НАУКА и ТЕХНИКА

Международный научно-технический журнал

Серия 1. Машиностроение Серия 3. Электронные системы

Издается с января 2002 года

Периодичность издания – один раз в два месяца

Учредитель Белорусский национальный технический университет



ScienceV. 17, No 1and Technique(2018)

International Scientific and Technical Journal

Series 1. Mechanical Engineering Series 3. Electronic Systems

> Published from January 2002 Publication frequency – bimonthly

> > **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

| Жук А. Н., Качанов И. В., Веременюк В. В., | |
|---|----|
| Филипчик А. В. | |
| Результаты исследований по определению | |
| давления реверсивной струи | |
| на обрабатываемую плоскую поверхность | 5 |
| Шелег В. К., Шатуров Д. Г., Шатуров Г. Ф. | |
| Анализ и выбор рациональных режимов резания | |
| твердосплавным инструментом при точении валов | 14 |
| Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., | |
| Оковитый В. В., Асташинский В. М., | |
| Храмцов П. П., Черник М. Ю., Углов В. В., | |
| Шиманский В. И., Черенда Н. Н., Соболевский С. Б. | |
| Формирование и исследование плазменных | |
| двухслойных композиционных покрытий | |
| (вязкий металлический NiCr | |
| и твердый ZrO ₂ слои) | 21 |
| Протасеня О. Н., Ларченков Л. В., | |
| Протасеня М. Л. | |
| Деформационный механизм уплотнения | |
| структурного тела | 29 |
| Лобашов А. О., Дульфан С. Б., | |
| Прасоленко А. В., Доля К. В., Бурко Д. Л. | |
| Исследование спроса | |
| на «перехватывающие» парковки | 42 |
| | |
| | |

CONTENTS

Mechanical Engineering

| Zhuk A. N., Kachanov I. V., Veremenyuk V. V., | |
|---|----|
| Filipchik A. V. | |
| Investigation Results Pertaining | |
| to Determination of Reverse Flow Pressure | |
| on Treated Flat Surface | 5 |
| Sheleg V. K., Shaturov D. G., Shaturov G. F. | |
| Analysis and Selection of Rational Cutting Modes | |
| while Using Hard-Alloy Tool for Shaft Turning | 14 |
| Okovity V. A., Panteleenko F. I., | |
| Okovity V. V., Astashinsky V. M., | |
| Hramtsov P. P., Cernik M. Y., Uglov V. V., | |
| Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. | |
| Formation and Study of Plasma Spraying Double- | |
| Layer Composite Coatings | |
| (Viscous Metallic NiCr | |
| and Solid ZrO ₂ Layer) | 21 |
| Protasenva O. N., Larchenkov L. V., | |
| Protasenva M. L. | |
| Deformation Mechanism | |
| of Structural Body Compression | 29 |
| Lobashov A. O., Dulfan S. B., Prasolenko A. V., | |
| Dolva K. V., Burko D. L. | |
| Demand Research | |
| for "Park and Ride" Parking Lots | 42 |
| for Tunn und Hout Tunning Dots | 12 |

паука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018)

| Луговой В. П., Луговой И. В. | |
|--|----|
| Определение размерных параметров кольцевого | |
| концентратора ультразвуковой системы | 51 |
| Дьяченко О. В., Кардаполова М. А. | |
| Параметры лазерной обработки и их влияние | |
| на трибологические характеристики покрытий | |
| на основе железа | 56 |
| Yaryta O. A., Mychalevych M. G., Leontiev D. N., | |
| Klymenko V. I., Bogomolov V. A., | |
| Gritsuk I. V., Novikova Y. B. | |
| Features of Controlling Electropneumatic Valves | |
| of Actuator to Control its Clutch | |
| with Acceleration Valve | |
| (Ярита А. А., Михалевич Н. Г., Леонтьев Д. Н., | |
| Клименко В. И., Богомолов В. А., | |
| Грицук И. В., Новикова Е. Б. | |
| Особенности управления электропневматическими | |
| клапанами исполнительного механизма | |
| управления сцеплением | |
| с ускорительным клапаном) | 64 |
| Электронные системы | |
| Лагунович Н. Л. | |

| Усовершенствованный технологический | |
|---|----|
| маршрут формирования биполярного | |
| транзистора со статической индукцией | 72 |
| Старосотников Н. О., Фёдорцев Р. В. | |
| Сравнение по точности алгоритмов | |
| определения координат центров изображений | |
| в оптико-электронных приборах | 79 |
| | |

Главный редактор Борис Михайлович Хрусталев

Редакционная коллегия

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

| Lugovoi V. P., Lugovoi V. I. | |
|---|----|
| Determination of Dimensional Parameters | |
| for Annular Concentrator of Ultrasonic System | 51 |
| Diachenko O. V., Kardapolova M. A. | |
| Parameters of Laser Processing | |
| and Their Influence on Tribological Characteristics | |
| of Iron-Based Coatings | 56 |
| Yaryta O. A., Mychalevych M. G., Leontiev D. N., | |
| Klymenko V. I., Bogomolov V. A., Gritsuk I. V., | |
| Novikova Y. B. | |
| Features of Controlling Electropneumatic Valves | |
| of Actuator to Control its Clutch | |
| with Acceleration Valve | 64 |

Electronic Systems

| Lagunovich N. L. | |
|---|----|
| Improved Process Flow | |
| for Formation of Bipolar Static | |
| Induction Transistor | 72 |
| Starasotnikau M. A., Feodortsau R. V. | |
| Accuracy Comparison of Algorithms | |
| for Determination of Image Center Coordinates | |
| in Optoelectronic Devices | 79 |
| | |

Editor-in-Chief Boris M. Khroustalev

Editorial Board

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

- К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- П. И. ДЯЧЕК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- М. З. ЗГУРОВСКИЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
- Р. Б. ИВУТЬ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
- М. Г. КИСЕЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Я. Н. КОВАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- В. В. КОЗЛОВСКИЙ (Минский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Минск, Республика Беларусь).
- В. М. КОНСТАНТИНОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Н. В. КУЛЕШОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. Н. ЛЕОНОВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).
- С. А. МАСКЕВИЧ (Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь),
- Э. И. МИХНЕВИЧ (Белорусский наииональный 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),
- Г. А. ПОТАЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),

Наука_ итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018)

- 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),
- G. A. POTAEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

Редакционная коллегия

- О. П. РЕУТ (Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики», Минск, Республика Беларусь),
- Ф. А. РОМАНЮК (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)

- 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 Sate 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»

С 2002 Г. издание выходило под названием «Бестник БПТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 29.01.2018. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая. Усл. печ. л. Уч.-изд. л. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет Заказ № .

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018

МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-5-13

УДК 669.620.197

Результаты исследований по определению давления реверсивной струи на обрабатываемую плоскую поверхность

Инж. А. Н. Жук¹⁾, докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, канд. физ.-мат. наук, доц. В. В. Веременюк¹⁾, канд. техн. наук А. В. Филипчик¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018 Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Проведенные исследования показали, что весьма экономично и с малыми затратами мощности можно подготовить листовой материал под лазерную резку, применяя реверсивно-струйную очистку для обработки поверхностей. Эффективность реверсивно-струйной очистки в сравнении с традиционными технологиями струйной очистки объясняется существенным повышением давления (на 25-50 %) при взаимодействии струи с обрабатываемой поверхностью. В статье на основе приближенного энергетического метода (метода верхней оценки) предлагается математическая модель для расчета давления разрушения от воздействия реверсивной струи на обрабатываемую поверхность, состоящую из слоя коррозионных отложений. В рамках разработанной модели была решена вариационная задача, позволившая получить теоретическую зависимость для расчета минимальной величины давления разрушения p_{min} в точке соударения реверсивной струи с преградой, учитывающая предел текучести деформируемого материала σ_s, плотность разрушаемого материала ρ, скорость струи υ_{стр} и параметр реверсивного течения – коэффициент обжатия струи λ. Сопоставление теоретических данных с экспериментальными (получены на основе применения датчика разности давления ЭДП-30 и пружинного динамометра с пределами измерения 25 и 80 МПа соответственно) показало расхождение в 4-15 %. Установленное незначительное расхождение между теорией и экспериментом показывает, что полученная теоретическая зависимость является вполне корректной и может быть использована в инженерной практике для прогнозирования энергосиловых и кинематических параметров, необходимых для подбора насосного оборудования, предназначенного для реализации процесса реверсивно-струйной очистки.

Ключевые слова: энергетический метод, метод верхней оценки, реверсивная струя, давление разрушения, теория, эксперимент, датчик давления, пружинный динамометр, насосное оборудование

Для цитирования: Результаты исследований по определению давления реверсивной струи на обрабатываемую плоскую поверхность / А. Н. Жук [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 5–13. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-5-13

Investigation Results Pertaining to Determination of Reverse Flow Pressure on Treated Flat Surface

A. N. Zhuk¹⁾, I. V. Kachanov¹⁾, V. V. Veremenyuk¹⁾, A. V. Filipchik¹⁾

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

Abstract. The executed investigations have shown that it is possible to prepare sheet-like material for laser cutting economically viable and with small amount of power expenditure while using reverse jet cleaning for surface treatment. As compared to conventional jet cleaning technologies efficiency of the reverse jet cleaning is attributed to significant pressure

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

Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018) Address for correspondence Zhuk Andrey N. Belarusian National Technical University 65 Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus Tel.: +375 17 292-76-77 hidrokaf@bntu.by increase (by 25–50 %) when the jet is interacting with the treated surface. The paper proposes a mathematical model on the basis of approximate energy method (upper-bound method) and the model is used for calculation of fracture pressure due to action of the reverse jet on the treated surface which consists of a corrosion deposit layer. A variational problem was solved within a framework of the developed model and the problem solution has made it possible to obtain a theoretical dependence for calculation of minimum fracture pressure value p_{min} in the point reverse jet impact with a barrier oretical dependence and it has taken into account yielding point of the deformed material σ_s , density of fractured material med material ρ , jet velocity υ_{crp} and parameter of reverse flowing – jet reduction ratio λ . Comparison theoretical data and experimental ones (experimental data have been obtained while using a differential pressure transducer $\Im\Pi\Pi$ -30 and a spring dynamometer with measuring limits 25 and 80 MPa, respectively) has shown difference by 4–15 %. Determined insignificant difference between a theory and an experiment demonstrates that the obtained theoretical dependence is considered as a quite correct one and it can be used in engineering practice for prediction of power and kinematics parameters which are necessary for selection of the required pump equipment designed for realization of reverse-jet cleaning process.

Keywords: power method, upper-bound method, reverse jet, fracture pressure, theory, experiment, pressure transducer, spring dynamometer, pump equipment

For citation: Zhuk A. N., Kachanov I. V., Veremenyuk V. V., Filipchik A. V. (2018) Investigation Results Pertaining to Determination of Reverse Flow Pressure on Treated Flat Surface. *Science and Technique*. 17 (1), 5–13. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-5-13 (in Russian)

Введение

Эффективность реализации целого ряда технологических процессов (лазерная резка, покраска, газопламенное напыление и т. д.) напрямую зависит от качества очистки поверхностей от коррозии. Так, для подготовки стальных листов под лазерную резку (ЛР) необходимо после очистки от коррозии иметь высококачественную поверхность с шероховатостью Ra = 0,4-1,0 мкм. При использовании в качестве характеристики упрочнения такого параметра, как микротвердость Н_и, нужно, чтобы его величина по отношению к исходному значению $H_{\mu 0}$ ($H_{\mu 0}$ – микротвердость поверхности листового материала применительно к условиям поставки) не выходила за пределы соотношения $H_{\mu} = (1,5-1,6)H_{\mu 0}$. При этом поверхность стальных листов должна иметь низкую отражательную способность.

Исследования, проведенные на кафедре «Кораблестроение и гидравлика», показали, что весьма экономично и с малыми затратами мощности можно подготовить листовой материал под ЛР, применяя реверсивно-струйную очистку (РСО) для обрабатываемых поверхностей. Эффективность РСО в сравнении с традиционными технологиями струйной очистки объясняется существенным повышением давления (на 25–50 %) при взаимодействии струи с обрабатываемой поверхностью [1].

Указанное повышение давления обусловлено дополнительным воздействием реактивной силы на обрабатываемую поверхность при развороте струи на 180° относительно первоначального направления давления. За счет повышения силового воздействия для РСО характерны снижение мощности и повышение производительности на 30–50 % по сравнению с традиционными технологиями струйной очистки [2, 3].

Несмотря на отмеченные преимущества, технология РСО в настоящее время не дошла до промышленного внедрения и находится на стадии лабораторных исследований. Такое состояние объясняется недостатком экспериментальных данных, а также отсутствием корректной теории, позволяющей на стадии разработки технологии спрогнозировать энергосиловой режим от воздействия реверсивной струи на обрабатываемую поверхность. Учитывая перечисленное, в статье основное внимание уделено разработке теории процесса РСО на основе применения приближенного энергетического метода (метода верхней оценки) для расчета давления при воздействии реверсивной струи на преграду [4].

Основная часть

Как уже было отмечено выше, для подготовки стальных листов под последующую ЛР предлагается использовать технологию РСО. Для реализации этой технологии на кафедре «Кораблестроение и гидравлика» БНТУ разработана конструкция струйного блока (рис. 1) [1]. Конструкция включает конусное сопло 1, установленное в корпусе 2, который через уплотнение 3 полотно прижимается к очищаемой поверхности 4. Изменение расстояния *L* между поверхностью и соплом обеспечивается за счет перемещения последнего в радиальных опорах 5.





of reverse jet cleaning

При подключении данного струйного блока к насосной установке поток рабочей жидкости после взаимодействия с поверхностью 4 разворачивается на 180° относительно своего первоначального движения. Этот разворот обеспечивает формирование реактивной силы, которая, складываясь с силой от воздействия струи, приводит к увеличению давления p_{max} струйного воздействия в 1,25-1,5 раза (теоретически – в два раза) по сравнению с традиционной схемой очистки, когда струя после взаимодействия с поверхностью растекается под углом 90° относительно своего первоначального направления течения.

Параметр силы (давления) струйного воздействия на обрабатываемую поверхность является одним из основных при разработке технологии РСО и выборе насосного оборудования, предназначенного для реализации технологии.

Анализ показал, что значительный объем теоретических исследований по расчету силы (давления) струйного воздействия основан на использовании теоремы об изменении количества движения, что не позволяет авторам установить взаимосвязь между усилием (давлением) обработки и механическими свойствами обрабатываемых материалов, включая технологические параметры процесса РСО [4].

Для получения решения, лишенного указанных недостатков, предлагается использовать теоретический метод, который в механике сплошной среды известен как приближенный энергетический метод (метод верхней оценки).

Сущность метода заключается в том, что объем очага деформации (разрушения) представляется в виде жестких (недеформируемых) блоков, скользящих один относительно другого и по границам жесткой зоны. Тем самым действительное поле линий скольжения, характеризующее напряженное состояние деформируемого объекта, заменяют кинематически возможным, состоящим из системы прямолинейных отрезков, образующих треугольники. Вдоль границ блоков - сторон треугольников компоненты скоростей перемещений претерпевают разрывы. Внутри каждого блока поле скоростей однородно, т. е. вектор скорости для всех точек данного блока один и тот же. На этом основании строят поле скоростей, которое при правильном построении всегда является кинематически возможным полем (КВП). Число и размеры треугольных блоков первоначально выбирают произвольно [4-7].

Для проведения расчета процесса РСО использовалось кинематически возможное поле (рис. 2a), состоящее из жестких однородных блоков. Аналогичное поле для анализа процесса внедрения плоского пуансона в жесткопластическую среду использовалось в [8].

На рис. 2а вследствие симметрии относительно оси OZ представлена только правая половина кинематически возможного поля. Цифрами показаны: 0 – жесткая неподвижная зона; 1, 2, 3 – блоки поля; 4 – граница свободного пространства; 5 – струя рабочей жидкости. Границы между блоками и зонами обозначаются двумя цифрами (1, 2 – граница между блоками 1 и 2; 3, 4 – граница между блоком 3 и свободной поверхностью 4; 1, 5 – контактная поверхность и т. д.). Длины указанных границ обозначаются соответственно l_{12}, l_{23}, l_{34} и т. д.

Для построения годографа (рис. 2b) от центра 0 по вертикали вниз откладывается вектор 05 скорости струи v₀, длину которого примем за единицу. Затем из конца вектора 05 проводится линия, параллельная линии 15, а из точки 0 – линии 01. Пересечение этих линий определяет положение точки 1, характеризующей величину вектора скорости блока 1. Продолжая построение подобным образом, получается представленный на рис. 2b годограф скоростей.



Рис. 2. Кинематически возможное поле линий скольжения (а) и годограф скоростей (b), принятые для анализа процесса реверсивно-струйной очистки: І – струя рабочей жидкости; ІІ – корпус струйного блока; ІІІ – обрабатываемая

поверхность

Fig. 2. Kinematically possible sliding line field (a) and velocity hodograph (b), accepted for analysis of reverse jet cleaning: I – jet of power fluid; II – body of jet unit; III – treated surface

Линии годографа 12, 23 обозначают относительные скорости блоков υ_{12} , υ_{23} вдоль линий разрыва 12, 23 (рис. 2b).

Для расчета динамических напряжений на поверхностях разрыва 12, 23 из центра O откладываются отрезки OK и OM, направленные по нормали к поверхностям 12 и 23 и характеризующие нормальные компоненты скоростей $(\upsilon_n)_{12}$ и $(\upsilon_n)_{23}$ частиц разрушаемой среды (слоя коррозии), пересекающих поверхности разрыва скорости.

Для установления давления от воздействия реверсивной струи на плоскую преграду примем следующие допущения:

 обрабатываемая поверхность считается плоским слоем коррозионных отложений, который покрывает листовую поверхность и имеет одинаковую толщину, распространяясь на неограниченную длину вправо и влево от оси симметрии струи;

 материал обрабатываемой поверхности считается однородным и несжимаемым;

 вид принятого КВП не зависит от изменения скорости струи в процессе разрушения слоя коррозионных отложений; действие сил инерции не оказывает влияния на характер разрушения слоя коррозионных отложений.

Для определения величины струйного давления на поверхность коррозионного слоя воспользуемся условием баланса внешних и внутренних сил [5, 6]

$$W_{\rm r.crp} = W_{\rm BH},\tag{1}$$

где $W_{\text{г.стр}}$ – гидравлическая мощность струи, воздействующей на преграду; $W_{\text{вн}}$ – мощность внутренних сил, действующих на поверхностях разрыва и контактного трения.

Величину мощности *W*_{г.стр} определим из выражения

$$W_{\text{r.crp}} = pQ = pS_5 \upsilon_5, \tag{2}$$

где p – гидродинамическое давление, возникающее на поверхности взаимодействия струи с преградой, H/M^2 ; Q – расход жидкости в струе, M^3/c ; S_5 – площадь живого сечения струи, M^2 , для плоской струи $S_5 = 2ab$ (a и b – ширина и толщина струи соответственно); υ_5 – скорость струи (средняя) в момент соударения с преградой.

Мощность внутренних сил $W_{\rm BH}$ в (1) представим в виде

$$W_{\rm BH} = W_{\rm pa3} + W_{\rm TP} + W_{\rm duh}, \tag{3}$$

где $W_{\text{раз}}$ — мощность внутренних сил сопротивления, действующих на поверхностях разрыва скорости; $W_{\text{тр}}$ — мощность от действия сил трения на контактных поверхностях; $W_{\text{дин}}$ — мощность внутренних сил, обусловленная действием динамических напряжений на поверхностях разрыва скорости.

