \frac{\Delta x}{2} - \frac{7}{6}\Delta x \left[\frac{466560}{7} \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^7 \frac{1}{\pi^7} - 31104 \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^6 \frac{1}{\pi^6} + 3888 \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right)^5 \frac{1}{\pi^5} - \left(\varphi - \frac{5\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} + \frac{2}{21} \right], \quad \frac{5\pi}{6} < \varphi \leq \pi. \quad (33)$$

Аналогично определяется профиль кулачка на участке его поворота от π до 2π , который описывается радиусом, изменяющимся по зависимостям:

$$\rho = \frac{b}{2} - 252\Delta x \left(-\frac{2160}{7} \cdot \frac{(\varphi - \pi)^3}{\pi^3} + 216 \frac{(\varphi - \pi)^2}{\pi^2} - 54 \frac{(\varphi - \pi)}{\pi} + 5 \right) \frac{(\varphi - \pi)^4}{\pi^4} + \frac{\Delta x}{2}, \quad \pi \leq \varphi \leq \frac{7\pi}{6}; \quad (34)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{1}{9}\Delta x \left[1 + \frac{21}{2} \left(\varphi - \frac{7\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} \right] + \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{7\pi}{6} < \varphi < \frac{11\pi}{6}; \quad (35)$$

$$\rho = \frac{b}{2} - \frac{\Delta x}{2} + \frac{7}{6} \Delta x \left[\frac{466560 \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^7}{7} \frac{1}{\pi^7} - 31104 \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^6 \frac{1}{\pi^6} + \right. \\ \left. + 3888 \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right)^5 \frac{1}{\pi^5} - \left(\varphi - \frac{11\pi}{6} \right) \frac{1}{\pi} + \frac{2}{21} \right], \quad \frac{11\pi}{6} < \varphi \leq 2\pi. \quad (36)$$

Для предотвращения ударов кулачка о толкатель при изменении направления движения тележки описанный уравнениями (31)–(36) профиль кулачка (рис. 3) имеет такой вид, что в любом положении его диаметр d – величина постоянная и равна расстоянию между толкателями b ($d = b$).

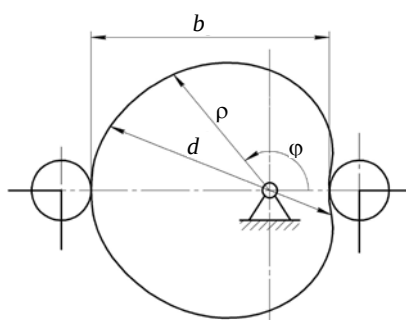


Рис. 3. Профиль кулачка, реализующий комбинированный режим движения по ускорению третьего порядка:

b – расстояние между толкателями; d, ρ – диаметр и радиус кулачка; φ – угловая координата поворота кулачка

Fig. 3. Cam profile realizing combined motion mode according to acceleration of 3rd order:

b – distance between pusher mechanisms; d, ρ – diameter and radius of cam; φ – angular coordinate of cam turning

С целью уменьшения динамических нагрузок в элементах установки, повышения ее надежности и обеспечения комбинированного режима движения формовочной тележки по ускорению третьего порядка предложена конструкция роликовой формовочной установки с кулачковым приводным механизмом (рис. 4). Приводной механизм исполнен в виде шарнирно установленных на портале кулачковых механизмов, которые контактируют с толкателями, жестко прикрепленными к формовочной тележке.

Установка состоит из смонтированной на неподвижном портале 1 формовочной тележки 2, вмещающей в себя подавальный бункер 3 и укатывающие ролики 4 и осуществляющей возвратно-поступательные движения в направляющих 5 над пустотой формы 6. Тележка приводится в движение с помощью двух приводов 7, прикрепленных к portalу в виде кулачковых механизмов, вращающихся с постоянной угло-

вой скоростью ($\omega = \text{const}$), но разной по направлению, и контактирующих с двумя толкателями 8, жестко соединенными с рамой тележки. Сами же кулачки 7 приводятся во вращательное движение от двигателей 9.

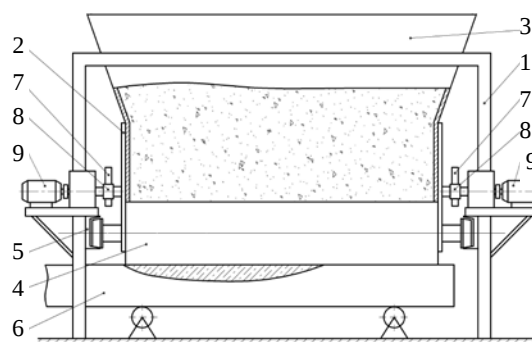


Рис. 4. Роликовая формовочная установка с кулачковым приводным механизмом

Fig. 4. Roller forming installation with cam driving mechanism

Наличие двух толкателей с каждой стороны формовочной тележки позволяет создавать жесткую силовую цепь при ее прямом и возвратном движении. При использовании в установке кулачкового приводного механизма с каждой стороны формовочной тележки предотвращается возможность ее осевого перекашивания, что повышает качество обрабатываемой бетонной смеси, уменьшает динамические нагрузки в элементах привода и лишние разрушительные нагрузки на рамную конструкцию и соответственно увеличивает долговечность установки в целом.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований с целью повышения надежности и долговечности роликовой формовочной установки рассчитан комбинированный режим возвратно-поступательного движения формовочной тележки по ускорению третьего порядка.

2. Разработана конструкция привода установки в виде кулачкового механизма и построен профиль кулачка для обеспечения комбинированного режима возвратно-поступательно-

го движения формовочной тележки по ускорению третьего порядка.

3. Результаты работы могут быть использованы для уточнения и усовершенствования существующих инженерных методов расчета приводных механизмов машин роликового формования как на стадиях проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарнець, В. М. Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси / В. М. Гарнець. Київ: Будівельник, 1991. 144 с.
2. Кузин, В. Н. Технология роликового формования плоских изделий из мелкозернистых бетонов / В. Н. Кузин. М., 1981. 20 с.
3. Рюшин, В. Т. Исследование рабочего процесса и разработка методики расчета машин роликового формования бетонных смесей / В. Т. Рюшин. Киев, 1986. 219 с.
4. Ловеikin, В. С. Аналіз нерівномірності руху роликової формовочної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловеikin, К. І. Почка // Підійомно-транспортна техніка. 2005. Вип. 4. С. 19–33.
5. Ловеikin, В. С. Визначення оптимального значення кута зміщення кривошипів роликової формувальної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловеikin, К. І. Почка // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2007. Вип. 41. С. 127–134.
6. Ловеikin, В. С. Оптимізація конструктивних параметрів приводного механізму роликової формувальної установки з енергетично зрівноваженим приводом / В. С. Ловеikin, К. І. Почка // MOTROL. Motorization and Power Industry in Agriculture, Lublin. 2010. Vol. 12B. P. 9–18.
7. Гарнец, В. Н. Оценка эффективности конструкций машин роликового формования / В. Н. Гарнец, В. С. Ловеikin // Горные, строительные и дорожные машины: Респ. межвед. науч.-техн. сб. Киев: Техніка, 1988. Вип. 41. С. 51–55.
8. Ловеikin, В. С. Динамічний аналіз роликової формовочної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловеikin, К. І. Почка // Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: пр. І-ї Міжнар. наук.-техніч. конф. (DSR AM-I). Тернопіль, 2004. С. 507–514.
9. Ловеikin, В. С. Силовий аналіз роликової формовочної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловеikin, К. І. Почка // Техніка будівництва. 2003. № 14. С. 27–37.
10. Ловеikin, В. С. Результати експериментальних досліджень режимів руху роликової формувальної установки з рекуперативним приводом / В. С. Ловеikin, К. І. Почка // Вісник Харківського націон. ун-ту сільс. господ. ім'я П. Василенка. 2007. Т. 1, № 59. С. 465–474.
11. Ловеikin, В. С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин / В. С. Ловеikin. Киев: УМК ВО, 1990. 168 с.

Поступила 14.09.2016

Подписана в печать 22.11.2016

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Garnets V. N. (1991) *Advanced Concrete-Molding Assembly Unit and Complexes*. Kiev, Budivelnik Publ. 144 (in Ukrainian).
2. Kuzin V. N. (1981) *Technology for Rolling Molding of Flat Products Made of Fine Grained Concrete*. Moscow. 20 (in Russian).
3. Riushin V. T. (1986) *Investigation of Operating Process and Development of Calculation Methodology for Concrete Mix Rolling Moulding Machines*. Kiev, 1986. 219 (in Russian).
4. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2005) Analysis of Non-uniform Motion of Rolling Molding Assembly Unit with Recuperation Drive. *Pidiomno-Transportna Tekhnika* [Hoisting and Transportation Equipment], (4), 19–33 (in Ukrainian).
5. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2007) Determination of Optimum Offset Angle Value for Cranks of Rolling Molding Assembly Unit with Recuperation Drive. *Avtomatizatsiya Virobnichikh Protsesiv u Mashinobuduvanni ta Priladobuduvanni: Ukraïns'kii Mizhvidomchii Naukovo-Tekhnichnii Zbirnik* [Automation of Industrial Processes in Mechanical and Instrument Engineering. Ukrainian Interdepartmental Scientific and Technical Collection]. Lviv, Publishing House Lviv Polytechnic National University, (41), 127–134 (in Ukrainian).
6. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2010) Optimization of Constructive Parameters for Driving Mechanism in Rolling Molding Assembly Unit with Energetically-Balanced Drive. *MOTROL. Motorization and Power Industry in Agriculture*. Lublin, 12B, 9–18 (in Ukrainian).
7. Garnets V. N., Loveykin V. S. (1988) Evaluation of Design Efficiency for Rolling Molding Machines. *Gornye, Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny: Resp. Mezhd. Nauch.-Tekhn. Sb.* [Mining, Construction and Road-Building Machinery: Republican Inter-Ministerial Scientific and Technical Collected Volume], (41), 51–55 (in Ukrainian).
8. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2004) Dynamic Analysis of Rolling Molding Assembly Unit with Recuperation Drive. *Dinamika, Mitsnist' i Nadiinist' Sil'skogospodars'kikh Mashin: Pr. I-i Mizhnar. Nauk.-Tekhnich. Konf. (DSR AM-I)* [Dynamics, Capacity and Reliability of Agricultural Machines: Proceedings of the 1st International Scientific and Technical Conference (DSR AM-I)]. Ternopil, 507–514 (in Ukrainian).
9. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2003) Force Analysis of Rolling Molding Assembly Unit with Recuperation Drive. *Tekhnika Budivnitsva* [Construction Equipment], (14), 27–37 (in Ukrainian).
10. Loveykin V. S., Pochka K. I. (2007) Results of Experimental Investigations on Motion Modes of Rolling Molding Assembly Unit with Recuperation Drive. *Visnik Kharkivskogo Natsionalnogo Universitetu Sil'skogo Gospodarstva imia P. Vasilenka* [Bulletin of Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture], 1 (59), 465–474 (in Ukrainian).
11. Loveykin V. S. (1990) *Calculation for Optimum Modes of Mechanism Motion in Building Machines*. Kiev: Publishing House "UMK VO". 168 (in Russian).

Received: 14.09.2016

Accepted: 22.11.2016

Published online: 30.05.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224

УДК 681.7.023.72

Технологические особенности процесса одновременной двусторонней обработки высокоточных линз малой жесткости

Доктора техн. наук, профессора А. С. Козерук¹⁾, И. П. Филонов¹⁾,
канд. техн. наук, доц. М. И. Филонова¹⁾, студ. Н. С. Власовец¹⁾, асп. Д. Л. Мальпика¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Обоснована целесообразность использования при изготовлении линз малой жесткости станков, позволяющих одновременно обрабатывать обе исполнительные поверхности оптических деталей. При этом происходит не только улучшение качества деталей из-за исключения их деформации на стадии блокировки, но и существенное повышение производительности процесса формообразования высокоточных нетехнологических оптических элементов, а также снижение энергозатрат на единицу продукции. Приведена принципиальная схема станка для одновременной двусторонней обработки оптических деталей со сферическими поверхностями в условиях свободного притирания. Описана сущность метода свободного притирания, являющегося одним из наиболее распространенных в оптическом приборостроении при получении деталей с прецизионными исполнительными поверхностями. Изложена методика определения наладочных параметров технологического оборудования, обеспечивающих равномерный съем припуска по всей обрабатываемой поверхности, а также усиленное его удаление как в центральной зоне заготовки, так и на ее периферии, что необходимо для исправления макропогрешностей в виде «бугра» и «ям». Предложена методика определения чувствительности интенсивности съема припуска к изменениям наладочных параметров станка и эффективности этих параметров при исправлении макропогрешностей линзы. Выявлено, что максимальная чувствительность съема припуска имеет место в случае изменения диаметра инструмента. Что касается эффективности наладочных параметров технологического оборудования, то установлено, что для исправления макропогрешностей в виде «бугра» и «ям» наиболее целесообразно изменять соотношение частот вращения инструмента и детали. Проведены экспериментальные испытания обработки линз, которые удовлетворительно коррелируют с результатами теоретических исследований.

Ключевые слова: оптические детали, свободное притирание, макропогрешность, наладочные параметры, интенсивность съема припуска, технологическое оборудование

Для цитирования: 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. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224

Technological Distinctive Features Pertaining to Process of Simultaneous Two-Sided Machining of High-Precision Lenses Having Low Stiffness

A. S. Kozeruk¹⁾, I. P. Filonov¹⁾, M. I. Filonova¹⁾, N. S. Vlasovetz¹⁾, D. L. Malpika¹⁾

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

Abstract. The paper contains substantiated expediency in application of machine tools for manufacturing lenses with low stiffness which make it possible to process simultaneously both actuating surfaces of optical parts. While doing so there is a possibility not only to improve quality of parts due to exclusion of their deformation at the blocking stage but there is also a possibility to ensure significant increase in productivity of the process which pre-supposes shape-formation of high-precision non-process optical elements and also to decrease energy consumption per unit of production. A basic diagram of the machine tool for simultaneous processing of two-sided optical parts with spherical surfaces under conditions of free lapping is presented

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

in the paper. The paper describes the essence of the free lapping method which is one of the most widely used methods in optical instrument-making while obtaining parts with precision actuating surfaces. Methodology for determination of technological equipment settings that ensure uniform stock removal along the whole surface to be machined and also its forced removal as in the central zone of a work-piece, so along its periphery and it is necessary in order to correct macro defects in the form of "hump" or "hole". The paper proposes methodology for determination of sensitivity in stock removal intensity in respect of changes pertaining to machine tool settings and efficiency of these settings while making corrections of lens macro defects. It has been revealed that maximum sensitivity in stock removal occurs in the case when we change a tool diameter. As for efficiency of the technological equipment settings it has been established that in order to rectify macro defects in the form "hump" or "pit" it is more expedient to change rotation ratio of the tool and the part. Experimental tests on lens processing have been executed and they adequately correlate with the results of theoretical investigations.

Keywords: optical parts, free lapping, macro defect, settings, intensity in stock removal, technological equipment

For citation: Kozeruk A. S., Filonov I. P., Filonova M. I., Vlasovetz N. S., Malpika D. L. (2017) Technological Distinctive Features Pertaining to Process of Simultaneous Two-Sided Machining of High-Precision Lenses Having Low Stiffness. *Science and Technique*. 16 (3), 215–224. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-215-224 (in Russian)

Введение

Половина силовых оптических деталей (линз) (двояковогнутые, плоско-вогнутые и отрицательные мениски) относится к нетехнологическим оптическим элементам из-за их невысокой жесткости, обусловленной малой толщиной по центру. При закреплении заготовок таких линз на блокировочный инструмент с помощью наклеенного вещества, которое в классической технологии односторонней обработки наносится на одну из исполнительных поверхностей заготовки, после остывания блока происходит упругая деформация последней, вызванная различными значениями температурных коэффициентов линейного расширения металла, наклеенного вещества и стекла. После разблокировки блока наступает релаксация напряжений в стекле и достигнутая точность обработки поверхности линзы снижается [1]. Для устранения этой проблемы используют так называемый прием разгрузки линзы. Сущность его сводится к тому, что на центральную зону поверхности заготовки, на которую будет наноситься наклеенное вещество, помещают бумажный кружок диаметром примерно 1/3 диаметра линзы. Деформация заготовки при этом уменьшается, но не полностью [2].

Более эффективным в данном случае является крепление линзы за ее нерабочую цилиндрическую поверхность. Такое крепление освобождает обе сферические поверхности детали и позволяет реализовать прогрессивную технологию одновременной двусторонней ее обработки. При использовании предлагаемой технологии происходит не только улучшение качества деталей из-за исключения их дефор-

мации на стадии блокировки, но и существенное (по меньшей мере, в два раза) повышение производительности процесса формообразования высокоточных нетехнологических оптических деталей типа линз, а также снижение энергозатрат на единицу продукции [3].

Описание технологического оборудования

Для реализации отмеченного метода одновременной двусторонней обработки линз предлагается технологическое оборудование, схема которого показана на рис. 1 [4].

Станок работает следующим образом. Линзу 6 неподвижно закрепляют в сепараторе 5, на ее обрабатываемые поверхности устанавливают инструменты 8, 9 с поводками 26, 27, приводят в контакт с последними валы электродвигателя 30, 31 вместе с электродвигателями 28, 29 и штангами 24, 25, нагружают последние грузами 32, 33, создавая необходимое рабочее усилие, и включают электродвигатели 4, 10, 11, 28, 29. Крутящий момент от электродвигателя 4 через вал 3, ведущее зубчатое колесо 2 и сепаратор 5, снабженный зубчатым винтом 7, вызывает вращение линзы, а крутящие моменты от электродвигателей 28, 29 через вал электродвигателей 30, 31 и поводки 26, 27 – вращение инструментов 8, 9.

Крутящие моменты от электродвигателей 10, 11 через входные валы 12, 13, кривошипные диски 14, 15, пальцы 16, 17, шатуны 18, 19, рычаги 20, 21, валы штанг 22, 23, установленных в основании 1, штанги 24, 25 и поводки 26, 27 вызывают возвратно-вращательное перемещение инструментов 8, 9 по обрабатываемым поверхностям линзы.

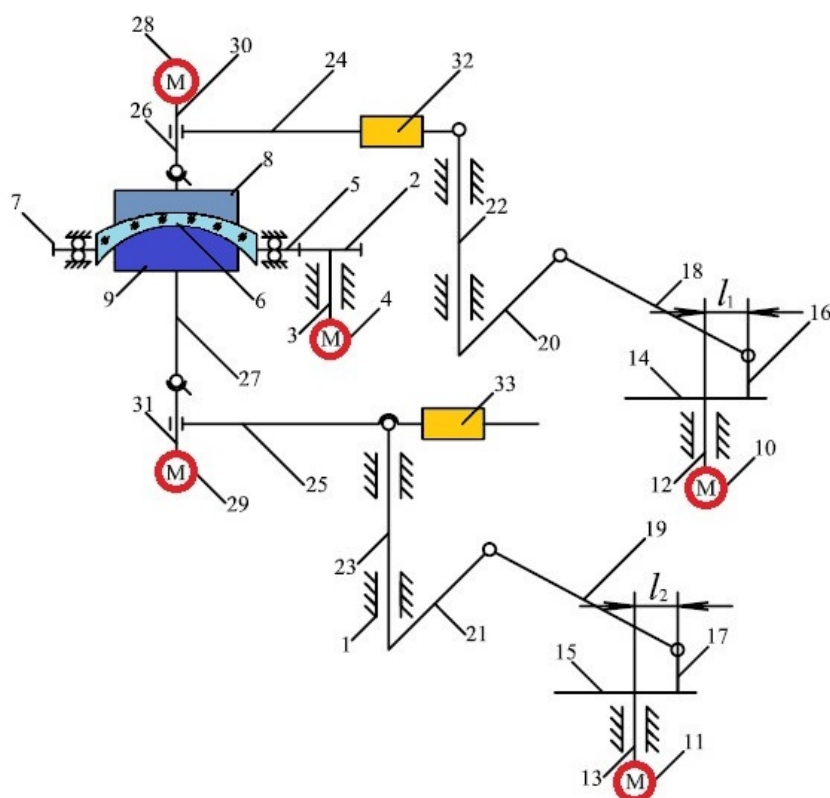


Рис. 1. Схема станка для двусторонней обработки линз

Fig. 1. Scheme of machine for double-sided lens processing

Для управления величиной съема припуска в той или иной зоне исполнительных поверхностей линзы в процессе ее обработки производят независимое регулирование следующих наладочных параметров станка: рабочего усилия посредством перемещения вдоль осей штанг 24, 25 грузов 32, 33, амплитуды возвратно-вращательных перемещений инструментов 8, 9 по поверхностям линзы, что обеспечивается регулированием расстояний l_1 , l_2 между осями симметрии пальцев 16, 17 и входных валов 12, 13, а также количества двойных ходов в минуту инструментов, что достигается изменением скорости вращения входных валов 12, 13 посредством электродвигателей 10, 11.

Технология обработки прецизионных сферических поверхностей

При использовании предлагаемого технического решения обработка происходит по методу свободного притирания. Сущность метода заключается в том, что две поверхности при взаимном притирании самоисправляются

и приобретают правильную геометрическую форму одинаковой кривизны: либо сферическую (одна выпуклая, другая вогнутая), либо плоскую. Причем на стадии шлифования заготовка притирается к обрабатываемой поверхности твердого шлифовальника, а при полировании смолой мягкие подложки полировальника притираются к шлифованной поверхности заготовки стекла [5].

Метод свободного притирания определяется наличием нескольких признаков:

- контакт притирающихся поверхностей инструмента и заготовки обеспечивается силовым замыканием;
- одна из притирающихся поверхностей самоустанавливается на другой благодаря наличию шарового шарнира;
- наладочные параметры станка выбирают так, чтобы все точки на притирающихся поверхностях инструмента и детали находились в многократном аperiodическом контакте.

Для получения поверхности заданной кривизны в методе свободного притирания в процессе обработки регулируют следующие наладочные

дочные параметры станка: величину амплитуды возвратно-вращательного движения инструмента по детали L и число его двойных ходов в единицу времени (определяемое частотой вращения входного звена исполнительного механизма станка ω_2); частоту вращения линзы ω_n , а также величины диаметра инструмента d_n и рабочего усилия F . Причем в каждом сеансе регулирования параметров изменяют один (максимум два) из них. Невыполнение последнего требования вызывает нарушение геометрической формы обрабатываемой поверхности [6].

Выбор наиболее эффективного наладочного параметра и величину его изменения в каждом конкретном случае в классической технологии опытным путем определяет рабочий-оптик. Однако не всегда это бывает удачно, что приводит к увеличению времени получения детали. При одновременной двусторонней обработке линзы с разными радиусами кривизны по величине и по знаку, а также с неодинаковыми параметрами качества экспериментальное определение оптимальных наладочных параметров станка крайне затруднительно.

С целью устранения отмеченных недостатков по выбору эффективных наладочных параметров технологического оборудования и их величины предлагается трудоемкие натурные эксперименты заменить расчетами на ЭВМ. Для этого выполнено математическое моделирование геометрических и кинематических связей разработанного станка для одновременной двусторонней обработки линз и его рабочей зоны. В результате получены аналитические выражения для расчета скорости скольжения u в произвольно выбранной опорной точке M на обрабатываемой поверхности и давления p в окрестности этой точки. Используя эти параметры, по формуле Ф. Престона [7] рассчитывали величину съема материала с заготовки в точке M

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

где k – технологический коэффициент, зависящий от условий обработки и износостойкости материала заготовки; t – время обработки.

Расчет величины съема материала, пропорциональной параметру $Q = up$, проводили в

опорных точках диаметрального сечения обрабатываемой поверхности линзы, выбранных согласно методике, приведенной в [8]. Использовали линзу типа отрицательный мениск с параметрами: $R_1 = 120,85$ мм; $d_1 = 100$ мм (R_1 и d_1 – радиус кривизны и диаметр выпуклой поверхности) и $R_2 = 50,34$ мм; $d_2 = 80$ мм (R_2 и d_2 – радиус кривизны и диаметр вогнутой поверхности).

Результаты исследования и их обсуждение

При определении оптимальных наладочных параметров станка использовали следующую методику. Учитывая геометрические характеристики выбранной линзы и практику работы оптических цехов [9], назначили следующие средние значения наладочных параметров станка для выпуклой поверхности линзы: $L = 60$ мм; $\omega_n/\omega_l = 0,8$; $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹; $\omega_l = 6$ с⁻¹ (где ω_n – скорость вращения инструмента). Первоначально определяли наиболее выгодное значение d_n , при котором происходит равномерный съем припуска по обрабатываемой поверхности, т. е. значения Q в центре последней и на ее краю равны. Затем таким же образом поочередно выявляли оптимальные значения других наладочных параметров при средней величине остальных из них.

Результаты расчета представлены на рис. 2. Здесь кривые 2, 5, 8, 11 и 14 отображают процесс обработки, при котором происходит равномерный съем припуска по всей поверхности линзы на стадии выхаживания (на заключительной стадии финишной обработки – полирования), что требуется для повышения частоты исполнительной поверхности детали после достижения заданной ее геометрической формы (заданной точности). Для линзы с рассматриваемыми параметрами такая обработка имеет место при: $\omega_l = 8$ с⁻¹; $\omega_n/\omega_l = 0,7$; $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹; $L = 50$ мм и $d_n = 80$ мм. Однако на начальных стадиях как финишного шлифования, так и полирования, когда необходимо обеспечить усиленный съем припуска в краевой зоне линзы, наладочные параметры станка рекомендуется назначать следующими: $\omega_l = 7,1$ с⁻¹; $\omega_n/\omega_l = 0,61$; $\omega_2 = 4,1$ с⁻¹; $L = 52$ мм и $d_n = 81,7$ мм (соответственно кривые 3, 6, 9, 12, 15, рис. 2). Если же требуется исправить макропогрешность обрабатываемой поверхности линзы в виде общего

«бугра», следует принимать: $\omega_n = 8,7 \text{ с}^{-1}$; $\omega_n/\omega_n = 0,74$; $\omega_2 = 5,3 \text{ с}^{-1}$; $L = 45,4 \text{ мм}$ и $d_n = 77,1 \text{ мм}$ (соответственно кривые 1, 4, 7, 10, 13, рис. 2).

Неравномерное распределение параметра Q на рис. 2 вызвано большими значениями скорости скольжения в шаровом слое сферической поверхности линзы по сравнению с ее центральной и краевой зонами и обусловлено особенностями обработки по методу свободного притирания, когда в процессе относительного

движения притирающихся поверхностей максимальная площадь их взаимного перекрытия имеет место именно в шаровом слое.

Однако в реальном процессе обработки происходит автоматическое нивелирование отмеченного экстремума: увеличение скорости скольжения в шаровом слое вызывает усиление съема материала в этой зоне, что уменьшает активную площадь соприкосновения детали и инструмента в данной их части.

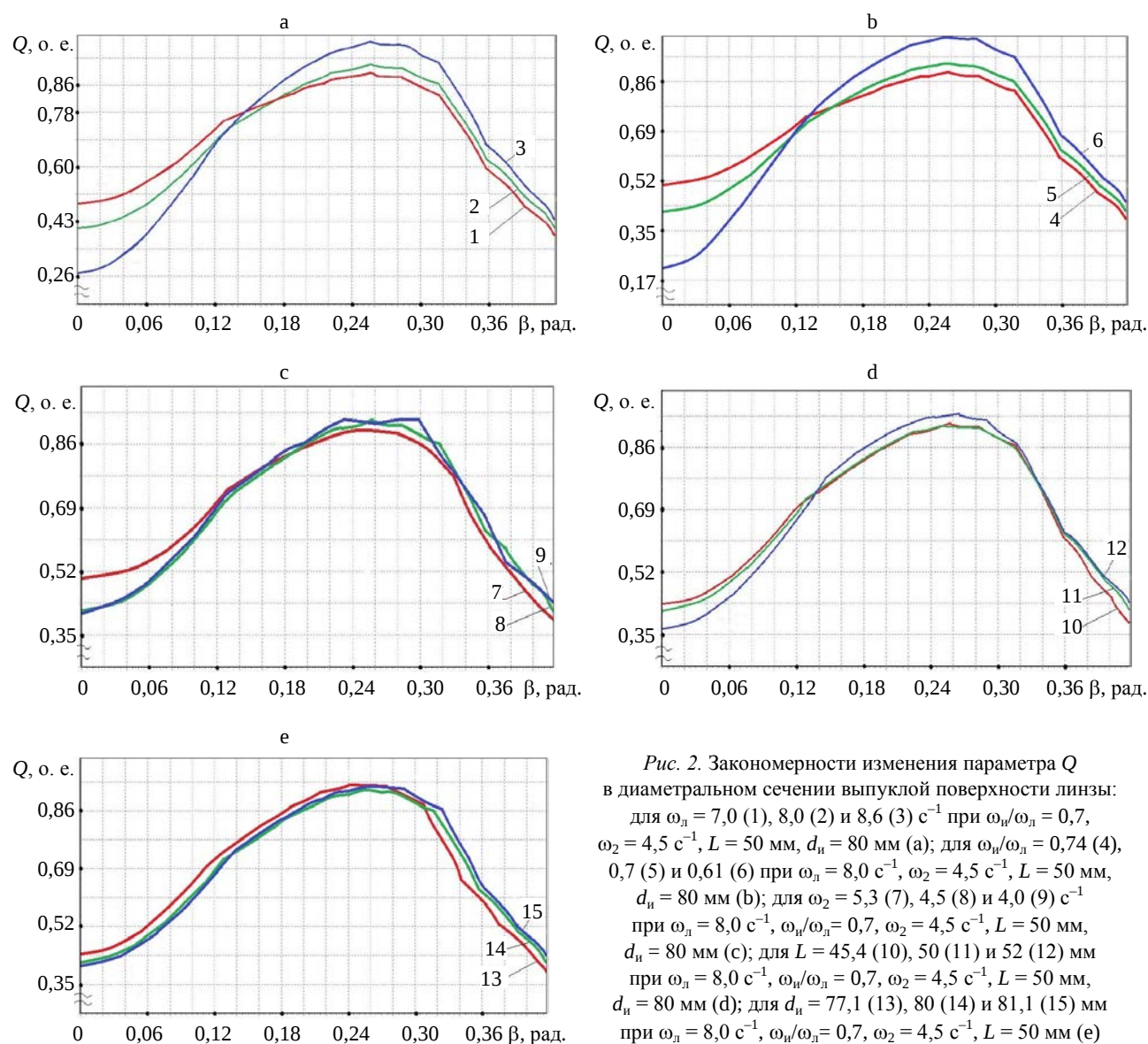


Рис. 2. Закономерности изменения параметра Q в диаметральном сечении выпуклой поверхности линзы: для $\omega_n = 7,0$ (1), $8,0$ (2) и $8,6$ (3) с^{-1} при $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (а); для $\omega_n/\omega_n = 0,74$ (4), $0,7$ (5) и $0,61$ (6) при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (б); для $\omega_2 = 5,3$ (7), $4,5$ (8) и $4,0$ (9) с^{-1} при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (с); для $L = 45,4$ (10), 50 (11) и 52 (12) мм при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (д); для $d_n = 77,1$ (13), 80 (14) и $81,1$ (15) мм при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$ (е)

Fig. 2. Regularities for changes of Q parameter in diametral section of convex lens surface: for $\omega_n = 7.0$ (1), 8.0 (2) and 8.6 (3) s^{-1} when $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_n = 80 \text{ mm}$ (a); for $\omega_n/\omega_n = 0.74$ (4), 0.7 (5) and 0.61 (6) when $\omega_n = 8.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_n = 80 \text{ mm}$ (b); for $\omega_2 = 5.3$ (7), 4.5 (8) and 4.0 (9) s^{-1} when $\omega_n = 8.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_n = 80 \text{ mm}$ (c); for $L = 45.4$ (10), 50 (11) and 52 (12) mm when $\omega_n = 8.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$, $d_n = 80 \text{ mm}$ (d); for $d_n = 77.1$ (13), 80 (14) and 81.1 (15) mm when $\omega_n = 8.0 \text{ s}^{-1}$, $\omega_n/\omega_n = 0.7$, $\omega_2 = 4.5 \text{ s}^{-1}$, $L = 50 \text{ mm}$ (e)

В результате рабочее усилие, приложенное к инструменту, перераспределяется таким образом, что оно увеличивается в центре и на краю детали, вызывая там повышение интенсивности съема припуска. Такое непрерывное перераспределение давления между притирающимися поверхностями лежит в основе самоорганизации процесса формообразования в условиях свободного притирания, который относится к одному из наиболее точных методов обработки [10].