Для расчета *W*_{раз} используем уравнение

$$W_{\rm pas} = \sum \tau_n b l_{rs} \upsilon_{rs}, \tag{4}$$

где τ_n – касательные напряжения, действующие вдоль границ блоков при их относительном перемещении, на свободных поверхностях $\tau_n = 0$, а на поверхностях разрыва

$$\tau_n = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}; \tag{5}$$

 σ_s – предел текучести деформируемого материала, для хрупких материалов $\sigma_s = \sigma_{\rm B}$ ($\sigma_{\rm B}$ – предел прочности материала, установленный по результатам испытаний на сжатие (растяжение)); l_{rs} – длина границ между блоками *r* и *s* в принятом КВП; υ_{rs} – величина разрыва скорости вдоль границ смежных блоков.

Для расчета мощности, затраченной на преодоление сил контактного трения, используется зависимость

$$W_{\rm Tp} = \sum \tau_k l_{rs} b \upsilon_{rs}, \tag{6}$$

где τ_k – касательные напряжения, действующие на поверхности трения между блоками КВП и жесткими неподвижными зонами обрабатываемой детали, определяются по [8]

$$\tau_k = 2\mu \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}},\tag{7}$$

 μ – коэффициент трения, изменяющийся от 0 (идеально гладкие поверхности) до 0,5 (по-

верхности, где
$$\tau_k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$$
).

При динамическом воздействии струи на разрушение преграды под действием импульса силы на поверхности разрыва скорости возникают дополнительные динамические напряжения

$$(q_{\text{дин}})_{rs} = \rho(\upsilon_n)_{rs} \upsilon_{rs}, \qquad (8)$$

где ρ – плотность разрушаемого материала, кг/м³; (υ_n)_{rs} – нормальная к поверхности разрыва скорости компонента скорости, определяемая по годографу скорости из рис. 2b.

Мощность $W_{\text{дин}}$, затраченная на преодоление напряжений $(q_{\text{дин}})_{rs}$, определяется по уравнению

$$W_{\text{дин}} = \rho(\upsilon_n)_{rs} \upsilon_{rs}^2 b l_{rs}.$$
 (9)

Выразим с помощью параметра поля α , размеров сечения струи *a*, *b* до начала реверсивного течения и размера *A* (*A* характеризует степень уширения струи после растекания в направлении оси *X* в момент начала реверсивного движения вверх внутри корпуса II струйного устройства (рис. 2а)) длину границ блоков l_{rs} . Одновременно с помощью годографа скоростей установим соотношения между кинематическими параметрами точек деформируемой среды υ_{rs} и (υ_n)_{rs} и блока 1. С учетом изложенного уравнение (1) после преобразований приводится к виду

$$p = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{\sin 2\alpha} + \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{2\mu}{\mathrm{tg}\alpha} \right) + \rho \upsilon_{01}^2 (\lambda + 1), \quad (10)$$

где υ₀₁ – скорость блока 1; λ – коэффициент обжатия реверсивной струи

$$\lambda = \frac{a}{A-a}.$$

Изменяя угол α в (10), можно получить различные значения струйного реверсивного давления p, действующего на обрабатываемую поверхность.

Однако наиболее правильной будет минимальная величина давления p_{min} . Для определения оптимального угла α_{opt} уравнение (10), используя известные тригонометрические формулы, приведем к виду

$$p(L) = A \left[\frac{1,5}{L} + (1,5+2\mu)L + \sqrt{1+L^2} \right] \rightarrow \min, (11)$$

где $A = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}};$
 $L = \operatorname{ctga}, \ L \in (0; +\infty).$ (12)

При решении (11) отмечается, что функционал давления $p(L) \to +\infty$ при $L \to +\infty$ и $L \to +0$. Следовательно, функционал p(L) достигает минимума в некоторой точке $L_{\min} \in (0; +\infty)$. Для нахождения этой точки приравняем нулю первую производную уравнения (11), т. е. p'(L) = 0.

Тогда после дифференцирования по *L* уравнения (11) получим

$$-\frac{1,5}{L^2} + 1,5 + 2\mu + \frac{L}{\sqrt{1+L^2}} = 0.$$
 (13)

Графический анализ показал, что (13) имеет один корень. Следовательно, (13) имеет единственное решение L_{min} . Соответствующий оптимальный угол α_{opt} в результате преобразования (12)

$$\alpha_{\rm opt} = \operatorname{arctg} \frac{1}{L_{\min}}.$$
 (14)

Поскольку (13) не допускает точного решения, обработав его численным методом (методом половинного деления), получим формулу взаимосвязи между L_{min} и μ

$$L_{\min} = 0,569 + \frac{0,05}{\mu + 0,5} + 0,216 \cdot 0,37^{\mu + 0,5}.$$
 (15)

Максимальная абсолютная погрешность формулы (15) меньше 0,0005 %, а максимальная относительная погрешность – меньше 0,06 %. Таким образом, задавая нужное значение коэффициента трения μ (например, $\mu = 0,1$), из (15) получим, что $L_{\min} = 0,8$. Подставляя данное значение L_{\min} в (14), получим, что оптимальный угол $\alpha_{opt} = \operatorname{arctg} \frac{1}{0.8} = 51,22^{\circ}$.

В результате решения (10) с учетом $\alpha_{opt} = 51,22^{\circ}$ получим выражение для расчета минимального давления разрушения

$$p_{\min} = 2,6\sigma_s + \rho v_{01}^2 (1+\lambda).$$
(16)

Для практического использования (16) следует уточнить вопрос, касающийся скорости υ_{01}^2 блока 1 в принятом для расчета давления *p*_{min} КВП. Из годографа скоростей (рис. 2b) видно, что скорость блока U₀₁ больше, чем скорость струи U05. Однако такое соотношение между указанными скоростями ($\upsilon_{01} > \upsilon_{05}$) приводит к тому, что гидравлическая мощность реверсивной струи, расходуемая на разрушение слоя коррозии, будет равна нулю. Решение этой задачи в [9] показывает, что максимальная гидравлическая мощность реверсивной струи, затраченная на разрушение коррозионного слоя, будет реализована в случае, когда $\upsilon_{01} < \upsilon_{05}$, а более конкретно, когда между скоростями υ_{01} и 005 имеет место следующее соотношение:

$$\upsilon_{01} = 0,5\upsilon_{05} = 0,5\upsilon_{\rm crp},\tag{17}$$

где υ_{crp} – скорость струи при взаимодействии ее с преградой.

На основании рекомендаций [9] с учетом (17) формула (16) примет вид

$$p_{\min} = 2,6\sigma_s + 0,25\rho(1+\lambda)\upsilon_{erp}^2.$$
 (18)

Отличительной особенностью уравнения (18) по сравнению с аналогичными формулами для определения струйного давления следует считать то, что оно предназначено для расчета давления именно реверсивной струи на преграду с помощью коэффициента обжатия струи λ, характеризующего дополнительное силовое воздействие струи на преграду уже после разворота ее на 180° в процессе реверсивного течения. Дополнительно научное и практическое значения формулы (18) заключаются в том, что она в результате оптимизации параметра поля α позволяет определять минимальное давление разрушения p_{\min} в зависимости от скорости струи υ_{crp} и физико-механических свойств (σ_s , ρ) разрушаемого материала.

Для оценки результатов, полученных по теоретической зависимости (18), на предмет их использования в инженерной практике были разработаны методики экспериментального определения давления $p_{3\kappa}$, действующего на площадке соударения реверсивной струи с обрабатываемой поверхностью. При этом для измерения давлений $p_{3\kappa}$, не превышающих 25 МПа, использовался электронный датчик ЭДП-30 (рис. 3). В комплекте с ЭДП-30 в качестве регистрирующей аппаратуры применяли комбинированный цифровой омметр Щ4313 с погрешностью измерений до 2 %.

Принцип работы датчика основан на использовании тензорезистивного эффекта изменения удельного электросопротивления проводника в результате его деформации. Входным сигналом для датчика является давление измеряемой рабочей жидкости, которое изгибает трубный элемент 6, в результате чего приходит в движение пластина, закрепленная на конце трубного элемента, посредством которой происходит перемещение подпружиненного штока реостата. При изменении давления и перемещении штока реостата меняется величина сопротивления, создаваемого реостатом, тем самым увеличивается или уменьшается сигнал на выходе из датчика.





11 – attachment (earthing)

В результате тарировки была получена линейная зависимость R = f(p) «сопротивление Rв цепи цифрового омметра Щ4313 – давление струи на преграду p», представленная на рис. 4 и подтверждающая работу чувствительных элементов датчика в зоне упругих деформаций [4].

| итехника. Т. | 17 | , Nº | 1 | (2018 | 3) |
|---------------------|-------|--------|----|--------|----|
| Science and Techniq | ue. V | /. 17, | No | 1 (201 | B) |



Рис. 4. Зависимость изменения сопротивления в цепи датчика ЭДП-30 от давления струи на преграду *Fig. 4.* Dependence of resistance changes in ЭДП-30 transducer circuit on barrier pressure by jet

Для измерения силы *F* струйного воздействия на плоскую поверхность также была разработана конструкция динамометра, принципиальная схема которой приведена на рис. 5. В состав принципиальной схемы динамометра входит шток 1, на верхнем торце которого смонтирована площадка-опора 2. Нижний торец штока соединен с манжетой 3, опирающейся на упругий элемент – пружину 4. Шток с площадкой-опорой, манжетой и пружиной установлены в корпусе 5.



Рис. 5. Схема динамометра для измерения силы Fот воздействия струи на преграду: а – радиальное течение струи ($\beta = 90^{\circ}$) после взаимодействия ее с плоской поверхностью; b – реверсивное течение струи ($\beta = 180^{\circ}$) после взаимодействия ее с плоской поверхностью *Fig. 5.* Scheme of dynamometer for measuring force *F* due to jet action on barrier: a – radial jet flow ($\beta = 90^{\circ}$) after its interaction with flat surface; b – reverse jet flow ($\beta = 180^{\circ}$) after its interaction with flat surface

| Наука | а | | | | | | |
|-------------|------|-------|------|----|-----|-----------------|------|
| итехника. | Τ. | 17, | N⁰ | 1 | (2 | 018 |) |
| Science and | l Te | chnie | aue. | ۷. | 17. | No ₁ | (201 |

Силовое воздействие струи 6 рабочей жидкости, вытекающей из сопла 7 и действующей на заготовку-препятствие (ЗП) 8 [10], передается через шток на пружину и регистрируется в диапазоне от 0 до 50 Н по шкале динамометра 9 (рис. 5). Принимая погрешность измерений, равную половине цены деления шкалы динамометра, была установлена абсолютная погрешность ΔF определяемой силы F, равная $\pm 0,1$ Н и не превышающая 0,2% от максимальной величины измеренной нагрузки.

Для изменения давления и скорости струи рабочей жидкости в измерительной схеме смонтирован регулировочный вентиль 10. Регистрация давления в потоке жидкости на входе в сопло осуществлялась с помощью образцового манометра 11 марки МП-160 (ГОСТ 15150–69, диапазон измерений 0–100 МПа, класс точности 2.5). Формирование струи происходило в коническом сопле диаметром $d_c = 1$ мм, с углом конусности $\alpha = 45^{\circ}$.

Применение ЗП с цилиндрическим выступом A (рис. 5а) обеспечивало радиальное течение струи ($\beta = 90^{\circ}$) после взаимодействия ее с плоской поверхностью. Применение ЗП с глухой цилиндрической полостью Б (рис. 5b) позволило осуществить формирование реверсивной струи ($\beta = 180^{\circ}$), взаимодействующей с плоской поверхностью В, выполненной в донной части полости Б. В результате тарировки динамометра было установлено повышение силового взаимодействия на преграду в 1,25–1,5 раза при использовании реверсивной струи (рис. 5b) по сравнению со струей, сформированной по схеме радиального растекания после взаимодействия с преградой (рис. 5a).

Для сравнения результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований во всем диапазоне рассматриваемых давлений (10–80 МПа) на динамометре была протарирована схема реверсивного течения (рис. 5b), которая позволила построить графики зависимости $p_{3\kappa} = f(\upsilon_{\rm стр})$ «давление струи на преграду – скорость струи».

Силу воздействия струи *F* на преграду для исследованных схем нагружения определили по второму закону Ньютона

$$F = mg, \tag{19}$$

где m – переменная масса, установленная по шкале динамометра при воздействии реверсивной струи на заготовку-препятствие, кг; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Давление от воздействия реверсной струи на заготовку-препятствие

$$p_{_{\rm SK}} = \frac{4F}{\pi d_{_{\rm CTD}}^2},\tag{20}$$

где F – сила воздействия реверсивной струи на преграду, Н; $d_{\rm crp}$ – диаметр струи, равный диаметру сопла $d_{\rm c}$ в его выходном сечении, м.

Величину скорости струи υ_{crp} для построения графика $p_{3\kappa} = f(\upsilon_{crp})$ определяли по зависимости

$$\upsilon_{\rm crp} = \frac{4Q}{\pi d_c^2},\tag{21}$$

где Q – расход рабочей жидкости, определяемый объемным методом, м³/с; $d_{\rm c}$ – диаметр сопла, м.

Некоторые результаты сходимости теоретических и экспериментальных данных, связанных с определением давления от воздействия реверсивной струи на обрабатываемую поверхность, представлены на рис. 6.

При рассмотрении кривых 1 и 2 видно, что максимальное расхождение между теоретическими (кривая 1) и экспериментальными данными (кривая 2) составляет около 30 % при скорости U_{стр} = 240 м/с. В диапазоне рабочих скоростей реверсивной струи $\upsilon_{crp} = (140-200)$ м/с и давлений 14-43 МПа расхождение между теорией и экспериментом находится в пределах 4-15 %. Полученные данные свидетельствуют о том, что расчетная зависимость (18) является достаточно корректной, хорошо учитывает физическую сущность реверсивного течения рабочей жидкости при разрушении слоя коррозии и вполне может быть использована в инженерной практике для прогнозирования рабочих давлений на обрабатываемой поверхности при воздействии на нее реверсивной струи рабочей жидкости. Следует отметить, что для построения экспериментальной кривой 2 (рис. 6) применялись две методики определения струйного давления (с помощью датчика ЭДП-30 и динамометра) в зоне I, где величина *р*_{эк} не превышала 25 МПа. В зоне II с верхним диапазоном давления порядка 75-80 МПа применялась методика регистрации давления *р*_{эк} только с помощью пружинного динамометра. При этом следует отметить, что в зоне I сравнительно низких давлений $p_{3\kappa}$ установлено, что расхождение результатов по измерению струйного давления рэк по двум использованным методикам не превышает 0,2-0,5 %.

Эксперименты проводились с рабочими жидкостями, которые характеризуются запатентованными составами [11, 12] с ρ_{π} =1,045 · 10³ кг/м³.



Рис. 6. Зависимости экспериментального и теоретических давлений разрушения слоя коррозии от скорости реверсивной струи при диаметре выходного сечения сопла $d_{\rm c} = 1$ мм: І – зона регистрации низких давлений $p_{_{\rm ЭК}}$ с помощью датчика ЭДП-30 и пружинного динамометра; II – зона регистрации $p_{3\kappa}$ с помощью пружинного динамометра; 1 – теоретическая кривая расчета давления p_{\min} по (18) при $\rho = 3.5 \cdot 10^3$ кг/м³, $\mu = 0.1$ и $\sigma_s = 2,5$ МПа; 2 – экспериментальная кривая с рабочей жидкостью по [11, 12] при $\rho_{\pi} = 1,045 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; 3 – теоретическая кривая по (18) при $\rho = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\mu = 0,1$ и $\sigma_s = 2,5$ МПа; 4 – теоретическая кривая по (13) при $\rho = 1.5 \cdot 10^3$ кг/м³, $\mu = 0.1$ и $\sigma_s = 2.5$ МПа [13] Fig. 6. Dependences of experimental and theoretical pressures of corrosion layer destruction on reverse jet velocity with nozzle outlet section diameter $d_c = 1$ mm: I – zone of low pressure $p_{3\kappa}$ registration while using $\Im Д\Pi$ -30 transducer and spring dynometer; II – zone of registration $p_{_{\mathfrak{I}\mathfrak{K}}}$ while using spring dynometer; 1 - theoretical curve for pressure calculation p_{min} according to (18) at $\rho = 3.5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.1$ and $\sigma_s = 2.5$ MPa; 2 – experimental curve with power fluid according to [11, 12] at $\rho_{\rm w} = 1.045 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; 3 – theoretical curve according to (18) at $\rho = 5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.1$ and $\sigma_s = 2.5$ MPa; 4 – theoretical curve according to (13) at $\rho = 1.5 \cdot 10^3$ kg/m³, $\mu = 0.1$ and $\sigma_s = 2.5$ MPa [13]

выводы

1. На основе приближенного энергетического метода (метода верхней оценки) разработана математическая модель расчета давления разрушения от воздействия реверсивной струи на обрабатываемую поверхность, состоящую из слоя коррозионных отложений.

2. В результате решения вариационной задачи получена теоретическая зависимость (18) для расчета минимальной величины давления разрушения p_{min} в точке соударения реверсивной струи с преградой, учитывающая механические свойства разрушаемого материала – предел текучести σ_s и его плотность ρ , скорость струи υ_{crp} и параметр реверсивного течения – коэффициент обжатия струи λ .

3. Сопоставление экспериментальных данных, полученных с помощью двух методик (базируются на основе применения датчика разности давлений ЭДП-30 и пружинного динамометра с пределами измерений 25 и 80 МПа соответственно), с теоретическими (получены на основе расчета по формуле (18)) в диапазоне рабочих скоростей реверсивного струйного воздействия v_{стр} = (140-200) м/с и давлений на преграду 14-43 МПа показало расхождение порядка 4-15 %. Полученное незначительное расхождение между теорией и экспериментом показывает, что оптимизированная теоретическая зависимость (18) является вполне корректной и может быть использована в инженерной практике как для прогнозирования энергосиловых и кинематических параметров процесса реверсивноструйной очистки, так и для подбора соответствующего насосного оборудования, предназначенного для реализации этого процесса.

ЛИТЕРАТУРА

- Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности: пат. Респ. Беларусь на изобретение от 30.10.2015 № 19453, МПК В 63В 59/08 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, И. М. Шаталов, В. Н. Шарий.
- Устройство для очистки от коррозии плоских стальных поверхностей: пат. Респ. Беларусь на изобретение от 12.05.2010 № 16526, МПК В 08В 3/00 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, И. М. Шаталов, В. Н. Шарий.
- 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.
- Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. 167 с.
- 5. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. М.: Наука, 1988. 654 с.
- 6. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
- Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов. Минск: Технопринт, 2002. 327 с.
- Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев. М.: Машиностроение, 1977. 420 с.
- 9. Френкель, Н. З. Гидравлика / Н. З. Френкель. М.: Машиностроение, 1956. 455 с.
- Качанов, И. В. Экспериментальные исследования по определению силы давления реверсивной струи на плоские поверхности заготовок-препятствий различной формы / И. В. Качанов, А. Н. Жук // Наука и техника. 2015. № 3. С. 30–36.
- 11. Состав рабочей жидкости для гидродинамической очистки металлических поверхностей от коррозии

перед лазерной резкой: пат. 21455 Респ. Беларусь: МПК В 08В 3/02 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. Н. Яглов, А. В. Филипчик; дата публ.: от 03.11.2014.

- Способ очистки металлических поверхностей: заявка a20140350 Респ. Беларусь: В 08В 3/02 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик; дата публ.: 28.02.2016.
- Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко. М.: Недра, 1985. 455 с.