При проведении численных исследований каждый из наладочных параметров станка изменяли на величину, при которой происходило одинаковое отклонение Q по краю линзы от его оптимального значения (от средней кривой на рис. 2) в случаях более интенсивного съема припуска как в краевой, так и в центральной зонах обрабатываемой поверхности (при исправлениях макропогрешности в виде общих соответственно «ямы» и «бугра»). В проводимых исследованиях принимали отклонение $\Delta Q = 0,02$. В результате появилась возможность проанализировать чувствительность Q к изменениям наладочных параметров технологического оборудования, которая представляет собой величину изменения ΔQ , приходящуюся на единицу относительного изменения того или иного наладочного параметра ΔN :

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

Результаты расчета коэффициента σ приведены в табл. 1.

Параметр ΔN определяли как частное деления разности значений измененного N' и исходного N_0 наладочных параметров на его исходное значение. В качестве N_0 и N' брали величины наладочных параметров, при которых происходил равномерный съем припуска по всей обрабатываемой поверхности и возникали отклонения этой поверхности от правильной геометрической формы в виде общих «бугра» или «ямы»

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

Из анализа данных табл. 1 следует, что максимальная чувствительность Q имеет место в

случае изменения диаметра инструмента, причем в большей степени при исправлении общей «ямы» по сравнению с исправлением общего «бугра». Остальные наладочные параметры с точки зрения чувствительности Q расположены в такой последовательности: ω_n/ω_l , L , ω_l , ω_2 – для исправления «бугра» и L , ω_l , ω_2 , ω_n/ω_l – для исправления «ямы».

Таблица 1

Значения σ для выпуклой поверхности линзы радиусом $R = 120,85$ мм

Values σ for convex lens surface with radius $R = 120.85$ mm

Исправление макропогрешности в виде			
общего «бугра»		общей «ямы»	
Наладочный параметр	σ	Наладочный параметр	σ
d_n	0,555	d_n	1,540
ω_n/ω_l	0,350	L	0,500
L	0,217	ω_l	0,266
ω_l	0,160	ω_2	0,180
ω_2	0,113	ω_n/ω_l	0,156

С целью выявления эффективности рассматриваемых наладочных параметров технологического оборудования с точки зрения интенсивности съема припуска с заготовки определим абсолютную величину показателя k , представляющего собой разность значений параметра Q в краевой ($Q_{кр}$) и центральной ($Q_{ц}$) зонах обрабатываемой поверхности линзы

$$k = |Q_{ц} - Q_{кр}|. \quad (4)$$

Значения k , вычисленные по графикам рис. 1, приведены в табл. 2.

Из сравнительного анализа данных табл. 2 и рис. 1 можно заключить, что для усиления съема припуска в центральной зоне обрабатываемой поверхности наиболее целесообразно увеличить частоту переносного (колебательного) движения инструмента. Менее эффективным является увеличение отношения ω_n/ω_l , т. е. повышение частоты вращения инструмента или уменьшение частоты вращения линзы.

Таблица 2
Значения k для выпуклой поверхности линзы
радиусом $R = 120,85$ мм

Values k for convex lens surface
with radius $R = 120.85$ mm

Исправление макропогрешности в виде			
общего «бугра»		общей «ямы»	
Наладочный параметр	k	Наладочный параметр	k
ω_2	0,120	ω_n/ω_l	0,222
ω_n/ω_l	0,114	ω_l	0,166
ω_l	0,097	L	0,062
d_n	0,044	d_n	0,033
L	0,039	ω_2	0,020

Однако следует учесть, что увеличение числа двойных ходов в единицу времени инструмента (повышение частоты его колебательного движения) приводит к усилению влияния динамических нагрузок (зазоров в шарнирах исполнительного механизма станка) на процесс обработки, в итоге появляются локальные погрешности на поверхности линзы. Эти погрешности – несимметричные, их невозможно компенсировать на стадии юстировки оптической системы прибора. Следовательно, для исправления макропогрешности в виде общего «бугра» целесообразно увеличивать отношение ω_n/ω_l . Реализовать эту рекомендацию в классической технологии обработки оптических деталей не представляется возможным, поскольку в существующих станках для оптической промышленности предусмотрено принудительное вращение только одного из притирающихся звеньев, а второе вращается за счет сил трения в зоне контакта этих звеньев. Поэтому при уменьшении частоты вращения линзы, если она закреплена на шпиндель станка, снижается и частота вращения инструмента, а ее следует увеличивать. Это требование диктует необходимость наличия в станке для обработки оптических элементов возможности независимой регулировки частот вращения инструмента и детали. Для исправления макропогрешности в виде общей «ямы» лучше всего, как видно из данных табл. 2 и рис. 1, уменьшить отношение ω_n/ω_l , что является дополнительным аргументом в пользу целесообразности применения технологии обработки линз, предусматривающей принудительное вращение инструмента и детали.

Использование отмеченных параметров для исправления «бугра» и «ямы» можно рекомендовать на стадиях среднего и мелкого (окончательного) полирования линз, где с обрабатываемой поверхности требуется обеспечить съем припуска значительной величины. На операции же финишной обработки – полирования, в процессе которой необходимо достичь заданной точности детали, управлять процессом формообразования целесообразно посредством изменения наладочных параметров станка, обеспечивающих более «мягкие» условия съема припуска. В частности, на этапе начального полирования «бугор» необходимо исправлять уменьшением значения ω_l , а «яму» – увеличением L . При окончательном полировании «бугор» следует удалять уменьшением d_n или L , а «яму» – увеличением d_n или уменьшением ω_2 .

Принимая во внимание особенности предлагаемой технологии, при численном исследовании процесса обработки второй (вогнутой) поверхности линзы ее частоту вращения во всех случаях назначали такой же, как и при обработке первой (выпуклой) поверхности. С учетом этого и принятой методики определения рациональных значений режимов обработки выполнен расчет параметра Q для вогнутой поверхности линзы $R = 50,34$ мм диаметром 80 мм. Расчет показал, что равномерный съем припуска с данной поверхности имеет место при: $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$; $\omega_n/\omega_l = 0,7$; $\omega_2 = 3,0 \text{ с}^{-1}$; $L = 30$ мм и $d_n = 79,4$ мм. В случае отклонения рассматриваемой поверхности линзы от заданной геометрической формы необходимо назначать: $\omega_l = 7,1 \text{ с}^{-1}$; $\omega_n/\omega_l = 0,71$; $\omega_2 = 3,4 \text{ с}^{-1}$; $L = 29,1$ мм и $d_n = 79,27$ мм – для исправления «бугра» и $\omega_l = 8,7 \text{ с}^{-1}$; $\omega_n/\omega_l = 0,69$; $\omega_2 = 2,8 \text{ с}^{-1}$; $L = 31,6$ мм и $d_n = 79,49$ мм – для исправления «ямы».

Результаты расчета показателей σ и k для вогнутой поверхности линзы представлены в табл. 3, 4 соответственно. В частности, из табл. 3 видно, что, как и для выпуклой поверхности линзы, максимум чувствительности Q наблюдается при изменении d_n , причем также в большей степени в случае удаления «ямы». Распределение остальных наладочных параметров станка имеет несколько другую по сравнению с выпуклой поверхностью последовательность, а именно: L , ω_n/ω_l , ω_l , ω_2 – для удаления «бугра» и ω_n/ω_l , L , ω_2 , ω_l – для удаления «ямы».

Таблица 3

Значения σ для вогнутой поверхности линзы
радиусом $R = 50,34$ мм

Values σ for concave lens surface
with radius $R = 50.34$ mm

Исправление макропогрешности в виде			
общего «бугра»		общей «ямы»	
Наладочный параметр	σ	Наладочный параметр	σ
d_n	4,70	d_n	8,000
L	0,24	ω_n/ω_l	0,570
ω_n/ω_l	0,18	L	0,150
ω_l	0,06	ω_2	0,120
ω_2	0,06	ω_l	0,064

Таблица 4

Значения k для вогнутой поверхности линзы
радиусом $R = 50,34$ мм

Values k for concave lens surface
with radius $R = 50.34$ mm

Исправление макропогрешности в виде			
общего «бугра»		общей «ямы»	
Наладочный параметр	k	Наладочный параметр	k
L	0,029	L	0,016
ω_l	0,025	ω_l	0,013
ω_n/ω_l	0,023	ω_n/ω_l	0,012
ω_2	0,023	ω_2	0,010
d_n	0,011	d_n	0,008

Что касается эффективности наладочных параметров станка (табл. 4), то их распределение также отличается от такового для выпуклой поверхности, однако параметры эти в данном случае расположены в одинаковой последовательности при исправлении как «бугра», так и «ямы», а именно: L , ω_l , ω_n/ω_l , ω_2 , d_n . Причем первые три параметра можно рекомендовать для использования на стадии шлифования, а остальные два – в процессе полирования.

Для проверки корреляции результатов теоретических исследований (рис. 2) реальному процессу формообразования проведена экспериментальная обработка выпуклой поверхности линзы радиусом кривизны 120,85 мм на стадии мелкого шлифования. В качестве обрабатывающего инструмента использовали алмазный шлифовальник на медной связке с фракцией алмазных зерен 14/10 марки АСМ концентрации 10 %, радиус кривизны которого поддерживали постоянным и равным 120,87 мм. В процессе обработки отклонение радиуса кривизны линзы от номинального значения оценивали по стрелке прогиба, которую измеряли сферометром часового типа с микронной индикаторной головкой и кольцом диаметром 90 мм. Продолжительность шлифования в каждом сеансе составляла 5 мин при рабочем усилии на инструмент 2 Н, при этом исходная стрелка

прогиба h равнялась 8,689 мм. Шлифование выполняли на станке 6ШП-200.

Результаты экспериментальных исследований характера изменения h как функции увеличивающихся и уменьшающихся наладочных параметров станка представлены соответственно на рис. 3, 4.

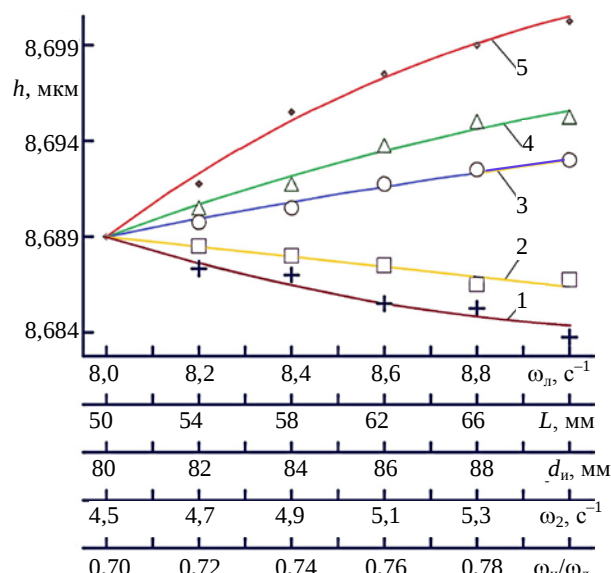


Рис. 3. Закономерности изменения величины стрелки прогиба выпуклой поверхности линзы в зависимости от значения увеличивающихся: ω_n/ω_l при $\omega_l = 8,0$ с⁻¹, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $L = 50$ мм, $d_n = 80$ мм (1); ω_2 при $\omega_l = 8,0$ с⁻¹, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $L = 50$ мм, $d_n = 80$ мм (2); d_n при $\omega_l = 8,0$ с⁻¹, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $L = 50$ мм (3); L при $\omega_l = 8,0$ с⁻¹, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $d_n = 80$ мм (4); ω_l при $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5$ с⁻¹, $L = 50$ мм, $d_n = 80$ мм (5)

Fig. 3. Regularities for changes of deflection value in convex lens surface due to the following increasing values: ω_n/ω_l when $\omega_l = 8.0$ s⁻¹, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $L = 50$ mm, $d_n = 80$ mm (1); ω_2 when $\omega_l = 8.0$ s⁻¹, $\omega_n/\omega_l = 0.7$, $L = 50$ mm, $d_n = 80$ mm (2); d_n when $\omega_l = 8.0$ s⁻¹, $\omega_n/\omega_l = 0.7$, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $L = 50$ mm (3); L when $\omega_l = 8.0$ s⁻¹, $\omega_n/\omega_l = 0.7$, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $d_n = 80$ mm (4); ω_l when $\omega_n/\omega_l = 0.7$, $\omega_2 = 4.5$ s⁻¹, $L = 50$ mm, $d_n = 80$ mm (5)

Анализ полученных закономерностей свидетельствует о том, что с увеличением d_n , L и ω_l (рис. 3, соответственно кривые 3–5) интенсивнее срабатывается периферия заготовки, что приводит к образованию макропогрешности в виде общего «бугра», а с возрастанием ω_2 и ω_n/ω_l , наоборот, происходит усиленный съем припуска в центральной зоне заготовки (рис. 3, кривые 1, 2), вызывая тем самым макропогрешность в виде общей «ямы». В случае уменьшения рассматриваемых наладочных параметров станка общий «бугор» на обрабатываемой поверхности появляется при изменении ω_2 и ω_n/ω_l (рис. 4, кривые 4, 5), а общая «яма» – при изменении ω_l , d_n и L (рис. 4, соот-

ответственно кривые 1–3). Изложенное удовлетворительно согласуется с результатами численных исследований, приведенных на рис. 2.

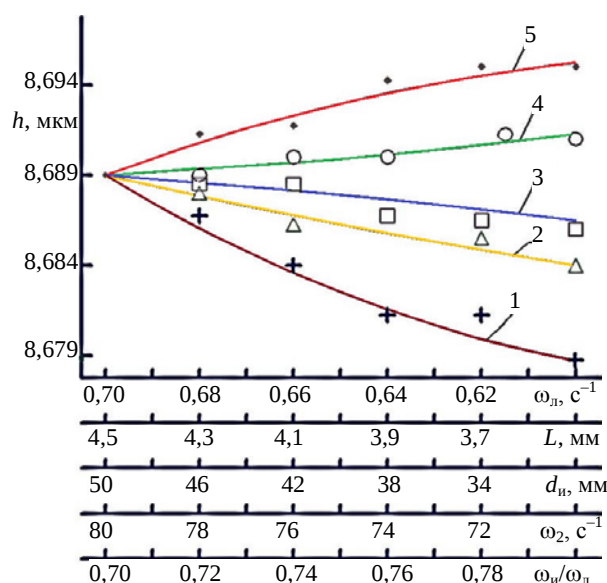


Рис. 4. Закономерности изменения величины стрелки прогиба выпуклой поверхности линзы в зависимости от значения уменьшающихся: ω_n при $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (1); d_n при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$ (2); L при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (3); ω_2 при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (4); ω_n/ω_l при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (5)

Fig. 4. Regularities for changes of deflection value in convex lens surface due to the following decreasing values: ω_n when $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (1); d_n when $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$ (2); L when $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (3); ω_2 when $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (4); ω_n/ω_l when $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (5)

Выполнены также исследования по проверке характера обработки, определяемого коэффициентами σ и k . В первом случае эти исследования сводились к определению такого значения ΔN для каждого из наладочных параметров станка при их изменении, когда стрелка прогиба выпуклой поверхности линзы в процессе ее мелкого шлифования достигала одинакового значения. Во втором случае эксперименты преследовали цель выявить время обработки (мелкого шлифования), по истечении которого исходная стрелка прогиба, изменяясь, достигала одного и того же значения (в рассматриваемом случае 8,679 мм). При этом значения наладочных параметров станка устанавливались такие же, как и на стадии теоретических расчетов, а рабочее усилие на инструмент и исходное значение стрелки прогиба составляли, как и ранее, соответственно 400 Па и 8,689 мм.

Результаты этой части экспериментальных исследований приведены на рис. 5, 6.

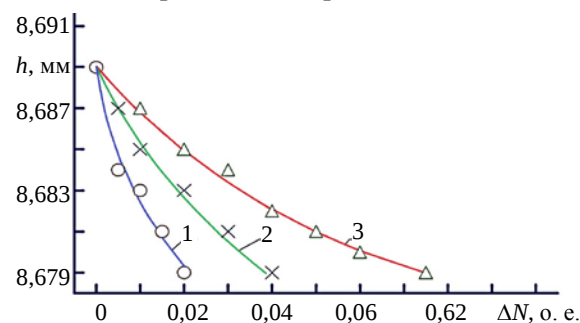


Рис. 5. Закономерности изменения стрелки прогиба выпуклой поверхности линзы в зависимости от: относительных изменений диаметра инструмента при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$ (1); амплитуды колебательного движения инструмента при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (2); частоты вращения линзы при $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$

Fig. 5. Regularities for changes of deflection value in convex lens surface due to relative changes of tool diameter: when $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$ (1); amplitudes of tool vibrational motion when $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (2); lens rotational speed when $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$

Из анализа рис. 5 видно, что изменение диаметра инструмента на незначительную величину $\Delta N = 0,013$ приводит к уменьшению h на 10 мкм (кривая 1), в то время как L и ω_l для уменьшения h на аналогичную величину ΔN понадобилось изменить соответственно на 0,040 и 0,075 (кривые 2 и 3).

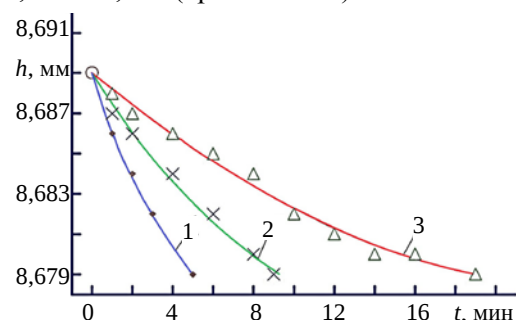


Рис. 6. Закономерности изменения стрелки прогиба выпуклой поверхности линзы в зависимости от: продолжительности обработки в случае изменений величины отношения ω_n/ω_l при $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (1); частоты вращения линзы при $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (2); амплитуды колебательного движения инструмента при $\omega_n = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $d_n = 80 \text{ мм}$

Fig. 6. Regularities for changes of deflection value in convex lens surface due to processing duration while changing the following ratio value ω_n/ω_l when $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (1); lens rotational speed when $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $L = 50 \text{ мм}$, $d_n = 80 \text{ мм}$ (2); amplitudes of tool vibrational motion when $\omega_l = 8,0 \text{ с}^{-1}$, $\omega_n/\omega_l = 0,7$, $\omega_2 = 4,5 \text{ с}^{-1}$, $d_n = 80 \text{ мм}$

Результаты, представленные на рис. 6, свидетельствуют о том, что в случае обработки на режимах, которые использовались на этапе численных исследований, изложенных на рис. 2, наибольшей производительности можно достичь при регулировании процесса формообразования посредством изменения отношения ω_n/ω_d (кривая 1). Следующими по эффективности идут регулирование ω_d (кривая 2) и L (кривая 3). Эти выводы согласуются с численными исследованиями.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных численных исследований выявлены режимы работы технологического оборудования для абразивной обработки линз, обеспечивающие равномерный съем припуска по всей поверхности заготовки, а также позволяющие исправить макропогрешности линзы в виде общих «бугра» и «ямы».

2. Назначив одинаковые отклонения параметра Q , характеризующего интенсивность съема припуска с обрабатываемой заготовки, по периферии линзы от его оптимального значения в случаях преобладающего съема припуска как в краевой, так и в центральной зонах обрабатываемой поверхности, определили чувствительность Q к изменениям наладочных параметров станка. В результате установили, что максимальная чувствительность Q имеет место в случае изменения диаметра инструмента, причем в большей степени при исправлении общей «ямы» по сравнению с исправлением общего «бугра».

3. Вычислив разность значений параметра Q в краевой и центральной зонах обрабатываемой поверхности линзы, выявили эффективность наладочных параметров технологического оборудования, которая показала, что для исправления макропогрешностей в виде «бугра» и «ямы» наиболее целесообразно изменять отношение ω_n/ω_d , что, в свою очередь, диктует необходимость наличия в станке возможности независимого регулирования частот вращения инструмента и детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
2. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 304 с.
3. Исследование качества и производительности обработки высокоточных сферических поверхностей оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // Вест. нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2009. № 2. С. 40–44.
4. Станок для одновременной двусторонней обработки линзы с пологими вогнутыми поверхностями: пат. 10724 Респ. Беларусь, МПК В24В 13/00 / А. С. Козерук, В. Ф. Климович, А. А. Сухоцкий; дата публ. 10.30.2007.

5. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
6. 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.
7. Preston, F. W. The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines / F. W. Preston // Journal of the Society Technology. 1927. No 11. P. 214–256.
8. Исследование кинематических закономерностей процесса двусторонней обработки двояковыпуклых оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // Вест. Нац. акад. наук. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 2. С. 26–31.
9. 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.
10. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.

Поступила 26.10.2016

Подписана в печать 27.12.2016

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Bardin A. N. (1963) *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
2. Sulim, A. V. (1969) *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 304 (in Russian).
3. Kozeluk A. S., Sukhotsky A. A., Klimovich V. F., Kuznechik V. O. (2009) Investigation of Quality and Productivity of Treatment of High-Accuracy Spherical Surfaces of Optical Details. *Vesti Natsyianal'nai Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (2), 40–44 (in Russian).
4. Kozeluk A. S., Klimovich V. F., Sukhotsky A. A. (2007) *Machine Tool for Simultaneous Two-Sided Processing of Lens with Shallow Concave Surfaces*. Patent Republic of Belarus No 10724 (in Russian).
5. Kozeluk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, VUZ-UNITI Publ. 176 (in Russian).
6. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeluk A. S. (1995) *Control in Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices*. Minsk, Dizayn-PRO Publ. 208 (in Russian).
7. Preston F. W. (1927) The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society Technology*, (11), 214–256.
8. Kozeluk A. S., Sukhotsky A. A., Klimovich V. F., Filonova M. I. (2008) Investigation of Kinematic Regularities of Double-Sided Treatment of Biconvex Optical Details. *Vesti Natsyianal'nai Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (2), 26–31 (in Russian).
9. Zubakov V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K., Semibratov M. N. ed. (1985) *Technology of Optical Parts*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 368 (in Russian).
10. Kozeluk A. S. (1997) *Control in Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices on the Basis of Mathematical Simulation*. Minsk. 317 (in Russian).

Received: 26.10.2016

Accepted: 27.12.2016

Published online: 30.05.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-225-231

УДК 621.436.038

Влияние состава топлива, содержащего бутанол, на показатели рабочего процесса дизеля

Магистр техн. наук Д. Г. Гершань¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Выполнены расчеты влияния топлива, содержащего бутанол, на показатели рабочего процесса дизеля 4ЧН 11/12,5 на режимах внешней скоростной характеристики. Номинальная мощность двигателя 140 кВт при частоте вращения коленчатого вала 2300 мин⁻¹. Двигатель снабжен газотурбинным наддувом с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, системой топливоподачи аккумуляторного типа. Расчет рабочего процесса выполнен по разработанной компьютерной программе и моделям. Исследования проводили в два этапа: без изменения регулировок системы топливоподачи и при цикловых подачах топлива, обеспечивающих на различных режимах работы величину коэффициента избытка воздуха на уровне, соответствующем работе на дизельном топливе. Выполнен анализ полученных результатов. Показано изменение среднего индикаторного давления, удельного индикаторного расхода топлива, индикаторного коэффициента полезного действия, удельных выбросов окислов азота для рассматриваемых режимов при использовании смесей дизельного топлива с содержанием бутанола 5, 10, 15, 20, 25 и 30 %. Установлены зависимости показателей работы дизеля по внешней скоростной характеристике на различных смесях, позволяющие обосновать параметры системы топливоподачи. Рекомендуется применение смеси дизельного топлива с бутанолом, содержащей 15 % бутанола, без изменения регулировочных и конструктивных параметров двигателя. Выявлено, что для улучшения показателей рабочего процесса двигателя состав смеси должен меняться с изменением режима работы. Разработан распылитель форсунки с составной иглой для системы топливоподачи, позволяющий изменять состав топлива в зависимости от режима работы двигателя.

Ключевые слова: рабочий процесс, дизельный двигатель, бутанол, распылитель форсунки

Для цитирования: Гершань, Д. Г. Влияние состава топлива, содержащего бутанол, на показатели рабочего процесса дизеля / Д. Г. Гершань // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 225–231. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-225-231

Effect of Fuel Composition Containing Butanol on Working Process Parameters of Diesel Engine

D. G. Hershan¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Calculations on the effect of fuel containing butanol on working process parameters of 4ЧН 11/12,5 diesel engine with the mode of an external speed characteristic have been carried out in the paper. Engine rated brake power is 140 kW with crankshaft speed of 2300 min⁻¹. The engine is equipped with gas turbine pressure charging with intercooling of charging air, accumulator-type fuel-handling system. Calculations of the working process have been made in accordance with the developed computer program and models. Investigations have been carried out in two stages: without any changes in regulation of fuel-handling system and with cyclic fuel delivery that ensure such value of excess air factor at various operational modes which corresponds to the operation with diesel fuel. All the obtained results have been analyzed in the paper. The paper

Адрес для переписки

Гершань Дмитрий Геннадьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-95-86
dvs_atf@bntu.by

Address for correspondence

Hershan Dmitry G.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-95-86
dvs_atf@bntu.by

shows changes in mean indicated pressure, specific indicated fuel consumption, indicated efficiency, specific nitrogen oxides emissions for various modes in question while using 5, 10, 15, 20, 25 and 30 % mixture of diesel fuel with butanol. Dependences of parameters pertaining to diesel operation have been determined according to external speed characteristic for various mixtures and the obtained data make it possible to justify parameters of the fuel-handling system. It has been recommended to use a diesel fuel-butanol mixture containing 15 % of butanol without any changes in regulating and design engine parameters. It has been revealed that in order to improve parameters of the engine operational process mixture composition must be changed while changing the operational mode. An injector nozzle with a compound needle for the fuel-handling system has been developed and it allows to change fuel composition according to engine operational mode.

Keywords: operational process, diesel engine, butanol, injector nozzle

For citation: Hershan D. G. (2017) Effect of Fuel Composition Containing Butanol on Working Process Parameters of Diesel Engine. *Science and Technique*. 16 (3), 225–231. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-225-231 (in Russian)

Введение

Необходимость использования возобновляемых источников энергии для получения различных видов топлива не вызывает сомнений. В связи со стремлением к уменьшению зависимости от поставок нефти, решением экологических проблем, обусловленных использованием нефтепродуктов, за последние десятилетия в мире значительно вырос интерес к производству моторных топлив на основе возобновляемых источников.

В качестве альтернативного моторного топлива относительно недавно стал рассматриваться бутанол в связи с появлением технологий, позволяющих наладить его промышленное производство, хотя по своим свойствам он превосходит метанол и этанол, особенно для использования в дизелях. На сегодняшний день бутанол – один из наиболее прогрессивных видов альтернативного топлива [1–9]. Поэтому актуальны исследования влияния состава топлива, содержащего бутанол, на показатели рабочего процесса дизеля.

Основная часть

Бутанол (бутиловый спирт) C_4H_9OH – бесцветная жидкость с характерным запахом сиушного масла. Бутанол может производиться из биомассы (свеклы, пшеницы, ячменя, сахарного тростника, кукурузы, древесины и др.) и ископаемого топлива. Благодаря своим свойствам C_4H_9OH может использоваться в дизелях в виде смесей с дизельным топливом и путем отдельной подачи. Теплофизические и термохимические свойства бутанола приведены в табл. 1 [2, 4].

Расчет рабочего процесса выполняли по разработанной компьютерной программе «МРПД» и моделям «распылитель – топливо – течение» и «топливные струи – камера сгорания» [10–13]. Исследования проведены для дизеля 4ЧН 11/12,5 на режимах внешней скоростной

характеристики. Номинальная мощность двигателя 140 кВт при частоте вращения коленчатого вала 2300 мин⁻¹. Двигатель снабжен газотурбинным наддувом с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, системой топливоподачи аккумуляторного типа.

Таблица 1

Теплофизические и термохимические свойства бутанола

Thermo-physical and thermochemical properties of butanol

Характеристика бутанола	Показатель
Плотность при 20 °С, кг/м ³	810
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	3,64
Октановое число (исследовательский метод)	100
Цетановое число	18
Содержание серы, %	0
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	33,1
Теплота парообразования, кДж/кг	570
Количество воздуха, необходимое для полного сгорания 1 кг топлива, кг	11,2
Элементарный состав:	
g_C	0,649
g_H	0,135
g_O	0,216

На первом этапе исследования регулировочные и конструктивные параметры двигателя не изменялись. Исследовано влияние содержания бутанола в смеси с дизельным топливом $C_{бут}$ на изменение среднего индикаторного давления p_i , удельного индикаторного расхода топлива g_i , индикаторного коэффициента полезного действия (КПД) η_i , удельных выбросов окислов азота g_{NOx} .

Зависимости среднего индикаторного давления от частоты вращения коленчатого вала при использовании дизельного топлива и его смесей с бутанолом с содержанием последнего 5, 10, 15, 20, 25 и 30 % представлены на рис. 1.

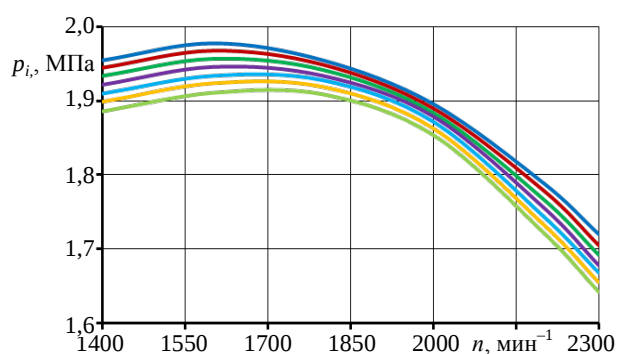


Рис. 1. Зависимость изменения среднего индикаторного давления от частоты вращения коленчатого вала при содержании бутанола в смеси, %:

— 0; — 5; — 10; — 15;
— 20; — 25; — 30

Fig. 1. Dependence of mean indicated pressure change on crankshaft speed with butanol content in mixture, %:

— 0; — 5; — 10; — 15;
— 20; — 25; — 30

Среднее индикаторное давление цикла с увеличением содержания бутанола в смеси уменьшается, причем оно различно для рассматриваемых режимов. Например, для режимов с частотой вращения коленчатого вала 1800–2100 min^{-1} в меньшей степени, чем для других. При $n = 1800 \text{ min}^{-1}$ для смесей с содержанием бутанола 10, 20 и 30 % снижение p_i по сравнению с дизельным топливом составляет 0,67; 1,40 и 2,40 %, а при $n = 2300 \text{ min}^{-1}$ p_i снижается на 1,6; 3,0 и 4,5 %.