Поступила 29.09.2017 Подписана в печать 04.12.2017 Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

- Kachanov I. V., Zhuk A. N., Shatalov I. M., Shariy V. N. (2015) *Device for Corrosion Removal From Flat Steel Surface*. Patent Republic of Belarus No 19453 (in Russian).
- Kachanov I. V., Zhuk A. N., Shatalov I. M., Shariy V. N. (2010) *Device for Corrosion Removal From Flat Steel Surface*. Patent Republic of Belarus No 16526 (in Russian).
- Zhuk A. N., Kachanov I. V., Filipchik A. V. (2017) Technology of Reverse-Blast Corrosion Cleaning of Steel Sheets Prior to Laser Cutting. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (3), 232–241 (in Russian). DOI: 10. 21122/ 2227-1031-2017-16-3-232-241.
- Kachanov I. V., Filipchik A. V., Babich V. E., Zhuk A. N., Ushev S. I. (2016) Technology of Hydroabrasive Blasting for Corrosion Removal and Protection Against Corrosion of Steel Products While Using Bentonite Clay. Minsk, Belarusian National Technical University. 167 (in Russian).
- Rabotnov Yu. N. (1988) Mechanics of Deformable Solid Body. Moscow, Nauka Publ. 654 (in Russian).
- 6. Tomlenov A. D. (1972) Theory for Plastic Deformation of Metals. Moscow, Metallurgiya Publ. 408 (in Russian).
- Kachanov I. V. (2002) Speed hot Extrusion of Rod-Shaped Products. Minsk, Tekhnoprint Publ. 327 (in Russian).
- Storozhev M. V. (1977) Theory of Pressure Metal Treatment. Moscow, Mashinostroenie Publ. 420 (in Russian).
- 9. Frenkel N. Z. (1956) *Hydraulics*. Moscow, Mashinostroyenie Publ. 455 (in Russian).
- Kachanov I. V., Zhuk A. N. (2015) Experimental Investigations on Determination of Pressure Force of Power Fluid-Jet Stream on Plane Surfaces of Specimens Having Various Shape. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 30–36 (in Russian).
- Kachanov I. V., Zhuk A. N., Yaglov V. N., Filipchik A. V. (2014) Composition of Working Liquid for Hydrodynamic Corrosion Removal From Metallic Surfaces Prior to Laser Cutting. Patent Republic of Belarus No 21455 (in Russian).
- Kachanov I. V., Zhuk A. N., Filipchik A. V. (2016) *Method for Cleaning Metallic Surfaces*: Patent Republic of Belarus No a20140350 (in Russian).
- 13. Gavrilko V. M. (1985) *Filters of Drilled Holes*. Moscow, Nedra Publ. 455 (in Russian).

Received: 29.09.2017 Accepted: 04.12.2017 Published online: 29.01.2018

Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique, V. 17, No 1 (2018) DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-14-20

УДК 621.9

Анализ и выбор рациональных режимов резания твердосплавным инструментом при точении валов

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾, канд. техн. наук Д. Г. Шатуров²⁾, докт. техн. наук, проф. Г. Ф. Шатуров²⁾

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

²⁾Белорусско-Российский университет (Могилев, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018 Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Токарная обработка деталей типа валов является наиболее распространенным методом при изготовлении узлов, механизмов и машин. При этом высокое качество обработки валов точением связано с износом лезвия твердосплавного инструмента, который в большой степени зависит от скорости резания. Как известно, стойкость инструмента, ресурс его работы и производительность связаны с износом лезвия твердосплавного инструмента. Однако отсутствие аналитической зависимости по определению оптимальной величины скорости резания не позволяет на стадии проектирования технологического процесса назначить оптимальные режимы обработки. Режущий инструмент в зависимости от условий обработки может подвергаться механическому, абразивному, адгезионному, окислительному (химическому), термоусталостному и диффузионному видам износа. При этом процесс изнашивания состоит из двух видов износа, один из которых в определенный момент влияет на износ в большей степени, чем другой. На основании анализа существующих представлений об изменении стойкости твердосплавного инструмента от скорости резания при точении валов разработана методика назначения рациональных режимов обработки для средних и больших скоростей резания, обеспечивающих максимальный ресурс работы инструмента. Установлен диапазон изменения скорости резания, приводящий к увеличению периода стойкости инструмента и соответственно производительности обработки валов из стали марки ст. 45 инструментом со сменными пластинами из твердого сплава марки T15K6.

Ключевые слова: точение валов, твердосплавный инструмент, скорость резания, стойкость инструмента

Для цитирования: Шелег, В. К. Анализ и выбор рациональных режимов резания твердосплавным инструментом при точении валов / В. К. Шелег, Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 14–20. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-14-20

Analysis and Selection of Rational Cutting Modes while Using Hard-Alloy Tool for Shaft Turning

V. K. Sheleg¹⁾, D. G. Shaturov²⁾, G. F. Shaturov²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),
 ²⁾Belarusian-Russian University (Mogilev, Republic of Belarus)

Abstract. Turning machining of such parts as shafts is considered as the most widely-spread method formanufacturing units, mechanisms and machinery. While doing so it is necessary to ensure high quality of shaft turning with the help of a hard-alloy tool (accuracy and roughness, stability and predictability of steel edge dimensional wear), maximum tool durability, resource of its service life and productivity. As it is known all these operational parameters of the tool depend very heavily on

Адрес для переписки Шатуров Геннадий Филиппович Белорусско-Российский университет просп. Мира, 43, 212030, г. Могилев, Республика Беларусь Тел.: +375 22 223-02-53 esu@tut.by Address for correspondence Shaturov Gennadiy F. Belarusian-Russian University 43 Mira Ave., 212030, Mogilev, Republic of Belarus Tel.: +375 22 223-02-53 esu@tut.by

> Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018)

cutting speed. However absence of an analytical dependence for determination of optimum cutting speed value does not per permit to prescribe optimum operational modes at the stage of technology design process. The cutting tool can be subjected to mechanical, anrasive, adhesive, oxidation (chemical), thermal-fatigue and diffusion wear types depending on turning conditions. In this case wearing process consists of two wear types and one of them influences at a certain point on wearing process to a greater extent than the other one. Methodology for prescription of rational turning modes for medium and high cutting speeds ensuring maximum resource of the tool operation has been developed in the paper and it has been based on the analysis of the existing viewpoints about changes in the hard-alloy tool durability due to cutting speed while turning shafts. The range of cutting speed changes has been determined in the paper and it leads to an increase of the tool durability period and, correspondingly, turning productivity of 45 steel grade shafts while using the tool with T15K6-hard-alloy replaceable inserts.

Keywords: shaft turning, hard-alloy tool, cutting speed, tool durability

For citation: Sheleg V. K., Shaturov D. G., Shaturov G. F. (2018) Analysis and Selection of Rational Cutting Modes while Using Hard-Alloy Tool for Shaft Turning. *Science and Technique*. 17 (1), 14–20. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-14-20 (in Russian)

Детали типа валов широко применяются в узлах, механизмах и машинах, а изготовляются они методом токарной обработки. Разработка технологического процесса обработки валов точением твердосплавным инструментом должна обеспечить высокое качество обрабатываемых поверхностей (точность и шероховатость, стабильность и предсказуемость размерного износа лезвия резца), максимальные стойкость инструмента, ресурс его работы и производительность. Как известно, все эти показатели работы инструмента в большой степени зависят от скорости резания. Однако отсутствие аналитической зависимости по определению оптимальной величины скорости резания не позволяет на стадии проектирования технологического процесса назначить оптимальные режимы обработки. Это предопределило актуальность и цель настоящих исследований, которые заключаются в определении рационального диапазона изменения скорости резания, обеспечивающей выполнение вышеназванных показателей работы твердосплавного инструмента, и разработке методики назначения рациональных режимов резания.

Зависимость периода стойкости инструмента от скорости резания при обработке валов из стали марки ст. 45 инструментом со сменными пластинами из твердого сплава марки T15К6 представляет собой периодически изменяющуюся плавную кривую с двумя или тремя максимумами («горбами») и минимумами («впадинами»), разделенными между собой точками перегиба, расположенными на разных уровнях по стойкости при различных скоростях резания (рис. 1) [1–7]. Установлено, что существование «горбов» связано с переходом при изменении скорости резания из одного физического вида износа рабочих поверхностей резца в другой [4]. При этом «горбы» свидетельствуют о динамической стабилизации и оптимальных условиях трения в контактных зонах инструмента со сходящей стружкой и поверхностью резания заготовки. До «горба» и после него условия трения в контактных зонах инструмента не стабильны.

Как известно, режущий инструмент в зависимости от условий обработки может подвергаться механическому, абразивному, адгезионному, окислительному (химическому), термоусталостному и диффузионному видам износа [3, 8]. При этом процесс изнашивания состоит из двух видов износа, один из которых в данный момент времени влияет на износ в большей степени, чем другой. Так, в точках M_1 (v_{M1} , T_{M1}) и $M(v_M, T_M)$ кривой $T_0 = f(v)$ (рис. 1) имеет место минимальная стойкость инструмента, обусловленная адгезионным видом износа [3, 9, 10]. Под адгезионным износом инструмента понимают циклический срез касательными напряжениями или отрыв силами адгезии (сцепления, сваривания, прилипания) частиц отдельных выступов разупрочненного инструментального материала сходящей стружкой [3, 8]. Так, при небольших скоростях резания (v < 10 м/мин), температуре резания ($\Theta < 300$ °C) и большом давлении адгезия способствует образованию чистых от окислов элементарных поверхностей на передней поверхности резца и нароста [3]. Образовавшийся нарост состоит из двух частей: неподвижной, «приваренной» к передней поверхности «подошвы», и контактирующей с «горячей» стружкой, приводящей к срыву «шапки».



Fig. 1. Dependence of edge tool durability period on cutting rate

При скорости резания v = 20-45 м/мин и температуре $\Theta = 300$ °C высота нароста максимальна, а износ минимален (рис. 1, точка А1 (v_{01}, T_{01}^{\max})). Твердость нароста в 2,5–3 раза превышает твердость обрабатываемого материала. По отношению к инструменту он выполняет функции режущего клина и защитные функции, препятствуя изнашиванию контактных поверхностей инструмента. В зоне образования максимальной высоты нароста, как правило, минимальными являются коэффициент трения, коэффициент усадки стружки, тангенциальная сила резания, а максимальными - стойкость инструмента, передний фактический угол и шероховатость обработанной поверхности [9, 11]. Таким образом, диапазон скоростей резания образования нароста не рекомендуется для чистовой обработки поверхностей.

При повышение скорости резания до 40–50 м/мин наблюдается повышение температуры от 300 до 600 °С, при которой нарост исчезает – вначале «шапка», а затем «подошва» [9]. В результате абразивно-адгезионного износа стойкость инструмента падает до момента (рис. 1, точка $M(v_M, T_M)$) начала образования окисной пленки, имеющей ячеистый вид [12].

Дальнейшее увеличение скорости резания ($v > v_M$) приводит к росту температуры в зоне резания и пропорционально ей – к увеличению толщины окисной пленки, а аб-

разивно-адгезионный износ постепенно уступает место окислительно-абразивному, где при $v \ge v_{n1}$ окисление является преобладающим [8]. Стабилизация в зоне трения достигается при скорости резания v₀ (рис. 1, точка A_0 (v_0 , T_0^{max})), второй «горб» на кривой зависимости периода стойкости от скорости резания. Окисная пленка, расположенная в зоне трения между рабочими поверхностями лезвия инструмента, стружкой и заготовкой, предотвращает их непосредственный контакт, что положительно сказывается на повышении стойкости инструмента. Окислительным износом называют установившийся стационарный процесс динамического равновесия разрушения и восстановления окисных пленок, где окисление является преобладающим [8]. Таким образом, для увеличения периода стойкости инструмента необходимо назначать такие режимы обработки, которые гарантируют существование окислительного износа между контактирующими поверхностями инструмента, заготовки и сходящей стружки.

При повышении скорости резания $v > v_0$ и росте температуры в зоне резания толщина окисной пленки увеличивается, а ее прочность уменьшается [8, 11]. Это приводит к ее разрушению, что резко увеличивает абразивно-окислительный износ, где в качестве абразива теперь выступает сама окисная пленка. При температуре Θ ≥ 850 °С абразивно-окислительный износ переходит в стадию диффузионного с резким уменьшением стойкости инструмента.

Практический интерес представляют восходящая (при $v \ge v_{n1}$) и нисходящая ($v \ge v_0$) ветви, обеспечивающие максимальную производительность (рис. 1).

Для участка кривой $T_0 = f(v)$, когда скорость резания $v \ge v_n$, где v_n – скорость резания, соответствующая точке *B* перегиба кривой $T_0 = f(v)$, установлена регрессионная зависимость для определения периода стойкости инструмента при точении [13] в виде

$$T_0 = \left(\frac{C}{\nu}\right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{C}{\nu}\right)^5,\tag{1}$$

$$C = \frac{C_v K_v}{t^x S^y},\tag{2}$$

где T_0 – период стойкости инструмента, мин; m – показатель относительной стойкости, для стали m = 0,2 [13]; C, C_v, K_v, x, y – коэффициенты и показатели степени, определяемые из [13]; v – скорость резания, м/мин; t – глубина резания, мм; S – подача, мм/об.

В [14] была получена более простая адекватная зависимость для определения периода стойкости инструмента при $v \ge v_{n}$

$$T_0 = T_{\rm n} \left(\frac{v_{\rm n}}{v}\right)^5. \tag{3}$$

Координаты точки $B(v_n, T_n)$ перегиба кривой $T_0 = f(v)$, являющиеся границей между абразивно-окислительным и диффузионным износом, определяются из следующих зависимостей [14, 15]:

$$v_{\pi} = C^{1,25} \left(\frac{U_0}{1000\delta_0 K_p} \right)^{0,25};$$
 (4)

$$T_{\rm m} = \frac{1000\delta_0 K_{\rm p}}{v_{\rm m} U_0};$$
(5)

$$K_{\rm p} = \frac{\sin \varphi + \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} tg\alpha_3, \tag{6}$$

где U_0 – величина относительного размерного износа лезвия инструмента, мкм/км (U_0 = = (5–7) мкм/км при обработке стали резцом с

| Наука | | | | |
|---------------|---------|--------------|---------|------|
| итехника. Т | . 17, N | l º 1 | (2018) |) |
| Science and T | echniau | ie V | 17 No 1 | (201 |

_ . .

многогранной пластинкой из твердого сплава марки Т15К6 [13]); δ_0 – оптимальная величина износа задней поверхности резца, мкм; K_p – коэффициент перевода линейного износа задней поверхности резца в размерный; T_n – период стойкости инструмента при скоростях резания v_n и v_{n1} , мин; ϕ , ϕ_1 – вспомогательный и главный углы в плане резца, град; α_3 – угол заточки задней поверхности резца, град.

Как показали исследования, при $v < v_{\pi}$ зависимостями (1) и (2) пользоваться нельзя, поскольку для периода стойкости T_0 получаем завышенное его значение (рис. 1, пунктирная линия). Поэтому для участка кривой $T_0 = f(v)$ при $v \le v_{\pi}$ в [14] предложена следующая формула для определения периода стойкости инструмента:

$$T_{0} = \frac{T_{\pi}\sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2}\left(5\frac{\nu}{\nu_{\pi}}-4\right)^{2}}},$$
(7)

где $v_{n1} \le v \le v_n$ – рациональный диапазон изменения скорости резания.

Из анализа зависимости (7) следует, что:

$$T_0^{\max} = T_{\pi} \sqrt{e}; \qquad (8)$$

$$v_0 = 0.8 v_{\pi};$$
 (9)

$$v_{\rm n1} = 0, 6v_{\rm n},$$
 (10)

где T_0^{max} – максимальный период стойкости инструмента, мин; v_0 – скорость резания, соответствующая максимальному периоду стойкости инструмента, м/мин; v_{n1} – скорость резания, соответствующая второй точке B_1 перегиба кривой $T_0 = f(v)$, м/мин (рис. 1).

Однако, как показывают исследования [16], скорость резания v_0 , соответствующая максимальному периоду стойкости инструмента, меньше скорости резания v_p , соответствующей максимальному ресурсу работы инструмента. Под ресурсом работы инструмента понимается максимальная длина пути резания за период его стойкости, подсчитываемая по зависимости [3–5]

$$L = vT_0 = v \frac{T_{\rm n} \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left(5 \frac{v}{v_{\rm n}} - 4\right)^2}},$$
 (11)

где *L* – ресурс работы инструмента, м.

Полагая, что зависимость (11) имеет максимум, для определения скорости резания, соответствующей этому максимуму, возьмем производную dL/dv и полученную функцию приравняем к нулю. В результате скорость резания v_p и период стойкости T_{0p} , соответствующие максимальному ресурсу работы инструмента L_{max} , будут равны:

$$v_{\rm p} = \left(0, 4 + \frac{1}{\sqrt{5}}\right) v_{\rm n} = 0,847 v_{\rm n};$$
 (12)

$$T_{0p} = 1,603T_{\pi};$$
 (13)

$$L_{\rm max} = 1,36 v_{\rm n} T_{\rm n} = 1360 \delta_0 K_{\rm p} / U_0, \qquad (14)$$

где $v_{\rm p}$ – скорость резания, соответствующая максимальному ресурсу работы инструмента, м/мин; $T_{0\rm p}$ – период стойкости инструмента при скорости резания $v_{\rm p}$, мин; $L_{\rm max}$ – максимальный ресурс работы инструмента, м.

Следует отметить, что с увеличением подачи *S* и глубины резания *t* значение скорости резания $v_{\rm n}$ уменьшается, а период стойкости $T_{\rm n}$ увеличивается [16]. В результате действия этих двух факторов в противоположных направлениях максимальный ресурс работы инструмента является постоянной величиной, что и отражено в (14). Максимальный ресурс работы инструмента обеспечивает уменьшение количества его переналадок, что, естественно, повышает производительность.

На основании проведенных исследований на рис. 2 представлено изменение периода стойкости инструмента T_{0p} и скорости резания v_p от глубины резания t (а) и подачи S (b), обеспечивающих максимальный ресурс работы инструмента. Материал заготовки – сталь марки ст. 45, инструмента – сменная многогранная пластина из твердого сплава марки T15K6.

Как видно из графиков на рис. 2, с увеличением глубины резания t и подачи S скорость резания v_p уменьшается, а период стойкости инструмента T_{0p} увеличивается. При этом подача S в большей степени влияет на изменение скорости v_p и периода стойкости T_{0p} . Так, увеличение подачи от 0,2 до 1,0 мм/об,

т. е. в пять раз, приводит к изменению этих параметров примерно в два раза ($234/120 \approx 2$). Увеличение глубины резания *t* от 0,2 до 1,0 мм ведет к изменению этих же параметров в 1,35 раза (174/129 = 1,35). На основании полученных зависимостей (2), (4), (5), (12) и (13) можно осуществить назначение рациональных режимов токарной обработки. Исходя из известных начальных условий, предлагается три метода назначения режимов резания.



Рис. 2. Изменение скорости $v_p(1)$ и периода стойкости $T_{0p}(2)$ от подачи S (а) и глубины резания t (b): а – для t = 0,8 мм; b – для S = 0,5 мм/об; • – расчет; × – эксперимент

Fig. 2. Changes in speed v_p (1) and durability period T_{0p} (2) due to cutting depth *t* (a) and tool advance *S* (b): a – for *t* = 0.8 mm; b – for *S* = 0.5 mm/rev; • – calculation; × – experiment

При первом методе рассчитывается необходимый припуск, т. е. глубина резания t. Исходя из получения необходимой величины шероховатости, назначается подача S. Дальше производится расчет скорости резания v_p наибольшего ресурса работы инструмента по алгоритму

$$t \to S \to C(2) \to v_{n}(4) \to T_{n}(5) \to$$

 $\to v_{p}(12) \to T_{0p}(13).$

Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018) Второй метод основан на обеспечении времени работы инструмента, равного или кратного такту автоматической линии:

$$T_0 = \tau_m N,$$

где τ_m – такт автоматической линии; N – количество деталей (план).