При увеличении содержания бутанола в смеси удельный индикаторный расход топлива растет на всех скоростных режимах. При этом наименьший рост получается в диапазоне частот вращения 1800–2100 min^{-1} . При $n = 1800$ и 2300 min^{-1} для 10-, 20-, 30%-х смесей увеличение g_i по сравнению с дизельным топливом составляет 0,67; 1,40; 2,40 % и 1,6; 3,0 и 4,5 % соответственно. Уменьшение среднего индикаторного давления и увеличение удельного индикаторного расхода топлива связаны с меньшей теплотворной способностью бутанола, чем дизельного топлива (табл. 1).

Индикаторный КПД двигателя с увеличением содержания бутанола в смеси повышается. При использовании 15- и 20%-х смесей увеличение по сравнению с дизельным топливом – не менее чем на 1,5 и 2,0 % во всем исследуемом диапазоне, кроме режимов с частотами, близкими 2200–2300 min^{-1} . Такое изменение индикаторного КПД показывает, что при применении

смесей эффективность процесса сгорания не нарушается по сравнению с дизельным топливом.

Относительное изменение индикаторного КПД (δ_{η_i}) в зависимости от частоты вращения коленчатого вала при использовании смесей дизельного топлива с бутанолом по сравнению с дизельным топливом показано на рис. 2.

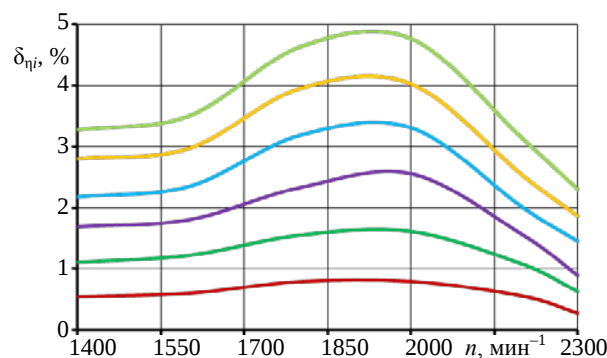


Рис. 2. Относительное изменение индикаторного коэффициента полезного действия при содержании

бутанола в смеси, %: — 5; — 10;
— 15; — 20; — 25; — 30

Fig. 2. Relative change of indicated efficiency with butanol content in mixture, %:

— 5; — 10; — 15;
— 20; — 25; — 30

Разброс значений индикаторного КПД в рассматриваемом диапазоне внешней скоростной характеристики для 5,0%-й смеси минимален и составляет не более 0,5 %, а для 30,0%-й максимален – не более 2,5 %. Для 15,0%-й смеси максимальное отклонение индикаторного КПД по режимам менее 1,7 %.

Содержание бутанола в смеси для режимов с частотами вращения 1400, 1600, 1800, 2000, 2200 и 2300 min^{-1} с учетом изменения p_i по сравнению с работой на дизельном топливе до 1 % показано на рис. 3.

При условии падения среднего индикаторного давления по сравнению с работой на дизельном топливе до 1,0 % для режима с частотой вращения коленчатого вала 2000 min^{-1} содержание бутанола в смеси не должно превышать 16,5 %; и это наибольшее значение из всех рассмотренных режимов. Для $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ и $n = 2300 \text{ min}^{-1}$ содержание бутанола $C_{\text{бут}}$ соответственно 9,5 и 6,0 %. Такое влияние на вышеуказанные параметры определяется различиями в протекании процессов смесеобразования и сгорания на разных режимах работы двигателя.

Зависимость изменения удельных выбросов окислов азота от содержания бутанола в смеси с дизельным топливом представлена на рис. 4.

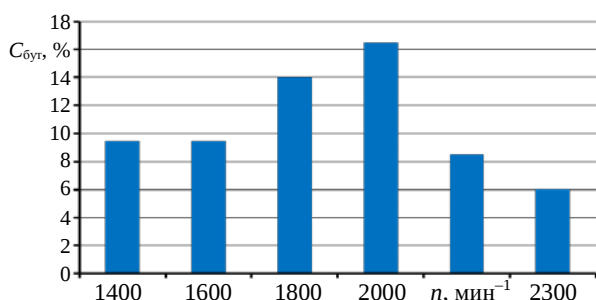


Рис. 3. Содержание бутанола в смеси в зависимости от частоты вращения при изменении p_i до 1,0 % (при неизменной цикловой подаче топлива)

Fig. 3. Butanol content in mixture due to engine speed while changing p_i up to 1,0 % (with unchangeable cyclic fuel supply)

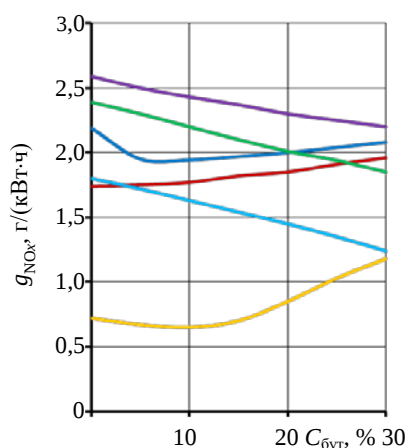


Рис. 4. Зависимость изменения удельных выбросов окислов азота от содержания бутанола в смеси при частоте вращения вала, min^{-1} :

— 2300; — 2200; — 2000;
— 1800; — 1600; — 1400

Fig. 4. Dependence of specific nitrogen oxide emission change on butanol content in mixture with crankshaft speed, min^{-1} :

— 2300; — 2200; — 2000;
— 1800; — 1600; — 1400

Влияние содержания бутанола в смеси на удельные выбросы окислов азота неодинаково. При частотах вращения коленчатого вала 1600, 1800 и 2000 min^{-1} с увеличением содержания бутанола в смеси удельные выбросы окислов азота g_{NOx} снижаются, при $n = 2200 \text{ min}^{-1}$ – растут, при 1400 и 2300 min^{-1} – снижаются, а затем растут. Например, при $n = 1800 \text{ min}^{-1}$ для 10-, 20- и 30%-х смесей удельные выбросы окислов азота по сравнению с работой на дизельном топливе

снижаются на 6,2; 11,2 и 15,1 %; при $n = 2200 \text{ min}^{-1}$ – увеличиваются на 1,7; 6,3 и 12,6 %.

На втором этапе проводимых экспериментов проанализировано влияние исследуемых смесей на показатели рабочего процесса при условии сохранения значений коэффициентов избытка воздуха, соответствующих работе на дизельном топливе. Коэффициенты избытка воздуха поддерживались постоянными за счет изменения цикловой подачи топлива.

Зависимость среднего индикаторного давления от содержания бутанола в смеси с дизельным топливом для рассматриваемых скоростных режимов приведена на рис. 5.

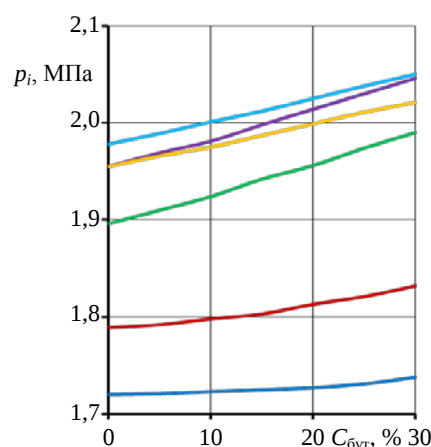


Рис. 5. Зависимость изменения среднего индикаторного давления от содержания бутанола в смеси (при сохранении коэффициента избытка воздуха) при частоте вращения вала, min^{-1} :

— 2300; — 2200; — 2000;
— 1800; — 1600; — 1400

Fig. 5. Dependence of mean indicated pressure on butanol content in mixture (while maintaining air ratio)

with crankshaft speed, min^{-1} : — 2300; — 2200;
— 2000; — 1800; — 1600; — 1400

Среднее индикаторное давление цикла растет с увеличением количества бутанола в смеси с дизельным топливом для всех рассмотренных режимов при поддержании коэффициента избытка воздуха постоянным для каждого скоростного режима. Интенсивность его роста различна для разных скоростных режимов. Наибольшее увеличение p_i получается при $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ и для 10-, 20- и 30%-х смесей по сравнению с работой на дизельном топливе составляет 1,5; 3,2 и 5,0 %.

С ростом содержания бутанола в смеси при постоянстве коэффициента избытка воздуха для рассмотренных скоростных режимов удель-

ный индикаторный расход топлива увеличивается. Наименьшее изменение g_i получается при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, наибольшее – при $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$ и для 10-, 20- и 30%-х смесей по сравнению с работой на дизельном топливе составляет 0,74; 1,40 и 2,00 % и 2,50; 4,40 и 5,90 % соответственно.

Удельные выбросы окислов азота с ростом концентрации бутанола в смеси при частотах вращения коленчатого вала 1400 и 1600 мин^{-1} растут, при 2200 и 2300 мин^{-1} – снижаются, при 1800 и 2000 мин^{-1} – снижаются, а затем растут. Например, при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ для 10-, 20- и 30%-х смесей удельные выбросы окислов азота по сравнению с работой на дизельном топливе снижаются на 1,7; 2,9 и 3,5 %; при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ для 10- и 20%-х смесей снижаются на 1,70 и 0,84 %, а для 30%-й смеси – растут примерно на 2,9 %. Таким образом, наименьшие изменения g_i и g_{NO_x} для всех исследуемых режимов в совокупности могут быть получены при сохранении коэффициентов избытка воздуха.

Индикаторный КПД двигателя растет при увеличении содержания бутанола в смеси. Наибольший относительный разброс значений индикаторного КПД при работе на смесях, по сравнению с дизельным топливом для рассматриваемых режимов, получается для 30%-й смеси, наименьший – для 5%-й смеси. Для 15%-й смеси максимальное отклонение удельного индикаторного КПД по режимам составляет не более 2,5 %.

Содержание бутанола в смеси для рассматриваемых режимов с учетом изменения p_i по сравнению с работой на дизельном топливе до 1 % при сохранении коэффициента избытка воздуха показано на рис. 6.

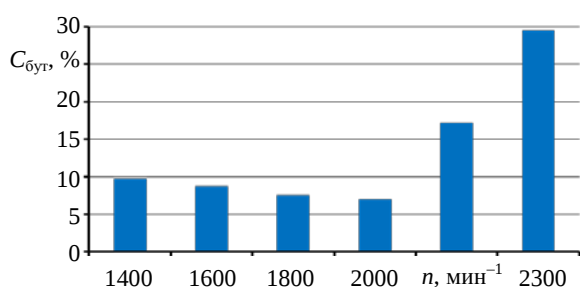


Рис. 6. Содержание бутанола в смеси в зависимости от частоты вращения при изменении p_i до 1 % при сохранении коэффициента избытка воздуха

Fig. 6. Butanol content in mixture due to engine speed while changing p_i up to 1 % while maintaining air ratio

При изменении среднего индикаторного давления по сравнению с работой на дизельном топливе не более чем на 1 % для режима с ча-

стотой вращения коленчатого вала 2000 мин^{-1} содержание бутанола в смеси не должно превышать 7 %. Для $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$ $C_{\text{бут}}$ должно быть 9,8 и 29,5 % соответственно.

Из приведенного анализа видно, что одинаковое содержание бутанола в смеси при работе на рассматриваемых скоростных режимах двигателя по-разному влияет на изменение среднего индикаторного давления, удельного индикаторного расхода топлив, индикаторного КПД, удельного выброса окислов азота. При выборе содержания бутанола в смеси с дизельным топливом необходимо учитывать изменение показателей рабочего процесса двигателя во всем диапазоне режимов его работы, разброс значений по режимам, возможность достижения требуемых показателей изменением регулировочных параметров двигателя.

Смесь дизельного топлива с бутанолом с концентрацией последнего до 15 % может быть использована в двигателе без изменения его регулировочных и конструктивных параметров. При этом сохраняется форма внешней скоростной характеристики с увеличением удельного индикаторного расхода топлива и падением среднего индикаторного давления 1,5–2,0 %. Чтобы получить наилучшие показатели работы двигателя в целом для каждого режима работы или их совокупности, целесообразно использовать смеси с различным содержанием бутанола. Для этого разработан распылитель форсунки для двухтопливной системы топливоподачи, дающий возможность изменять состав топлива в зависимости от режима работы.

Распылитель, содержащий составную иглу, позволяет производить раздельную подачу двух видов топлива и обеспечивать независимое управление характеристикой впрыскивания через верхний и нижний ряды распыливающих отверстий на каждом режиме работы дизельного двигателя и соответственно формировать многофазное впрыскивание с большим количеством видов характеристик впрыскивания для различных режимов работы двигателя. На разработанный распылитель форсунки (рис. 7) получен патент Республики Беларусь на изобретение № 18045 [14].

Распылитель форсунки содержит установленную в корпусе 1, имеющем в нижней части коническую запорную поверхность 2, составную иглу 3, состоящую из соосно расположенных наружной 4 и внутренней 5 частей, имею-

щих запорные поверхности 6, 7 и нажимные пояски 8, 9, камеру 10 высокого давления, образованную внутренней стенкой 11 корпуса и составной иглой, верхний 12 и нижний 13 ряды распыливающих отверстий, выполненных в нижней части корпуса. При этом запорные поверхности 6, 7 составной иглы расположены в ее вершине 14, а нажимной пояс 8 наружной части – в пределах камеры 10 высокого давления, которая сообщается с выполненным в корпусе каналом 15 для подвода топлива.

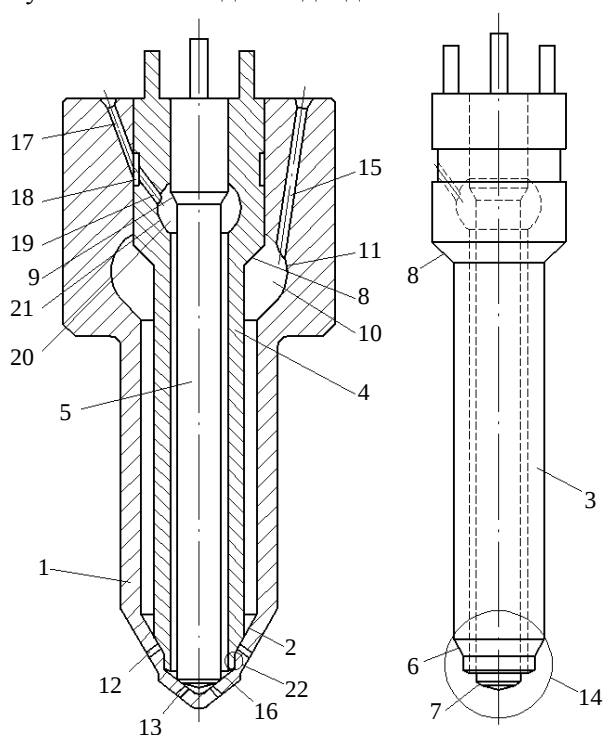


Рис. 7. Распылитель форсунки с составной иглой

Fig. 7. Injection nozzle with composite needle

Нижняя часть корпуса имеет дополнительную коническую запорную поверхность 16, в которой расположен нижний ряд 13 распыливающих отверстий с возможностью подачи к ним топлива через дополнительный канал 17 (в корпусе) для подвода топлива, канавку 18, топливopодводящий канал 19 (в наружной части составной иглы) и камеру 20 высокого давления, образованную внутренней стенкой 21 наружной и внутренней частями составной иглы, в пределах которой выполнен нажимной пояс 9 внутренней части составной иглы. Кроме того, наружная часть составной иглы образует с корпусом в его нижней части прецизионную пару 22, а наружная и внутренняя части составной иглы имеют возможность независимого перемещения.

ВЫВОДЫ

1. Установлены зависимости показателей работы дизеля по внешней скоростной характеристике на различных смесях без изменения регулировок системы топливоподачи и при цикловых подачах топлива, обеспечивающих на различных режимах работы величину коэффициента избытка воздуха на уровне, соответствующем работе на дизельном топливе, позволяющие обосновать параметры системы топливоподачи. При работе на смесях лучшие показатели удельного индикаторного расхода топлива g_i и удельных выбросов окислов азота g_{NOx} получены при сохранении коэффициентов избытка воздуха.

2. Рекомендуется применение смеси дизельного топлива, содержащей 15 % бутанола, без изменения регулировочных и конструктивных параметров двигателя. При этом сохраняется форма внешней скоростной характеристики расхода топлива и среднего индикаторного давления на 1,5–2,0 %. Индикаторный КПД возрастает примерно на 1,5 %, что свидетельствует об эффективности протекания процессов смесеобразования и сгорания.

3. Установлено, что для улучшения показателей рабочего процесса двигателя состав смеси должен варьироваться с изменением режима работы. При условии изменения среднего индикаторного давления по сравнению с работой на дизельном топливе не более чем на 1 % для режимов с частотами вращения коленчатого вала 1400, 2000 и 2300 мин⁻¹ при неизменной подаче топлива и сохранении коэффициентов избытка воздуха путем варьирования подачи топлива содержание бутанола в смеси не должно превышать 9,5; 16,5; 6,0 % и 9,8; 7,0; 29,5 % соответственно.

4. Разработан распылитель форсунки с составной иглой для системы топливоподачи, позволяющий изменять состав топлива в зависимости от режима работы двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2005. Кн. 1: Теория рабочих процессов. 479 с.
2. Емельянов, В. Е. Автомобильный бензин и другие виды топлива: свойства, ассортимент, применение / В. Е. Емельянов, И. Ф. Крылов. М.: Астрель: АСТ: Профиздат, 2005. 207 с.
3. Комаров, С. М. Тулунский бутанол: топливо из леса / С. М. Комаров // Химия и жизнь. 2009. № 5. С. 8–11.
4. Марков, В. А. Спиртовые топлива для дизельных двигателей / В. А. Марков, Н. Н. Патрахальцев // Транс-

- порт на альтернативном топливе. 2010. Т. 13, № 1. С. 22–26.
5. Investigation of the Performance and Emissions of Bus Engine Operating on Butanol/Diesel Fuel Blends / D. C. Rakopoulos [et al.] // *Fuel*. 2010. Vol. 89, No 10. P. 2781–2790.
 6. Butanol/Biobutanol as a Component of an Aviation and Diesel Fuel / W. Dziegielewski [et al.] // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2014. Vol. 21, No 2. P. 69–75.
 7. Anil Kumar, Y. Performance and Emission Characteristics of Spark Ignition Engine Fuelled with Gasoline/n-Butanol Blends / Y. Anil Kumar, B. Prabakaran // *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2015. Vol. 4, No 3. P. 257–263.
 8. Болотник, Е. В. Основы технологии получения биобутанола использованием отселектированного штамма *Clostridium acetobutylicum* БИМ В-709 Д / Е. В. Болотник. Минск: Нац. акад. наук Беларуси, 2015. 25 с.
 9. Перспективы использования сельскохозяйственных растительных культур для производства топлива в Республике Беларусь / О. А. Ивашкевич [и др.] // *Вестник БГУ. Сер. 2: Химия*. 2009. № 1. С. 4–13.
 10. Кухаренок, Г. М. Моделирование характеристик топливных струй и параметров камеры сгорания дизеля / Г. М. Кухаренок, Д. Г. Гершань // *Вестник БНТУ*. 2011. № 4. С. 35–39.
 11. Кухаренок, Г. М. Прогнозирование показателей рабочего процесса дизеля при использовании альтернативных топлив / Г. М. Кухаренок, Д. Г. Гершань // *Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов. Безопасность дорожного движения: сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2016. С. 284–291.*
 12. Гершань, Д. Г. Исследование характеристик топливных струй при применении смесей дизельного топлива с бутанолом / Д. Г. Гершань // *Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2015. С. 65–70.*
 13. Hershan, Dz. Coordination of Fuel Sprays Characteristics with Combustion Chamber Parameters / Dz. Hershan // *Proceedings of 12th EAEC European Automotive Congress, Bratislava, Slovak Republic, 29 June – 1 July 2009*. Bratislava, 2009. 57–58.
 14. Распылитель форсунки: пат. 18045 Респ. Беларусь, МПК F 02 М 61/10 / Г. М. Кухаренок, А. Н. Марчук, Д. Г. Гершань; дата публ. 28.02.2014.
 3. Komarov S. M. (2009) Tulun Butanol: Wood Fuel. *Khimiya i Zhizn* [Chemistry and Life], (5), 8–11 (in Russian).
 4. Markov V. A., Patrakhaltsev N. N. (2010) Alcohol Fuel for Diesel Engines. *Transport na Alternativnom Toplivo* [Alternative Fuels Transportation], 13 (1), 22–26 (in Russian).
 5. Rakopoulos D. C., Rakopoulos C. D., Hountalas D. T., Kakaras E. C., Giakoumis E. G., Papagiannakis R. G. (2010) Investigation of the Performance and Emissions of Bus Engine Operating on Butanol/Diesel Fuel Blends. *Fuel*, 89 (10), 2781–2790. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.03.047.
 6. Dziegielewski W., Gawron B., Kaźmierczak U., Kulczycki A. (2014) Butanol/Biobutanol as a Component of an Aviation and Diesel Fuel. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 21 (2), 69–75. DOI: 10.5604/12314005.1133869.
 7. Anil Kumar Y., Prabakaran B. (2015) Performance and Emission Characteristics of Spark Ignition Engine Fuelled with Gasoline/n-Butanol Blends. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 3 (4), 257–263.
 8. Bolotnik E. V. (2015) *Main Principles of Technology for Obtaining Bio-Butanol while Using Selected Strain (Clostridium Acetobutylicum BIM V-709 D*. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus. 25 (in Russian).
 9. Ivashkevich O. A., Kabo G. Ya., Blokhin A. V., Simirskii V. V., Lugovik Yu. N. (2009) Prospects for Using Agricultural Plant Crops for Fuel Production in the Republic of Belarus. *Vestnik Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya* [Vestnik BSU. Series 2: Chemistry. Biology. Geography], (1), 4–13 (in Russian).
 10. Kukharionok G. M., Gershan D. G. (2011) Simulation of Characteristics for Fuel jets and Parameters for Diesel Combustion Chamber. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (4), 35–39 (in Russian).
 11. Kukharionok G. M., Gershan D. G. (2016) Prediction of Indices for Diesel Working Process while Using Alternative Fuel. *Sovershenstvovanie Organizatsii Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozok Passazhirov i Gruzov. Bezopasnost' Dorozhnogo Dvizheniya: Sb. Nauch. Tr.* [Improvement of Road Traffic Organization and Passenger and Freight Transportation. Road-Traffic Safety: Collection of Research Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, 284–291 (in Russian).
 12. Gershan D. G. (2015) Investigations on Characteristics of Fuel Jets while Applying Mixture of Diesel Fuel with Butanol. *Sovershenstvovanie Organizatsii Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozok Passazhirov i Gruzov: Sb. Nauch. Tr.* [Improvement of Road Traffic Organization and Passenger and Freight Transportation: Collection of Research Papers]. Minsk: Belarusian National Technical University, 65–70 (in Russian).
 13. Hershan Dz. (2009) Coordination of Fuel Sprays Characteristics with Combustion Chamber Parameters. *Proceedings of 12th EAEC European Automotive Congress, Bratislava, Slovak Republic, 29 June – 1 July 2009*. Bratislava, 57–58.
 14. Kukharionok G. M., Marchuk A. N., Gershan D. G. (2014) *Injection Nozzle*. Patent Republic of Belarus no 18045 (in Russian).

Поступила 02.11.2016

Подписана в печать 05.01.2017

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Lukanin V. N., Morozov K. A., Khachiyan A. S., Alekseev I. V., Golubkov L. N., Chernyak B. Ya., Trusov V. I., Kamfer G. M., Makhov V. Z., Prishvin S. A., Sinyavskii V. V., Matyukhin L. M., Nazarov N. I., Shatrov M. G. (2005) *Internal Combustion Engines. Book 1. Theory of Working Processes*. 2nd Edition. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 479 (in Russian).
2. Yemelianov V. E., Krylov I. F. (2005) *Motor Petrol and Other Types of Fuel: Properties, Range of Fuel, Application*. Moscow, Astrel Publ. 207 (in Russian).

Received: 02.11.2016

Accepted: 05.01.2017

Published online: 30.05.2017

Технология реверсивно-струйной очистки стальных листов от коррозии перед лазерной резкой

Инж. А. Н. Жук¹⁾, докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, канд. техн. наук А. В. Филипчик¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Качество очистки поверхностей от коррозии влияет на эффективность реализации целого ряда технологических процессов. Реверсивно-струйная очистка с использованием в составе рабочей жидкости бентонитовой глины обеспечивает формирование антикоррозионного защитного покрытия со светопоглощающими свойствами на очищенной поверхности и предотвращает образование повторной коррозии. Представлены результаты исследования влияния параметров реверсивно-струйной очистки стальных листов на качество очищенной поверхности перед лазерной резкой. Приведены режимы обработки, используемые составы рабочей жидкости, а также свойства образовавшегося защитного пленочного покрытия на очищенной поверхности. Рассмотрены топография, морфология и химический состав данного покрытия с применением комплексных металлографических, рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследований. Экспериментальные работы для оценки влияния качества сформированной поверхности на эффективность процесса лазерной резки выполняли на комплексе лазерной резки (относится к газовым лазерам) с выходной непрерывной мощностью 2,5/4,0 кВт. Для этого были подготовлены образцы размерами 120×120 мм из стали Ст3пс толщиной от 3 до 10 мм. Анализ результатов показал, что применение реверсивно-струйной очистки обеспечивает повышение скорости лазерной резки в среднем на 10–20 %. В ходе исследований установлены оптимальные режимы очистки: расстояние от сопла до очищаемой поверхности, скорость струи, давление. Выявлено, что на всей очищенной поверхности образцов, обработанных после сушки рабочей жидкостью на основе воды с концентрациями бентонитовой глины и кальцинированной соды, формируется защитное пленочное покрытие толщиной примерно 5–7 мкм. Химическую основу пленочного покрытия составляют элементы, входящие в состав бентонитовой глины, являющейся основной компонентой рабочей жидкости.

Ключевые слова: сталь, поверхность, струя, рабочая жидкость, давление, шероховатость, микротвердость, адгезионная прочность, пленочное покрытие

Для цитирования: Жук, А. Н. Технология реверсивно-струйной очистки стальных листов от коррозии перед лазерной резкой / А. Н. Жук, И. В. Качанов, А. В. Филипчик // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 232–241. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-232-241

Technology of Reverse-Blast Corrosion Cleaning of Steel Sheets Prior to Laser Cutting

A. N. Zguk¹⁾, I. V. Kachanov¹⁾, A. V. Filipchik¹⁾

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

Abstract. Quality of surface cleaning against corrosion influences on efficiency in realization of a number of technological processes. While using bentonite clays in power fluid reverse-blast cleaning ensures formation of anticorrosion protective coating with light absorbing properties on the cleaned surface and prevents formation of the repeated corrosion. The paper

Адрес для переписки

Жук Андрей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Zguk Andrey N.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-77
hidrokaf@bntu.by

presents results of the investigations pertaining to influence of reverse-blast cleaning parameters of steel sheets on quality of the cleaned surface prior to laser cutting. Processing conditions, applied compositions of power fluid and also properties of the protective film coatings on the cleaned surface have been given in the paper. The paper considers topography, morphology and chemical composition of the given coating while applying complex metal micrographic, X-ray diffraction and electronic and microscopic investigations. A complex of laser cutting (refer to gas lasers) with output continuous capacity of 2.5/4.0 kW has been applied for experimental works to evaluate influence of the formed surface quality on efficiency of laser cutting process. Specimens having dimension 120×120 mm, made of steel Ст3пс, with thickness from 3 to 10 mm have been prepared for the experiments. An analysis has shown that the application of reverse-blast cleaning ensures higher speed in laser cutting by a mean of 10–20 %. The investigations have made it possible to determine optimum cleaning modes: distance from a nozzle to the surface to be cleaned, jet velocity, pressure. It has been revealed that after drying of the specimens processed by power fluid based on water with concentrations of bentonite clay and calcined soda a protective film coating with thickness of some 5–7 μm has been formed on the whole cleaned specimen surfaces. Chemical base of the coating has been formed by the elements which are included in the composition of bentonite clay being the basic component of the power fluid.

Keywords: steel, surface, jet, power fluid, pressure, roughness, micro-hardness, adhesion strength, film coating

For citation: Zguk A. N., Kachanov I. V., Filipchik A. V. (2017) Technology of Reverse-Blast Corrosion Cleaning of Steel Sheets Prior to Laser Cutting. *Science and Technique*. 16 (3), 232–241. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-232-241 (in Russian)

Введение

Для современного машиностроительного производства Республики Беларусь характерно отсутствие собственной сырьевой базы, результатом чего является существенная зависимость от импортных материальных ресурсов, поставляемых по мировым ценам. При таких условиях работы эффективность производства может быть достигнута за счет экономии и использования энерго- и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих получение высококачественной и конкурентоспособной продукции [1–10]. Эффективность реализации целого ряда технологических процессов напрямую зависит от качества очистки поверхностей от коррозии. Так, для подготовки стальных листов под лазерную резку (ЛР) (в настоящее время на промышленных предприятиях Беларуси насчитывается порядка 300 комплексов, на которых ежегодно разрезается более 80 тыс. т листовой стали) необходимо после очистки от коррозии иметь высококачественную поверхность с шероховатостью $Ra = 0,4\text{--}1,0$ мкм, с минимальным уровнем упрочнения (микротвердость H_μ после обработки по сравнению с исходным значением $H_{\mu 0}$ должна находиться в пределах $H_\mu = (1,5\text{--}1,6)H_{\mu 0}$) и низкой отражательной способностью [11, 12]. Однако обеспечение такого качества поверхности экономически затратно, требует значительного количества расходных материалов (чугунная, стальная дробь), участия в работе высококвалифицированного персонала.

Исследования, проведенные в лаборатории кафедры «Кораблестроение и гидравлика» БНТУ, показали, что весьма экономично и с гораздо меньшими затратами мощности можно подготовить листовые стальные материалы к последующей ЛР, применяя для удаления продуктов коррозии реверсивно-струйную очистку (РСО), основанную на струйном воздействии рабочих жидкостей на обрабатываемую поверхность. При этом в качестве рабочих жидкостей используются водные составы с добавками речного песка – на начальном этапе очистки и бентонитовой глины – на завершающем. При такой последовательности обработки листовых материалов на очищенной поверхности формируется микронеровность порядка 2–4 мкм, покрытая антикоррозионным защитным слоем, который имеет химсостав бентонитовой глины и характеризуется низкой отражательной способностью, что актуально при ЛР. Испытания на лазерных комплексах, относящихся по типу к газовым лазерам, показали повышение скорости ЛР для образцов, обработанных по указанной технологии, на 10–20 % по сравнению, например, с материалами, очищенными традиционными (дробе- и пескоструйными) способами.

Основная часть

Как уже отмечалось, для подготовки стальных листов к ЛР использовали технологию РСО, основанную на струйном воздействии рабочей жидкости на обрабатываемую поверхность. Схематично струйное устройство, предназ-

наченное для реализации PCO, представлено на рис. 1 [13]. В нем имеется конусное сопло 1, установленное соосно в стакане 2, который через уплотнение 3 плотно прижимается к обрабатываемой поверхности 4. Расстояние L между поверхностью и соплом регулируется путем перемещения последнего в радиальных опорах 5.

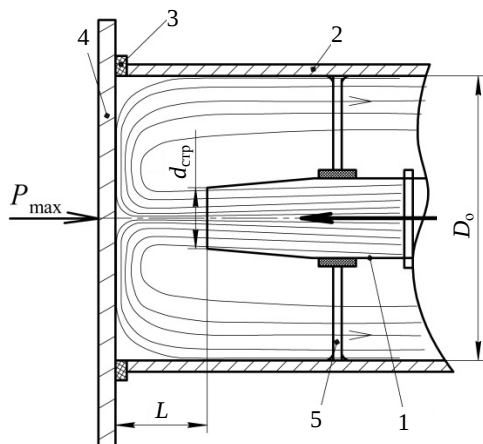


Рис. 1. Схема струйного устройства для реализации процесса реверсивно-струйной очистки

Fig. 1. Scheme of blast device for realization of reverse-blast cleaning

При подключении данного устройства к насосной установке струйный поток рабочей жидкости, проходящий через сопло, после взаимодействия с обрабатываемой поверхностью разворачивается на 180° относительно своего первоначального движения. Этот разворот обуславливает возникновение реактивной силы, которая, складываясь с силой от воздействия струи, приводит к увеличению максимальной силы струйного воздействия $P_{\max}$ в 1,5–1,75 раза (теоретически – в два раза) по сравнению с традиционной схемой очистки, когда струя после взаимодействия с поверхностью растекается под углом 90° по отношению к последней. За счет повышенного силового воздействия при неизменной подаче для данной конструкции PCO [13] характерны снижение мощности на 30–50 % и увеличение производительности на 30–40 % по сравнению с традиционными струйными методами очистки.

В [14, 15] в результате решения вариационной задачи по установлению минимальной мощности обработки определено, что минимальная сила разрушения слоя коррозии на обрабатываемой поверхности отмечается (при прочих равных параметрах – давлении на входе

в сопло p_c , расстоянии L от сопла до обрабатываемой поверхности) при коэффициенте обжатия струи $\lambda = 0,063$. Коэффициент обжатия струи характеризует оптимальные соотношения (с точки зрения мощности, затраченной на обработку) между диаметром полости D_0 и диаметром струи $d_{\text{стр}}$ на выходе из сопла (рис. 1) и определяется по формуле

$$\lambda = \frac{d_{\text{стр}}}{D_0 - d_{\text{стр}}}, \quad (1)$$

где $d_{\text{стр}}$ – диаметр струи, принятый равным диаметру сопла, мм; D_0 – то же цилиндрической полости, используемой для прохода реверсивной струи, мм.

Для проведения экспериментальных исследований процесса PCO стальных листовых материалов был разработан экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.

Работа на стенде осуществлялась следующим образом. При включении насосов высокого давления 3 рабочая жидкость (вода) из бака 1 через фильтры 2 по напорным линиям 4 подавалась в сопло 9, смонтированное в стакане 8. С помощью эффекта эжекции по линиям 31 либо 24 в сопло подавалась рабочая жидкость, состав которой подбирали с учетом требований для определенного этапа очистки. Так, исследованиями установлена целесообразность проведения очистки в три этапа. При этом на первом этапе для обеспечения повышенной производительности из рабочего бака 30 рабочая жидкость в сопло подавалась с высокой степенью абразивного воздействия на обрабатываемую поверхность. В качестве такой рабочей жидкости использовали воду, содержащую речной песок с размером фракций 0,10–0,63 мм и полиакриламид. Концентрации речного песка $K_{\text{р.п}}$ и полиакриламида $K_{\text{п}}$ в баке 30 составляли соответственно 8–10 % и 10^{-6} – 10^{-2} % от общего объема рабочей жидкости. Предварительную подготовку речного песка по фракционному составу осуществляли в устройстве гравитационного типа действия [16].

На втором этапе PCO использовали чистую воду, подаваемую насосами из бака 1 на обрабатываемую поверхность по линиям 4 с целью полной промывки ее от мелкодисперсных фракций речного песка, что необходимо для проведения третьего этапа очистки.

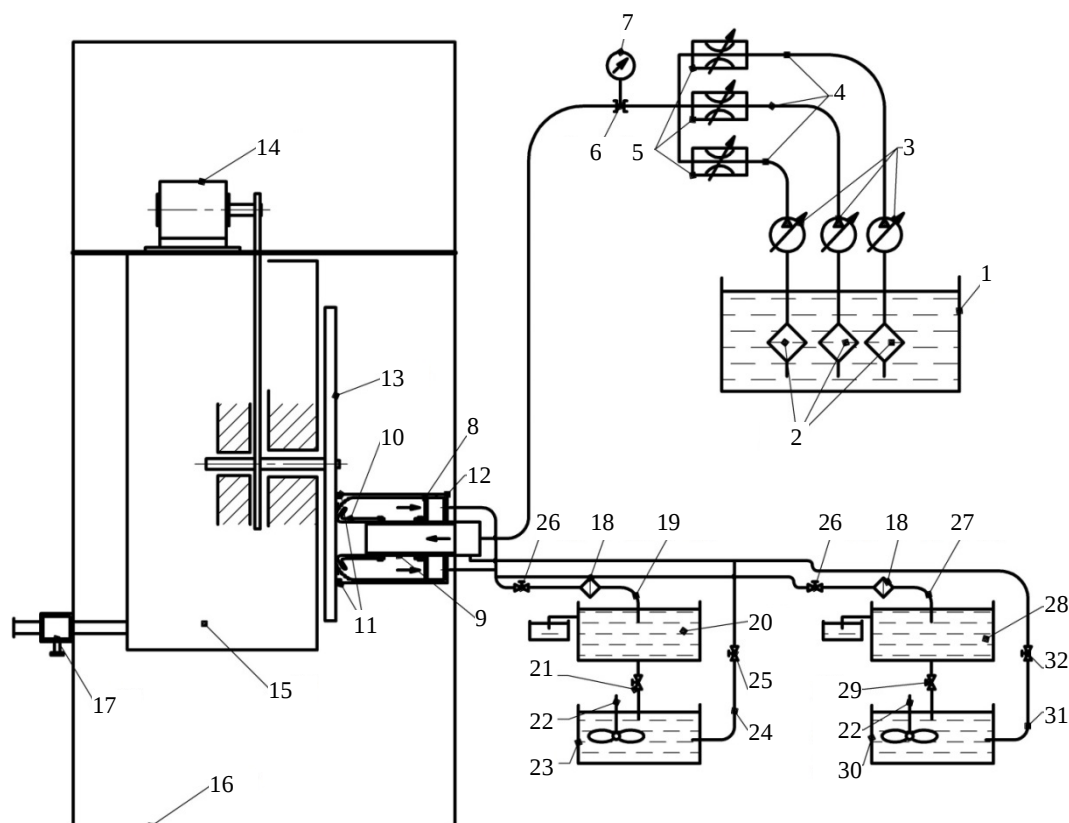


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования процесса реверсивно-струйной очистки

Fig. 2. Scheme of test stand for investigation of reverse-blast cleaning process

На третьем этапе осуществления РСО из бака 23 по линии 24 эжектировалась рабочая жидкость, содержащая воду, в которой были размешаны бентонитовая глина и кальцинированная сода с концентрациями соответственно $K_b = 5\text{--}20\%$ и $K_{kc} = 2\text{--}10\%$ от общего объема. Указанные концентрации после эжектирования в струйном сопле снижались в струе, действующей на обрабатываемую поверхность, до значений $K_{b,c} = 2\text{--}5\%$ и $K_{kc,c} = 0,2\text{--}1,0\%$. Указанные диапазоны были установлены как оптимальные при подготовке очищенной поверхности под ЛР.

При этом отличительным моментом реализации третьего этапа РСО является операция сушки образцов при комнатной температуре ($T = 20^\circ\text{C}$) в течение 20–24 ч. Указанная операция позволяет сформировать на обработанной поверхности за счет заполнения впадин микронеровностей антикоррозионный защитный слой толщиной δ , составляющий не менее $1,1\text{--}1,2$ от максимальной высоты выступов микронеровностей $Ra_{\max}$ ($\delta > (1,1\text{--}1,2)Ra_{\max}$).

Регулирование подачи на различных этапах РСО в сопле осуществляли с помощью кранов 32 и 25, установленных соответственно на линиях 31 и 24, связанных с баками 30 и 23, заполненными рабочей жидкостью, необходимой для отработки первого и третьего этапов процесса. Регулирование подачи и давления воды, поступающей из бака 1 в сопло, на всех трех этапах РСО осуществляли с помощью дросселей 5. Контроль давления на линиях 4 и на входе в сопло выполняли с помощью образцового манометра 7. Для регенерации отработанных составов путем отстоя использовали баки 20, 28, связанные трубопроводами с кранами 21, 29 с основными баками 30, 23, оснащенными для поддержания во взвешенном состоянии соответственно песка и бентонита барботажными устройствами (импеллерными мешалками) 22. Очистка стальных пластин 13 осуществлялась в баке 16. Плотное прилегание пластин 13 к стакану 8 и уплотнительным элементам 11 обеспечивалось с помощью фиксаторного устройства 17. При необходимости для повышения площади обработки пластина 13

приводилась во вращательное движение через ременную передачу, связанную с электродвигателем 14.

В качестве силового оборудования в экспериментальном стенде использовали три мембранных насоса 3 марки 700А с номинальной мощностью на валу 2,0 кВт, которые обеспечивали с помощью дросселей 5 переменное давление $p_c = 15\text{--}29$ МПа на входе в сопло и скорость реверсивной струи, взаимодействующей с заготовкой 13, в диапазоне 150–350 м/с. Указанные скорости струи $v_{стр}$ определяли через отношение объемного расхода к площади выходного сечения сопла. При проведении исследований по РСО использовали сопла диаметром $d_c = 1$ мм, устанавливаемые на различном расстоянии L от обрабатываемой поверхности. Для струйной обработки брали образцы из стали Ст3пс с исходной шероховатостью $Ra = 15\text{--}20$ мкм. Шероховатость поверхности Ra исходного и обработанного образцов измеряли на профилометре-профилографе модели 252 типа А1 в соответствии с ГОСТ 2789–73. Погрешность измерений составила 4–5 %.

Некоторые результаты по влиянию расстояния от торца сопла до очищаемой поверхности L на качество обработанной поверхности применительно к третьему этапу процесса РСО приведены на рис. 3.

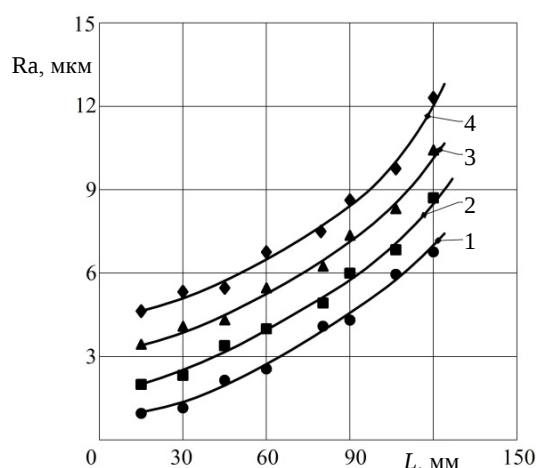


Рис. 3. Зависимость шероховатости Ra обработанной поверхности от расстояния L : 1 – $p_c = 29$ МПа; 2 – 22; 3 – 18; 4 – 15 МПа; $v_{стр} = 203$ м/с; $\lambda = 0,063$; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $K_{б.с} = 5$ %; $K_{к.с.с} = 1$ %

Fig. 3. Dependence of machined surface roughness Ra on distance L : 1 – $p_c = 29$ МПа; 2 – 22; 3 – 18; 4 – 15 МПа; $v_{стр} = 203$ м/с; $\lambda = 0,063$; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $K_{б.с} = 5$ %; $K_{к.с.с} = 1$ %

Образцы на этом этапе обработки (после применения состава с концентрациями в струе бентонита и кальцинированной соды $K_{б.с} = 5$ % и $K_{к.с.с} = 1$ %, остальное – вода) высушивали для формирования защитного покрытия на очищенной поверхности. Обработку осуществляли при реверсивно-струйном течении с коэффициентом обжатия струи $\lambda = 0,063$ и при переменных давлениях на входе в сопло $p_c = 15\text{--}29$ МПа.

Согласно рис. 3, шероховатость очищенной поверхности Ra увеличивается от 1,0 до 14,0 мкм при изменении расстояния L от 15 до 120 мм, кроме того, при давлении на входе в сопло $p_c = 22$ МПа (кривая 2) для $L = 15\text{--}60$ мм значения шероховатости на очищенной поверхности находятся в диапазоне 2,0–4,0 мкм, который вполне (при данной технологической обработке) может быть использован для проведения ЛР.

Влияние скорости струи на выходе из сопла при РСО на шероховатость обработанной поверхности показано на рис. 4.

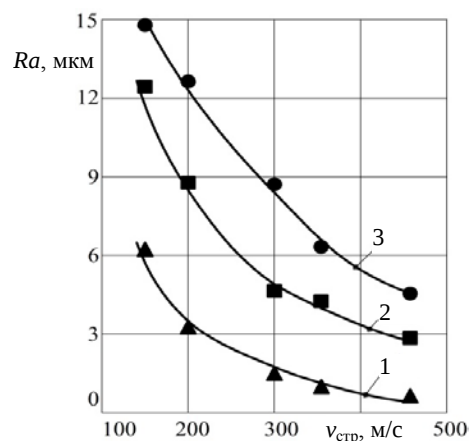


Рис. 4. Влияние скорости струи $v_{стр}$ на шероховатость обработанной поверхности Ra :

1 – $L = 50$ мм; 2 – 100; 3 – 130 мм; $\lambda = 0,063$; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $K_{б.с} = 5$ %; $K_{к.с.с} = 1$ %

Fig. 4. Influence of jet speed $v_{стр}$ on machined surface roughness Ra :

1 – $L = 50$ мм; 2 – 100; 3 – 130 мм; $\lambda = 0,063$; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $K_{б.с} = 5$ %; $K_{к.с.с} = 1$ %

Из анализа рис. 4 видно, что при увеличении скорости струи от 150 до 350 м/с шероховатость поверхности Ra уменьшается в среднем в 2–2,5 раза, достигая, например, значений 1,8–3,5 мкм в диапазоне скоростей 200–300 м/с при $L = 50$ мм. Отмеченное уменьшение величины Ra объясняется существенным воздействием реактивной силы при развороте струи на высокой скорости в реверсивном сопле.

Отдельные эксперименты в этой серии проводили на опытном участке в ОАО «Слущкий сахарафинный комбинат» на установке «КАМАТ K451A-E45B» (ФРГ) (рис. 5), способной развивать давление на входе в сопло $p_c = 63\text{--}120$ МПа, что обеспечивало скорость струи $v_{стр}$ на выходе из сопла в пределах $350\text{--}550$ м/с.



Рис. 5. Очистная установка высокого давления «КАМАТ K451A-E45B» (ФРГ), обеспечивающая реверсивно-струйную очистку со скоростью струи $v_{стр} = 350\text{--}550$ м/с

Fig. 5. High-pressure cleaning unit “KAMAT K451A-E45B” (Germany) ensuring reverse-blast cleaning with jet speed $v_{стр} = 350\text{--}550$ m/s

Наряду с шероховатостью исследовали влияние РСО на микротвердость поверхности H_μ . Измерение микротвердости осуществляли по ГОСТ 9450–76 на микротвердометре Micromet-2 с нагрузкой на индентор $0,5$ Н.

Влияние расстояния L от сопла до очищаемой поверхности на микротвердость H_μ при изменении входного давления p_c представлено на рис. 6. Из рисунка видно, что в диапазоне $L = 15\text{--}120$ мм для всех исследованных давлений p_c , равных $15, 18, 22, 29$ МПа, имеет место уменьшение значений H_μ . Следует отметить, что максимальная величина H_μ , равная 2750 МПа, зафиксирована для $p_c = 29$ МПа. При этом для исходной микротвердости $H_{\mu 0} = 1950$ МПа значение отношения $H_\mu/H_{\mu 0}$ не превышает допустимой величины $H_\mu/H_{\mu 0}$ ($H_\mu/H_{\mu 0} =$

$= 2750/1950 = 1,41$), равной $1,5\text{--}1,6$ и отвечающей требованиям, которые предъявляются к стальной поверхности, прошедшей предварительную очистку перед ЛР.

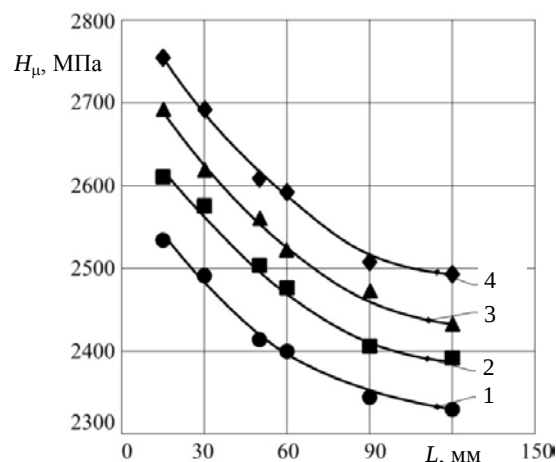


Рис. 6. Влияние расстояния от сопла до очищаемой поверхности L на ее микротвердость H_μ : 1 – $p_c = 15$ МПа; 2 – 18; 3 – 22; 4 – 29 МПа (состав рабочей жидкости: $K_{б.с} = 5\%$; $K_{к.с.с} = 1\%$; остальное – вода; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м)

Fig. 6. Influence of distance L from nozzle up to cleaned surface on its micro-hardness H_μ : 1 – $p_c = 15$ МПа; 2 – 18; 3 – 22; 4 – 29 МПа (composition of power fluid: $K_{б.с} = 5\%$; $K_{к.с.с} = 1\%$; the rest – water; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ m)

Влияние концентрации бентонитовой глины $K_{б.с}$ на микротвердость очищенной поверхности H_μ показано на рис. 7. Из анализа зависимостей на рис. 7 видно, что величина H_μ достигает максимальных значений при концентрациях бентонита $K_{б.с}$ в составе рабочей жидкости, равных $4\text{--}5\%$. При $L = 50$ мм превышение максимальной величины H_μ относительно исходного значения $H_{\mu 0}$ ($H_\mu = 2480$ МПа; $H_{\mu 0} = 1950$ МПа) составляет 27% , что в полной мере отвечает требованиям к стальной поверхности, подготовленной для ЛР.

Существенным эффектом РСО с использованием бентонитовой глины является формирование защитного пленочного покрытия на очищенной поверхности после сушки образцов. Для исследования топографии, морфологии и химсостава пленочного покрытия были подготовлены образцы из стали СтЗпс, обработанные реверсивной струей рабочей жидкости ($K_{б.с} = 5\%$; $K_{п.с} = 10^{-5}\%$; $K_{к.с.с} = 1\%$; остальное – вода) при $L = 50$ мм; $d_c = 1$ мм; $p_c = 22$ МПа.

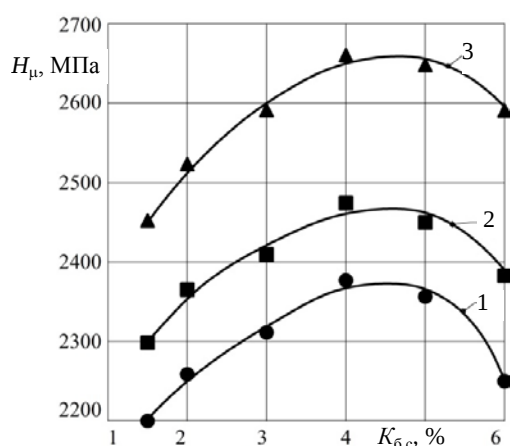


Рис. 7. Зависимость микротвердости поверхности H_μ от концентрации бентонитовой глины в составе рабочей жидкости: 1 – $L = 15$ мм; 2 – 50; 3 – 120 мм; $p_c = 22$ МПа; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м

Fig. 7. Dependence of H_μ -surface micro-hardness on bentonite clay concentration in power fluid: 1 – $L = 15$ mm; 2 – 50; 3 – 120 mm; $p_c = 22$ MPa; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ m

Съемку и анализ топографии шлифов с пленочным покрытием проводили на сканирующем электронном микроскопе Mira фирмы Tescan (Чехия) с использованием ускоряющего напряжения 20 кВ. Морфологию образцов изучали на этом же электронном микроскопе. Исследование элементного состава проводили на микрорентгеноспектральном анализаторе INCA 350 фирмы Oxford Instruments (Великобритания). Этот прибор позволяет определить

элементы с их минимальным пределом обнаружения ($-0,5\%$) и погрешностью $0,05-0,15\%$.

Внешний вид покрытия, сформированного на поверхности образцов после РСО, показан на рис. 8. Из рисунка видно, что на поверхности при РСО формируется защитное, равномерно распределенное, плотное покрытие, состоящее из «волнообразных» чешуек 1–4 со средним размером фракций $50-70$ мкм, имеющих четкие граничные очертания, входящие в зацепление у смежных чешуек.

Фотографии поперечных сечений шлифов, представленные на рис. 9, дают представление о качестве поверхности после РСО и толщине сформированного на ней защитного покрытия. Из фотографий видно, что после РСО поверхность металла имеет плавный волнистый профиль abcd со средней высотой выступов шероховатости $2,0-4,0$ мкм. Вся очищенная поверхность полностью изолирована от окружающей среды защитным пленочным покрытием, средняя толщина δ которого составляет $5-7$ мкм (рис. 9b). Из рис. 9 видно, что пленочное покрытие, расположенное между отвердителем шлифа и основным металлом, полностью повторяет микрогеометрию (шероховатость abcd) обработанной поверхности, что позволяет сделать вывод об эффекте граничного склеивания, которое является предпосылкой для обеспечения прочной связи между покрытием и основным металлом.

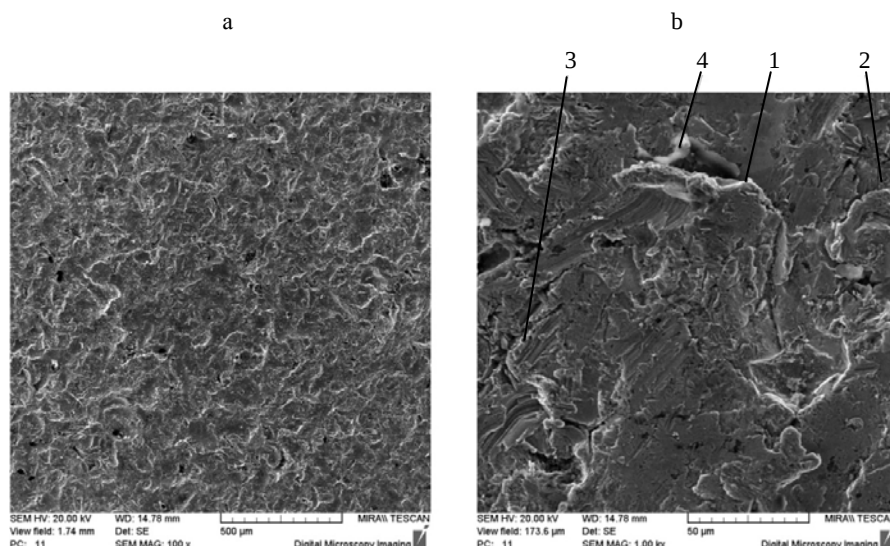


Рис. 8. Внешний вид покрытия, сформированного на поверхности образцов после реверсивно-струйной очистки: а – $\times 25$; б – $\times 250$; 1–4 – «волнообразные» чешуйки

Fig. 8. External view of coating formed on specimen surfaces after reverse-blast cleaning: а – $\times 25$; б – $\times 250$; 1–4 – “wavelike” scales

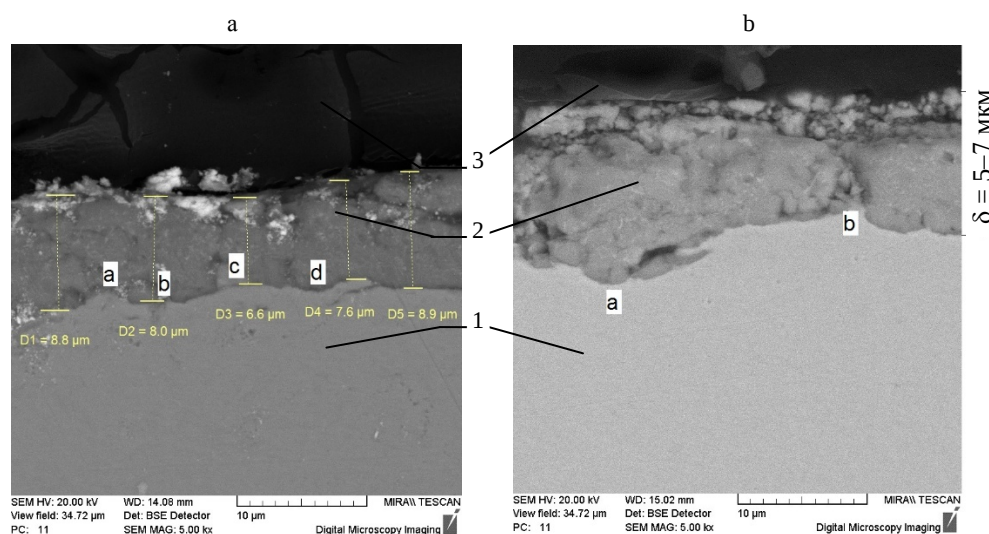


Рис. 9. Внешний вид поперечного сечения обработанных реверсивно-струйной очисткой заготовок: а – поперечное сечение с указанием толщины пленочного покрытия ($\times 1350$); б – структура поперечного сечения ($\times 2500$); 1 – основной металл сталь Ст3пс; 2 – защитное пленочное покрытие на основе бентонитовой глины; 3 – отвердитель шлифа (эпоксидная смола); $p_c = 22$ МПа

Fig. 9. External view of cross sections in blanks treated by reverse-blast cleaning: а – cross section with indication of film coating thickness ($\times 1350$); б – cross section structure ($\times 2500$); 1 – basic metal – steel Cr3nc; 2 – protective film coating on the basis of bentonite clay; 3 – hardener for metallographic specimen (epoxide resin); $p_c = 22$ MPa

Химический состав защитного покрытия в спектрах 1–4, приведенных на рис. 10, и установленный путем точечного микрорентгено-спектрального анализа (сталь Ст3пс) после РСО составом рабочей жидкости ($K_{б.с} = 5\%$; $K_{п.с} = 10^{-5}\%$; $K_{к.с.с} = 1\%$; остальное – вода) представлен в табл. 1.

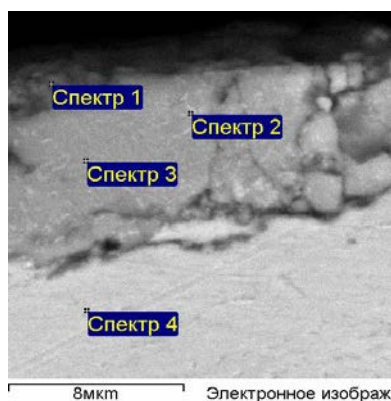


Рис. 10. Участок поперечного сечения шлифа, используемый для анализа химического состава пленочного покрытия (спектры 1–3) и основного металла (спектр 4) ($\times 10000$)

Fig. 10. Area of cross section in metallographic specimen used for analysis of chemical composition of film coating (spectra 1–3) and basic metal (spectrum 4) ($\times 10000$)

Таблица 1

Химический состав покрытия, сформированного на поверхности образца (сталь Ст3пс) после РСО составом рабочей жидкости ($K_{б.с} = 5\%$, $K_{п.с} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с.с} = 1\%$, остальное – вода)

Chemical composition of coating on specimen surface (steel Cr3nc) formed after reverse-blast cleaning while using the following composition of power fluid ($K_{б.с} = 5\%$, $K_{п.с} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с.с} = 1\%$, the rest – water)

Спектр	Al, %	Si, %	Ca, %	Fe, %	O, %
Спектр 1	0,31	0,15	0,33	28,24	Остальное
Спектр 2	0,12	0,14	0,28	40,29	
Спектр 3	0,07	0,08	0,15	50,56	
Спектр 4	0,01	0,01	0,00	81,23	

Из анализа данных табл. 1 видно, что химическую основу пленочного покрытия составляют элементы, входящие в состав бентонитовой глины, являющейся основной компонентой рабочей жидкостью на третьем этапе реализации технологии РСО.

Эксперименты для оценки влияния качества сформированной поверхности на эффективность процесса ЛР проводили на комплексе Hyper Gear 510 корпорации Yamazaki Mazak Optonics Corp. (Япония). Комплекс расположен на производственной базе СООО «Элэзер», г. Минск. Он относится к газовым лазерам с выходной непрерывной мощностью 2,5/4,0 кВт.

Максимальный размер обрабатываемой заготовки составляет 1525×3050 мм. Для процесса ЛР металлов на данном комплексе основным эксплуатационным параметром является максимальная скорость лазерной резки $v_{\text{лр}}$, определяющая производительность и качественные показатели процесса ЛР, исходя из условия отсутствия грата на вырезанных деталях [5–7].

Для проведения исследований были подготовлены образцы размерами 120×120 мм из стали Ст3пс толщиной 3–10 мм. Заготовки разбили на три группы: 1-ю группу обработали по технологии РСО; 2-ю оставили в условиях поставки, без дополнительной обработки поверхности; 3-я группа образцов прошла механическую обработку – дробеструйную, согласно технологической карте.

Образцы подвергали ЛР на различных режимах резки, с увеличением скорости резки от 2,5 до 4,0 м/мин (рис. 11). По результатам проведенных испытаний установлено, что для образцов 1-й группы при увеличении $v_{\text{лр}}$ до 4,0 м/мин грат отсутствовал. Из этого следует, что технологическая операция по зачистке грата не требуется и исключается из дополнительной операции. Для образцов 2-й и 3-й групп выявлено, что при увеличении $v_{\text{лр}}$ до 3,2 м/мин (для 2-й) и до 3,5 м/мин (для 3-й) образуется грат длиной до 2,0 и 1,5 мм соответственно.

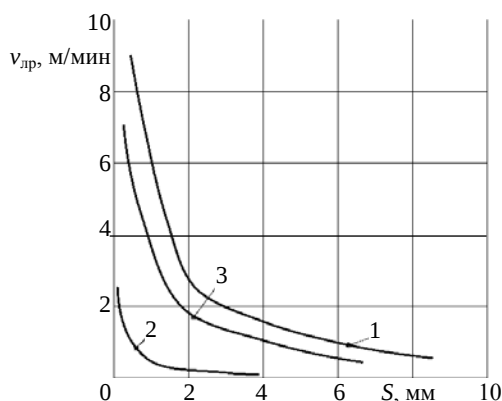


Рис. 11. Зависимость максимальной скорости резания от толщины материала: 1, 2, 3 – номер группы образцов

Fig. 11. Dependence of maximum cutting speed on material thickness: 1, 2, 3 – numbers of specimen groups

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что применение РСО обеспечивает повышение скорости ЛР в среднем на 10–20 %. Отмеченное увеличение скорости ЛР для 1-й группы образцов можно объяснить малой величиной упрочнения поверхностного

слоя, отсутствием эффекта рассеяния энергии лазерного луча от существенно шероховатой поверхности ($Ra = 2\text{--}4$ мкм) за счет того, что на этой поверхности в результате РСО формируется защитное пленочное покрытие. Последнее на основании экспериментальных данных характеризуют светопоглощающими свойствами, которые исключают отражение лазерного луча от поверхности разрезаемого материала.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлены оптимальные режимы очистки: расстояние от сопла до очищаемой поверхности $L = 15\text{--}60$ мм; скорость струи $v_{\text{стр}} = 150\text{--}200$ м/с; давление $p_c = 18\text{--}23$ МПа. При обработке с указанными параметрами обеспечивается формирование шероховатости Ra на поверхности образцов из стали Ст3пс в диапазоне значений 2–4 мкм. Установлено, что на всей очищенной поверхности образцов формируется (после высыхания рабочей жидкости на основе воды с концентрациями бентонитовой глины и кальцинированной соды соответственно $K_{\text{б.с}} = 2,0\text{--}5,0$ % и $K_{\text{к.с.с}} = 0,2\text{--}1,0$ %) защитное пленочное покрытие со средней толщиной 5–7 мкм, которая в 1,5–2 раза превышает среднюю высоту выступов микронеровности Ra поверхности при обработке ее с использованием оптимальных параметров реверсивно-струйной очистки.