Тогда период максимального ресурса работы инструмента T_{0p} принимается равным периоду T_0

$$T_{0p} = T_0 = \tau_m N.$$

Далее расчет производится по таблице или по алгоритму

$$T_{0p} = T_0 \to T_n(13) \to v_n(5) \to v_p(12) \to$$
$$\to C(4) \to t \to S(2).$$

Третий метод основан на том факте, что скорость резания при обработке конкретной поверхности не может быть выбрана самостоятельно, поскольку частота вращения заготовки связана с одновременной обработкой другой лимитирующей поверхности при многоинструментальной обработке. Тогда скорость резания для этой поверхности вала определяется расчетом, исходя из неизменной частоты вращения заготовки, и она для данной поверхности принимается равной скорости наибольшего ресурса работы инструмента, т. е. $v = v_p$. Далее расчет проводится по таблице или алгоритму

$$v = v_{\rm p} \rightarrow v_{\rm n}(12) \rightarrow T_{\rm n}(5) \rightarrow T_{\rm 0p}(13) \rightarrow$$
$$\rightarrow C(4) \rightarrow t \rightarrow S(2).$$

При известных величинах расчетного значения снимаемого припуска (т. е. глубины резания t) и коэффициента C(4) по табл. 1 определяем значение подачи S, обеспечивающей выполнение условий:

$$T_0 = T_{0p}$$
 или $v = v_{0p}$.

Таким образом, в результате проведенных исследований решены все поставленные задачи по определению величины и диапазона изменения скорости резания, обеспечивающей максимальную стойкость и максимальный ресурс работы твердосплавного инструмента при точении валов.

Таблица 1

Значение параметра C(4) для соответствующих режимов обработки [13] Parameter value C (4) for relevant machining conditions [13]

| Значение параметра <i>С</i> (4) при глубине резания <i>t</i> , мм | | | | | | | Пода- ча <i>S</i> , | | | | | |
|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | м/об |
| 847 | 797 | 764 | 739 | 719 | 702 | 688 | 665 | 626 | 600 | 580 | 565 | 0,1 |
| 738 | 694 | 665 | 643 | 626 | 611 | 600 | 579 | 545 | 522 | 505 | 491 | 0,2 |
| 680 | 640 | 613 | 593 | 577 | 564 | 553 | 534 | 503 | 482 | 466 | 453 | 0,3 |
| 614 | 578 | 553 | 535 | 521 | 509 | 499 | 482 | 454 | 435 | 420 | 409 | 0,4 |
| 568 | 534 | 512 | 495 | 482 | 471 | 461 | 446 | 420 | 402 | 389 | 378 | 0,5 |
| 533 | 501 | 480 | 464 | 452 | 442 | 433 | 419 | 394 | 377 | 365 | 355 | 0,6 |
| 505 | 475 | 455 | 440 | 428 | 418 | 410 | 397 | 373 | 357 | 346 | 336 | 0,7 |
| 479 | 450 | 431 | 417 | 406 | 397 | 389 | 376 | 354 | 338 | 328 | 319 | 0,8 |
| 433 | 407 | 390 | 377 | 367 | 359 | 352 | 340 | 320 | 306 | 296 | 288 | 1,0 |
| = 0, | Примечание. Принято, что $C_v = 420$ (350; 340); $y = 0.20$ (0.35; 0.45); $x = 0.15$; $K_v = 1.0$. | | | | | | | | | | | |

выводы

1. Разработана методика назначения рационального режима обработки для средних и больших скоростей резания, обеспечивающего максимальный ресурс работы инструмента и производительности.

2. Установлен диапазон изменения скорости резания от $0,6v_{\rm n}$ до $0,8v_{\rm n}$, когда увеличение скорости резания приводит к повышению стойкости инструмента и соответственно производительности.

3. Выбор скорости резания, соответствующей наибольшему ресурсу работы инструмента, при увеличении глубины резания и подачи ведет к повышению периода стойкости инструмента.

4. Установлен рациональный диапазон изменения скорости резания от 0,6 $v_{\rm n}$ до $v_{\rm n}$, обеспечивающий повышенную стойкость инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Яще-

рицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. Минск: Высш. шк., 1990. 512 с.

- Грановский, Г. И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов / Г. И. Грановский. М.: Машиностроение, 1982. 112 с.
- Развитие науки о резании металлов / В. Ф. Бобров [и др.]. М.: Машиностроение, 1967. 416 с.
- Аваков, А. А. Физические основы теорий стойкости режущих инструментов / А. А. Аваков. М.: Машгиз, 1960. 308 с.
- Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. М.: Высш. шк., 1985. 304 с.
- Лоладзе, Т. Н. Износ режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. М.: Машиностроение, 1958. 357 с.
- Шатуров, Д. Г. Состояние и пути повышения износостойкости лезвийного инструмента в широком диапазоне изменения скорости резания / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, М. В. Панков // Вестник Белорусско-Российского университета. 2017. № 1. С. 100–109.
- Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 279 с.
- 9. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. М.: Машиностроение, 1958. 357 с.
- Зорев, Н. Н. О процессе износа твердосплавного инструмента / Н. Н. Зорев, Д. Н. Клауч, В. А. Батырев // Вестник машиностроения. 1971. № 11. С. 70–73.
- Даниелян, А. М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов / А. М. Даниелян. М.: Машиностроение, 1954. 276 с.
- 12. Кожевников, Д. В. Резание металлов / С. В. Кожевников. 2-е изд., доп. М.: Машиностроение, 2012. 304 с.
- Справочник технолога машиностроителя: в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985. Т. 2. 495 с.
- Шатуров, Д. Г. Технологические возможности управления режущей способностью лезвийного инструмента / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. № 2. С. 112–119.
- Шатуров, Д. Г. Технологические особенности чистовой токарной обработки валов / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, А. А. Жолобов. Могилев: Белор.-Рос. ун-т, 2015. 192 с.
- Шатуров, Д. Г. Ресурс работы лезвийного инструмента при обработке / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. № 4. С. 90–98.

Поступила 27.10.2017 Подписана в печать 28.12.2017 Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

- Yashcheritsyn P. I., Yeremenko M. L., Feldstein E. E. (1990) *Theory of Cutting. Physical and Thermal Processes in Technological Systems*. Minsk, Vysshaya Shkola Publ. 512 (in Russian).
- Granovskii G. I. (1982) Data Processing of Experimental Investigations on Metal Cutting. Moscow, Mashinostroyenie Publ. 112 (in Russian).
- Bobrov V. F., Granovskii G. I., Zorev N. N., Isaev A. I., Klushin M. I., Larin M. N., Loladze T. N. (1967) *Devel*opment of Science Dealing with Metal Cutting. Moscow, Mashinostroenie Publ. 416 (in Russian).
- 4. Avakov A. A. (1960) *Physical Fundamentals of Stability Theory for Cutting Tools*. Moscow, Mashgiz Publ. 308 (in Russian).
- 5. Granovskii G. I., Granovskii V. G. (1985) *Metal Cutting*. Moscow, Vysshaya Shkola. 304 (in Russian).
- Loladze T. N. (1958) Cutting Tool Wear. Moscow, Mashinostroenie. 357 (in Russian).
- Shaturov D. G., Shaturov G. F., Pankov M. V. (2017) State and Ways to Increase Wear Resistance of Edge Tool Within Wide Range of Changes in Cutting Speed. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (1), 100–109 (in Russian).
- Makarov A. D. (1976) *Optimization of Cutting Processes*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 279 (in Russian).
- 9. Bobrov V. F. (1958) *Fundamentals of Metal Cutting Theory*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 357 (in Russian).
- Zorev N. N., Klauch D. N., Batyrev V. A. (1971) On Wearing Process of Carbide Tool. *Vestnik Mashinostroyenia*, (11), 70–73 (in Russian).
- 11. Danielyan A. M. (1954) *Heat and Wear of Tools in Metal Cutting Process*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 276 (in Russian).
- Kozhevnikov D. V. (2012) *Metal Cutting*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie. 304 (in Russian).
- Kosilova A. G., Meshcheriakova R. K. (eds.) (1985) Reference Book of Mechanical Engineering Technologist. Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie Publ. 495 (in Russian).
- Shaturov D. G., Shaturov G. F. (2016) Technological Possibilities to Control Cutting Ability of Edge Tool. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (2), 112–119 (in Russian).
- Shaturov D. G., Shaturov G. F., Zholobov A. A. (2015) Technological Specific Features of Finishing Turning Machining. Mogilev, Belarusian-Russian University. 192 (in Russian).
- Shaturov D. G., Shaturov G. F. (2016) Operational Resource of Edge Tool During Machining Process. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], (4), 90–98 (in Russian).

Received: 27.10.2017 Accepted: 28.12.2017 Published online: 29.01.2018 DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28

УДК 621.793.71

Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический NiCr и твердый ZrO₂ слои)

Канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾,

чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾, инж. В. В. Оковитый¹⁾, чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾, докт. физ.-мат. наук П. П. Храмцов²⁾, канд. физ.-мат. наук М. Ю. Черник²⁾, докт. физ.-мат. наук, проф. В. В. Углов³⁾, кандидаты физ.-мат. наук В. И. Шиманский³⁾, Н. Н. Черенда³⁾, канд. техн. наук С. Б. Соболевский⁴⁾

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

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

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

⁴⁾Государственное учреждение «Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018 Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье приведены результаты исследования влияния параметров плазменной струи и фракционного состава исходного порошка на характеристики двухслойных композиционных покрытий на основе никель-хрома и диоксида циркония на элементах защитных экранов. Проведена оптимизация на основании получения максимального коэффициента использования порошка. Сравнительный анализ зависимости коэффициента использования порошка вязких металлических слоев никель-хрома и никель-алюминия от дистанции напыления показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения коэффициента использования порошка больше при оптимальных режимах для порошка никель-хрома. Это можно объяснить высокой пластичностью последнего и соответственно меньшим отскоком соударяющихся с подложкой частиц. Приведены результаты исследований микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, выполненных с использованием растровой электронной микроскопии. Рассмотрены микроструктуры поперечных сечений покрытия ZrO₂ и промежуточного слоя Ni-Cr. Из представленных данных видно, что в исходном состоянии покрытие характеризуется пористостью, причем средний размер пор составляет несколько микрометров и в некоторых областях достигает 20 мкм. Микроструктура слоя Ni-Cr характеризуется меньшей пористостью. Воздействие на напыленное покрытие компрессионных плазменных потоков приводит к формированию переплавленного слоя оксида толщиной 12-15 мкм, способствует сглаживанию рельефа поверхности и образованию на поверхности трещин, распространяющихся преимущественно в глубину покрытия. Обработка оксидных покрытий компрессионной плазмой приводит также к снижению их пористости.

Ключевые слова: плазменная струя, покрытия, элементы защитных экранов, коэффициент использования порошка, плазменные потоки, кубическая модификация, диоксид циркония

Для цитирования: Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический NiCr и твердый ZrO₂ слои) / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 21–28. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28

Адрес для переписки Оковитый Вячеслав Александрович Белорусский национальный технический университет просп. Независимости, 65, 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 65 Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus Tel.: +375 17 293-93-71 niil svarka@bntu.by

Formation and Study of Plasma Spraying Double-Layer Composite Coatings (Viscous Metallic NiCr and Solid ZrO₂ Layer)

V. A. Okovity¹⁾, F. I. Panteleenko¹⁾, V. V. Okovity¹⁾, V. M. Astashinsky²⁾, P. P. Hramtsov²⁾, M. Y. Cernik²⁾, V. V. Uglov³⁾, V. I. Chimanskiy³⁾, N. N. Cerenda³⁾, S. B. Sobolewski⁴⁾

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

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

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

⁴⁾State Organization "Belarusian Institute of System Analysis and Information Support

for Scientific and Technical Sphere" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents results pertaining to investigations on influence of plasma jet parameters and fractional composition of initial powder on characteristics of two-layer composite coatings on the basis of nickel-chromium, and zirconium dioxide in the shielding elements. Optimization has been carried out on the basis of obtaining maximum powder use factor. A comparative analysis for dependence of the powder use factor in viscous metal layers of nickel-chrome and nickelaluminum on spraying distance shows that while having similar character of curves for the presented dependencies an absolute value of powder use factor is higher for nickel-chromium powder. It can be explained by a higher ductility of the latter and correspondingly smaller rebound of particles which are colliding with substrate. The investigation results for cross section microstructure in the formed coatings while using scanning electron microscopy are given in the paper. The paper considers cross section microstructures for ZrO₂-coating and intermediate Ni–Cr layer. The submitted data reveal that an initial stage of the coating is characterized by porosity and an average pore size is of several micrometers, and in some areas its size reaches 20 µm. The microstructure of a Ni–Cr layer is characterized by lower porosity. Impact of compression plasma flows on sprayed coating leads toformation of fused oxide layer with thickness of 12–15 µm and contributes to smoothing of surface relief and formation of cracks on the surface which are preferably propagating into coating depth. Processing of oxide coatings by compression plasma also results in reduction of their porosity.

Keywords: plasma jet, coatings, shielding elements, powder use factor, plasma flows, cubic modification, zirconium dioxide

For citation: Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Cernik M. Y., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. (2018) Formation and Study of Plasma Spraying Double-Layer Composite Coatings (Viscous Metallic NiCr and Solid ZrO₂ Layer). *Science and Technique*. 17 (1), 21–28. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-21-28 (in Russian)

Введение

Эффективность защиты объектов от повреждений при высокоэнергетическом воздействии определяется уровнем поглощения кинетической энергии метеорных частиц материалом покрытия. Не касаясь всех механизмов поглощения энергии, укажем, что значительная ее часть расходуется на упругую и пластическую деформацию материала покрытий. Высокая пластичность и вязкость являются существенным фактором увеличения стойкости. Повышение твердости резко снижает пластичность и вязкость, приводит к хрупкому разрушению. Типичные конструкционные материалы для противометеорных экранов – алюминиевые сплавы, титан, сталь. Еще большей противоударной стойкостью обладают многослойные структуры с твердым керамическим лицевым слоем и подслоем из вязкого металлического материала. В качестве материалов для керамического слоя антиметеоритных покрытий часто применяют композиции на основе оксидов, в том числе диоксида циркония [1-5]. Это обусловлено рядом его свойств: сравнительно высоким коэффициентом линейного термического расширения и возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики, в частности ударной вязкости. Для эффективной работы таких защитных элементов необходимо, чтобы они позволяли существенным образом снизить кинетическую энергию налетающих микрочастиц, сохраняя при этом стабильность своей структуры. В связи с этим предложено формировать композиционные покрытия на основе диоксида циркония с предварительным осаждением вязкого подслоя на основе переходных металлов, повышающего, во-первых, адгезионную прочность сформированного покрытия к подложке, а во-вторых, обладающего иными по сравнению с внешним покрытием вязко-пластическими свойствами [6-11], приводящими к значительному замедлению проходящих микрочастиц. В то же время для повышения прочности поверхностного слоя покрытия, который в первую очередь взаимодействует с налетающей микрочастицей, предложено проводить его обработку компрессионными плазменными потоками с энергиями, обеспечивающими плавление приповерхностного слоя. В этом случае за счет процессов, связанных со скоростной кристаллизацией расплава, ожидается формирование мелкокристаллической структуры, обладающей повышенными механическими свойствами. Структурно-фазовое состояние приповерхностного модифицированного слоя может контролироваться также параметрами самого компрессионно-плазменного воздействия, в частности плотностью поглощенной энергии, давлением газа остаточной атмосферы, числом последовательных импульсов воздействия и др.

Для выявления особенностей перераспределения элементов в покрытии и изменения их фазового состава после воздействия компрессионными плазменными потоками использованы методы рентгеноспектрального микроанализа и рентгеноструктурного анализа. При исследовании микроструктуры покрытий после воздействия компрессионными плазменными потоками применялся метод растровой электронной микроскопии. Анализ механических свойств приповерхностных модифицированных слоев осуществлялся в результате трибологических испытаний.

Оптимизация процесса напыления вязкого металлического слоя на основе никель-хрома

Оптимизация напыления NiCr проводилась по методике, описанной в [12]. На первом этапе выполнялась оптимизация на основании получения максимального коэффициента использования материала. Вначале коэффициент использования порошка (КИП) определяли при различных значениях тока I (300–650 A с интервалом 50 A) и расходах плазмообразующего газа R_{N2} (45; 50; 55 л/мин), но с постоянной дистанцией напыления L = 110 мм (рис. 1).

На следующем этапе оптимальные значения дистанции напыления определялись с постоянными значениями тока и расходом плазмообразующего газа (I = 550 A; $R_{N2} = 50$ л/мин) для различных фракций порошка (рис. 2).



Рис. 1. Зависимость коэффициента использования порошка от силы тока электрической дуги для порошков NiCr с различным расходом плазмообразующего газа R_{N2} , л/мин: 1-55; 2-50; 3-45 (L=110 мм; $R_{nop}=4,5$ кг/ч; фракция порошка 40–63 мкм)

Fig. 1. Dependence of powder use factor on electric arc current strength for NiCr powders with various consumption of plasma gas R_{N2} , l/min: 1-55; 2-50; 3-45 (L = 110 mm; $R_{nop} = 4.5$ kg/h; powder fraction 40–63 µm)



Рис. 2. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления для порошков NiCr с фракцией, мкм: 1 – 40–63; 2 – 63–100;
3 – 100–160 (*I* = 550 A; *R*_{N2} = 50 л/мин; *R*_{пор} = 4,5 кг/ч) *Fig.* 2. Dependence of powder use factor on spraying distance for NiCr powders having fraction, μm: 1 – 40–63; 2 – 63–100;
3 – 100–160 (*I* = 550 A; *R*_{N2} = 50 1/min; *R*_{пор} = 4.5 kg/h)

Увеличение тока и расхода плазмообразующего газа (рис. 1) до определенных значений приводит к повышению КИП, так как эти параметры влияют на степень проплавления порошка [1–4]. Дальнейший их рост ведет к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно, КИП уменьшается. При увеличении расхода N₂ происходит уменьшение значений тока для максимального КИП. Для $R_{N2} = 55$ л/мин максимальный КИП = 78 % соответствует I = 500 A, для $R_{N2} = 50$ л/мин максимальный КИП = 85 % соответствует I = 550 А, для $R_{N2} = 45$ л/мин максимальный КИП = 80 % соответствует I = 600 А. Похожая тенденция сохраняется и при изменении дистанции напыления (рис. 2) при оптимизации значения расхода N₂ и тока (в рассматриваемом случае $R_{N2} = 50$ л/мин, I = 550 А). При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой ниже $t_{пл}$. В рассматриваемом случае КИП возрастает до L = 110 мм, дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к тому, что частица из-за длительного нахождения в струе переплавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИП уменьшается [5].

На оптимальных режимах для NiCr (расход плазмообразующего газа азота 50 л/мин; ток 550 А; дистанция напыления 110 мм; фракция порошка 40–63 мкм; расход порошка 4,5 кг/ч) получены покрытия с КИП = 85 %.

Сравнительный анализ зависимости КИП NiCr и NiAl от дистанции напыления приведен на рис. 3. Этот анализ показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения КИП больше при оптимальных режимах для порошка NiCr, что можно объяснить более высокой пластичностью последнего и соответственно меньшим отскоком соударяющихся с подложкой частиц [2].