2. Проведен анализ образовавшегося на поверхности очищенного образца пленочного покрытия с определением его химического состава и толщины. Установлено, что химическую основу пленочного покрытия составляют элементы, входящие в бентонитовую глину, являющуюся основной компонентой рабочей жидкости на третьем этапе реализации технологии реверсивно-струйной очистки.

3. Проведены производственные испытания очищенных образцов, в результате которых установлена эффективность реверсивно-струйной очистки при подготовке стальных поверхностей под лазерную резку. В частности, для очищенных образцов из стали Ст3пс выявлено повышение скорости лазерной резки на 10–20 %, что было достигнуто за счет устранения эффекта рассеяния лазерного луча от существенно шероховатой поверхности ($Ra = 2\text{--}4$ мкм) при формировании на ней защитного пленочного покрытия толщиной 5–7 мкм, которое исключает отражение лазерного луча от поверхности разрезаемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Банников, И. И. Механизация очистки и окраски подводной части судов / И. И. Банников, Г. Н. Финкель, В. Л. Хейфец. Л.: Судостроение, 1980. 116 с.
2. Агасарян, Р. Р. Струйно-абразивная обработка металлов / Р. Р. Агасарян. Ереван: АрмНИИТИ, 1990. 51 с.
3. Меркулов, В. Н. Перспективные процессы гидрообработки материалов в машиностроении / В. Н. Меркулов. Киев: УкрНИИТИ, 1987. 10 с.
4. Тихомиров, Г. А. Гидрорезание судостроительных материалов / Г. А. Тихомиров. Л.: Судостроение, 1987. 164 с.
5. Крайко, А. Н. Механика жидкости и газа. Избранное / под общ. ред. А. Н. Крайко, ред.-сост. А. Н. Крайко, А. Б. Ватажий, Г. А. Любимов. М.: Физматлит, 2003. 752 с.
6. Вилькер, Д. С. Лабораторный практикум по гидромеханике / Д. С. Вилькер. М.: Физматгиз, 1959. 351 с.
7. Гибсон, А. Гидравлика и ее приложения / А. Гибсон; пер. с 6-го англ. изд. А. Е. Стратоницкой и С. С. Соколова; под ред. М. В. Потапова. М.; Л.: Гос. энергетич. изд-во, 1934. 610 с.
8. Френкель, Н. З. Гидравлика / Н. З. Френкель. М.; Л.: Госэнергиздат, 1956. 456 с.
9. Кудинов, В. А. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В. А. Кудинов, Г. В. Бобров. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
10. Комов, В. А. Гидравлика / В. А. Комов. М.; Л.: Гос. изд-во сельскохозяйств. лит-ры, 1951. С. 230–233.
11. Качанов, И. В. Теоретические и экспериментальные исследования по определению струйного давления рабочей жидкости на обрабатываемую плоскую поверхность / И. В. Качанов, А. В. Филипчик // Наука и техника. 2012. № 1. С. 79–85.
12. Памфилов, Е. А. Формирование качества поверхностей при лазерной обработке / Е. А. Памфилов, В. Д. Северин // Вестник машиностроения. 1982. № 4. С. 46–48.
13. Устройство для очистки от коррозии плоских стальных поверхностей: пат. № 16526 Респ. Беларусь, МПК В 08В 3/00, В63В 59/08 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, И. М. Шаталов, В. Н. Шарий, С. О. Мяделец; дата публ.: 30.10.2012.
14. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. 167 с.
15. Качанов, И. В. Математическая модель расчета минимального давления разрушения поверхностного слоя коррозии от воздействия реверсивной струи рабочей жидкости / И. В. Качанов, В. В. Веремениук, А. Н. Жук // Наука и техника. 2014. № 2. С. 46–51.
16. Устройство для отбора осветленной гидросмеси на земснаряде: пат. № 14172 Респ. Беларусь, МПК Е 02F 3/88 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, Г. В. Песцов, А. Н. Чернобылец; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. № а20081686; заявл. 24.12.2008; опубл. 30.04.2010.

Поступила 27.01.2017

Подписана в печать 29.03.2017

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Bannikov I. I., Finkel G. N., Kheifits V. L. (1980) *Mechanization of Ship Bottom Cleaning and Painting*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 116 (in Russian).
2. Agasarian R. R. (1990) *Abrasive jet Machining of Metal*. Erevan, [Armenian Scientific-Research Institute of Scientific and Technical Information. 51 (in Russian).
3. Merkulov V. N. (1987) *Prospective Material Hydroprocessing in Mechanical Engineering*. Kiev, Ukrainian Scientific-Research Institute of Scientific and Technical Information. 10 (in Russian).
4. Tikhomirov G. A. (1987) *Hydraulic Cutting of Shipbuilding Materials*. Leningrad, Sudostroenie. 164 (in Russian).
5. Kraiko A. N. (ed.), Vatazhnyy A. B., Liubimov G. A. (2003) *Fluid Mechanics. Selected Works*. Moscow, Fizmatlit Publ. 752 (in Russian).
6. Vilker D. S. (1959) *Laboratory Course for Hydromechanics*. Moscow, Fizmatgiz Publ. 351 (in Russian).
7. Gibson A. (1923) *Hydraulics and its Applications*. New York, Van Nostrand Company. 813 (Russ. ed.: Gibson A. (1934). *Gidravlika i ee Prilozheniia*. Moscow, Leningrad: State Power Engineering Publishing House. 610).
8. Frenkel N. Z. (1956) *Hydraulics*. Moscow, Leningrad: State Power Engineering Publishing House. 456 (in Russian).
9. Kudinov V. A., Bobrov G. V. (1992) *Application of Spray Coating. Theory, Technology and Equipment*. Moscow, Metallurgiya Publ. 432 (in Russian).
10. Komov V. A. (1951) *Hydraulics*. Moscow, Leningrad, State Publishing House of Agricultural Literature, 230–233 (in Russian).
11. Kachanov I. V., Filipchik A. V. (2012) Theoretical and Experimental Investigations on Determination of Power Fluid Jet Pressure on Treated Flat Surface. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (1), 79–85 (in Russian).
12. Pamfilov E. A., Severin V. D. (1982) Formation of Surface Quality in Case of Laser Processing. *Vestnik Mashinostroyeniya* [Mechanical Engineering Bulletin], (4), 46–48 (in Russian).
13. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Shatalov I. M., Shariy V. N., Myadelets S. O. (2012) *Device for Corrosion Removal from Flat Steel Surfaces*. Patent Republic of Belarus No 16526 (in Russian).
14. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Babich V. E., Zhuk A. N., Ushev S. I. (2016) *Technology of Jet Hydro-Abrasive Cleaning and Protection of Steel Products Against Corrosion While Using Bentonite Clays*. Minsk, Belarusian National Technical University. 167 (in Russian).
15. Kachanov I. V., Veremeniuk V. V., Zhuk A. N. (2014) Mathematical Model for Calculation of Minimum Pressure Pertaining to Destruction of Surface Corrosion Layer Due to Impact of Working Liquid Reversible Stream. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (2), 46–51 (in Russian).
16. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Pestov G. V., Tchernobylets A. N. (2010) *Device for Extraction of Clarified Hydraulic Fluid from a Dredge*. Patent Republic of Belarus No 14172 (in Russian).

Received: 27.01.2017

Accepted: 29.03.2017

Published online: 30.05.2017

Экспериментальная апробация интеллектуальной системы для управления точностью механической обработки

Магистр техн. наук М. Н. Миронова¹⁾

¹⁾Белорусско-Российский университет (Могилев, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Обеспечение точности механической обработки – актуальная задача технологии машиностроения, решение которой позволяет гарантировать точность работы механизмов и машин, их износостойкость, надежность и долговечность. Для выполнения данной задачи предложен способ, позволяющий создать наибольший запас точности обработки на основе многофакторной оптимизации параметров технологического процесса с использованием методов искусственного интеллекта. С целью обеспечения точности обработки концевыми инструментами разработана интеллектуальная система, базирующаяся на технологиях функциональных семантических сетей. Для выявления корректности функционирования интеллектуальной системы SEMANTIC проведена экспериментальная проверка ее работоспособности. В статье описана методика экспериментальных исследований, целью которых являлось сравнение фактических погрешностей обработки отверстий с погрешностями обработки, прогнозируемыми системой SEMANTIC на основе использования функциональных семантических сетей. В ходе исследований устанавливались зависимости смещений осей обрабатываемых отверстий от подачи и частоты вращения инструмента при сверлении отверстий сверлом из быстрорежущей стали. Приведены результаты анализа предельных и вероятных значений составляющих суммарной погрешности обработки. Показано, что при оценке точности обработки следует учитывать вероятностный характер проявления составляющих суммарной погрешности, задающих ее верхнюю границу, как это и реализовано в описанной интеллектуальной системе. С помощью семантической сети сопоставлены погрешности расположения осей отверстий, обрабатываемых при допустимых подачах и частотах вращения сверла, и соответствующие им экспериментальные значения. На основе экспериментальных исследований подтверждена возможность использования подхода прогнозирования суммарной погрешности обработки, базирующегося на применении технологии функциональных семантических сетей.

Ключевые слова: точность механической обработки, искусственный интеллект, функциональные семантические сети, погрешность обработки

Для цитирования: Миронова, М. Н. Экспериментальная апробация интеллектуальной системы для управления точностью механической обработки / М. Н. Миронова // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 242–248. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-242-248

Experimental Approbation of Intellectual System for Machining Accuracy Control

M. N. Mironova¹⁾

¹⁾Belarusian-Russian University (Mogilev, Republic of Belarus)

Abstract. Provision of machining accuracy is a relevant objective in technology of mechanical engineering and its solution allows to guarantee an operational accuracy of mechanisms and machines, their wear resistance, reliability and durability. In order to solve the given task a method has been proposed in the paper that permits to ensure the highest machining accuracy margin on the basis of multiple-factor optimization of parameters for technological process while using methods of artificial intelligence. To ensure the machining accuracy by point tools, an intellectual system has been developed and it is based on technologies of functional semantic networks. For revealing correctness of SEMANTIC intellectual system operation an experimental inspection of its working capacity has been carried out in the paper. The paper contains description of the methodology for In article the technique of experimental investigations and their purpose is to make a comparative analysis of actual errors in opening machining with the machining errors predicted by the SEMANTIC system on the basis of functional semantic

Адрес для переписки
Миронова Марина Николаевна
Белорусско-Российский университет
просп. Мира, 43,
212000, г. Могилев, Республика Беларусь
Тел.: +375 22 226-62-98
MarinaMN16@mail.ru

Address for correspondence
Mironova Marina N.
Belarusian-Russian University
43 Mira Ave.,
212000, Mogilev, Republic of Belarus
Tel.: +375 22 226-62-98
MarinaMN16@mail.ru

network application. The investigations have made it possible to determine dependences of axial misalignment in the machined openings on tool advance and its rotation frequency while making openings by high-speed steel drills. The paper presents analysis results of limiting and probable values for components of a total machining error. It has been shown that while making assessment of machining accuracy it is necessary to consider probabilistic nature of occurrence of total error components that are setting upper boundary as it is realized in the described intellectual system. The semantic network permits to compare errors in arrangement of opening axes which are machined in accordance with admissible drill advance and rotation frequency and corresponding experimental values. The experimental investigations prove the possibility to use an approach for forecasting a total machining error which is based on application of functional semantic network technology.

Keywords: machining accuracy, artificial intelligence, functional semantic networks, machining error

For citation: Mironova M. N. (2017) Experimental Approbation of Intellectual System for Machining Accuracy Control. *Science and Technique*. 16 (3), 242–248. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-242-248 (in Russian).

Введение

Обеспечение точности механической обработки представляет собой актуальную задачу технологии машиностроения, решение которой позволяет гарантировать точность работы механизмов и машин, их износостойкость, надежность и долговечность. Повышение точности механической обработки упрощает пригоночные работы при сборке, дает возможность осуществить принцип взаимозаменяемости деталей и узлов, вести поточную сборку, что не только сокращает ее трудоемкость, но также облегчает и удешевляет проведение ремонта машин в условиях их эксплуатации. В связи с этим управление процессом механической обработки представляется наиболее эффективным методом обеспечения требуемой точности. В то же время современные методы управления не в полной мере учитывают текущее состояние технологического оборудования, а также функциональные взаимосвязи между параметрами обработки и технологической оснастки.

Альтернативу таким подходам могут составить методы, позволяющие обеспечить наибольший запас точности обработки на основе решения задачи многофакторной оптимизации технологических процессов, в том числе на базе методов искусственного интеллекта. Такое решение даст комплексный подход к обеспечению точности и позволит осуществить многофакторную оптимизацию как параметров технологического процесса, так и технологической оснастки. Для реализации данного подхода была создана интеллектуальная система, предназначенная для решения прикладных задач, описываемых функциональными зависимостями [1].

Основой модели представления знаний в системе служит функциональная семантическая сеть, которая в общем случае – это неориентированный двудольный граф с двумя типами вершин. Первый тип представляет собой параметры рассчитываемых задач, в том числе исходные данные [2–7]. Второй тип вершин опи-

сывает отношения, определяющие функциональные зависимости между параметрами сети. При построении сети для данной системы были использованы математические зависимости между параметрами обработки отверстий концевыми инструментами и отдельными составляющими общей погрешности обработки.

Первая вспомогательная задача, которую решает программный комплекс, заключается в определении минимально замкнутой системы отношений, позволяющей решить поставленную задачу. У отношений выявляются входы и выходы, что приводит к становлению их как функций и преобразованию неориентированного двудольного графа отношений в ориентированный граф решения задачи. Таким образом происходит синтез рабочей программы решения задачи из цепочки программных модулей, соответствующих каждой функции [8].

Разработанная система уверенно решает различные задачи в области управления точностью обработки деталей машин. Она позволяет как успешно решать задачу, связанную с обеспечением точности, так и математически корректно обеспечить наибольший запас точности на основе решения задачи многофакторной оптимизации на семантической сети [9]. Для выявления корректности функционирования интеллектуальной системы SEMANTIC проведена экспериментальная проверка ее работоспособности.

Методика экспериментальных исследований

Целью экспериментальных исследований являлось сравнение фактических погрешностей обработки отверстий с погрешностями обработки, прогнозируемыми системой SEMANTIC на основе использования функциональных семантических сетей. Обработку заготовок осуществляли на радиально-сверлильном станке модели 2K522. В качестве заготовки использовали стальную втулку с базированием по отверстию $\varnothing 50$ мм (рис. 1).

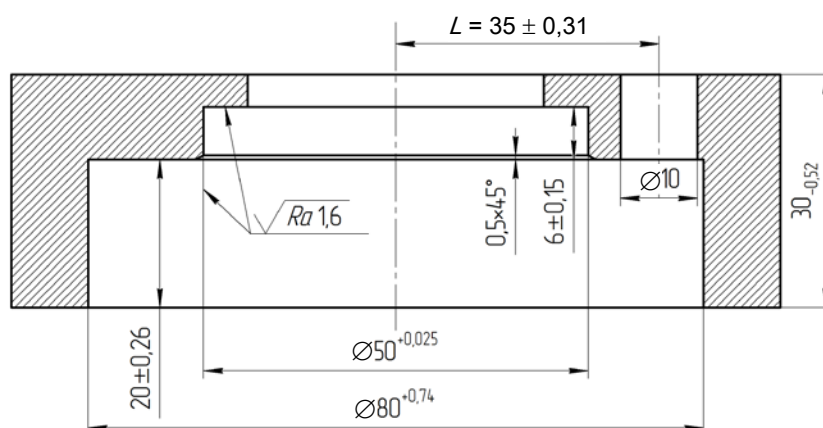


Рис. 1. Заготовка, используемая для экспериментальных исследований

Fig. 1. Work-piece used for experimental investigations

В ходе эксперимента определяли точность расположения отверстия $\varnothing 10$ мм (точность выполнения размера $L = 35 \pm 0,31$ мм).

Для установки заготовки на станке использовали кондуктор (рис. 2), конструктивная схема которого представлена на рис. 3.



Рис. 2. Кондуктор для исследования процесса сверления отверстия диаметром 10 мм

Fig. 2. Conductor for investigation of process for drilling opening of 10 mm diameter

В процессе исследований устанавливали зависимости смещений осей обрабатываемых отверстий от подачи и частоты вращения инструмента при сверлении отверстий диаметром 10 мм сверлом из быстрорежущей стали Р6М5.

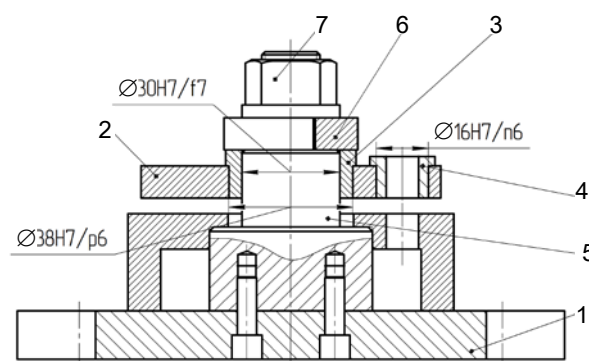


Рис. 3. Конструктивная схема кондуктора:
1 – основание; 2 – плита; 3 – втулка; 4 – кондукторная втулка; 5 – ось; 6 – быстросъемная шайба; 7 – гайка

Fig. 3. Constructive conductor scheme:
1 – basis; 2 – plate; 3 – bush; 4 – jig bush; 5 – axis; 6 – quick-detachable washer; 7 – nut

Измерения смещений осей обрабатываемых отверстий проводили на координатно-измерительной машине DuraMax 5/5/5 фирмы Carl Zeiss (рис. 4).

Полученные результаты позволяют сравнить их с теоретическими погрешностями обработки, прогнозируемыми системой SEMANTIC. При этом учитывались следующие параметры обработки: допуск на расположение оси отверстия $T_{обр} = 620$ мкм; допуск базовой поверхности заготовки $TD = 25$ мкм; твердость материала заготовки по Бринеллю 197 HB; диаметр сверла $D_{in} = 10$ мм; погрешность станка $\epsilon_{ст} = 22$ мкм; длина обработки $L = 10$ мм; стойкость инструмента $T = 25$ мин; длина кондукторной втулки $L_{вт} = 13$ мм; расстояние от поверхности заготовки до кондукторной

втулки $L_{zv} = 5$ мм; максимальный зазор между шпонкой и Т-образным пазом станка $S_{shp} = 0,025$ мм; поле допуска на величину обратной конусности $T_k = 0,06$ мм; поле допуска на размер отверстия кондукторной втулки $\delta A = 0,019$ мм; поле допуска на размер направляющей части инструмента $\delta B = 0,036$ мм; зазор в сопряжении «втулка – инструмент» $S_1 = 0,017$ мм.



Рис. 4. Измерение смещений осей обрабатываемых отверстий на координатно-измерительной машине DuraMax 5/5/5 фирмы Carl Zeiss

Fig. 4. Measurement of misalignments in machined openings while using DuraMax 5/5/5 coordinate measuring machine of Carl Zeiss company

Погрешность определяли посредством системы SEMANTIC с учетом компоновки приспособления на основе размерного анализа цепи B (рис. 5) [10]

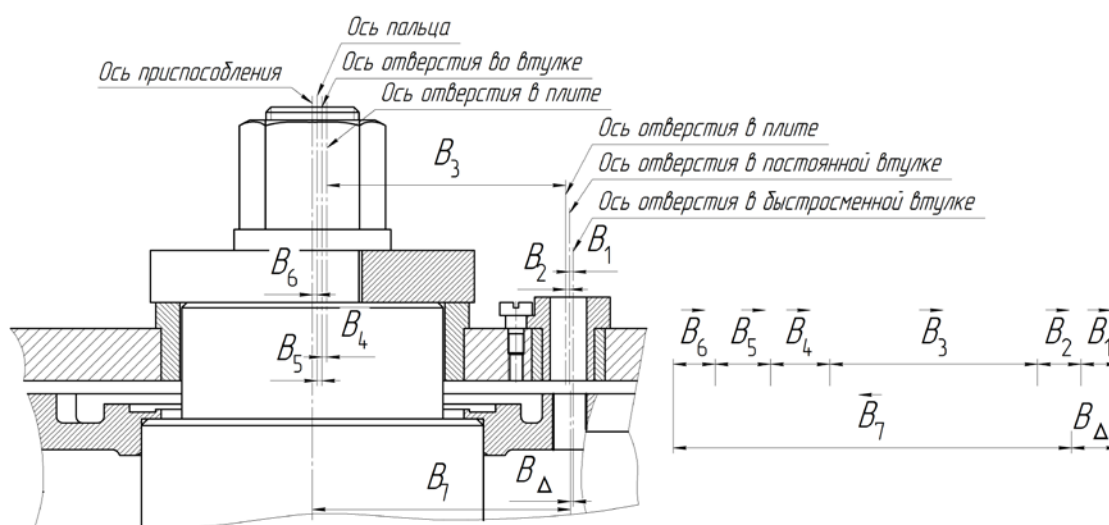


Рис. 5. Размерная цепь элементов приспособления

Fig. 5. Dimension chain of fixture elements

$$B_{\Delta} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 - B_7, \quad (1)$$

где B_1 – эксцентricность наружной и внутренней поверхностей постоянной втулки; B_2 – отклонение от соосности осей наружной поверхности постоянной втулки и отверстия в плите; B_3 – межцентровое расстояние между осями отверстий в плите; B_4 – эксцентricность наружной и внутренней поверхностей втулки; B_5 – отклонение от соосности осей отверстия во втулке и пальца; B_6 – эксцентricность пальца; B_7 – расстояние от оси обрабатываемого отверстия до оси пальца.

Для расчета замыкающего звена размерной цепи (1) в результате прямых измерений на координатно-измерительной машине DuraMax 5/5/5 были получены действительные значения геометрических параметров деталей кондуктора, влияющих на точность обработки отверстий (рис. 6):

- эксцентricность наружной и внутренней поверхностей постоянной втулки 0,02 мм;
- межцентровое расстояние между осями отверстий в кондукторной плите 34,997 мм;
- эксцентricность наружной и внутренней поверхностей втулки (рис. 3, поз. 3) 0,094 мм;
- эксцентricность пальца 0,007 мм.

После прямых измерений размеров соответствующих деталей были также вычислены зазоры между втулкой и пальцем (0,079 мм) и между втулкой и отверстием в кондукторной плите (0,086 мм).

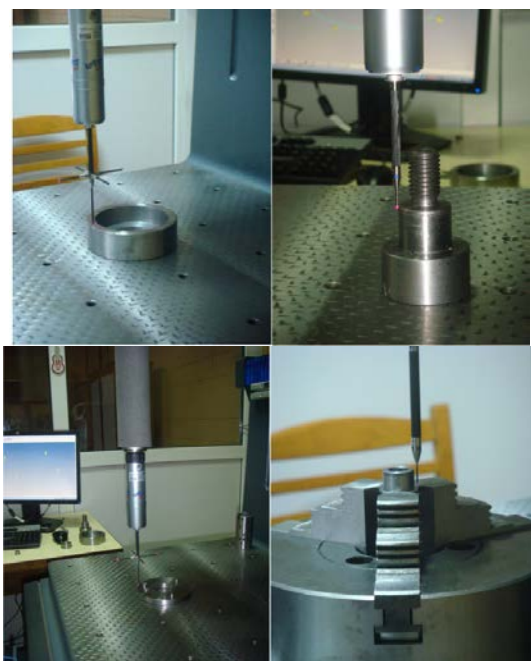


Рис. 6. Измерения геометрических параметров деталей кондуктора на координатно-измерительной машине

Fig. 6. Measurement of geometrical parameters of conductor parts while using coordinate measuring machine

Анализ погрешностей обработки

Следует отметить, что замыкающее звено цепи B будет принимать различные значения в зависимости от сочетаний направлений указанных погрешностей в пределах имеющихся зазоров и погрешностей элементов приспособления. Наибольшее значение B_{Δ} примет при сонаправленном проявлении погрешностей, в этом случае

$$\begin{aligned} B_{\Delta}^{\max} &= B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 - B_7 = \\ &= 0,02 + 0,086 + 34,997 + 0,094 + 0,079 + \\ &\quad + 0,007 - 35 = 0,283 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (2)$$

Наименьшее значение B_{Δ} будет принимать при взаимной компенсации погрешностей, что может быть характерно для обработки с наличием силовых воздействий на элементы приспособления, например перемещение элементов приспособления под действием сил резания в направлении выборки зазоров. Опишем порядок определения соответствующей величины $B_{\Delta}^{\min}$.

Очевидно, что указанные погрешности могут быть разделены на две группы. Первая связана с установкой постоянной кондукторной втулки и включает погрешности B_1, B_2 . Вторая

включает погрешности, связанные с установкой кондукторной плиты (B_4, B_5, B_6). Значение $B_{\Delta}^{\min}$ соответствует тому случаю, когда суммарные погрешности двух указанных групп компенсируют друг друга. При этом погрешности B_1 и B_2 должны быть разнонаправленными, в результате чего смещение оси внутренней поверхности кондукторной втулки, зависящее только от погрешностей первой группы, будет совпадать с направлением смещения B_2 .

Погрешности B_4, B_5 также в этом случае компенсируют друг друга, при этом результирующее смещение оси отверстия в плите будет совпадать с направлением B_4 , так как $B_4 > B_5$. Для компенсации погрешностей двух групп погрешность B_6 должна совпадать по направлению с B_4 , то есть

$$\begin{aligned} B_{\Delta}^{\min} &= -B_1 + B_2 + B_3 - B_4 + B_5 - B_6 - B_7 = \\ &= -0,02 + 0,086 + 34,997 - 0,094 + \\ &\quad + 0,079 - 0,007 - 35 = 0,041 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (3)$$

Видно, что величины $B_{\Delta}^{\min}$ и $B_{\Delta}^{\max}$ отличаются друг от друга почти в семь раз. Следует отметить, что хотя такие значения погрешностей и возможны, однако указанное суммирование по максимальным и минимальным значениям не соответствует случайному характеру сочетаний направлений элементарных погрешностей. Для нахождения наиболее вероятной погрешности используют теоретико-вероятностный метод, согласно которому

$$\begin{aligned} B_{\Delta}^{\text{вер}} &= \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + (B_7 - B_3)^2 + B_4^2 + B_5^2 + B_6^2} = \\ &= \sqrt{0,02^2 + 0,086^2 + (35 - 34,997)^2 + \dots} \rightarrow \\ &\rightarrow + 0,094^2 + 0,079^2 + 0,007 = 0,152 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогичный анализ предельных и вероятных значений погрешностей может быть применен и для суммарной погрешности обработки. Так, для определения суммарной погрешности расположения оси отверстия при указанных исходных данных с помощью семантической сети были определены ее составляющие: погрешность базирования заготовки $\varepsilon_6 = 0,025$ мм; погрешность закрепления заготовки $\varepsilon_3 = 0$; погрешность обработки $\Delta_y = 0,0003$ мм, обусловленная упругими смещениями оси концевого инструмента; погрешность обработки $\Delta_r = 0,042$ мм, обусловленная геометрическими смещениями оси концевого инструмента; погрешность $\Delta_t = 0,003$ мм, вызы-

ваемая тепловыми деформациями технологической системы; погрешность $\Delta_c = 0,022$ мм, связанная с неточностью, износом и деформацией станков; погрешность $\Delta_n = 0$, возникающая в результате размерного износа режущих инструментов.

Очевидно, что значение суммарной погрешности обработки Δ_Σ в реальных условиях также может изменяться в широких пределах, при этом действительные значения погрешностей могут отличаться на порядок и более. Например, наибольшее значение Δ_Σ будет принимать при максимальной погрешности приспособления ($\varepsilon_n = B_{\Delta}^{\max}$) и при сонаправленном проявлении ее составляющих

$$\begin{aligned}\Delta_{\Sigma}^{\max} &= \varepsilon_6 + \varepsilon_3 + \varepsilon_n + \Delta_y + \Delta_r + \Delta_t + \Delta_c + \Delta_n = \\ &= 0,025 + 0 + 0,283 + 0,0003 + 0,042 + \\ &\quad + 0,003 + 0,022 + 0 = 0,3753 \text{ мм.}\end{aligned}\quad (5)$$

Наименьшее значение Δ_Σ будет принимать при минимальной погрешности приспособления ($\varepsilon_n = B_{\Delta}^{\min}$) и при взаимной компенсации ее составляющих. Например, в случае, когда погрешность обработки, обусловленная геометрическими смещениями оси концевой инструмента, будет компенсироваться погрешностью приспособления. В результате получим

$$\begin{aligned}\Delta_{\Sigma}^{\min} &= \varepsilon_6 + \varepsilon_3 - \varepsilon_n - \Delta_y + \Delta_r - \Delta_t - \Delta_c + \Delta_n = \\ &= 0,025 + 0 - 0,055 - 0,0003 + 0,042 - \\ &\quad - 0,003 - 0,022 + 0 = 0,0007 \text{ мм.}\end{aligned}\quad (6)$$

Как видно из представленных результатов, суммарные погрешности обработки $\Delta_{\Sigma}^{\max}$ и $\Delta_{\Sigma}^{\min}$ отличаются на несколько порядков. Данное обстоятельство показывает, что при оценке точности обработки следует учитывать вероятностный характер проявления составляющих суммарной погрешности, задающий ее верхнюю границу, как это и реализовано в описанной интеллектуальной системе. Таким образом, при оценке суммарной погрешности будем использовать зависимость

$$\Delta_{\Sigma}^{\text{впр}} = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_n^2 + \Delta_y^2 + \Delta_r^2 + \Delta_t^2 + \Delta_c^2 + \Delta_n^2}. \quad (7)$$

Как правило, на практике действительные значения погрешностей обработки оказываются меньше даже данной оценки. С учетом проведенного анализа с помощью семантической сети сопоставлены погрешности расположения осей отверстий, обрабатываемых при допусти-

мых подачах и частотах вращения сверла, и соответствующие им экспериментальные значения (рис. 7, 8).