Рис. 3. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления для порошков NiAl (1) и NiCr (2) с фракцией 40–63 мкм и расходом порошка 4,5 кг/ч (для NiAl: $R_{N2} = 45$ л/мин, I = 500 A; для NiCr: $R_{N2} = 50$ л/мин, I = 550 A

Fig. 3. Dependence of powder use factor on spraying distance for NiAl (1) and NiCr (2) powder having fraction 40–63 μ m and powder consumption 4.5 kg/h (for NiAl: $R_{N2} = 45$ l/min, I = 500 A; for NiCr: $R_{N2} = 50$ l/min, I = 550 A)

Оптимизация процесса нанесения твердого слоя на основе диоксида циркония

В процессе плазменного напыления действует большое число факторов, оказывающих влияние на свойства получаемых покрытий. Важнейшими из них при прочих равных условиях являются: расход плазмообразующего и транспортирующего газов, расход распыляемого порошка, ток электрической дуги (подводимая мощность), дистанция напыления, скорость перемещения подложки [12]. В качестве примера на рис. 4-8 представлен характер зависимостей эффективности плазменного напыления твердого комбинированного слоя на основе диоксида циркония на подслой из никель-хрома, характеризовать которые можно с помощью коэффициента использования распыляемого материала (порошка) КИП от перечисленных условий напыления. Зависимость КИП от дистанции напыления показана на рис. 4. При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой ниже *t*_{пл}.



Рис. 4. Зависимость коэффициента использования порошка от дистанции напыления для порошков ZrO_2 с фракцией, мкм: 1 – менее 50; 2 – 50–63 (I = 500 A; $R_{N2} = 50$ л/мин; $R_{nop} = 4,5$ кг/ч)

Fig. 4. Dependence of powder use factor on spraying distance for ZrO_2 powder having fraction, μ m: 1 - less than 50; 2 - 50-63 (*I* = 500 A; R_{N2} = 50 l/min; R_{riop} = 4.5 kg/h)

В рассматриваемом случае КИП возрастает до L = 100 мм для порошков ZrO_2 с фракцией менее 50 мкм и до L = 110 мм с фракцией 50–63 мкм. Дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к тому, что частица из-за длительного нахождения в струе пере-

| Наука | | | | | |
|----------------------|--------|--------|----|--------|----|
| итехника. Т. | 17 | , Nº | 1 | (201 | 8) |
| Science and Techniqu | .le. V | /. 17, | No | 1 (201 | 8) |

плавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИП уменьшается [5]. Увеличение тока и расхода плазмообразующего газа (рис. 5, 6) до определенных значений приводит к росту КИП, так как эти параметры влияют на степень проплавления порошка [1–4]. Дальнейший их рост приводит к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно, КИП уменьшается. При увеличении расхода N₂ происходит уменьшение значений тока для максимального КИП. Для $R_{N2} = 55$ л/мин максимальный КИП = 56 % соответствует I = 600 A, для $R_{N2} =$ = 50 л/мин максимальный КИП = 54 % соответствует I = 650 A.



Рис. 5. Зависимость коэффициента использования порошка от расхода плазмообразующего газа N₂ для порошков ZrO₂ с фракцией, мкм: 1 – менее 50; 2 - 50-63 (L = 100 мм; I = 500 А; $R_{nop} = 4.5$ кг/ч)

Fig. 5. Dependence of powder use factor on consumption of plasma gas N₂
for ZrO₂ having fraction, μm: 1 – not less than 50; 2 – 50–63 (L = 100 mm; I = 500 A; R_{nop} = 4.5 kg/h)



Рис. 6. Зависимость коэффициента использования порошка от силы тока электрической дуги для порошков ZrO_2 с R_{N2} , л/мин: 1 – 55; 2 – 50 (L = 100 мм; $R_{nop} = 4,5$ кг/ч; фракция менее 50 мкм)

Fig. 6. Dependence of powder use factor on electric arc current strength for ZrO₂ powder with R_{N2} , l/min: 1 – 55; 2 – 50

 $(L = 100 \text{ mm}; R_{\text{nop}} = 4.5 \text{ kg/h}; \text{ fraction - not less than 50 } \mu\text{m})$

| Наука | | | | |
|-----------------------|---|-----|--------------|-------|
| итехника. Т. 17, № | 1 | (20 |)18) |) |
| Science and Technique | V | 17. | No 1 | (2018 |

Влияние расхода подачи порошка на КИП показано на рис. 7. Так как в формировании покрытия принимают участие все частицы в плазменной струе, наилучшими свойствами будут обладать покрытия, отвечающие плазменным режимам, где доля расплавленных частиц в струе и их концентрация максимальны.



Рис. 7. Зависимость коэффициента использования порошка от расхода порошка для порошков ZrO_2 с фракцией, мкм: 1 – менее 50; 2 – 50–63 (L = 100 мм; I = 600 А; $R_{N2} = 55$ л/мин)

Fig. 7. Dependence of powder use factor on powder consumption for ZrO_2 powder having fraction, µm: 1 – less than 50; 2 – 50–63 (L = 100 mm; I = 600 A; $R_{N2} = 55$ l/min)

Для определенных выше оптимальных режимов максимальный КИП соответствует расходу порошка 4 кг/ч, при дальнейшем увеличении расхода КИП уменьшается, поскольку тепловой энергии плазменной струи не хватает для расплавления всех подаваемых в струю частиц. С увеличением степени охлаждения при одинаковых скоростях подачи порошка КИП уменьшается [1-5]. В результате проведенной оптимизации отработаны режимы напыления APS (плазменное напыление на воздухе) процесса для материалов ZrO₂. Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала. На оптимальных режимах для ZrO₂ (расход плазмообразующего газа азота 55 л/мин; ток 600 А; дистанция напыления 100 мм; фракция порошка менее 50 мкм; расход порошка 4,0 кг/ч) получены покрытия с КИП = 58 %.

Исследование микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий

Результаты исследования микроструктуры поперечных сечений сформированных покры-

тий, проведенные с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ), представлены на рис. 8. Из приведенных данных видно, что толщина покрытия ZrO₂ составляет примерно 800 мкм.



Рис. 8. Изображение с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ-изображение) поперечного сечения покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками

Fig. 8. Image of coating cross section prior to action of compression plasma flows while using scanning electronic microscopy (SEM-image)

Между покрытием на основе диоксида циркония ZrO₂ на РЭМ-изображении обнаружено наличие промежуточного подслоя, толщина и элементный состав которого были исследованы с помощью рентгеноспектрального микроанализа. Результаты, представленные на рис. 9, указывают на то, что толщина подслоя составляет около 450 мкм.



Рис. 9. РЭМ-изображение и распределение характеристического рентгеновского излучения элементов вдоль выделенной линии на поперечном шлифе покрытия

Fig. 9. SEM-image and distribution of characterictic element X-ray radiation along marked line on coating cross section Элементный анализ позволил установить, что подслой состоит из никеля и хрома. РЭМ-изображения микроструктуры поперечных сечений покрытия ZrO₂ и промежуточного слоя Ni–Cr показаны на рис. 10. Из представленных данных видно, что в исходном состоянии покрытие характеризуется пористостью, причем средний размер пор составляет несколько микрометров и в некоторых областях достигает 20 мкм. Микроструктура слоя Ni–Cr характеризуется меньшей пористостью.



Рис. 10. РЭМ-изображение микроструктуры покрытия диоксида циркония (а) и промежуточного слоя Ni–Cr (b) на поперечном шлифе

Fig. 10. Microstructure SEM –image of zirconium dioxide coating (a) and Ni–Cr intermediate layer (b) on cross section

РЭМ-изображение поверхностного слоя покрытий, полученное на поперечном шлифе до воздействия компрессионных плазменных потоков, представлено на рис. 11. Видно, что в исходном состоянии приповерхностный слой характеризуется наличием большого количества микротрещин, распространяющихся как вдоль поверхности, так и в глубину.



Рис. 11. РЭМ-изображение поверхностного слоя покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками (поперечный шлиф)

Fig. 11. SEM-image of coating surface layer prior to action of compression plasma flows (cross section)



После воздействия на покрытие компрессионных плазменных потоков происходит сглаживание поверхности, о чем свидетельствует РЭМ-изображение поперечного шлифа, представленное на рис. 12.



Рис. 12. РЭМ-изображение поперечного шлифа покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками при различных увеличениях: а – 20 мкм; b – 2 мкм

Fig. 12. SEM –image of coating cross section after action of compression plasma flows at various increasing process parameters: $a - 20 \ \mu m$; $b - 2 \ \mu m$

Анализ полученных РЭМ-изображений показал, что в приповерхностном модифицированном слое покрытий существенно уменьшается количество микротрещин и пор. Происходит это из-за плавления приповерхностного слоя и его кристаллизации из расплава. Тем не менее некоторое количество микротрещин присутствует вследствие скоростного охлаждения закристаллизовавшегося слоя. Однако данные микротрещины распространяются преимущественно в глубину покрытия, что может препятствовать отслоению частей покрытий в процессе механического воздействия.

По наличию трещин, распространяющихся в глубь образца, можно определить толщину расплавленного слоя, которая составляет 12–15 мкм.

выводы

1. Проведена оптимизация плазменного напыления двухслойных композиционных покрытий на основе никель-хрома и диоксида циркония на элементах защитных экранов на основании получения максимального коэффициента использования порошка. Исследовано влияние параметров плазменной струи (тока, дистанции напыления, расхода плазмообразующего газа азота) и фракционного состава исходного порошка на характеристики покрытий. Сравнительный анализ зависимости коэффициента использования порошка вязких металлических слоев никель-хрома и никель-алюминия от дистанции напыления показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения коэффициента использования порошка больше при оптимальных режимах для порошка никель-хрома. Это можно объяснить более высокой пластичностью последнего и соответственно меньшим отскоком соударяющихся с подложкой частиц.

2. Результаты исследований микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, проведенных с использованием растровой электронной микроскопии, показали, что напыленная структура представляет собой покрытие на основе диоксида циркония ZrO₂ толщиной покрытия примерно 800 мкм. Между покрытием и подложкой из алюминиевого сплава присутствует переходный вязкий слой из переходных металлов Ni-Cr, толщина которого составляет 450 мкм. Воздействие на покрытие компрессионных плазменных потоков приводит к формированию переплавленного слоя оксида толщиной около 12-15 мкм, способствует сглаживанию рельефа поверхности и образованию на поверхности трещин, распространяющихся преимущественно в глубину покрытия. Обработка оксидных покрытий компрессионной плазмой приводит также к уменьшению их пористости.

ЛИТЕРАТУРА

- Оптимизация процесса напыления керамических плазменных покрытий на модели элементов экранов противометеорной защиты / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Машиностроение и техносфера XXI в.: сб. трудов XXI Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 15–20 сент. 2014 г. Донецк: МСМ, 2014. С. 206–208.
- 2. Девойно, О. Г. Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью / О. Г. Девойно, В. В. Оковитый // Наука и техника. 2015. № 1. С. 35–39.
- Разработка технологии нанесения плазменных композиционных покрытий на основе диоксида циркония

для систем космических аппаратов / Ф. И. Пантелеен-ко [и др.] // Наука и техника. 2015. № 3. С. 5–9.

- Оковитый, В. В. Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий аппаратов / В. В. Оковитый // Наука и техника. 2015. № 5. С. 26–32.
- Девойно, О. Г. Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий на основе диоксида циркония / О. Г. Девойно, В. В. Оковитый // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015): сб. тр. VII Междунар. науч.практ. конф., Кемерово, 23–25 сент. 2015 г. Кемерово: КузГТУ, 2015. С. 332–335.
- Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. М.: Наука, 1990. 244 с.
- Анциферов, В. Н. Газотермические покрытия / В. Н. Анциферов [и др.]. Екатеринбург: Наука, 1994. 324 с.
- Куприянов, И. Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И. Л. Куприянов. Минск: Навука і тэхніка, 1990. 254 с.
- 9. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. М., 1985. 261 с.
- Теплозащитные покрытия на основе ZrO₂ / А. Ф. Ильющенко [и др.]. Минск: Ремика, 1998. 128 с.
- Акишин, А. И. Космическое материаловедение / А. И. Акишин. М.: НИИЯФ МГУ, 2007. С. 209.
- Формирование и исследование многослойных композиционных плазменных оксидных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты / В. А. Оковитый [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 5. С. 357–364. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364.

Поступила 06.03.2017 Подписана в печать 29.05.2017 Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. A. (2014) Optimization of Deposition Process for Ceramic Plasma Coatings on Models of Meteroid Protection Screen Elements. *Mashinostroenie i Tekhnosfera XXI Veka. Sbornik Trudov XXI Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii, Sevastopol' 15–20 Sentyabrya 2014 g.* [Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI Century. Collection of works International Scientific and Technical Conference, Sevastopol, September 15–20]. Donetsk, MCM Publ., 206–208 (in Russian).
- Devoyno O. G., Okovity V. V. (2015) Plasma Thermal Barrier Coatings Based on Zirconium Dioxide with High Thermal Stability. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (1), 35–39 (in Russian).

- Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Okovity V. V., Sobolewski S. B. (2015) Development of Technology for Application of Plasma Composite Coatings Based on Zirconium Dioxide for Spacecraft Systems. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (3), 5–9 (in Russian).
- Okovity V. V. (2015) Selection of Oxides for Stabilization of Zirconium Dioxide while Obtaining Thermal Barrier Coatings. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (5), 26–32 (in Russian).
- Devoyno O. G., Okovity V. V. (2015) High-Energy Treatment of Plasma Coatings Based on Zirconium Dioxide. *Innovatsii v Mashinostroenii (InMash-2015): VII Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., 23–25 sent. 2015 g., Kemerovo: sb. tr.* [Innovations in Mechanical Engineering (InMash-2015): Proceedings of Scientific and Technical Conference, 23–25 sept. 2015 g., Kemerovo]. Kemerovo, Kuzbass State Technical University, 332–335 (in Russian).
- Kudinov V. V., Pekshev P. Yu., Belashchenko V. E., Kovalenko L. V. (1990) *Plasma Coating Deposition*. Moscow, Nauka Publ. 244 (in Russian).
- Antsiferov V. N., Shmakov A. M., Ageev S. S., Bulanov V. Ya. (1994) *Gas-Thermal Coatings*. Ekaterinburg, Nauka Publ. 324 (in Russian).
- Kupriyanov I. L. (1990) Gas-Thermal Coatings with High Adhesion Strength / I. L. Kupriyanov. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ. 254 (in Russian).
- 9. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnukhin A. S., Nikitin M. D. (1985) *Gas-Thermal Spraying of Composite Powders*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 261 (in Russian).
- Il'yushchenko A. F., Ivashko V. S., Okovity V. A., Sobolevski S. B. (1998) *Thermal-Protective Coating Based* on ZrO₂. Minsk, Publishing House "Remika". 128 (in Russian).
- Akishin A. I. (2007) Space Material Science. Moscow, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics – Lomonosov Moscow State University. 209 (in Russian).
- Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., Sobolevski S. B. (2016) Formation and Research of Multi-Layer Composite Plasma Oxide Coatings Based on Elements of Screen Meteroid Ptotection. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 15 (5), 357–364 (in Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-357-364.

Received: 06.03.2017 Accepted: 29.05.2017 Published online: 29.01.2018 DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-29-41

УДК 631.171:634.0.384.2

Деформационный механизм уплотнения структурного тела

Кандидаты техн. наук О. Н. Протасеня¹⁾, Л. В. Ларченков¹⁾, инж. М. Л. Протасеня¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018 Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Для подготовки почвы к посеву сельскохозяйственных культур необходим ряд инженерных конструкций, обеспечивающих качественную ее обработку и защиту от эрозии. Современная техника не вполне соответствует всему комплексу предъявляемых к ней требований. Применение почвообрабатывающей техники для основной обработки почвы направлено на подавление (уничтожение) природной растительности, которая является сильнейшим конкурентом культурным растениям. С другой стороны, растительность на поверхности земли играет роль надежной защиты почвы от эрозии. Уничтожение природной растительности на протяжении всего периода ухода за посевами приводит к тому, что оставшиеся культурные растения не способны защитить почву от эрозии агрессивными природными факторами: дождями ливневого характера и сильными ветрами. Как следствие - в географической (ландшафтной) оболочке происходят процессы разрушения структуры и потеря целых пластов почвы и ее плодородия. Таким образом, техника для основной и дополнительной обработки почвы оказывает двойственное влияние: с одной стороны, производится уничтожение сорняков, с другой – происходит разрушение (эрозия) структуры почвы, профилей ее географической оболочки. За последние 50 лет существенно расширилась область анализа физических процессов, протекающих в почве, получили распространение физические методы исследования ее свойств, увеличилось применение технической аппаратуры в оценке физико-механических характеристик. Однако нет обобщающего исследования по физике почвы, в котором были бы изложены термодинамика, электрофизика и ядерная физика почв. Вместе с тем комплексный подход к изучению такого сложного объекта позволяет понять важнейшую природу ряда процессов, протекающих в почве, и разработать практические мероприятия для повышения ее плодородия и уменьшения эрозии. В статье рассмотрены вопросы деформационного механизма при формировании структуры почвы и уплотнении под воздействием внешних нагрузок: магнитных, электрических, физико-химических, гравитационных и тепловых полей, а также рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

Ключевые слова: земля, почва, деформирование, дисперсионные среды, контактное взаимодействие, деформационный механизм, уплотнение, механический состав почвы

Для цитирования: Протасеня, О. Н. Деформационный механизм уплотнения структурного тела / О. Н. Протасеня, Л. В. Ларченков, М. Л. Протасеня // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 1. С. 29–41. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-29-41

Deformation Mechanism of Structural Body Compression

O. N. Protasenya¹⁾, L. V. Larchenkov¹⁾, M. L. Protasenya¹⁾

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

Abstract. In order to prepare soil for sowing of agricultural crops it is necessary to have a number of engineering structures that ensure its qualitative treatment and protection from erosion. Modern equipment do not fully meet the whole complex of specified requirements. Application of tillage machinery being used for main soil cultivation is directed on suppression (destruction) of natural vegetation which is considered as the strongest competitor to cultivated plants. From the other side, vegetation on the Earth's surface plays an important role for reliable protection of soil from erosion. Destruction of vegetation throughout the whole period of crop tending leads to the fact that the remaining cultivated plants are not able to protect soil from erosion by such natural aggressive factors as rain storms and strong winds. As a consequence, processes of soil structure destruction and losses of entire soil strata and its fertility occur in the geographical (landscape) envelope. Thus, equipment for primary and secondary soil tillage exerts double impact: from one side, killing of weeds takes place, and on the other

Адрес для переписки

Протасеня Марина Леонидовна Белорусский национальный технический университет просп. Независимости, 65/2, 220013, г. Минск, Республика Беларусь Тел.: +375 17 292-65-52 ерр@bntu.by

Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17. № 1 (2018) Address for correspondence Protasenya Marina L. Belarusian National Technical University 65/2 Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus Tel.: +375 17 292-65-52 epp@bntu.by

Машиностроение

hand, there is destruction (erosion) of soil structure and profiles of its geographical envelope. The soil, in the understanding of the earth, is the perfect place that gives life to plants and organisms, has a fertility. For the last 50 years analytical scope of physical processes occurring in the soil has been extended, physical methods for investigation of soil properties and application of technical equipment for assessment of physical-mechanical soil characteristics have got widespread use. However, there is no summative investigation on soil physics which includes and reveals thermodynamics, electrophysics and nuclear physics of soils. At the same time an integrated approach for studying such complicated object makes it possible to understand important nature of some processes occurring in the soil and to develop practical measures for fertility improvement and erosion reduction. The paper considers problems pertaining to deformation mechanism while forming soil structure and its compression under influence of external loadings: magnetic, electric, physico-chemical, gravitational and thermal fields and working organs of tillage tools.