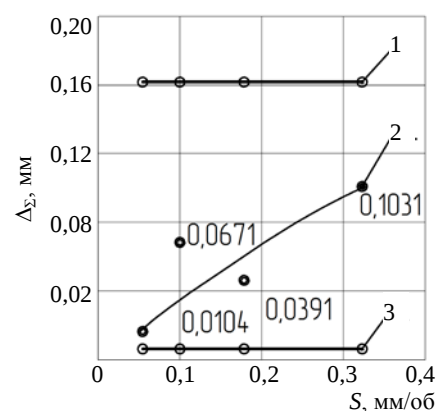


Рис. 7. Зависимость погрешности расположения осей обрабатываемых отверстий от подачи сверла при $n = 355 \text{ мин}^{-1}$: 1 – оценка суммарной погрешности программой при вероятностной погрешности приспособления $\Delta_{\Sigma}^{\text{впр}}$; 2 – экспериментальные данные; 3 – оценка минимальной суммарной погрешности программой $\Delta_{\Sigma}^{\min}$

Fig. 7. Dependence diagram of error in axis location of the machined openings on drill feed at $n = 355 \text{ мин}^{-1}$: 1 – assessment of total error while using a program and with a probable fixture error $\Delta_{\Sigma}^{\text{впр}}$; 2 – experimental data; 3 – assessment of minimum total error $\Delta_{\Sigma}^{\min}$ while using a program

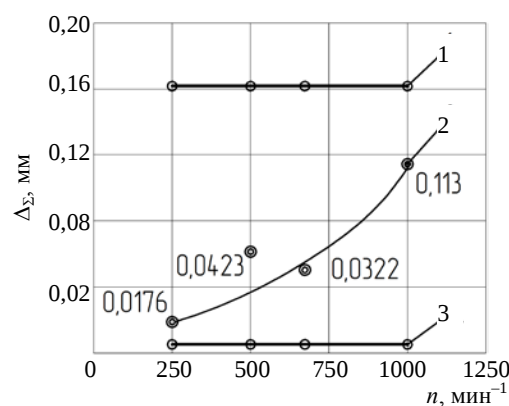


Рис. 8. Зависимость погрешности расположения осей обрабатываемых отверстий от частоты вращения шпинделя при $S = 0,32 \text{ мм/об}$: 1 – оценка суммарной погрешности программой при вероятностной погрешности приспособления $\Delta_{\Sigma}^{\text{впр}}$; 2 – экспериментальные данные; 3 – оценка минимальной суммарной погрешности программой $\Delta_{\Sigma}^{\min}$

Fig. 8. Dependence diagram of error in axis location of the machined openings on spindle rotational speed at $S = 0.32 \text{ mm/rev}$: 1 – assessment of total error while using a program and with probability fixture error $\Delta_{\Sigma}^{\text{впр}}$; 2 – experimental data; 3 – assessment of minimum total error $\Delta_{\Sigma}^{\min}$ while using a program

Из графиков на рис. 7, 8 видно, что экспериментальные данные находятся в пределах ограничений $[\Delta_{\Sigma}^{\min} \dots \Delta_{\Sigma}^{\max}]$, полученных системой, что демонстрирует корректность ее функционирования. Вид графиков, построенных по результатам работы интеллектуальной системы, объясняется преимущественным влиянием на точность обработки погрешности приспособления и погрешности, обусловленной геометрическими смещениями оси концевой инструмента, которые не зависят от подачи и частоты вращения сверла. Данное обстоятельство подтверждает тезис о том, что задачу проектирования станочного приспособления следует рассматривать как подзадачу обеспечения точности обработки, решение которой должно учитывать действительное состояние технологического оборудования.

ВЫВОДЫ

1. В результате экспериментальных исследований установлено, что действительные значения общей погрешности обработки заключены в интервале прогнозируемых системой SEMANTIC значений, что подтверждает корректность ее функционирования, а также возможность ее использования на этапе подготовки производства для прогнозирования погрешностей обработки отверстий концевым инструментом и проектирования технологической оснастки.

2. Установлено, что наибольшее влияние на точность обработки концевым инструментом оказывает погрешность приспособления.

3. Показано, что задачу проектирования станочного приспособления следует рассматривать как подзадачу обеспечения точности обработки, решение которой должно учитывать действительное состояние технологического оборудования.

4. На основе экспериментальных исследований подтверждена возможность использования подхода прогнозирования суммарной погрешности обработки, базирующегося на применении технологии функциональных семантических сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашкевич, В. М. Управление точностью обработки деталей машин на основе использования семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. 2012. № 1. С. 14–21.
2. Поспелов, Г. С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии / Г. С. Поспелов. М.: Наука, 1988. 280 с.
3. Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
4. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход: пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. 3-е изд. М.: Вильямс, 2010. 1408 с.

5. Искусственный интеллект: справ.: в 3 кн. / под ред. Д. А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. Кн. 2: Модели и методы. 304 с.
6. Пашкевич, В. М. Самообучающиеся системы искусственного интеллекта в машиностроении / В. М. Пашкевич, Ж. А. Мрочек. Могилев: МГТУ, 2003. 423 с.
7. Братко, И. Программирование на языке Пролог для искусственного интеллекта / И. Братко. М.: Мир, 1990. 559 с.
8. Пашкевич, В. М. Многофакторная оптимизация параметров обработки на основе использования семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестник Белорусско-Российского университета. 2011. № 4. С. 51–61.
9. Миронова, М. Н. Интеллектуальная система для расчета станочных приспособлений / М. Н. Миронова // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В: Промышленность. 2010. № 2. С. 26–33.
10. Пашкевич, В. М. Методология комплексного решения технологических задач на основе использования функциональных семантических сетей / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова // Вестник Белорусско-Российского университета. 2013. № 2. С. 95–105.

Поступила 03.03.2015

Подписана в печать 25.06.2016

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Pashkevich V. M., Mironova M. N. (2012) Accuracy Control While Machining Parts on the Basis of Semantic Network. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo* [P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel], (1), 14–21 (in Russian).
2. Pospelov G. S. (1988) *Artificial Intelligence is a Basis for New Information Technology*. Moscow, Science Publ. 280 (in Russian).
3. Gavrilova T. A., Khoroshevsky V. F. (2000) *Knowledge Data Base of Intelligent Systems*. Saint-Petersburg, Piter Publ. 384 (in Russian).
4. Russell S., Norvig P. (2010) *Artificial Intelligence: a Modern Approach*. 3rd ed. New Jersey, Prentice Hall. 1408.
5. Pospelov D. A. [ed.] (1990) *Artificial Intelligence: Reference Book. Book 2: Models and Methods*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. 304 (in Russian).
6. Pashkevich V. M., Mrochek Zh. A. (2003) *Self-Teaching Systems of Artificial Intelligence in Mechanical Engineering*. Mogilev, Mogilev State Technical University. 423 (in Russian).
7. Bratko I. (1990) *Prologue Programming Language for Artificial Intelligence*. Moscow, Mir Publ. 559 (in Russian).
8. Pashkevich V. M., Mironova M. N. (2011) Multiple-Factor Optimization of Machining Parameters on the Basis of Using Semantic Networks. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (4), 51–61 (in Russian).
9. Mironova M. N. (2010) Intellectual System for Design of Adaptations for Metal-Cutting Machine. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry], (2), 26–33 (in Russian).
10. Pashkevich V. M., Mironova M. N. (2013) Methods of Complex Solution of Technological Tasks by Using Functional Semantic Networks. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (2), 95–105 (in Russian).

Received: 03.03.2015

Accepted: 25.06.2016

Published online: 30.05.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255

УДК 621.793.71

Исследование износостойких покрытий из диффузионно-легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой

Докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно¹⁾, А. Ф. Пантелеенко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Проведено исследование износостойких покрытий из диффузионно-легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой. Общеизвестно, что большинство деталей машин и оборудования выходит из строя в результате изнашивания поверхностного слоя. Применение диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9 на основе аустенитной стали при использовании комбинированной технологии, включающей плазменное напыление и лазерное оплавление, позволяет получать качественные покрытия с высокими эксплуатационными характеристиками. Покрытие обладает гомогенной структурой с характерным дисперсным, мелкодендритным строением. При использовании различных режимов борирования порошка и лазерной обработки возможно управление пористостью (0,23–4,70 %), так как данный фактор является «наследуемым» параметром и на него влияют не только характеристики лазерной обработки, но и время борирования порошка. Установлено, что наименьшие деформации, а значит, и внутренние напряжения образуются в покрытии в случае применения самофлюсующегося диффузионно-легированного в течение 3 ч порошка. Выявлено, что для удельной энергии 100–300 Дж/мм² вне зависимости от времени борирования наблюдается резкое увеличение микротвердости на глубине 150–400 мкм от поверхности. Покрытия могут быть успешно применены в промышленности, так как требуемая после лазерного оплавления механическая обработка деталей не ухудшит эксплуатационные характеристики при снятии менее твердого слоя покрытия. Испытания деталей в условиях сухого трения скольжения без смазки показали рост износостойкости в 3–3,2 раза при сохранении коррозионной стойкости.

Ключевые слова: диффузионно-легированный порошок, плазменное напыление, лазерная обработка, напряжения, деформации, износостойкость

Для цитирования: Девойно, О. Г. Исследование износостойких покрытий из диффузионно легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой / О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 249–255. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255

Investigation on Wear-Resistant Coatings from Diffusion-Alloyed Austenitic Steel Obtained by Plasma Spraying and Subsequent Laser Processing

O. G. Devoino¹⁾, A. F. Panteleenko¹⁾

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

Abstract. The paper describes investigations on wear-resistant coatings from diffusion-alloyed austenitic steel obtained while using plasma spraying and subsequent laser processing. It is common knowledge that majority of machine parts and equipment has been out of service due to wear of surface layer. Application of diffusion-alloyed powder ПР-Х18Н9 based

Адрес для переписки

Пантелеенко Алексей Федорович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-81-85
mvm@bntu.by

Address for correspondence

Panteleenko Aleksey F.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-81-85
mvm@bntu.by

on austenitic steel while using combined technology including plasma spraying and laser infusion makes it possible to obtain qualitative coatings with high operational characteristics. The coating has a homogeneous structure with characteristic dispersive finely-dendrite formation. While using various powder boronizing modes and laser processing it is possible to control a porosity (0.23–4.70 %) because the given factor is considered as an inherited parameter and it is influenced not only by laser processing characteristics but by powder boronizing time. It has been established that the least deformations and internal stresses are formed in the coating in the case when self-fluxing diffusion-alloyed powder has been applied for 3 hours. It has been revealed that there is a sharp increase in micro-hardness at the depth of 150–400 μm from the surface for a specific energy of 100–300 J/mm^2 regardless of boronizing time. Coatings can be successfully applied in industry because after laser infusion the required mechanical processing of parts will not worsen operational characteristics when less hard coating layer is removed. Tests of parts under conditions of dry sliding friction without lubrication have shown an increase of wear-resistance by 3–3.2-fold while preserving corrosion-resistance.

Keywords: diffusion-alloyed powder, plasma spraying, laser processing, stresses, deformations, wear resistance

For citation: Devoino O. G., Panteleenko A. F. (2017) Investigation on Wear-Resistant Coatings from Diffusion-Alloyed Austenitic Steel Obtained by Plasma Spraying and Subsequent Laser Processing. *Science and Technique*. 16 (3), 249–255. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255 (in Russian)

Введение

Общеизвестно, что большинство деталей машин и оборудования выходит из строя в результате изнашивания поверхностного слоя. В мировой практике распространенными способами повышения износостойкости деталей машин и оборудования являются технологии их восстановления и упрочнения напылением и наплавкой, в частности комбинированные технологии [1–5]. Они позволяют сочетать преимущества каждой из технологий и добиваться наибольшей эффективности. К одной из таких перспективных технологий, получивших активное развитие в последние годы, относится плазменное напыление с последующей обработкой концентрированным потоком энергии, лазерным в частности. Лазерная обработка позволяет при минимальных кратковременных тепловложениях в деталь формировать ультрадисперсную структуру с повышенными триботехническими свойствами [6–8].

Наряду с выбором технологии не менее важно использование эффективного недорогого материала порошка, позволяющего в совокупности с технологией получать износостойкую структуру покрытия, например такую, как аустенитная матрица с дисперсными металлоподобными (карбидными, боридными и т. п.) включениями. При этом наряду с высокой износостойкостью, в том числе по сравнению с обычным аустенитным покрытием, может быть обеспечена и достаточная коррозионная стойкость. Это очень важно, например, для таких ответственных деталей, которые работают

в условиях изнашивания и одновременного воздействия коррозионных сред (детали буровой и строительной техники, бумагоделательного и нефтехимического производств, горнодобывающего оборудования и др.).

Распространенное в практике использование для этих целей самофлюсующихся порошков на никелевой основе (типа ПР-ХН80СР4) в последние годы все более проблематично в силу значительно возросшей их стоимости, различных коэффициентов термического линейного расширения такого покрытия и стальной основы, обуславливающих дефектообразование (трещины и сколы) в покрытии, а также неустойчивости, как правило, избыточной совокупности свойств (износо-, тепло-, жаро- и коррозионная стойкость). Кроме того, в промышленности широко применяются самофлюсующиеся порошки на железной основе, однако более высокая температура оплавления покрытия после их нанесения зачастую приводит к короблению деталей, выгоранию легирующих элементов. При применении таких порошков в покрытии образуется высокая пористость.

Перечисленные факторы обуславливают основную область применения порошков данного типа – детали почвообрабатывающих машин, строительной техники. Поэтому авторами статьи предложен ранее не применявшийся для получения напыленных износостойких плазменных покрытий самофлюсующийся диффузионно-легируемый порошок аустенитной стали ПР-Х18Н9 [9].

Потребность в технологии упрочнения и восстановления деталей буровой и строительной

техники, работающей в условиях одновременного изнашивания и коррозии, обусловила необходимость исследования целого комплекса вопросов, включающих разработку специального для выбранной комбинированной технологии (плазменное напыление с лазерной обработкой) материала на основе порошка аустенитной стали, определение оптимальных параметров комбинированной технологии (с лазерным воздействием как заключительным этапом) с точки зрения получения минимальной пористости, износостойкости в условиях механического изнашивания с воздействием абразивных частиц. При этом также исследованы особенности поведения частицы в плазменной струе и проведен расчет оптимальных параметров получения и обработки порошка.

Таким образом, разработка оптимальной комбинированной технологии восстановления и упрочнения деталей машин и оборудования и повышения их срока службы в рамках формулы «технология, новый материал, требуемая структура (аустенит + бориды) и свойства покрытия» обуславливают актуальность темы и необходимость ее разработки.

Методика исследований

Напыление износостойкого слоя из диффузионно-легированных порошков аустенитной стали толщиной 0,4–0,5 мм проводили на следующих режимах: сила тока $I = 350$ А, дистанция напыления $L = 120$ мм, напряжение $U = 65$ –70 В. Фазовый состав покрытий определяли методом рентгеноструктурного анализа на рентгенографическом дифрактометре ДРОН-3. Изучение микроструктуры на травленых и нетравленых шлифах исследуемых материалов проводили с помощью металлографического микроскопа «Альтами МЕТ-1», спектрального электронного микроскопа Vega II LMU, растворового электронного микроскопа LEO1455VP. Лазерную обработку напыленных покрытий выполняли на установке «Комета-2» на следующих режимах: мощность лазера $P = 1$ кВт, удельная энергия $E = 100$ –300 Дж/мм².

Микроструктура плазменных покрытий из диффузионно-легированных порошков аусте-

нитной стали, полученных методом борирования в твердом боризаторе, приведена на рис. 1. В целом такие покрытия характеризуются гетерогенностью структуры, наличием нерасплавившихся боридных оболочек, что характерно для частиц порошка размерами более 90–100 мкм, частицы меньшей фракции разрушаются в полете при расплавлении металлического ядра.

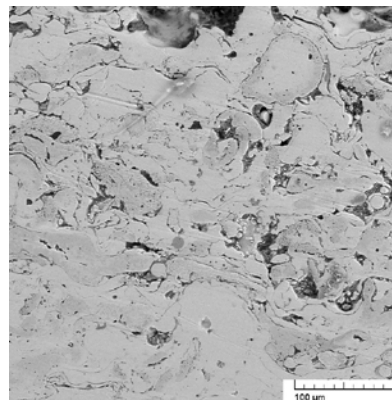


Рис. 1. Микроструктура плазменно-напыленного покрытия из диффузионно-легированного порошка ПР-X18H9

Fig. 1. Microstructure of plasma-sprayed coating made of diffusion-alloyed ПР-X18H9 powder

Покрытия из применяемых порошков характеризуются наличием пористости (9,59–14,68 % в зависимости от времени диффузионного легирования). При этом следует отметить несколько типов пористости: традиционные газозовые поры, возникающие при напылении покрытия [3]; пористость, возникающая вблизи от нерасплавленных частиц; ряд пор обладает «наследственным» характером – они образуются в частицах при диффузионном легировании аустенитного порошка ПР-X18H9 и соответственно выявляются в нетрансформировавшейся частице в напыленном покрытии (рис. 1).

Рентгеновский фазовый анализ показывает присутствие в покрытии фаз Fe₂B и FeB, также выявлено наличие метастабильных боридов Fe₃B (структура изоморфна карбиду Fe₃C) и Fe₂₃B₆ (пространственная группа Fm-3m) [10].

В плазменно-напыленных покрытиях присутствуют нерасплавившиеся частицы, борид-

ные оболочки, оксидные пленки, характерные для плазменного напыления, что позволяет предположить недостаточные физико-механические характеристики покрытия и плохую адгезию покрытия с подложкой. С целью устранения этих недостатков покрытия подвергали лазерной обработке на установке «Комета-2». После лазерной обработки происходит практически полный переплав покрытия (его степень зависит от величины удельной энергии).

Микроструктура покрытия имеет характерное мелкодисперсное, дендритное строение. Плазменно-напыленные покрытия после лазерной обработки характеризуются низкой пористостью (0,23–4,70 %) и гомогенностью структуры (рис. 2а). При лазерной обработке образуется различная микроструктура (рис. 2), однако среди разных ее типов можно выделить три основных: доэвтектическая (рис. 2а), «квазиэвтектическая» (рис. 2б) и заэвтектическая (рис. 2с) [10, 11]. В рассматриваемом случае речь идет о «квазиэвтектике», так как образование этого типа микроструктуры зависит от плотности энергии и скорости охлаждения расплава: чем быстрее охлаждение, тем больше возрастает доля «квазиэвтектики» и близких состояний [10, 12].

Исследование распределения микротвердости по глубине нанесенного покрытия показало,

что для удельной энергии $E = 300 \text{ Дж/мм}^2$ вне зависимости от времени борирования наблюдается резкое увеличение микротвердости на глубине 150–250 мкм от поверхности до $H_{\mu} = 2768\text{--}3572 \text{ МПа}$, что объясняется формированием ультрадисперсной структуры за счет быстрого теплоотвода после лазерной обработки в глубь металла (рис. 3а). Снижение твердости на поверхности объясняется большим тепловложением в покрытие. Для удельной энергии $E = 100 \text{ Дж/мм}^2$ аналогичный скачок происходит на глубине 350–400 мкм от поверхности (рис. 3б). Полученные данные свидетельствуют, что покрытия могут быть успешно применены в промышленности, так как требуемая после лазерного оплавления механическая обработка деталей не ухудшит эксплуатационные характеристики при снятии менее твердого слоя покрытия.

Рентгеновский фазовый и микрорентгено-спектральный анализы позволили установить, что основными фазами покрытий после лазерной обработки являются $\gamma\text{-Fe}$, $\alpha\text{-Fe}$, Fe_2B , FeB (диффузионное легирование порошка в течение 3 ч при температуре 900°C). Наличие в покрытии $\alpha\text{-Fe}$ связано с частичной ферритизацией порошка при диффузионном легировании и фазовыми превращениями в процессе плазменного напыления и лазерной обработки.

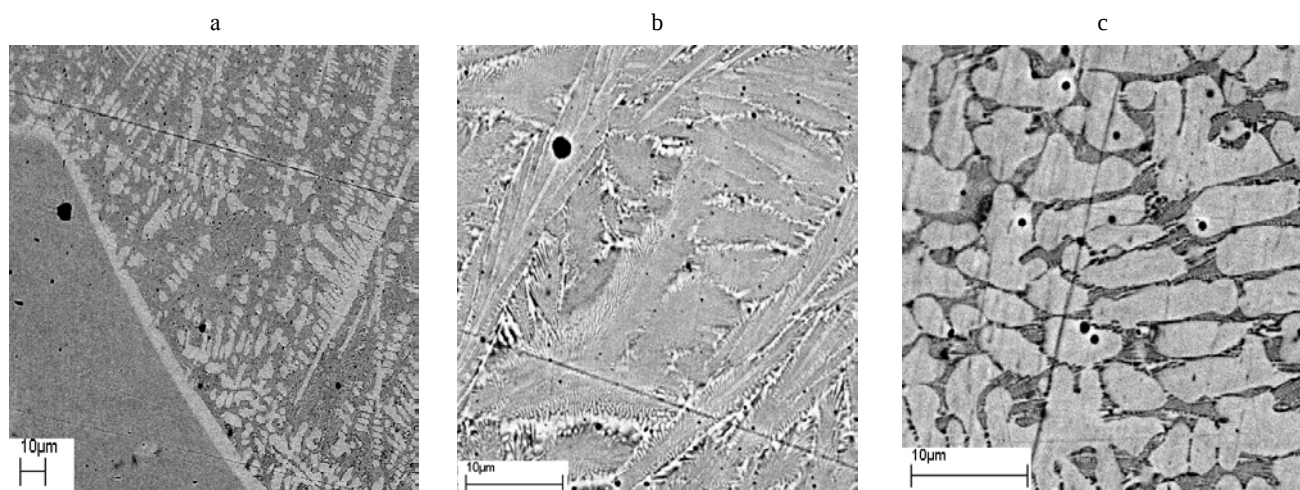


Рис. 2. Микроструктура плазменно-напыленного покрытия после лазерной обработки при удельной энергии: а – $E = 300 \text{ Дж/мм}^2$; б – 100; с – 150 Дж/мм^2

Fig. 2. Microstructure of plasma-sprayed coating after laser processing for specific energy: а – $E = 300 \text{ J/mm}^2$; б – 100; с – 150 J/mm^2

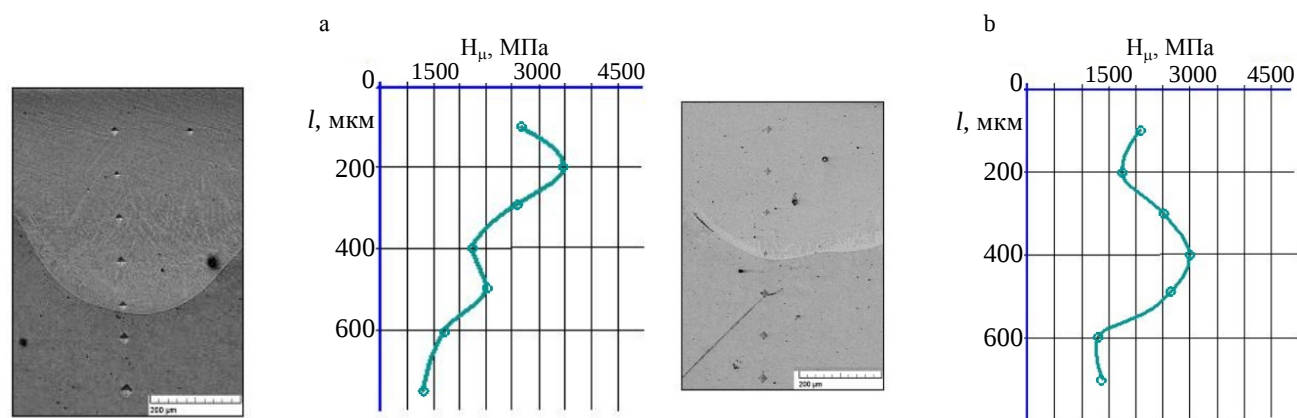


Рис. 3. Распределение микротвердости покрытий по глубине при удельной энергии: а – $E = 300$ Дж/мм²; б – 100 Дж/мм²

Fig. 3. Distribution of microhardness of coatings in depth for specific energy: а – $E = 300$ J/mm²; б – 100 J/mm²

Для изучения поведения при эксплуатации покрытий в них исследовали деформации и внутренние напряжения согласно методике, описанной в [4]. Внутренние напряжения в покрытиях напрямую зависят от деформации образцов. Деформации напыленных и оплавленных образцов из диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Деформация образцов
в результате напыления и оплавления
Deformation of specimens
as a result of spraying and infusion

Время бориро- вания, ч	Удельная энергия, Дж/мм ²	Деформация, мкм		Общая величина деформа- ции Δ , мкм
		после напыле- ния	после оплавления лазером	
1	100	-520	770	890
	150	-600	680	1280
	200	-870	680	1550
	300	-1060	790	1850
3	100	-50	440	490
	150	0	400	400
	200	-90	460	550
	300	-30	440	470
5	100	-160	500	660
	150	-300	560	860
	200	-820	770	1590
	300	-270	580	860

Примечание. Если нет знака «-», то изгиб плоского образца направлен вверх (сжимающие напряжения), при наличии знака «-» изгиб направлен вниз (растягивающие напряжения).

В графическом виде результаты опытов представлены на рис. 4. По степени деформирования образцов можно судить о появляющихся

ся на различных стадиях получения покрытия напряжениях. Так, при плазменном напылении в образцах возникают растягивающие напряжения, а после лазерной обработки существенное термическое влияние приводит к смене направления напряжений и образованию сжимающих напряжений.

Из анализа рис. 4 можно предположить, что состав напыляемого покрытия имеет существенное влияние на величину напряжений, возникающих при плазменном напылении: при напылении порошка с минимальным содержанием бора (1 ч) значительная часть энергии плазменной струи идет не на расплавление материала, а на нагрев самого образца, что ведет к образованию больших растягивающих напряжений. Столь резкое падение растягивающих напряжений при напылении порошка после 3 ч и небольшое увеличение после 5 ч обработки можно объяснить тем, что теплопроводность борида Fe_2B в четыре раза меньше, чем у FeB , а в покрытии присутствует избыточное количество нерасплавившихся боридных оболочек, поэтому теплота плазменного факела плохо проводится в тело образца.

При большей удельной энергии отмечаются значительные изменения величины внутренних напряжений. После лазерной обработки наблюдается изменение знаков напряжений и их размеров. Это можно объяснить разными коэффициентами термического расширения и размерами зоны расплава и зоны термического влияния, что, в свою очередь, зависит от химического состава покрытия и его микроструктуры.

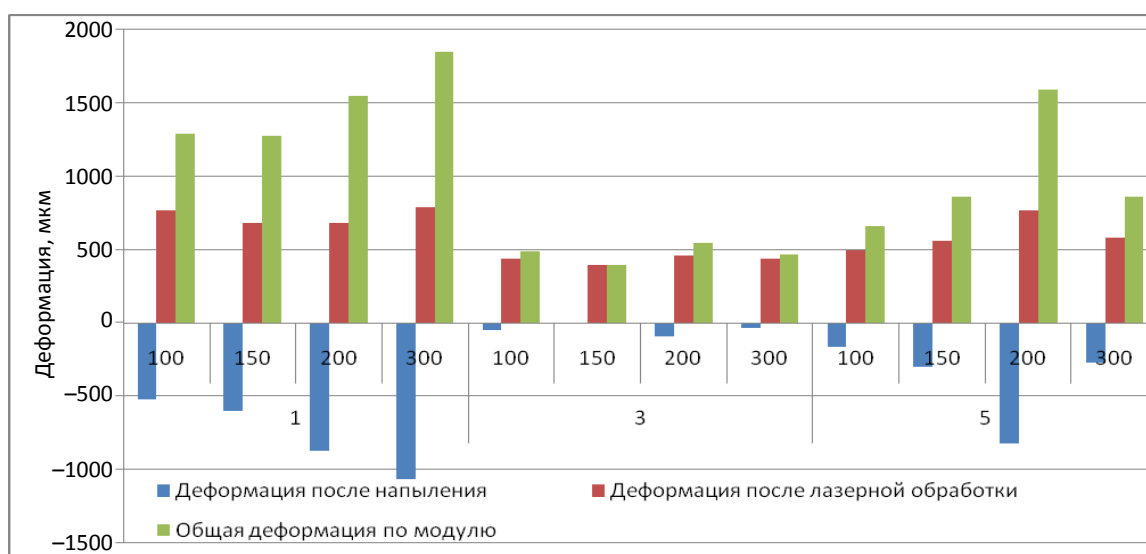


Рис. 4. Остаточные напряжения на разных этапах обработки

Fig. 4. Residual stresses at different processing stages

Из рис. 4 видно, что наименьшие напряжения образуются в покрытии при использовании диффузионно-легированного порошка в течение 3 ч. Исходя из этого, дальнейшие расчеты проводили с учетом этого фактора. Для оптимизации процессов высокоэнергетической обработки плазменно-напыленных покрытий применили центральный композиционный ротатбельный план второго порядка. В качестве исследуемого параметра приняли износостойкость, а в качестве факторов выступали содержание бора (зависит от времени борирования), скорость перемещения лазерного луча v , плотность мощности q . Оптимальные параметры получения покрытия из диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9 плазменным напылением и лазерным оплавлением следующие: время борирования порошка 3 ч, удельная энергия $E = 300 \text{ Дж/мм}^2$.

Для образцов покрытий проводили испытания на трение и износ на машине трения МТ-1 по схеме «диск – вал». Триботехнические испытания выполняли в условиях сухого трения скольжения без смазки. Износостойкость исследуемых образцов повысилась в 2,5–3,2 раза по сравнению с образцами из закаленной стали 45. Также для изучения эксплуатационных характеристик был изучен такой параметр, как коррозионная стойкость. Исследования в камере соляного тумана согласно ГОСТ 9.308–85 показали, что коррозионная стойкость напыленных и оплавленных образцов сопоставима

с коррозионной стойкостью нержавеющей стали.

По разработанной технологии была упрочнена партия деталей «Шпилька-фиксатор Ф-240» тележки перебазирования башенного крана, работающих в условиях сухого трения скольжения с абразивными частицами. В результате испытаний определено, что износостойкость упрочненных деталей выросла в 3–3,2 раза по сравнению с базовыми деталями.

ВЫВОДЫ

1. Применение самофлюсующегося диффузионно-легированного порошка аустенитной стали ПР-Х18Н9 [9] позволяет получать порошок и покрытия с управляемой структурой, а следовательно, и свойствами. С помощью разработанного порошка в совокупности с комбинированной технологией в условиях мелкосерийного производства можно упрочнять и восстанавливать широкую номенклатуру деталей с разными свойствами. При использовании различных режимов борирования порошка и лазерной обработки возможно управление пористостью (0,23–4,70 %), так как данный фактор является «наследуемым» параметром и на него влияют не только характеристики лазерной обработки, но и время борирования порошка.

2. Установлено, что наименьшие деформации, а значит, и внутренние напряжения образуются в покрытии в случае применения самофлюсующегося диффузионно-легированного в

течение 3 ч порошка. Выявлено, что для удельной энергии 100–300 Дж/мм² вне зависимости от времени борирования наблюдается резкое увеличение микротвердости на глубине 150–400 мкм от поверхности. Покрытия могут быть успешно применены в промышленности, так как требуемая после лазерного оплавления механическая обработка деталей не ухудшит эксплуатационные характеристики при снятии менее твердого слоя покрытия.