Keywords: earth, soil, deformation, dispersion media, contact interaction, deformation mechanism, compression, mechanical composition of soil

For citation: Protasenya O. N., Larchenkov L. V., Protasenya M. L. (2018) Deformation Mechanism of Structural Body Compression. *Science and Technique*. 17 (1), 29–41. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-29-41 (in Russian)

Введение

Главная задача обработки земли - уничтожение естественной растительности как опасного для культурных растений сорняка. Самый распространенный механизм обработки - отрезать пласт от массива земли по заданным размерам поперечного сечения и во время движения орудия перевернуть его на 180° растительностью вниз. В результате такой обработки пропадает защитная роль естественной растительности от разрушительных стихийных сил природы (дождя и ветра). Поэтому обработка почвы имеет двойственный результат: с одной стороны, уничтожение естественной растительности, с другой - разрушение, что способствует явлению эрозии и вмешательству в географическую (ландшафтную) оболочку планеты Земля [1, 2].

Биологическая составляющая земли – гумус – образован при участии живых организмов в геохимических процессах, преобразующих химический состав атмосферы, гидросферы и земной коры. Он придает ей черный цвет, плодородие и формирует прочную структуру [3–5]. С целью защиты гумуса от разрушения рассматриваются более совершенные способы обработки почвы.

Процесс обработки почвы, если принимать его как механизм разрушения, представляет сложный вид взаимодействия двух физических тел: полидисперсной (земля) и однородной (металл) систем. Такой способ взаимодействия земли и рабочих органов орудий является контактным, с временным (нестатическим) характером. В расчете надежности и экономичности нуждаются как рабочие органы, так и почвообрабатывающее орудие в целом, сложность расчета которых заключается в том, что деформационный механизм контактного взаимодействия тел не изучен. Для каждого физического тела данный механизм необходимо рассматривать отдельно, так как взаимодействующие тела, находящиеся в равновесии, сильно различаются физико-механическими и физико-химическими свойствами.

Практически все физические тела обладают таким свойством, как структура. Структурное тело (земля) представляет особую группу, которая выделяется из всех физических тел и отличается полидисперсностью, многокомпонентностью и разновидностью структурных элементов, зависящих от природных и климатических условий [7–11].

Весьма сложное строение почвы можно представить в виде матричной модели с взаимодействующими друг с другом природными образованиями (например, газ – жидкость или жидкость – растение, животные и микроорганизмы) (рис. 1) [12–15].

Дисперсная система – образование из двух или большего числа фаз (структурных элементов) с сильно развитой поверхностью раздела между ними. В ней одна из фаз (дисперсная) распределена в виде мелких элементов (кристаллов, пленок или пластинок, капель, пузырьков) в другой – сплошной – фазе (дисперсионной среде). По основной характеристике – размерам (дисперсности) элементов – дисперсные системы делятся на грубо- и тонкодисперсные (коллоиды). Размер первых составляет 10⁻⁴ см и более, вторых – от 10⁻⁴ до 10⁻⁷ см.

| Дисперсная система | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Дисперсионная | Дисперсная фаза | | | | | | | |
| среда | Газовая | Жидкая | Твердая | Биомасса | | | | |
| Газовая | Дисперсная система не образуется | Туман | Дым, пыль | Растения, животные, насекомые | | | | |
| Жидкая | Пены | Эмульсии, золи | Суспензии, коллоиды | Растения, бактерии | | | | |
| Твердая | Аэрогели | Жидкие включения в твердых телах | Твердые золи (рубиновое стекло) | Корни, мхи, сине- зеленые водоросли | | | | |
| Биомассовая | Растения, живот- ные, насекомые | Одноклеточные, растения, бактерии | Корни, мхи, сине- зеленые водоросли | Дисперсная система не образуется | | | | |

Рис. 1. Дисперсные системы по агрегатному состоянию фаз почвы

Fig. 1. Disperse systems for aggregate state of soil phases

По интенсивности молекулярного взаимодействия фаз бывают лиофильные и лиофобные дисперсные системы – характеристики способности веществ (или образуемых ими структурных элементов) к межмолекулярному взаимодействию с жидкостями. Интенсивное взаимодействие и сильное взаимное притяжение молекул элементов и контактирующей с ними жидкости характеризует лиофильность, а слабое – лиофобность.

В лиофильных системах молекулярное взаимодействие между фазами велико, а удельная свободная поверхностная энергия (поверхностное натяжение) на межфазной границе очень мала. Эти системы образуются в результате распада более крупных структурных агрегатов в коллоиды при температуре 15–20 °C при межфазном поверхностном натяжении 0,01–0,03 дин·см⁻¹.

В лиофобных коллоидах структурные элементы дисперсной фазы слабо взаимодействуют с окружающей средой. Межфазное натяжение в таких системах на порядок сильнее при той же температуре. Вследствие избытка свободной поверхностной энергии они термодинамически неустойчивы, всегда готовы к распаду. При распаде лиофобного коллоида происходит укрупнение (слипание, слияние) структурных элементов и образование структурных агрегатов. Этот процесс сопровождается уменьшением свободной энергии системы. Слипание структурных элементов осуществляется через тонкую прослойку жидкой дисперсионной среды вследствие действия слабых молекулярных сил притяжения. Элементы лиофобной коллоидной группы всегда находятся в броуновском движении и при появлении внешней нагрузки (энергии) происходит их слипание или слияние, что приводит к увели-

| Наука | | | | |
|-----------------------|---|----|------|-------|
| итехника. Т. 17, № | 1 | (2 | 018) |) |
| Science and Technique | V | 17 | No 1 | (201) |

чению энергии сопротивления внешней нагрузке. Слияние происходит на основе химических реакций и является более прочным, чем при слипании структурных агрегатов. Фактор увеличения сопротивляемости структурных тел внешней нагрузке – их дисперсность [16–20].

Фрагмент полидисперсной среды (почвы) можно представить в отличие от рис. 1 в другом виде – как на рис. 2. На рисунке свободная зона между твердыми элементами относительно велика, поэтому жидкая фаза тоже велика и представлена в виде трех составляющих: прочно связной, связной и свободной воды. Твердая фаза – азотный, фосфорный и калийный минералы – представлена минеральными удобрениями NPK.



Рис. 2. Схема взаимодействия структурных элементов почвы: I, II, III – прочно связная, связная и свободная вода; 1 – анион; 2 – катион; 3 – молекула; 4 – корневая система растений

Fig. 2. Scheme for interaction of structural soil elements:
I, II, III – strong binding, binding and free water;
1 – anion; 2 – cation; 3 – molecule;
4 – plant root system

Газовая и биологическая фазы входят в состав каждого из трех структурных агрегатов в виде кислорода, азота атмосферного воздуха и организмов, микроорганизмов, бактерий, одноклеточных [20, 21].

Минералогический и механический составы почв

Твердая составляющая почвы — это минеральные, органические и органоминеральные структурные элементы. Химический и минералогический составы почв определяются характером материнской породы, на основе которой происходило ее формирование.

Минеральные частицы состоят из окисей (кремния, железа, алюминия), соединений кальция, магния, титана, марганца, калия, натрия, фосфора, серы и микроэлементов (бора, цинка, кобальта, меди и др.), являющихся малой частью общего минералогического состава почв. Органические коллоиды состоят из гуминовой и фолиевой кислот, протеина, клетчатки, смол и других сложных соединений. Основными соединениями являются углерод, водород, кислород, азот, сера, фосфор. Органические коллоиды бывают в соединении с натрием, кальцием, магнием (гуматы оснований), с гидроокислами алюминия, железа и др.

Энергия взаимодействия органических и минеральных коллоидов может быть больше, чем энергия взаимодействия между однородными минеральными коллоидами, что связано с процессом структурообразования. У разнородных энергия взаимодействия очень высокая, если потенциал определяющие ионы у структурных элементов имеют разные знаки (гидроокиси железа и кремниевой кислоты).

Минералы, образующие почвенные структурные агрегаты, разделяются по происхождению на первичные и вторичные. Первичные образовались при остывании магмы, а вторичные – из первичных под воздействием физических, химических и биологических процессов выветривания земной коры. Наиболее распространенные первичные минералы – полевые шпаты, пироксен и амфибол, слюды, кварц. Вторичные – три группы: каолиниты, монтмориллониты и филлиты (гидрослюды).

Важнейшие характеристики почв – механический состав и структура. Механический состав характеризует почвы в отношении размеров первичных элементов, прочность которых определяется молекулярным строением горных пород, осколками которых первичные элементы являются. Удельная поверхность дисперсной системы зависит от крупности элементов и определяет ее величину и главнейшие свойства, поэтому механический состав является основным классификационным признаком почв [20, 23].

В почвоведении структура почвы определяется количественно только в отношении содержания структурных агрегатов размерами 0,25–7,00 мм к остальной части почвы [19, 24, 25].

Лиофобные коллоиды значительно влияют на упрочнение структуры почв. Чем лучше агрегатный состав почвы (выше структурность), тем дольше сохраняется ее хорошее сложение, тем меньше оно подвергается влиянию неблагоприятных погодных условий. Роль такой структуры почвы не только в создании хорошего водно-воздушного и теплового режимов в ней, но и в предохранении ее от водной и ветровой эрозии.

В связи со столь большой ролью структуры почвы в земледелии при испытании или исследовании техники необходимо проводить не только механический анализ почвы, но и анализ ее агрегатного состояния [1].

Нагляднее всего агрегатный состав почвы можно отобразить графиком зависимости гранулометрического состава, приведенного на рис. 3 [20].

Для построения функциональной зависимости дисперсности от размера элементов лучше всего использовать полулогарифмическую сетку координат. По оси абсцисс откладываем логарифмы размера фракций (d, мм), а по оси ординат – сумму всех фракций (n, %), менее данного размера.

Выделение фракций диаметром более 0,25 мм осуществляют с помощью сит. Для оценки содержания фракций диаметром менее 0,25 мм применяют метод Стокса (скорость падения фракций в жидкости)

$$=\frac{2r^2g(\rho_h-\rho_s)}{9\eta}$$

v

где v – установившаяся скорость частицы, м/с (частица движется вниз, если $\rho_h > \rho_s$, и вверх

| Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) |
|---|
| Science and Technique. V. 17, No 1 (2018) |

в случае $\rho_h < \rho_s$); *r* – радиус частицы, м; *g* – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_h – плотность частиц, кг/м³; ρ_s – плотность среды, кг/м³; η – динамическая вязкость среды, Па·с.





Fig. 3. Dependence of dispersity on fraction size: 1 - fine sand; 2 - silt loam

Форма почвенных структурных элементов отличается от сферической, поэтому распределение фракций по размерам имеет условный характер.

Равновесное распределение структурных элементов, погруженных в среду с плотностью, меньше плотности самих элементов, определяется зависимостью

$$\left(\frac{kT}{C} - \frac{V_b}{V_c}kT\right)\frac{dC}{dz} - \frac{dU_c}{dz}\frac{V_b}{V_c} - \frac{U_b}{dz} = 0,$$

,

где kT – температурный коэффициент; C – коэффициент, $C = n_b/n_c$; n_b , n_c – структурные элементы фазы и среды; V_b , V_c – объем, приходящийся на один структурный элемент вещества и на одну молекулу среды; U_b , U_c – потенциальная энергия элементов фазы и среды в гравитационном поле.

Отношение V_c/V_b мало по сравнению с C, поэтому этой величиной можно пренебречь. Например, при объемной концентрации суспензии 10^{-2} моль/л и диаметре структурных элементов 10^{-5} см величина V_c/V_b на два порядка меньше C

$$\frac{kT}{C}\frac{dC}{dz} + \frac{dU_b}{dz} - \frac{dU_c}{dz}\frac{V_b}{V_c} = 0.$$

С учетом гравитационного поля энергия элементов фазы и среды от сил тяжести: $U_b = V_b \rho_b gz$, $U_c = V_c \rho_c gz$.

Следовательно:

$$\frac{dU_b}{dz} = V_b \rho_b g; \ \frac{dU_c}{dz} = V_c \rho_c g.$$

Тогда

$$\frac{kT}{C}\frac{dC}{dz}+V_bg(\rho_b-\rho_c)=0.$$

Откуда

$$\ln \frac{C_z}{C_o} = -\frac{V_b g(\rho_b - \rho_c)}{kT} z$$
или $\frac{C_z}{C_o} = e^{-az}$

где

$$a = \frac{V_b g(\rho_b - \rho_c)}{kT}.$$

Расчеты показывают, что броуновское движение следует учитывать при размере фракций менее 0,005 мкм.

Рабочий процесс обработки почвы основан на принципе работы клина, обеспечивающего деформирование за счет силы тяги *F* источника энергии. Работа этой силы, согласно уравнению В. П. Горячкина [25], используется на резание в вертикальной и горизонтальной плоскостях, на сжатие, изгиб и перемещение пласта почвы и его вращение (рис. 4).



Рис. 4. Схема работы клина (плуга) при обработке почвы: ABCD – проекция поперечного сечения пласта; $Bb_1b_2b_3b_4B_n$ – траектория движения точки B Fig. 4. Scheme of wedge operationCxeмa работы клина (plough) while cultivating soil: ABCD – projection of stratum cross section; $Bb_1b_2b_3b_4B_n$ – trajectory of point motion B Из условия устойчивости равновесного состояния сил структурных связей почвы в процессе работы клина можно записать выражение силы

$$F = fG + kab + \varepsilon abv^2,$$

где f – коэффициент трения; G – вес почвообрабатывающего орудия; k – коэффициент изменения параметров сечения; a, b – высота и ширина пласта почвы; ε – коэффициент относительной деформации почвы; v – скорость движения пласта.

Академик В. П. Горячкин предложил метод определения коэффициентов f, k, ε путем замены правой части выведенной им формулы другой математической зависимостью

$$ax + by + cz + l = 0,$$

где a = 1; x = fG; b = ab; y = k; $c = abv^2$; $z = \varepsilon$; l = -F.

Величина $\Sigma \delta^2 = \Sigma ax + by + cz + l = 0$ должна быть минимальной, то есть:

$$\frac{\partial \Sigma \delta^2}{\partial a} = x \Sigma a a^2 + y \Sigma a b + z \Sigma a c + \Sigma a l = 0;$$
$$\frac{\partial \Sigma \delta^2}{\partial b} = x \Sigma a b + y \Sigma b^2 + z \Sigma b c + \Sigma c l = 0;$$
$$\frac{\partial \Sigma \delta^2}{\partial c} = x \Sigma a c + y \Sigma b c + z \Sigma c^2 + \Sigma c l = 0.$$

Решение трех неизвестных коэффициентов x = fG, y = k, $z = \varepsilon$ при различных значениях a = 1, b = ab, $c = abv^2$, l = -F предложено Гауссом. Это решение весьма сложно при расчетах и не совсем точное. Дело в том, что физико-механические свойства почвы не могут быть постоянными, и рабочие органы (плуга) и почва испытывают сильно изменяющиеся во времени силы взаимодействия.

Следует учитывать, что полная, накопленная структурными агрегатами энергия от природных сил получает дополнительно часть кинетической энергии деформации рабочего органа почвообрабатывающего орудия. При этом необходимо сравнивать суммарную потенциальную энергию почвы с кинетической энергией орудия. Тогда вместо силы тяги следует применять кинетическую энергию плуга

$$N = \frac{Fv}{75} = \left(\frac{fG}{75} + \frac{k + \varepsilon v^2}{75}ab\right)v =$$
$$= \left[fG + \left(k + \varepsilon v^2\right)ab\right]\frac{v}{75},$$

где 75 – мощность, л. с. (сопротивление почвы)

Пористость, вес, влажность и удельная поверхность

Доли единичного объема почвы заняты твердыми структурными элементами, порами, водой с их удельными весами v_1 , ρ_1 ; v_2 , ρ_2 ; v_3 , ρ_3 , v_4 , ρ_4 (рис. 5). Биологическая составляющая присутствует в каждой из частей элементарного объема, которую отделить от них невозможно.

Пористость
$$n = \frac{v_1}{v_1 + v_2}$$
. Коэффициент пори-

стости $\varepsilon = \frac{v_2}{v_1}$.

Объемный вес абсолютно сухой почвы $\gamma_1 = v_1 \rho_1$.

Объемный вес влажной почвы $\gamma_3 = v_1 \rho_1 + v_3 \rho_3$.

Весовая влажность
$$W = \frac{v_3 \rho_3}{v_1 \rho_1}$$
.



Рис. 5. Составные части дисперсных фаз в элементарном объеме



Величины γ_3 , γ_1 , ρ_3 , ρ_1 обычно находятся из опытов при проведении исследований. Тогда определим v_1 , v_2 , v_3 :

$$v_1 = \frac{\gamma_1}{\rho_1}; \quad v_2 = 1 - \frac{\gamma_1}{\rho_1}; \quad v_3 = \frac{\gamma_3 - \gamma_1}{\rho_3}$$

Используя полученные зависимости, находим:

$$n = 1 - \frac{\gamma_1}{\rho_1}; \quad \varepsilon = \frac{\rho_1}{\gamma_1} - 1; \quad W = \frac{\gamma_3}{\gamma_1} - 1.$$

Некоторые соотношения, связывающие характеристики объема пор, объема твердых элементов, объемного веса влажной почвы, объемного веса сухой почвы, влажности, запишутся в виде:

$$v_2 = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}; \quad v_1 = \frac{1}{1+\varepsilon}; \quad n = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}$$

Объемный вес влажной почвы

$$\gamma_3 = \frac{\rho_1}{1+\varepsilon} (1+W).$$

Объемный вес сухой почвы

$$\gamma_1 = \frac{\rho_1}{1+\varepsilon}$$

Коэффициент насыщения пор водой *K*₃ – отношение объема пор к полному объему пор

$$K_3 = \frac{v_3}{v_2} = \frac{(\gamma_3 - \gamma_1)\rho_1}{(\rho_1 - \gamma_1)\rho_3}$$

Получим выражения для пористости и веса многоступенчатых систем, в которых агрегаты каждой ступени состоят из более мелких агрегатов предыдущей ступени. К первой ступени относятся первичные агрегаты, ко второй – микроагрегаты, к третьей – макроагрегаты. Обозначим долю в единичном объеме системы первичных пор (между первичными агрегатами) – V_1 , микропор (между микроагрегатами) – V_2 , макропор (между макроагрегатами) – V_3 .

Обозначим объемы агрегатов ступеней в единице объема системы T_1 , T_2 , T_3 , состоящей только из этих частиц.

Объемы пор: макро- $V_3 = 1 - T_3$; микро- $V_2 = (1 - T_2)T_3$; первичных $V_1 = (1 - T_1)T_2T_3$.

Первичные поры и микропоры: $V_1 + V_2 = (1 - T_1T_2)T_3$, сумма всех пор: $V_1 + V_2 + V_3 = 1 - T_1T_2T_3$.

Пористость почвы многоступенчатой структуры $n = (1 - T_1 T_2 \dots T_n) \cdot 100 \%$.

Объемный вес сухой почвы $\gamma_T = (T_1 T_2 \dots T_n) dT.$

Влажность почвы с многоступенчатой структурой $W = \frac{V_W}{T_1 T_2 \dots T_n} \frac{d_W}{d_T} \cdot 100\%.$

Если проанализировать приведенные данные по этому разделу и сделать предварительные расчеты, то получится, что структурные почвы, состоящие из макроагрегатов, при влажности почвы 33,3 % в трехступенчатой системе сохраняют еще 26,0 % пространства, свободного от твердых элементов и воды. Такая почва не нуждается в механической обработке, в случае если не нужно вести борьбу с сорной растительностью.

Важнейшей характеристикой любой дисперсной системы (почвы) является ее удельная поверхность, т. е. суммарная поверхность структурных элементов в единице объема пористого тела.

Удельная поверхность системы из однородных элементов определенного объема может быть выражена зависимостью

$$\Omega = \frac{b}{d},$$

где b – коэффициент формы элементов и характера взятого объема; d – какой-либо из характерных размеров структурных элементов.