3. Проведенные испытания деталей строительной техники подтвердили корректность лабораторных исследований. Износостойкость упрочненных деталей увеличилась в 3–3,2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Мори-гаки, пер. с япон. В. Н. Попова; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Восстановление деталей машин: справ. / Ф. И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В. П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
3. Витязь, П. А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильюшенко, А. И. Шевцов. Минск: Беларус. наука, 2006. 363 с.
4. Износостойкие газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков на основе чугуна / В. М. Константинов [и др.]; под ред. Ф. И. Пантелеенко. Минск: Технопринт, 2005. 146 с.
5. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. Минск: Беларус. наука, 1998. 583 с.
6. Ильюшенко, А. Ф. Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий / А. Ф. Ильюшенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов; под общ. ред. А. Ф. Ильюшенко. Минск: Бестпринт, 2007. 246 с.
7. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
8. Parallel Laser Melted Tracks: Effects on the Wear Behaviour of Plasma-Sprayed Ni-Based Coatings / D. Felgueroso [et al.] // *Wear*. 2008. Vol. 264, No 3–4. P. 257–263.
9. Способ получения самофлюсующегося порошка: пат. 17321 Респ. Беларусь, B22F 1/02, C23C 8/70 / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко, В. В. Оковитый; заявитель БНТУ, № а20100650; заявл. 30.04.2010, опубл. 30.06.2013 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. 2013. № 3. С.78.
10. Пантелеенко, А. Ф. Композиционные покрытия, полученные высокоэнергетическими методами / А. Ф. Пантелеенко, О. Г. Девойно; под ред. В. В. Клубовича // *Перспективные материалы и технологии*. Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013. С. 587–607.
11. Пантелеенко, А. Ф. Исследование морфологии и микроструктуры покрытий из диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9, полученных плазменным напылением с последующим лазерным модифицированием / А. Ф. Пантелеенко // *Вестник БрГТУ. Сер. «Машиностроение»*. 2012. № 4. С. 37–39.
12. Таран, Ю. Н. Структура эвтектических сплавов / Ю. Н. Таран, В. Н. Мазур. М.: Металлургия, 1978. 312 с.

Поступила 22.12.2016

Подписана в печать 23.02.2017

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Hasui A., Morigaki O. (1985) *Surfacing and Spraying*. Moscow, Mashinostroyenie Publ. 240 (in Russian).
2. Panteleenko F. I., Lyalyakin V. P., Ivanov V. P., Konstantinov V. M. (2003) *Reconditioning of Machine Parts: Reference Book*. Moscow, Mashinostroyenie. 672 (in Russian).
3. Vityaz P. A., Ilyushchenko A. F., Shevtsov A. I. (2006) *Fundamentals of Wear-Resistant, Corrosion-Resistant and Thermal Protection Coating Depositions*. Minsk, Belaruskaya Nauka Publ. 363 (in Russian).
4. Panteleenko F. I., Konstantinov V. M., Spiridonov N. V., Devoino O. G., Avsieich A. M. (2005) *Wear-Resistant Gas-Thermal Coatings from Diffusion-Alloyed Powder Based on Cast-Iron Chips*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 146 (in Russian).
5. Vityaz' P. A., Ivashko V. S., Il'yushchenko A. F., Shevtsov A. I., Manoilo E. D. (1998) *Theory and Practice for Protective Coating Deposition*. Minsk, Belaruskaya Nauka Publ. 583 (in Russian).
6. Ilyushchenko A. F., Okovity V. A., Shevtsov A. I. (2007) *High-Energy Processing of Plasma Coatings*. Minsk, Bestprint Publ. 246 (in Russian).
7. Grigoriants A. G. (1989) *Fundamental of Laser Materials Processing*. Moscow, Mashinostroyenie. 304 (in Russian).
8. Felgueroso D., Vijande R., Cuetos J. M., Tucho R., Hernández A. (2008) Parallel Laser Melted Tracks: Effects on the Wear Behaviour of Plasma-Sprayed Ni-Based Coatings. *Wear*, 264 (3–4), 257–263. DOI: 10.1016/j.wear.2007.03.015.
9. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V. (2013) *Method for Obtaining Self-Fluxing Powder*. Patent Republic of Belarus No 17321 (in Russian).
10. Panteleenko A. F., Devoino O. G., Klubovich V. V. (2013) Composite Coatings Obtained While Using High-Energy Methods. *Non-Conventional Materials and Technologies*. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 587–607 (in Russian).
11. Panteleenko A. F. (2012) The Examination of Morphology and Microstructure of Coatings Made of Diffusion-Alloyed Powder ПР-Х18Н9 Received with Plasma Spraying and Subsequent Laser Modification. *Vestnik BrGTU. Ser. Mashinostroyenie* [Brest State Technical University. Bulletin. Series "Mechanical Engineering"], (4), 37–39 (in Russian).
12. Taran Yu. N., Mazur V. N. (1978) *Structure of Eutectic Alloys*. Moscow, Metallurgiya Publ. 312 (in Russian).

Received: 22.12.2016

Accepted: 23.02.2017

Published online: 30.05.2017

Параметрическая идентификация стохастической системы неградиентным случайным поиском

Докт. техн. наук, проф. А. А. Лобатый¹⁾, асп. В. Ю. Степанов¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. К настоящему времени известно большое разнообразие объектов, задач и методов идентификации, значение которой в различных областях науки и техники постоянно возрастает. Задача идентификации зависит от априорной информации об объекте идентификации, кроме того, существующие подходы и методы идентификации определяются формой математических моделей (детерминированные, стохастические, частотные, временные, спектральные и т. п.). В статье рассматривается задача определения параметров системы (объекта идентификации), заданной стохастической математической моделью, включающей в себя случайные функции времени. Показано, что для оптимизации стохастической системы, подверженной случайным воздействиям, детерминированные методы могут применяться лишь ограниченно для приближенной оптимизации системы при учете усредненных случайных воздействий и при фиксированной структуре системы. Предложен алгоритм идентификации параметров математической модели стохастической системы неградиентным случайным поиском, особенностью которого является его применимость к математическим моделям практически любого вида, так как примененный алгоритм не зависит от линеаризации и дифференцируемости функций, входящих в математическую модель системы. Предложенный алгоритм обеспечивает поиск экстремума заданного критерия качества в условиях внешних неопределенностей и ограничений путем использования случайного поиска параметров математической модели системы. Представлены результаты исследования работоспособности рассматриваемой методики идентификации путем математического моделирования гипотетической системы управления при априорно не известных значениях параметров математической модели. Приведенные результаты математического моделирования наглядно показывают работоспособность предлагаемого метода идентификации.

Ключевые слова: идентификация, математическая модель, методы решения, математическая формулировка задачи, неградиентный случайный поиск

Для цитирования: Лобатый, А. А. Параметрическая идентификация стохастической системы неградиентным случайным поиском / А. А. Лобатый, В. Ю. Степанов // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 256–261. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-148-256-261

Parametric Identification of Stochastic System by Non-Gradient Random Searching

A. A. Lobaty¹⁾, V. Y. Stepanov¹⁾

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

Abstract. At this moment we know a great variety of identification objects, tasks and methods and its significance is constantly increasing in various fields of science and technology. The identification problem is dependent on a priori information

Адрес для переписки

Лобатый Александр Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, 25/3,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 266-26-58
mido@bntu.by

Address for correspondence

Lobaty Aleksandr A.
Belarusian National Technical University
25/3 F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 266-26-58
mido@bntu.by

about identification object, besides that the existing approaches and methods of identification are determined by the form of mathematical models (deterministic, stochastic, frequency, temporal, spectral etc.). The paper considers a problem for determination of system parameters (identification object) which is assigned by the stochastic mathematical model including random functions of time. It has been shown that while making optimization of the stochastic systems subject to random actions deterministic methods can be applied only for a limited approximate optimization of the system by taking into account average random effects and fixed structure of the system. The paper proposes an algorithm for identification of parameters in a mathematical model of the stochastic system by non-gradient random searching. A specific feature of the algorithm is its applicability practically to mathematic models of any type because the applied algorithm does not depend on linearization and differentiability of functions included in the mathematical model of the system. The proposed algorithm ensures searching of an extremum for the specified quality criteria in terms of external uncertainties and limitations while using random searching of parameters for a mathematical model of the system. The paper presents results of the investigations on operational capability of the considered identification method while using mathematical simulation of hypothetical control system with a priori unknown parameter values of the mathematical model. The presented results of the mathematical simulation obviously demonstrate the operational capability of the proposed identification method.

Keywords: identification, mathematical model, methods for solving, mathematical formulation of the problem, non-gradient random searching

For citation: Lobaty A. A., Stepanov V. Y. (2017) Parametric Identification of Stochastic System by Non-Gradient Random Searching. *Science and Technique*. 16 (3), 256–261. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-256-261 (in Russian).

Введение

Задачи идентификации математических моделей и методы их решения рассматриваются специалистами в области технической (и не только) кибернетики с тех пор, как исследование объектов и систем начали производить на основе использования их математических моделей. Значение идентификации в различных областях науки и техники постоянно возрастает, так как трудно представить решение задач анализа или синтеза технических систем без применения их математических моделей. Под идентификацией в широком смысле понимается получение или уточнение по экспериментальным данным модели реального объекта, выраженной в тех или иных терминах [1, 2].

К настоящему времени известно большое разнообразие объектов, задач и методов идентификации. В зависимости от априорной информации об объекте идентификации задача, как правило, может сводиться к определению структуры модели объекта (непараметрическая идентификация) или к определению параметров известной или заданной математической модели объекта (параметрическая идентификация). Строгое разграничение между подходами к проведению идентификации при решении практических задач провести не представляется возможным. Существующие подходы и методы идентификации, как правило, определяются формой математических моделей (детерминированные, стохастические, частотные, временные, спектральные и т. п. [3–6]). Кроме того, методы идентификации могут различаться в зависимости от принятого критерия идентификации и применяемых математических методов решения сформулированной задачи.

Математическая формулировка задачи

Из различных задач идентификации рассмотрим определение параметров системы (объекта идентификации), заданной стохастической математической моделью, включающей в себя случайные функции времени. Пусть существует некая система (объект) идентификации, описываемая математической моделью вида

$$\dot{Y} = f(Y, X, \xi, D, t), \quad Y(t_0) = Y_0, \quad (1)$$

где f – векторная функция; $Y = Y(t)$ – вектор переменных (фазовых координат), характеризующих работу системы (объекта); $X = X(t)$ – то же детерминированных переменных, поступающих на вход системы; $\xi = \xi(t)$ – то же (внешних помех и внутренних шумов); D – матрица параметров системы; t – время.

Модель системы (1) теоретически не может быть известна абсолютно точно. На практике на основе априорных исследований задается некоторая приближенная математическая модель системы вида

$$\dot{Y}_M = f_M(Y_M, X_M, \xi_M, D_M, t), \quad Y_M(t_0) = Y_{M0}. \quad (2)$$

Необходимо определить матрицу $D_M = [d_1, d_2, \dots, d_n]$ параметров математической модели на основании имеющегося вектора измерений $Z = Z(t)$, который характеризует выход измерителя, описываемого математической моделью вида

$$Z = h(Y, t) + \zeta(t), \quad (3)$$

где h – векторная функция; $\zeta(t)$ – вектор шумов измерителя.

Структурная схема системы идентификации может быть представлена в виде, показанном на рис. 1. Для реализации системы идентификации (рис. 1) необходимо иметь модель идентифицируемой системы вида (2) и следующую модель измерителя:

$$Z_M = h_M(Y_M, t) + \zeta_M(t). \quad (4)$$

В процессе идентификации системы необходимо найти оптимальные значения параметров (вектора $D_{\text{опт}}(t)$), обеспечивающие минимум заданного функционала качества (целевой функции) $J(D)$. При этом должны выполняться обязательные требования, предъявляемые к системе, заключающиеся в наложенных на систему ограничениях $\Omega(D)$, формализованных в виде совокупности равенств и неравенств

$$\min_{D \in \Omega} J(D) \rightarrow D_{\text{опт}}. \quad (5)$$

При такой постановке задача идентификации представляется задачей оптимизации.

В настоящее время существует большое число методов оптимизации систем, которые в общем случае можно разделить на детерминированные и вероятностные, градиентные и неградиентные, поисковые и непоисковые [3, 4]. Так как одновременное проведение структурной и параметрической оптимизаций может привести к появлению множества локальных экстремумов, необходимо основную параметрическую оптимизацию («в большом») проводить перед структурной, а на конечном этапе – параметрическую оптимизацию (адаптацию) «в малом» [7].

Для оптимизации стохастической системы, подверженной случайным воздействиям, детерминированные методы могут ограниченно применяться лишь для приближенной оптимизации системы при учете усредненных случайных воздействий и при фиксированной структуре системы. Алгоритм поисковой настройки получим на основе метода неградиентного случайного поиска [7]. Достоинство данного метода заключается в том, что он применим к математическим моделям практически любого вида, так как не зависит от линеаризации и дифференцируемости функций, входящих в математические модели систем.

Неградиентный случайный поиск

Пусть при заданных характеристиках векторного входного сигнала $X = X(t)$ системы характеристики векторного выходного сигнала $Y = Y(t)$ полностью определяются стохастическим оператором $A(X, Y, t)$

$$Y = A(X, Y, t)X. \quad (6)$$

Изменять оператор системы можно путем варьирования его структуры, а также изменением вектора параметров D . Будем полагать, что структура системы задана, а вектор параметров D определяется некой управляющей матрицей системы U_D (U_D – блочный вектор (матрица-столбец) оптимизируемых параметров элементов системы), которая имеет вид $U_D^T = [D_1, ..., D_n]$. Таким образом, для оптимизируемой системы имеем зависимость

$$Y(U_D) = A(X, Y, U_D, t)X. \quad (7)$$

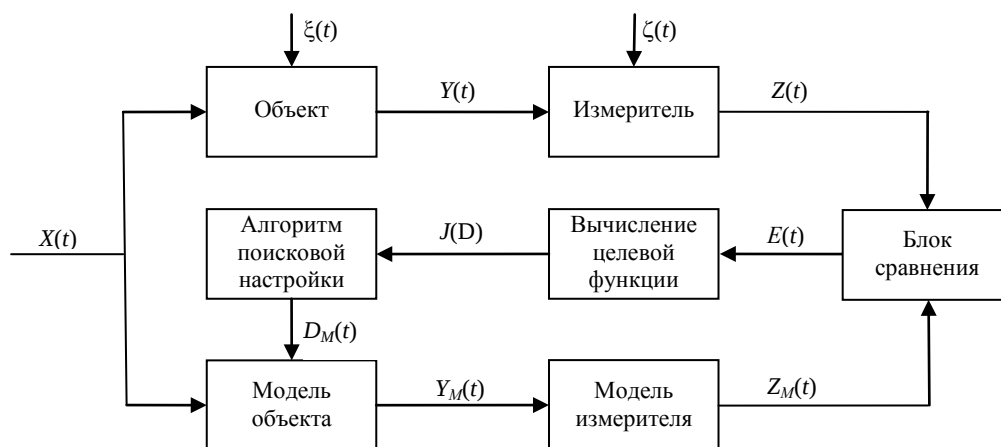


Рис. 1. Структурная схема системы идентификации

Fig. 1. Structural diagram of identification system

В процессе оптимизации управляющая матрица параметров системы U_D может принимать значения, совокупность которых представляет собой фиксированное множество $U_D = \{u_1, u_2, \dots\}$. При этом фиксированному значению u_k соответствуют конкретные значения вектора $D = D_k$.

Для того чтобы получить удобный для алгоритмического синтеза параметров модели системы критерий оптимальности, введем в рассмотрение событие Ξ , заключающееся в том, что при заданном входном сигнале X модель измерения Z_M удовлетворяет требованию близости к заданному значению Z и выполняются все ограничения, наложенные на систему. Применительно к объекту идентификации это означает, что величина ошибки идентификации $E(t)$ не выходит за границы заданной области. Противоположное событие $\bar{\Xi}$ состоит в том, что не выполняется требование близости Z_M к Z или не выполняется хотя бы одно из ограничений, наложенных на систему.

Если матрицу параметров оптимальной математической модели системы обозначить через $U_0 = U_0(D_{\text{опт}})$, то

$$\min_{D \in \Omega} J(D) = \min_{U_D} P(\bar{\Xi} | U_D), \quad (8)$$

или

$$P(\Xi | U_0) = \max_{U_D} P(\Xi | U_D). \quad (9)$$

Формула (9) называется критерием максимума вероятности успешного решения задачи, поставленной перед системой. Он позволяет производить оптимизацию систем, выходными сигналами которых могут быть не только случайные величины, но и случайные события [7–9]. При такой постановке задачи управляющая матрица системы имеет вид $U_D^T = [D_1, \dots, D_n]$, т. е. свойства системы зависят от n векторов D_k ($k = \overline{1, n}$), составляющих блочный вектор (матрицу-столбец). Следовательно, необходимо определить $U_D = U_0$ такое, при котором достигается максимум вероятности события, заключающегося в близости реального выходного сигнала системы к требуемому (выражение (9)).

Пусть D_v – v -е сочетание элементов матрицы U_D . При совместном рассмотрении матрицы U_D и события Ξ справедливо равенство

$$P(D_v)P(\Xi | D_v) = P(\Xi)P(D_v | \Xi), \quad v = \overline{1, n_D}, \quad (10)$$

где $P(\Xi | D_v)$, $P(D_v | \Xi)$ – условные вероятности событий; n_D – число возможных состояний

матрицы U_D (число возможных векторов параметров системы).

Из (10) следует, что

$$\max_{D_v} P(\Xi | D_v) = \max_{D_v} P(\Xi) \frac{P(D_v | \Xi)}{P(D_v)}. \quad (11)$$

Вероятности $P(D_v)$ задаются и называются априорными. В процессе поиска необходимо определить апостериорные вероятности $P(D_v | \Xi)$. В частном случае при отсутствии необходимой информации априорные векторы D_v могут быть равновероятными. Поскольку каждому вектору D_v при заданной вероятности $P(D_v)$ соответствует единственное значение вероятности $P(D_v | \Xi)$, то из $\max P(D_v | \Xi)$ выбирается оптимальное значение D_0 .

Для ускорения случайного поиска оптимальных параметров системы $D_{\text{опт}}$ априорные вероятности $P(D_v)$ должны изменяться в соответствии с апостериорной информацией, накопленной в блоке оптимальной управляющей матрицы U_0 . В основу этого изменения нужно положить выражение (11), из которого следует, что максимальная эффективность поиска достигается при $P(D_v) = P(D_v | \Xi)$.

Общая схема неградиентного случайного поиска с адаптацией, предназначенного для оптимизации идентифицируемых значений параметров системы при точной работе измерителя [4, 7], показана на рис. 2.

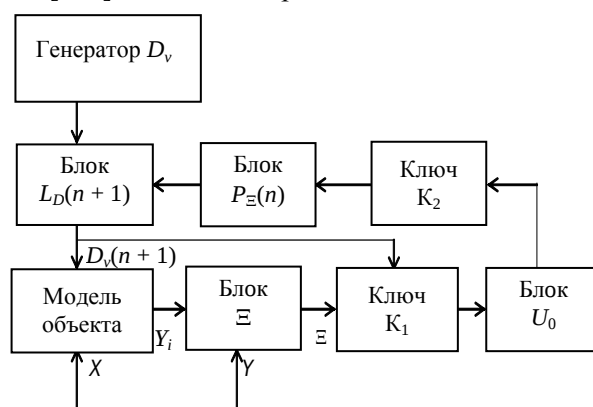


Рис. 2. Структурная схема неградиентного случайного поиска

Fig. 2. Structural diagram of non-gradient random searching

Если событие Ξ имеет место, то ключ K_1 открывается и в блок U_0 поступает вектор U_{cd} , обеспечивающий свершение события Ξ . В блоке U_0 формируются вероятностные характеристики события $(U_D | \Xi)$, называемые апо-

стериорными. Блоки $L_D(n+1)$ и $P_{\Xi}(n)$ в данном случае представляют собой оператор адаптации, который корректирует априорные значения U_D . Работа блока адаптации основана на использовании рекуррентного алгоритма [7]

$$P(D_v; n+1) = P(D_v; n) + \Delta P(D_v; n), \quad (12)$$

где приращение вероятности $\Delta P(D_v; n)$ определяется выражением

$$\Delta P(D_v; n) = P(D_v | \Xi; n) - P(D_v; n). \quad (13)$$

Следовательно

$$P(D_v; n+1) = P(D_v | \Xi; n). \quad (14)$$

Как видно из (14), априорная вероятность v -го решения на $(n+1)$ -м шаге адаптации равна апостериорной вероятности v -го решения, полученного на n -м шаге адаптации. Принципы построения методики изменения априорной вероятности на $(n+1)$ -м шаге поиска по апостериорной вероятности подробно описаны в [6].

В зависимости от положения изображенного на рис. 2 ключа K_2 адаптация может быть непрерывной или дискретной. При непрерывной адаптации ключ K_2 замкнут постоянно. Целесообразно использовать дискретную адаптацию, когда ключ K_2 включается периодически для передачи накопленной в блоке U_0 информации [10]. При этом достоверность результатов несколько выше, так как в отличие от непрерывной адаптации осреднение реализаций поиска производится в одинаковых условиях поиска. В данном случае оценка матрицы апостериорных вероятностей вычисляется по формуле

$$\begin{bmatrix} P_1(D_1 | \Xi, n_{K_2}, n_{K_1}) \\ \dots \\ P_{nD}(D_{nD} | \Xi, n_{K_2}, n_{K_1}) \end{bmatrix} = \frac{1}{n_{K_1}} \begin{bmatrix} n_1(\Xi, n_{K_2}) \\ \dots \\ n_{nD}(\Xi, n_{K_2}) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где n_{K_1} – число включений ключа K_1 (число событий Ξ) между очередными включениями ключа K_2 ; $n_v(\Xi, n_{K_2})$ ($v=1, nD$) – число свершений события D_v вместе с событием Ξ за время между n_{K_2} -м и $(n_{K_2}+1)$ -м включением ключа K_2 .

При этом оценка матрицы апостериорных вероятностей тем точнее, чем больше значение n_{K_1} .

Если оптимизация производится без адаптации, то вероятности $P(D_v)$ в процессе поиска

должны задаваться исследователем. Потребное количество сеансов поиска N_0 зависит от требуемой (заданной) точности решения задачи и определяется известными выражениями прикладной математики. Поиск оптимальных значений параметров системы завершается на основе использования известных формул математической статистики для доверительных вероятностей. Останов поиска производится при $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$, где ε_c – среднее значение относительных приращений норм матриц апостериорных вероятностей; ε_0 – предельное значение ε_c ,

$$\varepsilon_c = \frac{1}{n_c + 1} \sum_{\mu=1}^{n_c} \frac{|H(n_p - \mu) - H(n_p - \mu - 1)|}{H(n_p - \mu)}, \quad (16)$$

где n_c – число рабочих шагов поиска, отсчитанных от конца успешных сеансов поиска (при которых открывается ключ K_1), по которым производится осреднение реализаций, поступающих в блок U_0 ; n_p – номер последнего шага поиска к U_0 ; $H(n_p - \mu)$, $H(n_p - \mu - 1)$ – нормы матриц апостериорных вероятностей соответственно на $(n_p - \mu)$ -м и $(n_p - \mu - 1)$ -м рабочих шагах поиска (элементы данных матриц определяют конечную цель поиска).

В качестве примера рассмотрим объект управления, описываемый передаточной функцией вида [8]

$$W(s) = \frac{b}{s+a}, \quad (17)$$

где b – коэффициент усиления; a – неизвестный параметр.

Требуется провести идентификацию параметра a , считая, что на объект действует задающее воздействие $x = \sin(t)$, $b = 2$. Выберем настраиваемую модель в виде звена первого порядка

$$W_M(s) = \frac{k}{s+d}, \quad (18)$$

где $d = d(t)$ – настраиваемый параметр.

Целью идентификации будем считать синтез алгоритма настройки параметра d , обеспечивающего минимизацию целевой функции (9). Результаты исследования работоспособности предложенной методики путем математического моделирования оптимизации параметров системы, описанной выражением (18) при априорно не известных значениях параметра d , представлены на рис. 3.

Случайные реализации на рис. 3 иллюстрируют работу изложенного выше алгоритма параметрического неградиентного случайного

поиска при различных априорных случайных значениях вектора параметров $U_D = [d]$. Дискретные значения вероятностей на рис. 3 для наглядности соединены прямыми линиями. Моделирование алгоритма производили в среде MathCad. В общем случае количество шагов поиска, необходимое для определения оптимальных параметров системы, является случайным. В приведенном примере значение вероятности определения искомого вектора параметров математической модели системы превысило 0,8 после 64 шагов поиска.

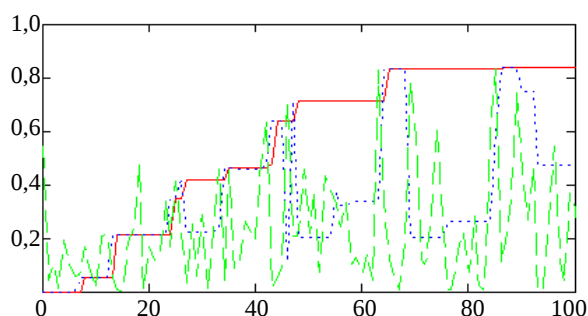


Рис. 3. Результаты математического моделирования:

— P_k — априорные вероятности выбора v -го значения параметра d системы;
 - - - PO_k — апостериорные вероятности события Ξ , поступающие в блок U_0 с выхода ключа K_1 ;
 — POM_k — максимальные апостериорные вероятности выбора оптимального значения параметра d системы, вычисленные в блоке U_0 ;
 k — номер шага случайного поиска

Fig. 3. Results of mathematical modeling:

— P_k — a priori probabilities to select v -value of d -system parameter;
 - - - PO_k — a posteriori probabilities of event Ξ , being fed to block U_0 from key outlet K_1 ;
 — POM_k — maximum a posteriori probabilities to select optimum value of d -system parameter calculated in the block U_0 ;
 k — step number of random searching

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена задача определения параметров системы, заданной стохастической математической моделью, включающей в себя случайные функции времени.

2. Показано, что для оптимизации стохастической системы, подверженной случайным воздействиям, детерминированные методы могут применяться лишь для приближенной оптимизации системы.

3. Для улучшения оптимизации стохастической системы предложено использовать алгоритм поисковой настройки на основе метода неградиентного случайного поиска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2004. 5 т.
3. Растрингин, Л. А. Адаптация сложных систем / Л. А. Растрингин. Рига: Знание, 1981. 386 с.
4. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. М.: Наука, 1987. 304 с.
5. Ljung, L. Analysis of Recursive Stochastic Algorithms / L. Ljung // IEEE Transactions on Automatic Control. 1977. Vol. 22, No 4. P. 551–575.
6. Rake, H. Step Response and Frequency Response Methods / H. Rake // Automatica. 1977. Vol. 16, No 5. P. 519–526.
7. Лобатый, А. А. Топология мультиструктурных технических систем / А. А. Лобатый. Минск: Военная академия Республики Беларусь, 2000. 162 с.
8. Лобатый, А. А. Поисковый алгоритм настройки модели непрямого адаптивного фазового управления / А. А. Лобатый, М. В. Почебут // Доклады БГУИР. 2009. № 6 (44). С. 62–68.
9. Kalman, R. E. On the General Theory of Control Systems / R. E. Kalman // IRE Transactions on Automatic Control. 1959. Vol. 4, No 3. P. 110.
10. Ljung, L. System Identification, Theory for the User. / L. Ljung. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 609 p.

Поступила 29.02.2016

Подписана в печать 27.04.2016

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Aleksandrov A. G., Artemev V. M., Afanasev V. N., Ashimov A. A., Beloglazov I. N., Bukov V. N., Zemlyakov S. N., Kazakevich V. V., Krasovskii A. A. (ed.), Medvedev G. A., Rastrigin L. A., Rutkovskii V. Yu., Yusupov R. M., Yadykin I. B., Yakubovich V. A. (1987) *Reference Book on Theory of Automatic Control*. Moscow, Nauka Publ. 712 (in Russian).
2. Pupkov K. A., Egupov N. D. (ed.) (2004) *Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control, in 5 Volumes*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2004.
3. Rastrigin L. A. (1981) *Adaptation of Complicated Systems*. Riga, Znanie Publ. 386 (in Russian).
4. Kazakov I. E., Gladkov D. I. (1987) *Methods of Optimization for Stochastic Systems*. Moscow, Nauka Publ. 304 (in Russian).
5. Ljung L. (1977) Analysis of Recursive Stochastic Algorithms. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22 (4), 551–575. DOI: 10.1109/tac.1977.1101561.
6. Rake H. (1977) Step Response and Frequency Response Methods. *Automatica*, 16 (5), 519–526. DOI: 10.1016/0005-1098(80)90075-8.
7. Lobaty A. A. (2000) *Topology Multistructural Technical Systems*. Minsk, Minsk Military Academy of the Republic of Belarus. 162 (in Russian).
8. Lobaty A. A., Pochebut M. V. (2009). Tuning search Algorithm for Model of Indirect Adaptive Phase Control. *Doklady BSUIR [Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 44 (6), 62–68 (in Russian).
9. Kalman R. E. (1959) On the General Theory of Control Systems. *IRE Transactions on Automatic Control*, 4 (3), 110. DOI: 10.1109/TAC.1959.1104873.
10. Ljung L. (1999) *System Identification, Theory for the User*. New Jersey, Prentice Hall. 609.

Received: 29.02.2016

Accepted: 27.04.2016

Published online: 30.05.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-262-270

УДК 334.726

Функционирование зоны развития новых и высоких технологий «Китайско-сингапурский индустриальный парк Сучжоу»

Асп. Ци Ци¹⁾, канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев¹⁾, Н. А. Дудко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017

Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Системная работа высших руководящих органов Китая по достижению и реализации общезначимых целей в научно-технической сфере позволила Китайской Народной Республике достичь интенсивного инновационного совершенствования экономики. Основу национальной инновационной инфраструктуры в Китае составляют зоны развития новых и высоких технологий, наиболее успешная из которых – «Китайско-сингапурский индустриальный парк Сучжоу». Парк можно охарактеризовать как флагманский проект сотрудничества между правительствами Китая и Сингапура, пилотная зона реформ и инноваций, успешная модель международного сотрудничества. Цель основания и развития парка – создание производства инновационной продукции на уровне мировых стандартов и строительство нового интернационального района с современной информационно-технологической инфраструктурой и экологически чистой территорией. В статье рассмотрен процесс формирования системы управления парком и взаимодействия органов власти с администрацией парка, а также основные принципы его организационной структуры. Проанализированы достигнутые показатели социально-экономического развития и совершенствование льготных условий для инвесторов. Особое внимание уделено концепции развития промышленной экологии, которой следует руководство парка. Приведены примеры интенсивного развития инфраструктуры: создание демонстрационных зон и экспериментальных участков, строительство социальных объектов. Особо сделан акцент на постоянном совершенствовании кадрового обеспечения деятельности парка. Проект представляет собой новую модель международного экономического и технического сотрудничества Китая с другими странами.

Ключевые слова: инновации, инфраструктура, международная кооперация, льготные условия, циркулярная экономика, экологический технопарк

Для цитирования: Ци Ци, Ци. Функционирование зоны развития новых и высоких технологий «Китайско-сингапурский индустриальный парк Сучжоу» / Ци Ци, Ю. Г. Алексеев, Н. А. Дудко // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 262–270. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-262-270

Operation of New and High-Tech Development Zone – “China-Singapore Suzhou Industrial Park”

Qi Ji¹⁾, Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, N. A. Dudko¹⁾

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

Abstract. Systematic work of higher authorities of China on achievement and implementation of generally valid aims in the field of science and technology has made it possible for the People's Republic of China to reach intense innovative advancement of its economy. New and High-Tech Development Zones form the basis of the national innovative infrastructure

Адрес для переписки

Алексеев Юрий Геннадьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-78
post@park.bntu.by

Address for correspondence

Aliakseyeu Yuriy G.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-78
post@park.bntu.by

in China, the most successful of which is China-Singapore Suzhou Industrial Park. The Park can be characterized as a flagship project of cooperation between the governments of China and Singapore, pilot zone of reforms and innovations, successful model of international cooperation. The aim of the foundation and development of the Park is to create production of innovative products up to the world standards and construction of new international district with modern information and technology infrastructure and eco-friendly territory. The paper considers the process pertaining to formation of the Park's management system and its interaction with the public authorities as well as the main principles of its organizational structure. The obtained indices of social-economic development and improvement of favourable conditions for investors have been analysed in the paper. A special emphasis has been given to the concept of industrial ecology development which is observed by the Park's management. The paper presents examples of intensive growth of infrastructure: creation of demonstration zones and experimental areas, building of social facilities. A special focus has been given to the constant development of the Park's human resources. The project represents a new model of international economic and technical cooperation of China with other nations.