В элементах, близких по форме к сферическим, b = 3-4, для ячеистой поверхности b = 3 + n, где n – отношение диаметра ячейки к ее глубине.

Для песков при диаметре структурного элемента 0,5 мм удельная поверхность $\Omega \approx 10^2$ см⁻¹. Для глин при размере ячеек 1 мкм и отношении $n \approx 7$ удельная поверхность $\Omega \approx 10^5$ см⁻¹, т. е. в тысячу раз больше, чем у песка. Для реальных глин удельная поверхность превышает в 10 и более раз вычисленные по формуле выше значений Ω и достигает более 100 м² на 1 см³ объема почвы. Из этого следует, что чем больше удельная поверхность структурных элементов, тем важнее роль поверхностных сил.

Механизм уплотнения структурных агрегатов почвы

Если в сплошных средах деформации сдвига определяются законами упругости, пластичности или вязкого течения, то в дисперсных телах к указанным деформациям добавляются деформации контактного взаимодействия. В процессе сдвиговых деформаций отдельные структурные элементы и их группы (агрегаты) могут совершать поступательное и вращательное движение. Прочность дисперсных систем и их механические характеристики определяются проявлением поверхностных сил, зависящих от величины удельной поверхности и плотности системы, от природы и формы элементов.

Деформация структурной почвы (рис. 6) может возникнуть от сдвиговых усилий видов:

 натяжение поверхности структурного элемента превосходит возникающие в нем напряжения при сдвигающих усилиях в системе;

 вращение относительно центра тяжести элемента;

 относительное смещение элементов без первых двух деформаций.



Рис. 6. Процесс сдвиговых деформаций структурных элементов
Fig. 6. Process of shearing deformations

in structural elements

Деформации первого вида присущи песчаным почвам и гравийным грунтам. В этих случаях происходит вращение структурного элемента относительно какого-либо контакта с соседними элементами, и условие его устойчивости определяется следующим образом:

$$F_i a - N_i b - \Sigma (C_c + C_k) e = 0,$$

где F_i – проекция равнодействующей внешних сил по отношению к элементу на направление, совпадающее с направлением сдвига системы; N_i – проекция равнодействующей внешних сил на направление, перпендикулярное к направлению сдвига; C_c – сила сцепления с соседними элементами при возникновении сдвигающих напряжений; C_k – кинетическое сопротивление водных прослоек в точках контакта; a, b, e – длина плеч приложения силы относительно точки контакта. Из приведенной зависимости общее сопротивление элемента сдвигу F_1 находится по формуле

$$F_1 = F_i = \left[N_i b + \Sigma (C_c + C_k)\right] e / a.$$

Если приложение нормальных N и сдвигающих F сил происходит одновременно и в период сдвига плотность системы в местах контактов не успевает измениться, то последнее выражение можно записать в виде

$$F_1 = f_1 N + C_1,$$

где f_1 – коэффициент трения, $f_1 = b/a$; C_1 – сцепление при сдвиге, $C_1 = \sum (C_c + C_k)e/a$.

В деформации второго вида, где возможно вращение структурного элемента, сопротивление сдвигу F_2 определяется зависимостью первого вида, но длина плеча берется относительно мгновенного центра вращения.

В третьем случае характер упаковки агрегатов и значение сил, препятствующих вращению, могут оказаться менее вероятными, чем относительный сдвиг групп элементов без вращения. Для такого случая статическое сопротивление сдвигу *F*₃, приходящееся на один контакт, определится из выражения

$$F_{3} = (q + q_{kr} + q_{p} + q_{c} + q_{\tau}) tg\phi + (q' + q'_{kr} + q'_{p} + q'_{c} + q'_{\tau}),$$

где q – внешняя нагрузка; q_{kr} – молекулярная прочность всех контактов на разрыв; q_p – молекулярная и ионно-электростатическая силы между элементами; q_c – капиллярная сила, действующая в контактах; q_{τ} – сила пластического прилипания; ϕ – угол внутреннего трения в почве.

Все силы q дают проекции сил q' на нормаль к направлению сдвига. Для кинетического сопротивления сдвигу учитывают вязкопластическое сопротивление водных прослоек при относительном смещении групп структурных элементов.

Возможен и четвертый случай, когда происходит срез в плоскости, проходящей через внутренний состав дисперсной системы, требующий меньшей затраты энергии, чем при деформации в рассмотренных трех видах [20].

> Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018)
В зависимости от прочности структурных элементов и интенсивности внешних воздействий деформации могут происходить с разрушением или без разрушения этих структур. Однако в целом любой объем структурного тела находится в устойчивом равновесном состоянии в соответствии с законом термодинамики.

Если имеются некоторые однородные системы, например газовая и жидкая, образующие собой туманы, то их состояние может быть определено заданием каких-либо двух термодинамических величин, например объема V и внутренней энергии U. Но не всем значениям величин V и U (с физической точки зрения) соответствуют возможные состояния. Известно, что во всяком однородном состоянии должны выполняться термодинамические неравенства $C_V > 0$, $(\partial C_V / \partial C_P)_T < 0$, где C_V – теплоемкость при постоянном объеме V; C_P – теплоемкость при постоянном давлении Р; Т – температура вещества. В реальности имеются такие значения величин V и U, при которых эти условия не выполняются. В этом случае среда перестает быть однородной и распадается на две соприкасающиеся однородные части, находящиеся в разных состояниях.

Состояния вещества, которые могут одновременно существовать в равновесии друг с другом (причем они соприкасаются между собой), называются различными фазами вещества. Примером такого равновесия может служить «точка росы» – дисперсионная среда, в которой можно видеть существование одновременно трех фаз дисперсной системы: твердое тело (лед), жидкость (вода), газ (атмосферный воздух).

Условием равновесного состояния трех фаз является равенство в окрестности этой точки температур $T_1 = T_2 = T_3$. Другое условие равновесия – равенство давлений во всех трех фазах $(P_1 = P_2 = P_3)$, поскольку на поверхности трех фаз силы, с которыми они действуют друг на друга, должны быть равны и противоположны. Третье – должно выполняться условие равенства химических потенциалов $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$.

Силовое контактное взаимодействие структурных тел

В настоящее время определение прочности почвенных агрегатов и почвы в целом проверяется путем экспериментального исследования с доведением или без доведения до разрушения. Для этого задаются запасом прочности *k*, откуда 1/k часть есть величина допустимой нагрузки. На рис. 4 показан прием деформирования, в котором этот процесс состоит из сжатия и изгиба (оба – в трех плоскостях: горизонтальной, вертикальной, профильной), кручения относительно центра тяжести поперечного сечения пласта на 180° , при этом пласт может разрушиться или остаться относительно не разрушенным. Соответственно пласт обладает определенной прочностью, которая оценивается его физико-механической прочностью.

Прочность почвы как физического структурного тела определяется опытным путем, поскольку теоретических расчетов прочности таких тел не имеется. Это понятие существует в стадии «опасное (предельное) состояние». Оно характеризуется наступлением текучести, сопровождающейся остаточными деформациями или появлением трещин, свидетельствующих о начале разрушения.

Принято, что тело (или элемент инженерной конструкции) находится в опасном состоянии, когда такое состояние появляется в любой его точке. Точку тела, в окрестности которой какая-нибудь дисперсионная среда или материал элемента конструкции первым оказывается в опасном состоянии, считают опасной точкой. Здесь следует отметить, что нагрузка должна пропорционально увеличиваться при одновременном возрастании всех других сил, действующих на пласт почвы (инженерную конструкцию), причем так, что соотношение между силами сохраняется неизменным с течением времени.

В общем случае при воздействии на пласт почвы определить опасную точку можно лишь после выбора критерия опасного состояния. Если причиной опасного состояния считать сжимающие напряжения, то опасной является та точка дисперсионной среды, в которой возникает самое большое сжимающее напряжение. Если причиной опасного состояния считать касательные напряжения, то опасной будет кочка, в которой возникает самое большое касательное напряжение.

На рис. 4 показано взаимодействие двух твердых физических тел (почвы и рабочего органа), которое является временным контактным, причем каждое тело обладает разными механическими характеристиками прочности. Первое тело (почва) – дисперсионная среда, включающая в себя все четыре дисперсные системы (рис. 1), второе (металл) – включает только одну дисперсную фазу (твердую).

Вопросы теории упругой прочности структурных тел (агрегатов) правильной геометрической формы подробно изложены в технической литературе. Основные теории – классические:

выдвинута Галилеем: фактором разрушения материала являются наибольшие нормальные напряжения растяжения или сжатия;

на основе закона Гука – выдвинута Мариоттом: прочность материала в исследуемой точке будет нарушена, если наибольшее относительное удлинение (уменьшение) в ней достигнет той же величины є₀, что и предел прочности всего образца при растяжении или сжатии;

– предложена Кулоном: предел прочного сопротивления в сложном напряженном состоянии будет достигнут тогда, когда наибольшее касательное напряжение достигнет величины ($\tau_0 = \sigma_0/2$) предела прочности образца на растяжение или сжатие;

– выведена Мором: сопротивление сдвигам в агрегате зависит не только от касательных, но и нормальных напряжений в данной точке тела; сопротивление разрушению от касательных напряжений выше в тех частях агрегата, где преобладают сжимающие нормальные напряжения, и ниже там, где преобладает растяжение (в теории прочности Мора учитывается, что касательным напряжениям сопротивляются слипание структурных элементов агрегата и трение, возникающее при появлении первых сдвигов – линий Чернова, как признаков разрушения);

– на основании теоремы Кастильяно и методики Бетти: опасное состояние материала наступает, когда удельная потенциальная энергия изменения формы достигает опасного значения (достоинством теории является то, что она учитывает все три главные напряжения и объясняет высокую прочность материала при всестороннем равномерном сжатии).

Силовое взаимодействие агрегатов происходит силами гравитационного и теплового полей, сопровождаемое упругими и пластическими деформациями. При этом контактирующие агрегаты могут иметь произвольную конфигурацию и размеры (рис. 7).

Силовое взаимодействие в точке F_4 контакта вызывает деформацию агрегатов, приводящую к сближению их центров тяжести, которая сопровождается деформацией сдвига и относительного перемещения, приводящего к уплотнению агрегатов и повышению свободной потенциальной энергии сопротивления U.



Рис. 7. Схема определения сил контактного взаимодействияFig. 7. Scheme for determination of contact interaction forces

Для определения U необходимо найти величину перемещения. Для этого можно воспользоваться теоремой Кастильяно, которая описывает взаимодействие в почвообразовательном процессе структурных агрегатов, испытывающих всестороннее сжатие. Согласно этой теореме, агрегат, зажатый силами гравитации между четырьмя аналогичными агрегатами, лишен возможности перемещения. Он может испытывать два различных состояния упругой системы. Допустим, что в первом состоянии к агрегату приложены силы F_1 и F_2 , а во втором – F_3 и F_4 .

Примем, что перемещения точек этих сил по направлениям их действия равны δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 в первом состоянии и δ'_1 , δ'_2 , δ'_3 , δ'_4 – во втором.

Теорема взаимности перемещений: работа, совершенная силами первого состояния, равна работе, совершенной силами второго состояния на соответствующих перемещениях первого состояния, выразится в виде уравнения

$$F_1\delta_1' + F_2\delta_2' = F_3\delta_3 + F_4\delta_4.$$
(1)

Для проверки этой зависимости рассмотрим энергию деформации агрегата, когда силы F_1 , F_2 , F_3 , F_4 действуют все вместе, и используем то, что количество потенциальной энергии Uдеформации структурного агрегата не зависит от порядка, в котором приложены силы, а зависит только от конечных значений сил.

Примем порядок приложения сил: в первом – F_1 и F_2 , во втором – F_3 и F_4 . Тогда потен-

| | Наук | а | | | | | |
|-----------|---------|------|-------|-------|-----|--------|----|
| ите | хника. | Τ. | 17, | N⁰ | 1 (| (201 | 8) |
| Science a | nd Tech | niqu | e. V. | 17, 1 | No | 1 (201 | 8) |

циальная энергия деформации, накопленная агрегатом при приложении сил F_1 и F_2 , запишется

$$F_1 \delta_1 / 2 + F_2 \delta_2 / 2.$$
 (2)

Приложив силы *F*₃ и *F*₄, определим работу, совершенную этими силами:

$$F_{3}\delta_{3}'/2 + F_{4}\delta_{4}'/2.$$
 (3)

При этом следует учитывать, что в случае приложения F_3 и F_4 точки приложения ранее действующих сил F_1 и F_2 переместятся на δ'_1 и δ'_2 . Тогда F_1 и F_2 совершат работу

$$F_1 \delta_1' + F_2 \delta_2'. \tag{4}$$

В (4) потенциальная энергия не учитывает 1/2 ее величины, так как силы F_1 и F_2 остаются постоянными все время, когда точки их приложения перемещаются на δ'_1 и δ'_2 .

Поэтому полная потенциальная энергия *U* деформации, накопленная структурным агрегатом, равна сумме (2), (3), (4)

$$U = F_1 \delta_1 / 2 + F_2 \delta_2 / 2 + F_3 \delta_3 / 2 + F_4 \delta_4 / 2 + F_1 \delta_1 + F_2 \delta_2.$$
(5)

При втором способе нагружения сначала приложим силы F_3 и F_4 , а затем F_1 и F_2 . После этого, рассуждая как ранее, получим

$$U = F_3 \dot{\delta}_3 / 2 + F_4 \dot{\delta}_4 / 2 + F_1 \delta_1 / 2 + F_2 \delta_2 / 2 + F_3 \delta_3 + F_4 \delta_4.$$
(6)

Приравняв (5) и (6), получим уравнение (1).

Теорема о взаимности перемещений применима для любого числа сил, а также для пар сил или для сил и пар сил. В случае приложения пары сил (момента) за перемещение принимается соответствующий угол поворота.

Когда действует только одна сила F_1 в первом состоянии напряжений и только одна сила F_2 во втором состоянии, уравнение (1) запишется как $F_1\delta'_1 = F_2\delta'_2$. Впервые это было доказано Максвеллом, и теорема названа его именем.

Если примем, что величины сил F_1 и F_2 численно равны между собой (но знак равенства ставить нельзя, так как эти силы являются обобщенными и могут быть разнородными (силы, моменты, их совокупности)), то (1) перейдет в более простое равенство

$$1 \cdot \delta_1' = 1 \cdot \delta_2'. \tag{7}$$

Эта теорема – о взаимности перемещений, которая совместно с теоремой Бетти о взаимности работ должна использоваться в расчетах прочности при контактном взаимодействии разнородных структурных физических деформируемых тел (полидисперсной почвы и монодисперсного рабочего органа).

Например, при действии одной нормальной силы N = 1 (при этом M = 0) перемещение можно выразить зависимостью $\delta(d\varphi) = \frac{1}{EAr} d\varphi$; при действии одного момента M = 1 (N = 0) – $\delta(ds) = \frac{1}{EAr} ds$, где $\delta(d\varphi)$, $\delta(ds)$ – величина элементарного изменения угла изгиба агрегата и длины агрегата; E – модуль упругости; A – площадь поперечного сечения; r – полярный радиус.

Отсюда следует, что $\delta(d\varphi) = \delta(ds) - и$ это частный случай теоремы о взаимности перемещений.

На основании приведенного исследования можно сделать вывод, что (7) можно представить в следующем виде:

$$1 \cdot \delta_{mn} = 1 \cdot \delta_{nm}$$
 или $1 \cdot \delta'_m = 1 \cdot \delta_n$. (8)

На рис. 4 показан процесс деформирования пласта, вырезаемого из массива почвы, как физического твердого тела в динамике (движении). В результате этого процесса пласт испытывает состояния деформирования: резание в двух плоскостях, сжатие в продольной оси пласта, изгиб в горизонтальном и вертикальном направлениях, кручение относительно продольной осевой линии. При этих видах деформаций пласт поворачивается на 180° и не разрушается, т. е. почва пласта обладает механическими свойствами прочности и пластичности. Отсюда теорема о взаимности перемещений в обозначениях (7) запишется для общего случая действия сил (N, Q) и момента (M):

$$1 \cdot \delta_{12} = 1 \cdot \delta_{21}; \quad 1 \cdot \delta_{13} = 1 \cdot \delta_{31}; \quad 1 \cdot \delta_{23} = 1 \cdot \delta_{32}.$$

Первое из этих равенств показывает, что вертикальный прогиб в точке *C* под действием пары сил $F_2 = 1$ равен углу поворота δ_{21} под действием вертикальной силы $F_1 = 1$ (рис. 8).





Fig. 8. Schematic legend diagram as exemplified by cantilever construction loaded by force $F_1 = 1$

Поясним эти обозначения на примере консоли, нагруженной силой $F_1 = 1$ на конце балки (рис. 8а). Обозначив прогиб конца консоли f_B , угол наклона касательной линии к упругой в этой точке φ_B , прогиб υ_C в точке C по принятой системе, получим два единичных состояния с указанными на них единичными силами: $f_B =$ $= \delta_{11}$; $\varphi_B = \delta_{31}$; $\upsilon_C = \delta_{21}$. Во втором состоянии под действием силы $F_2 = 1$ (рис. 8b) те же величины будут равны: $f_B = \delta_{12}$; $\varphi_B = \delta_{32}$; $\upsilon_C = \delta_{22}$.

По аналогии с этим введем обозначение для перемещения системы, находящейся под произвольной нагрузкой (назовем ее F), в которую входят какие угодно обобщенные силы. Вводим фиктивное состояние, в котором действует единичная сила $F'_k = 1$ в точке k. Через $\Delta_{k(F)}$ обозначим перемещение точки k системы, соответствующее силе $F'_k = 1$, вызванное силой F.

В общем случае будем иметь

$$1 \cdot \Delta_{k(F)} = \Sigma \int \left(\frac{MM'}{EI} + \frac{NN'}{EA} + \frac{QQ'}{GAa} \right) ds.$$
 (9)

В случае шарнирной фермы, образованной из прямых стержней:

$$1 \cdot \Delta_{k(F)} = \Sigma \frac{N_i N_i'}{E_i A_i} l_i.$$
(10)

В случае одного стержня

$$1 \cdot \Delta_{k(F)} = \int \left(\frac{MM'}{EI} + \frac{NN'}{EA} + \frac{QQ'}{GAa}\right) ds.$$
(11)

Формулы (9)–(11), полученные Мором, применяются и к таким структурам, как почва и грунты. Это общие формулы механики материалов и для определения упругих перемещений плоских стержневых систем. Если рассматривать пласт как твердое физическое тело, то он представляет консольный брус (балку). Поэтому к нему применимы схемы прочностных расчетов, которые существуют для расчета консольной балки.

выводы

1. Предложен метод исследования упругости (прочности, жесткости, устойчивости смятию) природных тел, представляющих собой полидисперсные системы, который может быть использован для расчета надежности и экономичности разрабатываемых инженерных конструкций, применяемых при обработке почвы.

2. Проведен анализ возникновения сил сопротивления внешним нагрузкам в полидисперсных природных деформируемых средах, в частности в почве. Предложены приемы обработки почвы, позволяющие выполнить рыхление (деформацию) и защиту географической (ландшафтной) оболочки Земли.