Keywords: China-Singapore Suzhou Industrial Park, innovation, infrastructure, international cooperation, favourable conditions, circular economy, environmentally-friendly technopark

For citation: Ji Qi, Aliakseyeu Yu. G., Dudko N. A. (2017) Operation of New and High-Tech Development Zone – “China-Singapore Suzhou Industrial Park”. *Science and Technique*. 16 (3), 262–270. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-262-270 (in Russian)

Системная работа властей Китая по достижению и реализации общезначимых целей в научно-технической сфере позволила государству достичь инновационного совершенствования экономики [1]. В этом процессе новая технологическая инфраструктура играет важную роль в распределении рисков между участниками инновационного процесса Китая. Основу национальной инновационной инфраструктуры в Китае составляют зоны развития новых и высоких технологий (далее – зоны развития), которые, полагаясь на интеллектуальные ресурсы через оптимизацию локальной среды, решают следующие задачи:

- способствуют объединению науки, образования и производства;
- содействуют скоординированному развитию науки и техники, экономики и общества;
- развивают индустриализацию и интернационализацию новых и высоких технологий.

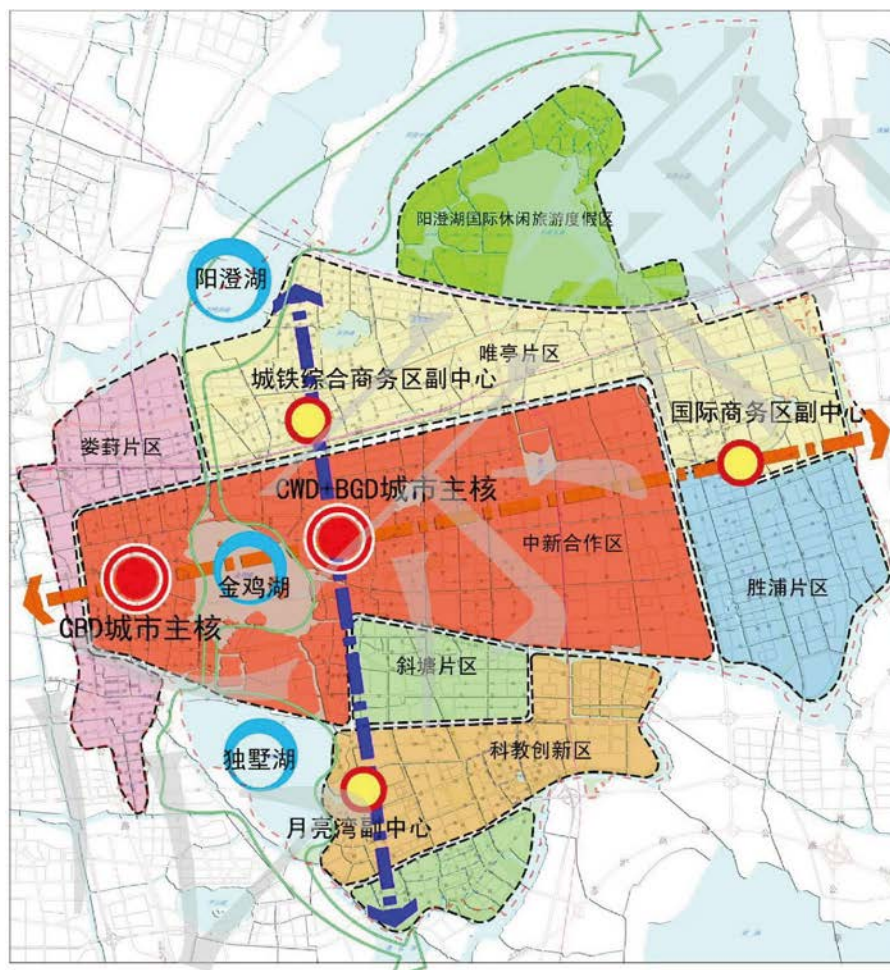
К концу 2015 г. в Китае функционировали 145 национальных зон развития [2]. Наиболее успешная из них – «Китайско-сингапурский индустриальный парк Сучжоу» (далее – парк). Для реализации совместного проекта по созданию и организации деятельности парка правительствами КНР и Сингапура в 1994 г. был создан двусторонний Наблюдательный совет, который в качестве сопредседателей возглавили заместители премьер-министров [3]. Миссия модели парка – открытость для внешнего мира, «душа» парка – инновации. Цель развития парка – создание производства инновационной продукции на уровне мировых стандартов,

строительство нового интернационального района с современной информационно-технологической инфраструктурой и экологически чистой территорией [4]. Парк является комплексной и относительно самостоятельной новой территорией (районом) в восточной части г. Сучжоу провинции Цзянсу. Парк включает в себя промышленные объекты, малые и средние инновационные предприятия и центры, учреждения образования и науки, социальную инфраструктуру для проживания и отдыха. Административная территория парка занимает 288 кв. км, в том числе зона китайско-сингапурского сотрудничества – 80 кв. км. Численность населения – 80260 человек (рис. 1).

Строительство парка начато в 1994 г. Следуя сингапурскому шаблону, 80 кв. км выделенных земельных активов для развития инфраструктуры китайско-сингапурского совместного сотрудничества были разделены на три зоны: первая – центральный деловой район; вторая – административный и культурный район, экспортно-промышленная часть и жилые кварталы; третья – информационно-индустриальный парк и парк программного обеспечения. В настоящее время парк имеет около 3 млн кв. м помещений, на которых, в частности, располагаются: международный научно-технологический парк, творческий промышленный парк, биотехнопарк, китайско-сингапурский экогород по науке и технике, парк нанотехнологий. Кроме того, в данный момент возводятся такие инновационные объекты, как центр культуры и искусства, район высшего образования, тури-

стический курорт «Озеро Янчэн», в том числе строится комплексная бондовая зона, специализирующаяся на импортной и экспортной торговле и переработке сырья. Предприятия, образованные в таких зонах, имеют право вести

международную торговлю, пользуясь режимом льготного налогообложения, которое включает три составляющие: частичное налогообложение, беспошлинную торговлю, бондовый налог [5].



Условные обозначения:

- зона китайско-сингапурского сотрудничества;
- инновационная зона по науке и образованию;
- международная туристическая зона «Озеро Янчэнху»;
- зона Вейтин;
- зона Ловей;
- зона Пушэн;
- зона Сетан;
- зона основных направлений социально-экономического развития города;
- зона второстепенных направлений социально-экономического развития города;
- центр города;
- вторичный центр города

Рис. 1. Комплексное планирование «Китайско-сингапурского индустриального парка Сучжоу» с 2012 по 2030 г.

Fig. 1. Complex planning of China-Singapore Suzhou Industrial Park from 2012 to 2030

В течение более 20 лет активно формируется система взаимодействия органов власти и администрации с субъектами инфраструктуры парка, направленная на разработку новой модели индустриализации результатов научных исследований, расширение международной кооперации в инновационной сфере и создание современной городской инфраструктуры. Парк стал важным окном Китая, открытым для внешнего мира, и успешной моделью – примером формирования китайско-иностранной экономики на взаимовыгодной основе.

Парк можно охарактеризовать как флагманский проект сотрудничества между правительствами Китая и Сингапура, пилотную зону реформ и инноваций, успешную модель международного сотрудничества. В прошедшие годы прирост основных экономических показателей парка в среднем ежегодно превышал 10 %. По комплексному показателю социального развития региона парк занимает второе место среди зон развития государственного уровня. По привлечению и использованию иностранного капитала в течение многих лет парк занимает первое место среди зон развития Китая [6].

Парк добился значительных успехов в экономическом и социальном развитии. Несмотря на то что он занимает 3,4 % территории Сучжоу,

на которой проживает 5,2 % его населения, парк формирует более 15 % ВВП данного города. В нем реализуют свои проекты 92 крупнейших корпорации мира из списка Fortune-500 [7].

Объем промышленного производства в парке в 2015 г. увеличился по сравнению с 2014-м на 8 % и составил 206 млрд юаней (около 31,8 млрд дол. США); доходы местного бюджета от его деятельности – 25,72 млрд юаней – увеличились на 11,7 % по сравнению с 2014 г. (23,02 млрд юаней); все виды совокупных налоговых поступлений – более 67 млрд юаней, что составило 93,6 % от поступлений предыдущего года; общий объем экспорта – на уровне 40,5 млрд дол. (упал на 3,35 %); фактическое использование иностранного капитала – 1,6 млрд дол. при 61,2 млрд юаней инвестиций в основной капитал; доля инвестиций в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы к ВВП – 3,35 %; общий объем розничных продаж социальных потребительских товаров – 35,285 млрд юаней – возрос на 10,5 % по сравнению с 2014 г. (31,59 млрд юаней). Доход на душу населения г. Сучжоу – на уровне 56000 юаней – увеличился на 7,5 % по сравнению с 2014 г. (52093 юаней) [8] (рис. 2).

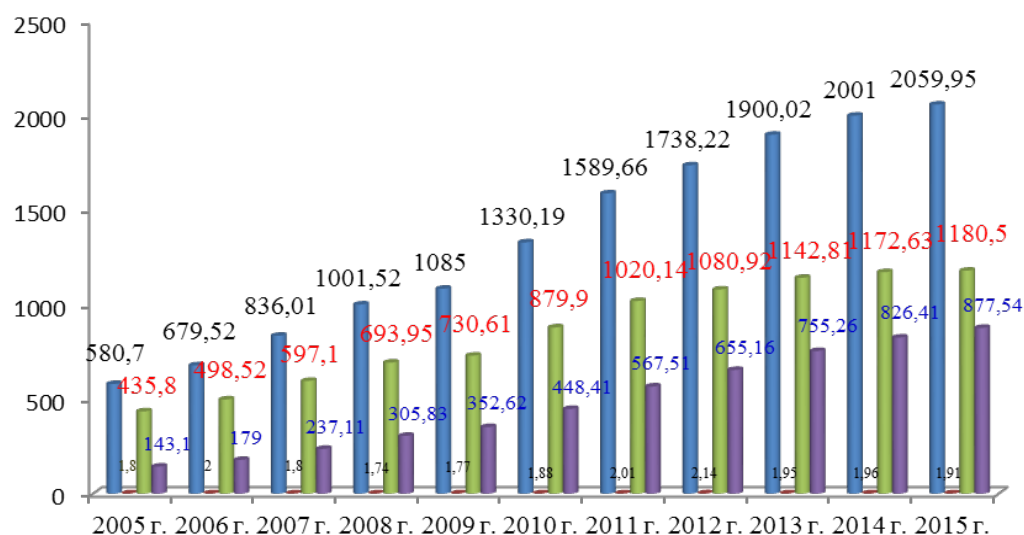


Рис. 2. ВВП «Китайско-сингапурского индустриального парка Сучжоу» с 2005 по 2015 г.:

■ – ВВП (100 млн юаней); ■ – отрасли промышленности (100 млн юаней); ■ – отрасли сельского хозяйства (100 млн юаней); ■ – отрасли сферы услуг (100 млн юаней)

Fig. 2. GDP of China-Singapore Suzhou Industrial Park from 2005 to 2015:

■ – GDP (100 million yuan); ■ – industry branches (100 million yuan); ■ – branches of agriculture (100 million yuan); ■ – branches of service industry (100 million yuan)

В парке впервые в Китае были созданы:
национальная демонстрационная база новых
индустриальных объектов;

экопромышленная демонстрационная зона;
национальная демонстрационная зона по
интеллектуальной собственности;
демонстрационная база услуг по аутсорсингу;
экспериментальный участок с льготной по-
литикой для предприятий, оказывающих пере-
довые технологические услуги;

экспериментальный участок с льготной по-
литикой для сервисных предприятий с передо-
выми технологиями.

В парке функционируют единственные в
Китае:

демонстрационная база по инновационной
торговле услугами;

национальная демонстрационная зона дело-
вого туризма;

производственная база в сфере нанотехно-
логий и инноваций.

Для улучшения функционирования парка
были приняты меры, направленные на совер-
шенствование льготных условий:

- центральное правительство предоставило
парку льготные условия, аналогичные как для
специальных зон, так и для зон развития;

- инвесторы в парке могут пользоваться
льготами по ставке налога на прибыль, которая
в 1,7 раза меньше, чем ставка для китайских
предприятий, и более чем в два раза меньше,
чем в США и Японии;

- зарубежные производственные предприя-
тия с периодом эксплуатации более 10 лет мо-
гут пользоваться льготами: нулевыми ставками
подходного налога в первые два года и 0,5 став-
ки подходного налога в следующие три года
путем возмещения налога из прибыли года;

- объекты с передовыми технологиями мо-
гут пользоваться льготами: нулевыми ставками
подходного налога в первые два года и 0,5 став-
ки подходного налога в следующие шесть лет;

- предприятия, работающие на экспорт, мо-
гут пользоваться льготами: нулевыми ставками
подходного налога в первые два года и 0,5
ставки подходного налога в дальнейшем [9].

Совершенствование системы управления парком

Управление парком можно разделить на два
периода. Первый – становление, когда управ-
ление им осуществлялось правительством Син-
гапура. Этот период характеризуется обучени-

ем и передачей административного управления
китайскому правительству. Второй период –
развитие и управление парком правительством
КНР. В Сингапуре данный период не посчита-
ли успешным: несколько лет убытков – одно
из главных доказательств этого. В 2000 г. син-
гапурская сторона была вынуждена сокра-
тить свою долю в китайско-сингапурской сов-
местной компании с изначальных 65 до 35 %.
Основная причина – в азиатском финансовом
кризисе 1997 г., который ограничил собствен-
ную независимую модель развития парка [10].
Был сделан вывод, что его успех зависит не
просто от повторения опыта Сингапура, но и от
развития парка через всестороннее понимание
успеха модели Сингапура наряду с существу-
ющими для этой модели ограничениями.

Парк извлекал уроки из опыта развития ин-
дустриального парка Сингапура в начале стро-
ительства путем использования высококаче-
ственных элементов и механизмов, таких как
успешное преодоление низкоэффективного и
трудоемкого этапа реализации продукции (тор-
говля) через привлечение предприятий (входя-
щих в список Fortune-500) с интенсивными
технологиями, передовыми знаниями и талан-
тами, предоставляя мультинациональным кор-
порациям возможность на льготных условиях
открывать свои штаб-квартиры, научно-иссле-
довательские центры и др. Тем не менее руко-
водство парка постепенно поняло, что он не
может устойчиво развиваться только путем
введения иностранного капитала. В то же время
руководители правительства отмечали тот
факт, что большое количество предприятий с
научоемкой продукцией, финансируемых из-за
рубежа, развиваются в парке и приводят к по-
явлению новых частных отечественных пред-
приятий, которые в основном открываются для
обслуживания мультинациональных корпора-
ций [11].

Правильно воспринимая успешный опыт
Сингапура – как осязаемые материальные, так
и нематериальные факторы его успеха, – необ-
ходимо в полной мере понимать местные со-
циальные, политические и экономические
изменения, всегда обращать внимание на зако-
номерности и тенденции развития иност-
ранных инвестиций. Таким образом, в настоя-
щее время менеджмент парка, учитывая нацио-
нальные условия Китая и ситуацию в г. Суч-

жоу, опираясь на опыт строительства нового района (индустриального парка) Сингапура в процессе управления, идет по пути научного планирования и последовательного строительства. В начале развития парка заимствовался опыт Сингапура и международный передовой опыт в сфере планирования и строительства, а далее разрабатывались планы и прогнозы развития с учетом региональных особенностей. Последовательно были сформулированы 300 профессиональных проектов, объединенных тщательно проработанной строгой системой планирования.

Создание парка со своими особенностями, развитие циркулярной экономики

Развитие научно-технологического комплекса на протяжении всей новейшей истории Китая выделялось в качестве приоритетного направления [12]. В процессе возникновения и развития новых экономических систем решения, связанные со значительными изменениями в отраслевой структуре, должны приниматься заранее. Корректировка отраслевой структуры парка представляет собой динамичный процесс, направленный на поддержку открытий и инноваций, – это самая большая особенность парка. Акцент делается на развитие приоритетных направлений в традиционно ведущих отраслях промышленности и активную поддержку новых развивающихся отраслей экономики. В промышленности резиденты парка сосредотачиваются на внедрении информационных технологий и производстве современного обрабатывающего оборудования, в новых высокотехнологичных отраслях – на ускорении применения нано- и биотехнологий, облачных вычислений и других научных достижений.

Следует отметить, что парк твердо установил и строго придерживается концепции развития промышленной экологии «Развитие парка с окружающей средой, развитие парка с экологией». Начиная с 2001 г. активно внедряются новые идеи по развитию циркулярной экономики и строительству экологического технопарка, в модели которого уменьшается использование сырья, а отходы сводятся к нулю. Департаментом государственной защиты окружающей среды парк был утвержден как Национальная демонстрационная зона, соответствующая тре-

бованиям ISO 14000. В соответствии с требованиями международного стандарта резиденты парка должны соблюдать систему экологического управления и постоянно повышать экологическую эффективность своей деятельности.

Строительство экопромышленного парка осуществляется в соответствии с разработанной моделью по модернизации действующих производств и открытию новых с предварительного одобрения инвестиций «зелеными» и исходя из требований охраны окружающей среды. Эти процессы ориентированы на внедрение проекта «Три высоких и три низких» (высокие технологии, высокий уровень инвестиций, высокая отдача; низкое потребление энергии, низкий расход материала, низкое загрязнение). Развитие данной цепочки дополнительно содействует в парке сплоченности и поддержке предпринимательства. Действует формат «экопродукты – экопитание – экопроизводство». Так, в парке формируется циркулярная экономика, при которой деятельность направлена на энергосбережение, регенеративное экологически чистое производство, а обращение и потребление играют важную роль в изменении методов экономического роста. В отличие от традиционной модели обычного экономического развития циркулярная модель является наиболее удачным способом сбережения ресурсов и материалов, постоянного экономического роста [13].

В парке ускоренными темпами идут строительство и развитие инфраструктуры, основанные на концепции «Ограниченные ресурсы, неограниченное творчество»: развитие малого бизнеса, углубление интеграции, эффективное использование наземного и подземного пространства, повышение коэффициента использования ресурсов и скорости ввода-вывода объектов.

Совершенствование кадрового обеспечения. Поддержка талантов для создания High-Tech индустриального парка мирового уровня

Парк позитивно реагирует на современные тенденции, использует на практике возможность построения национальной демонстрационной зоны развития отечественных инноваций в южной части провинции Цзянсу путем реали-

зации разработанной стратегии, направленной на активную поддержку массового инновационного предпринимательства. К 2015 г. освоено в общей сложности более 3,8 млн кв. м при внедрении и трансфере технологий по многим научным направлениям более чем на 30 общественных технических сервисных платформах. Создано более 20 национальных инновационных баз и около 450 различных научно-исследовательских учреждений, сформированы инновационные кластеры по основным отраслевым направлениям экономики знаний, такие как Международный научно-технологический парк, Сучжоуский город нанотехнологий и др. Благодаря реализации Плана по стратегии привлечения и развития талантов в значительной степени растет количество высококлассных специалистов, работающих в парке. Из них более 6000 иностранных, большинство из которых являются специалистами высшей научной квалификации, имеют ученую степень и звание.

Система управления парка Сучжоу опирается на три составляющие своей организационной структуры: компанию по проектированию и строительству (развитию) и действующие принципы «Про-бизнес» и «Упрощение, унификация и эффективность». Китайская и сингапурская стороны открыли совместную компанию по проектированию и строительству (развитию) парка. Компания отвечает за развитие инфраструктуры, привлечение инвестиций, управление недвижимостью и проектами, предоставление сервисных услуг, промышленное развитие, оценку инвестиционного риска и др. Правление парка не участвует в конкретных программах развития инфраструктуры, привлечения инвестиций и т. п., а в основном отвечает за экономическое и административное управление и другие правительственные функции.

«Про-бизнес» – это высший уровень построения, принцип и концептуальные подходы в реализации большинства программ из сингапурского опыта. Суть его состоит в том, чтобы сознательно встать на позицию инвесторов, рассматривая их проблемы, насколько это возможно, чтобы помочь им получить более высокую отдачу от инвестиций. Так, парк организовал работу офиса «Одна остановка» (аналогия – «Одно окно»), который предоставляет пакет

услуг, позволяющий открывать предприятие с иностранными инвестициями с соблюдением всех формальностей в течение 15 дней, а срок открытия отечественного предприятия может составлять менее семи дней. Это значительно повышает эффективность иностранных и отечественных инвестиций и является лучшим воплощением принципа «Про-бизнес». При этом разработанная и используемая система электронного учреждения предприятий в парке лучшая и наиболее передовая среди аналогичных зон развития Китая.

«Упрощение, унификация и эффективность» – это создание упрощенной структуры управления парком, где административный комитет представляет собой субъект управления, которому подчиняются 15 уполномоченных управлений. Не требуется координация внутренних структур с вышестоящими организациями. Внешние административные органы (за пределами парка), как правило, не создают в парке свои филиалы, что позволяет избежать их дублирования и экспансии. По сравнению с другими национальными экономическими зонами освоения технологий это можно назвать упрощенным малым правительством.

Существующий сегодня индустриальный парк Сучжоу – смелый новаторский проект, созданный на основе опыта Сингапура с учетом особенностей самого парка. Инновационная деятельность администрации парка многоуровневая. Благодаря практическим инновациям правительства хорошо сочетаются концептуальные, институциональные (системные) и технологические инновации в целях совместного содействия устойчивому и здоровому социально-экономическому развитию парка. В рамках индустриального парка Сучжоу выделяют следующие правительственные инновации: концептуальные, институциональные, на уровне взаимодействия между людьми и практические. В конечном итоге концептуальные, институциональные и технологические инновации воплощаются с помощью практической инновационной деятельности. Формирование чистого и высокоэффективного государственного сектора социального обслуживания является основной причиной создания уникального проекта индустриального парка Сучжоу (рис. 3).



Рис. 3. Структурная схема «Правительство в практике инноваций», опыт индустриального парка Сучжоу
 Fig. 3. "Government in Innovation Practical Activity" block diagram, experience of industrial Park "Suzhou"

ВЫВОДЫ

1. Правительственные инновации на идеологическом уровне включают в себя инновации, касающиеся правительственной доктрины, идеологии, методов управления и других аспектов. Это в основном относится к концептуальным и идейным инновациям в вопросах происхождения, сущности, целей, модели, положения и дальнейшего развития правительства.

2. Основное содержание институциональных (системных) инноваций воплощается в инновационной структуре и функциях правительства, другими словами, в инновациях в области устройства (структуры) и компетенций (функций) правительства. Это главным образом инновации, затрагивающие конкретные механизмы правительственного демократического режима, правовую и экономическую системы, культурную сферу и т. д.

3. Все правительственные инновации должны воплощаться и реализовываться в практических инновациях. Сущность правительственных (государственных) практических инноваций заключается во внедрении новых концепций (идей), новых механизмов и технологий в фактическое управление внутренними и внешними делами государства в целях повышения эффективности и качества работы правительства, а также достижения максимального общественного блага.

Практические инновации правительства – заключительный этап реализации трех вышеупомянутых процессов, наиболее важное звено государственных инноваций.

4. «Китайско-сингапурский индустриальный парк Сучжоу» – важнейший проект двустороннего сотрудничества между Китаем и Сингапуром, который создает новую модель международного экономического и технического сотрудничества КНР с другими странами. За прошедшие 23 года этот индустриальный парк не только позаимствовал у Сингапура передовой опыт управления, но и успешно реализовал программу экономического и социального развития на основе управленческого опыта правительства Сингапура. В то же время сформировалась модель открытости «маленького правительства и большого общества», создана «рациональная, честная (неподкупная), высокоэффективная структура государственного управления».

ЛИТЕРАТУРА

1. Цзи, Ци. Научно-техническая и инновационная политика Китая / Ци Ци, О. Нехайчик, Ю. Алексеев // Наука и инновации. 2016. Т. 4, № 158. С. 44–47.
2. Обзор и перспективы развития национальных Зон развития новых и высоких технологий Китая в 2015 году [Электронный ресурс] // Народное правительство города Чанша КНР. 2016. Режим доступа: <http://www.changsha.gov.cn/xxgk/szfgbmxxgkml/swszfpjcgxxgkml/jjjskfq/>

gzdt/201602/t20160204_882197.html. Дата доступа: 10.01.2017.

3. Краткое описание Китайско-сингапурского промышленного парка «Сучжоу» [Электронный ресурс] // Китайско-сингапурский промышленный парк «Сучжоу». 2016. Режим доступа: http://www.sipac.gov.cn/zjyq/yqgk/201603/t20160311_416382.htm. Дата доступа: 02.01.2017.
4. Обзор деятельности парка. Сотрудничество [Электронный ресурс] // Китайско-сингапурский промышленный парк «Сучжоу». 2016. Режим доступа: http://www.sipac.gov.cn/zjyq/zxhz/201403/t20140319_262392.htm. Дата доступа: 02.01.2017.
5. Импорт и экспорт [Электронный ресурс] // UGL Corporation LTD. 2016. Режим доступа: <http://www.uglc.ru/china-export-import/zone.htm>. Дата доступа: 26.12.2016.
6. Чженьянь, Чжоу. Успешное сотрудничество в Китайско-сингапурском промышленном парке «Сучжоу» / Чжоу Чженьянь // Уникальные инновационные разработки, модернизация, развитие и оптимизация промышленности: сб. докл. 10-й ежегодной студ. техн. конф. провинции Цзянсу, г. Наньтун, 21 сент. 2007 г. Наньтунский университет, 2007. С. 115–117.
7. List of World's 500 Largest Companies [Electronic resource] // Fortune Global 500. 2016. 22 July. Mode of access: <http://beta.fortune.com/fortune500/list>. Date of access: 10.01.2017.
8. Статистика показателей за 2014 год [Электронный ресурс] // Китайско-сингапурский промышленный парк «Сучжоу». 2015. Режим доступа: <http://www.sipac.gov.cn/government/tjfx/>. Дата доступа: 29.12.2016.
9. Стимулирование инвестиций в Китайско-сингапурском промышленном парке «Сучжоу» [Электронный ресурс] // Альянс по поощрению инвестиций в Китае. 2016. Режим доступа: <http://www.china.com.cn/market/cstj/402699.htm>. Дата доступа: 29.12.2016.
10. Лань, Ху. Зона развития промышленности новых и высоких технологий: модель открытых инноваций комплексного сравнительного тестирования – «Китайско-сингапурский промышленный парк Сучжоу» / Ху Лань, Ли Чжао, Чжэн Сусян // Зоны развития новых и высоких технологий. Китай. 2015. № 12. С. 20–29.
11. Ван, Вин. Исследование по градостроительству и архитектуре. Дизайн в строительстве высокотехнологичного промышленного парка (на примере «Китайско-сингапурского промышленного парка Сучжоу») / Ван Ван. Сучжоу, 2014. 69 с.
12. Ци, Ци. О состоянии и перспективах развития научно-технологического комплекса Китайской Народной Республики / Ци Ци, Ю. Г. Алексеев // Новости науки и технологий. 2016. Т. 39, № 4. С. 48–55.
13. Ван, Цзычан. Исследования Юго-Восточной Азии. Выход модели развития Сингапура и исследование на примере промышленного парка «Сучжоу» / Цзычан Ван // Юго-Восточная Азия: актуальные проблемы развития. 2011. № 5. С. 46–51.

Поступила 02.02.2017

Подписана в печать 05.04.2017

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Qi Ji., Nekhaychik O., Alekseev Yu. (2016) Scientific-Technological and Innovative Policy of China. *Nauka i Innovatsii* [Science and Innovations], 4 (158), 44–47.
2. Review and Prospects for Development of National Zones for Promotion of State-of-the-Art and High Technologies of China in 2015. *People's Government of Chang Shacity, People's Republic of China*. 2016. Available at: http://www.changsha.gov.cn/xxgk/szfgbmxxgkml/swsfpcjgxxgkml/jjjskf/gzdt/201602/t20160204_882197.html. (Accessed 10 January 2017). (in Chinese).
3. Brief Description of Chinese-Singapore Industrial Park "Suzhou". *Chinese-Singapore Industrial Park "Suzhou"*. 2016. Available at: http://www.sipac.gov.cn/zjyq/yqgk/201603/t20160311_416382.htm. (Accessed 2 January 2017). (in Chinese).
4. Review of Park Activity. Cooperation. *Chinese-Singapore Industrial Park "Suzhou"*. 2016. Available at: http://www.sipac.gov.cn/zjyq/zxhz/201403/t20140319_262392.htm. (Accessed 02 January 2017). (in Chinese).
5. Import and Export. *UGL Corporation LTD*. 2016. Available at: <http://www.uglc.ru/china-export-import/zone.htm>. (Accessed 26 December 2016). (in Chinese).
6. Zhenyan Cho (2007) Successful Cooperation in Chinese-Singapore Industrial Park "Suzhou". *Unique Innovation Developments, Modernization, Development and Optimization of Industry. Book of Reports of the 10th Annual Students' Technical Conference, Jiangsu Province, Nantong City, September 21, 2007*. Nantong City, Nantong University, 115–117 (in Chinese).
7. List of World's 500 Largest Companies (2016). *Fortune Global 500*. Available at: <http://beta.fortune.com/fortune500/list>. (Accessed 10 January 2017).
8. Statistical Indices for 2014. *Singapore Industrial Park "Suzhou"*. 2015. Available at: <http://www.sipac.gov.cn/government/tjfx/>. (Accessed 29 December 2016). (in Chinese).
9. Stimulation of Investments in Chinese-Singapore Industrial Park "Suzhou". *Alliance for Encouragement of Investments in China*. 2016. Available at: <http://www.china.com.cn/market/cstj/402699.htm>. (Accessed 29 December 2016). (in Chinese).
10. Lan Hu., Zhao Li, Susan Zheng (2015) Zone for Industrial Development of State-of-the-Art and High Technologies: Model of Open Innovations of Complex Comparative Testing – Chinese-Singapore Industrial Park "Suzhou". *Zones for Development of State-of-the-Art and High Technologies*, (12), 20–29 (in Chinese).
11. Wang Wen (2014) *Investigation on Urban Planning and Architecture. Design in Construction of High-Technology Industrial Park (Using the Example of Chinese-Singapore Industrial Park "Suzhou")*. Suzhou. 69 (in Chinese).
12. Qi Ji., Alekseev Yu. G. (2016) About the State and Prospects for Development of Scientific and Technological Complex of the People's Republic of China. *Novosti Nauki i Tekhnologii* [News of Science and Technology], 39 (4), 48–55 (in Russian).
13. Wang Ji Chang (2011) Investigations on South-Eastern Asia. Output of Model for Singapore Development and Investigations while Using the Example of Industrial Park "Suzhou". *Yugo-Vostochnaya Aziya: Aktual'nye Problemy Razvitiya* [South East Asia: Actual problems of Development], (5), 46–51 (in Russian).

Received: 02.02.2017

Accepted: 05.04.2017

Published online: 30.05.2017