3. Анализ проведен на основании исследования производственных опытов на почвах Нечерноземной зоны СССР [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

- Механизация защиты почв от водной эрозии в Нечерноземной полосе / А. Т. Вагин [и др.]; под ред. А. Т. Вагина. Л.: Колос, 1977. 272 с.
- Severnev, M. M. Improvement of Machinery for Chemical Fertilizer Application with the Aim of Achieving a More Even Spread Over Agricultural Land / M. M. Severnev, L. V. Larchenkov. AGRI/MECH Report – Economic Commission for Europe (USA). 1984. 103.
- 3. Развитие наук о Земле в СССР. М.: Наука, 1967. 714 с.
- 4. Панников, В. Д. О развитии исследований по почвозащитному земледелию / В. Д. Панников // Вестник сельскохозяйственной науки. 1970. № 2. С. 29–39.
- Калесник, С. В. Общие географические закономерности Земли / С. В. Калесник. М.: Мысль, 1970. 284 с.
- Введение в физическую географию / К. К. Марков [и др.]. М.: Мысль, 1978. 192 с.
- Уиппл, Ф. Земля, Луна и планеты / Ф Уиппл; пер. с англ. 2-е изд. М.: Наука, 1967. 252 с.
- Докучаев, В. В. Учение о зонах природы и классификация почв / В. В. Докучаев. М.; Л.: Селхозгиз, 1951. Т. 6. 296 с.

| наука итехника. Т. 17, № | 2 1 | (2018) |
|------------------------------|------|----------|
| Science and Technique. V. 17 | , No | 1 (2018) |

- Расчетная модель процесса эрозионного разрушения композиционного материала / Ю. В. Полежаев [и др.] // ИФЖ. 1979. Т. 37, № 3. С. 395–404.
- Кулаковская, Т. Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений / Т. Н. Кулаковская. М.: Агропромиздат, 1990. 220 с.
- Нерпин, С. В. Физика почв / С. В. Нерпин, А. Ф. Чудновский. М.: Наука, 1967. 564 с.
- Механика грунтов / Б. И. Далматов [и др.]. М.; СПб.: АСВ, 2000. Ч. 1: Основы геотехники в строительстве. С. 42–68.
- Ухов, С. Б. Механика грунтов, основания и фундаменты / С. Б. Ухов. М.: Высш. шк., 2007. 566 с.
- Цитович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цитович. М.: Высш. шк., 1983. С. 26–66.
- Гедройц, К. К. Учение о поглотительной способности почв / К. К. Гедройц. М.: Сельхозгиз, 1933. 206 с.
- 16. Мишустин, Е. Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия / Е. Н. Мишустин. М.: Наука, 1972. 344 с.
- Тимирязев, К. А. Избр. соч. / К. А. Тимирязев. М.: Госиздат с.-х. лит., 1948. Т. 2: Земледелие и физиология растений. 424 с.
- Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика пористых и волокнистых дисперсных структур / П. А. Ребиндер, И. Н. Влодавец // Проблемы физико-механики волокнистых и пористых дисперсных структур и материалов: сб. статей. Рига, 1967. С. 5–40.
- Вернадский, В. И. Живое вещество и биосфера / В. И. Вернадский. М.: Наука, 1994. 672 с.
- Тюрин, И. В. Органическое вещество и его роль в почвообразовании и плодородии: учение о почвенном гумусе / И. В. Тюрин. М.; Л.: Сельхозгиз, 1937. 286 с.
- Качинский, Н. А. Физика почвы / Н. А. Качинский. М.: Высш. шк., 1965. 324 с.
- Жданович, Г. М. Механика порошковых материалов / Г. М. Жданович. Минск: Изд-во БНТУ, 2013. 420 с.
- Эрозия / под ред. К. Прис; пер. с англ. под ред. Ю. В. Полежаева. М.: Мир, 1982. 464 С.
- 24. Ландау, Л. Д. Статическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1976. 584 с.
- 25. Горячкин, В. П. Сборник сочинений / В. П. Горячкин, под ред. В. П. Горячкина. М.: Колос, 1968. Т. 2. 456 с.
- 26. Духов, С. С. Электрофорез / С. С. Духов, Б. В. Дерягин. М.: Наука, 1976. 332 с.

Поступила 21.04.2017 Подписана в печать 04.07.2017 Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

- Vagin A. T., Kostyukov P. P., Larchenkov L. V., Piletskii A. Z., Pugach I. A. (1977) *Mechanization of Soil Protection Against Water Erosion in Nonchernozem Belt*. Leningrad, Kolos Publ. 272 (in Russian).
- 2. Severnev M. M., Larchenkov L. V. (1984) Improvement of Machinery for Chemical Fertilizer Application with the Aim of Achieving a More Even Spread Over Agricultural Land. AGRI/MECH Report – Economic Commission for Europe (USA), (103).
- 3. Vinogradov A. (ed.) (1967) *Development of Earth Sciences in the USSR*. Moscow, Nauka Publ. 714 (in Russian).
- Pannikov V. D. (1970) On Development of Investigations on Conservation Farming. Vestnik Selskokhozyaistvennoy

| Наука | а | | | | | | |
|-------------|-----|-------|----|---|----|------|------|
| итехника. | Τ. | 17, | N⁰ | 1 | (2 | 018 |) |
| Science and | ۱T۵ | chnie | | V | 17 | No 1 | (201 |

Nauki [Bulletin of Agricultural Science], (2), 29–39 (in Russian).

- 5. Kalesnik S. V. (1970) *General Geographical Regularities* of Earth. Moscow, Mysl Publ. 284 (in Russian).
- Markov K. K., Suetova I. A., Dobrodeev O. P., Simonov Yu. G. (1978) *Introduction to Physical Geography*. Moscow, Mysl Publ. 192 (in Russian).
- 7. Whipple F. (1946) *Earth, Moon and Planets*. Philadelphia, The Blakiston Company. 293.
- Dokuchayev V. V. (1951) Doctrine on Nature Zones and Soil Classification. Vol. 6. Moscow; Leningrad, Publishing House "Selkhozgiz". 296 (in Russian).
- Polezhaev Yu. V., Romanchenkov V. P., Chirkov I. V., Shebeko V. N. (1979) A model for Calculating the Erosion of a Composite Material. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 37 (3), 395–404.
- Kulakovskaya T. N. (1990) Optimization of Agro-Chemical System of Soil Plant Nutrition. Moscow, Agropromizdat Publ. 220 (in Russian).
- Nerpin S. V., Chudnovsky A. F. (1967) Soil Physics. Moscow, Nauka Publ. 564 (in Russian).
- Dalmatov B. I., Bronin V. N., Karlov V. D., Mangushev R. A. (2000) Soil Mechanics. Vol. 1: Fundamentals of Geotechnics in Construction. Moscow; Saint-Petersburg, Publishing House "ASV", 42–68 (in Russian).
- Ukhov S. B. (2007) Mechanics of Soils, Foundation Engineering. Moscow, Vysshaya Shkola. 566 (in Russian).
- Tsitovich N. A. (1983) Soil Mechanics. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 26–66 (in Russian).
- Gedroyts K. K. (1933) Doctrine on Soil Absorption Capacity. Moscow, Selkhozgiz Publ. 206 (in Russian).
- Mishustin E. N. (1972) Micro-Organisms and Land Productivity. Moscow, Nauka Publ. 344 (in Russian).
- Timiryazev K. A. (1948). Selected works. Vol. 2. Agriculture and Physiology of Plants. Moscow, State Publishing House of Agricultural Literature. 424 (in Russian).
- Rebinder P. A., Vlodavets I. N. (1967) Physical and Chemical Mechanics of Porous and fibrous Dispersive Structures. *Problemy Fiziko-Mekhaniki Voloknistykh i Poristykh Dispersnykh Struktur, i Materialov: sb. st.* [Problems of Physical Mechanics in Fibrous and Porous Dispersive Structures and Materials: Selected Papers]. Riga, 5–40 (in Russian).
- 19. Vernadsky V. I. (1994) *Living Matter and Biosphere*. Moscow, Nauka Publ. 672 (in Russian).
- Tiourin I. V. (1937) Organic Substance and its Role in Soil Formation and Fertility. Doctrine on Soil Humus. Moscow; Leningrad, Selkhozgiz Publ. 286 (in Russian).
- Kachinsky N. A. (1965) Soil Physics. Moscow, Vysshaya Shkola. 324 (in Russian).
- Zhdanovich G. M. (2013) *Mechanics of Powder Materials*. Minsk, Belarusian National Technical University. 420 (in Russian).
- 23. Price K. (1982) Erosion. Moscow, Mir Publ. 464 (in Russian).
- Landau L. D. Lifshits E. M. (1976) Static Physics. Moscow, Nauka Publ. 584 (in Russian).
- 25. Goryachkin V. P. (1968) *Collected Works. Vol 2.* Moscow, Kolos Publ. 456 (in Russian).
- Dukhov S. S., Deryagin B. V. (1976) *Electrophoresis*. Moscow, Nauka Publ. 332 (in Russian).

Received: 21.04.2017 Accepted: 04.07.2017 Published online: 29.01.2018 DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-42-50

УДК 656.13

Исследование спроса на «перехватывающие» парковки

Докт. техн. наук, проф. А. О. Лобашов¹⁾, канд. техн. наук С. Б. Дульфан²⁾, канд. техн. наук, доц. А. В. Прасоленко¹⁾, кандидаты техн. наук К. В. Доля¹⁾, Д. Л. Бурко¹⁾

¹⁾Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова (Харьков, Украина),

²⁾Департамент инфраструктуры Харьковского городского совета (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2018 Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье приведены результаты исследований спроса на «перехватывающие» парковки в городе Харькове. Проанализированы выполненные ранее исследования по проблеме изучения спроса на них и определены недостатки существующих методов. Представлена методика исследований спроса на «перехватывающие» парковки в Харькове, которая основана на моделировании распределения транспортных корреспонденций по сети города и анкетном опросе водителей автомобилей. Полученные в результате исследований данные позволили сегментировать спрос на «перехватывающие» парковки в г. Харькове по различным признакам. Определено распределение транспортного спроса водителей пригородных зон в зависимости от регулярности поездок в город на личных автомобилях. Произведена оценка удовлетворенности водителей эффективностью их передвижений по городу. На основе моделирования распределения транспортных корреспонденций проведено сегментирование транспортного спроса в узлах возможного расположения «перехватывающих» парковок по признаку расстояния сообщения по городу. По данным анкетного опроса водителей автомобилей определена величина спроса на «перехватывающие» парковки в Харькове в зависимости от условий предоставлений услуг. Установлено, что условия предоставления услуг в парковании в значительной степени определяют спрос на «перехватывающие» парковки. Анализ результатов сегментирования спроса на «перехватывающие» парковки показал, что в современных условиях спрос на этот вид парковок в г. Харькове находится на достаточно низком уровне, а при расстоянии сообщения по городу до 5 км практически отсутствует. Определены параметры зависимости спроса на «перехватывающие» парковки от расстояния сообщения по городу. Полученные результаты исследований являются исходными данными для определения потребности в «перехватывающих» парковках.

Ключевые слова: «перехватывающие» парковки, транспортный спрос, дорожное движение, транспортный поток, транспортная сеть, корреспонденции

Для цитирования: Исследование спроса на «перехватывающие» парковки / А. О. Лобашов [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 42–50. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-42-50

Demand Research for "Park and Ride" Parking Lots

A. O. Lobashov¹, S. B. Dulfan², A. V. Prasolenko¹, K. V. Dolya¹, D. L. Burko¹

¹⁾O. M. Beketov National University of Urban Economy (Kharkiv, Ukraine), ²⁾Department of Infrastructure of Kharkiv City Council (Kharkiv, Ukraine)

Abstract. The paper presents results of demand research for "park and ride" parking lots in the city of Kharkiv. The analysis of the previous research pertaining to demand for "park and ride" parking lots has been carried out in the paper. Disadvantages of the existing methods have been identified as well. A methodology in research on demand for "park and ride" demand for "park and ride" parking lots in the city of Kharkiv according to various characteristics. Distribution of traffic

Адрес для переписки Лобашов Алексей Олегович Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова ул. Маршала Бажанова, 17, 61002, г. Харьков, Украина Тел.: +38 050 323-69-27 lobashov61@mail.ru Address for correspondence Lobashov Alexey O. O. M. Beketov National University of Urban Economy 17 Marshala Bazhanova str., 61002, Kharkiv, Ukraine Tel.: +38 050 323-69-27 lobashov61@mail.ru parking lots in the city of Kharkiv has been developed and it is based on modelling of transportation correspondence distribution on traffic networks and a questionnaire survey of car drivers. The obtained data have made it possible to segment the demand for drivers representing suburban areas according to frequency of visits to the city by private cars has been determined in the paper. Drivers' satisfaction with their efficient movement through the city has been assessed in the paper. Segmentation of traffic demand in the places of possible locations for "park and ride" parking lots has been made according to urban transportation distance and on the basis of modelling distribution of transport correspondences. Quantity demanded for "park and ride" parking lots in the Kharkiv city in dependence to conditions for services has been calculated according to a questionnaire survey of car drivers. It has been established that conditions for parking services significantly determine the demand for "park and ride" parking lots. Analysis of segmentation results concerning the demand for "park and ride" parking lots has shown that under current condions demand for this type of parkings in Kharkiv is at rather low level and they are practically absent in case of 5 km urban transportation distance. Parameters demonstrating dependence of demand for "park and ride" parking lots on transportation distance through the city have beendetermined in the paper. The obtained results of the research are considered as initial data to study demand for "park and ride" parking lots.

Keywords: "park and ride" parking lots, transport demand, traffic, traffic flow, transport network, correspondence For citation: Lobashov A. O., Dulfan S. B., Prasolenko A. V., Dolya K. V., Burko D. L. (2018) Demand Research for "Park and Ride" Parking Lots. *Science and Technique*. 17 (1), 42–50. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-42-50 (in Russian)

Введение

«Перехватывающие» парковки не уменьшают транспортный спрос. Они меняют его структуру. Главная цель внедрения такого мероприятия, как устройство «перехватывающих» парковок, заключается в сокращении спроса на перемещение по транспортной сети на индивидуальном транспорте, уменьшении загрузки движением транспортной сети города [1-3]. Это достигается путем устройства на входных магистралях города вблизи крупных пересадочных узлов парковок для водителей, которые живут за пределами города. Оставив свои автомобили на «перехватывающей» парковке, водители передвигаются по городу (обычно до центральной части) на транспортных средствах маршрутного пассажирского транспорта (МПТ) [1, 3, 4].

Такие парковки, с одной стороны, являются частью парковочной системы города. Их устройство позволяет уменьшить спрос на парковочные места в центральных районах городов. С другой стороны, они устраиваются с целью создания условий для повышения удельного веса МПТ в удовлетворении транспортного спроса [1, 3, 4].

Надо отметить, что отсутствует отечественный опыт организации и использования «перехватывающих» парковок [5, 6]. Это направление только начинает развиваться. Учитывая тот факт, что устройство «перехватывающих» парковок требует значительных капитальных затрат, задача определения спроса на такой вид парковки является актуальной. Параметры спроса – основа для определения рационального количества машино-мест на «перехватывающих» парковках. Решение этого вопроса требует соответствующих исследований.

Научно-практическим проблемам внедрения и функционирования «перехватывающих» парковок посвящено немало работ. В частности, по результатам натурных обследований в крупных транспортно-пересадочных узлах г. Милуоки (США) установлено, что 66-73 % пассажиров различных видов МПТ являются водителями и пассажирами автомобилей [1]. Среди них 38-39 % водителей и 28-34 % пассажиров автомобилей. Кроме того, было определено, что после введения в тех же транспортно-пересадочных узлах автобуса-экспресса до центрального делового района города удельный вес водителей и пассажиров автомобилей среди пользователей МПТ увеличился на 16-18 % [1, 7, 8]. Стоит отметить, что полученные данные дают лишь общее представление о спросе на «перехватывающие» парковки и не могут быть распространены на другие города (например, на г. Харьков).

В нескольких работах предложена методика определения целесообразности устройства и рациональной емкости «перехватывающих» парковок в городах [4, 9–12]. Разработанный метод предполагает определение емкости «перехватывающих» парковок как доли интенсивности транспортного потока (ТП), который проходит по входной магистрали города. Эта доля интенсивности ТП определяется с помощью суммарной вероятности использования «перехватывающей» парковки с учетом коэффициента комфортности [4, 9–12].

Суммарная вероятность использования «перехватывающей» парковки рассчитывается гра-

фоаналитическим методом «изохрон» на основе допущения о том, что время выполнения поездки водителем на личном автомобиле не превышает ее времени с использованием «перехватывающей» парковки и МПТ. Коэффициентом комфортности учитываются различные субъективные факторы, которые характеризуют удобство пользования парковкой и передвижения в пункты назначения [4, 9]. Особенностью этого подхода является то, что суммарная вероятность использования «перехватывающей» парковки рассматривается как функция средней скорости сообщения МПТ и скорости ТП. Авторами получены количественные параметры этих зависимостей.

Один из подходов к определению спроса на «перехватывающие» парковки заключается в проведении обследований на уже существующих парковках возле транспортно-пересадочных узлов [4, 9]. Предварительно определяется количество автомобилей, использующих транспортно-пересадочный узел как обычную парковку. К таким автомобилям относятся автомобили местных жителей, которые паркуются в транспортно-пересадочном узле, автомобили сотрудников и посетителей различных объектов. Количество автомобилей, использующих транспортно-пересадочный узел как «перехватывающую» парковку, определяется путем вычитания из их общего числа количества автомобилей, использующих узел как обычную парковку [4, 9].

Этот подход к определению спроса на «перехватывающие» парковки имеет ряд недостатков:

 – подход рассчитан на крупные транспортнопересадочные узлы, что ограничивает его использование в условиях г. Харькова;

 практическая проверка графоаналитического метода «изохрон» осуществлялась в условиях радиально-кольцевой планировочной структуры транспортной сети города. Поэтому возникают сомнения в возможности его использования в городах с другими планировочными структурами;

 при определении спроса на «перехватывающие» парковки вообще не рассматриваются условия предоставления услуг в парковке, что существенно влияет на результаты расчетов; принятые допущения при определении суммарной вероятности использования «перехватывающей» парковки и коэффициента комфортности представляются недостаточно обоснованными.

Ряд работ посвящен моделированию функционирования парковок в транспортно-пересадочных узлах [13–17]. Разработана регрессионная модель изменения потребности в машиноместах на парковках возле железнодорожных станций в пригородной зоне как функции среднесуточного пассажиропотока [13]. Рассматривались также математические модели изменения потребности в парковании на уже существующих парковках в течение суток [14, 15]. Но результаты данных исследований не учитывают особенности функционирования транспортных систем городов Украины.

Было проведено исследование влияния «перехватывающих» парковок на характеристики ТП в городах [16, 17]. Но разработанные модели описывают изменение некоторых характеристик ТП в зависимости от изменения спроса на «перехватывающие» парковки. Спрос при этом является аргументом и искусственно изменяется в достаточно широком диапазоне.

В целом можно сделать вывод, что проведенные до сих пор исследования не предоставляют возможности определения спроса на «перехватывающие» парковки в г. Харькове.

Методика и объект исследований

В данной работе объектом исследования является транспортная система г. Харькова. Цель заключается в изучении спроса на «перехватывающие» парковки в нем. Данная цель предполагает решение следующих задач:

 – разработать методику и выполнить экспериментальные исследования спроса на «перехватывающие» парковки;

 провести сегментирование спроса на «перехватывающие» парковки по различным признакам.

Изучение спроса на «перехватывающие» парковки предполагает последовательное решение нескольких задач.

На начальном этапе необходимо рассмотреть схему транспортной сети и выделить на ней входящие в город магистрали общегородского значения. Для выделенных магистралей нужно определить потенциальные места расположения «перехватывающих» парковок, которые должны быть максимально приближены к станциям метрополитена или конечным остановочным пунктам транспортных средств МПТ.

Далее следует получить данные о характеристиках ТП на входящих в город магистралях. Для выполнения этой задачи целесообразно использовать метод натурных обследований. По результатам таких обследований должна быть получена информация об интенсивности и составе входящих в город ТП. Такая информация важна для определения потенциального спроса на пользование «перехватывающими» парковками.

На следующем этапе нужно определить матрицу транспортных корреспонденций, которые образуются в узлах расположения «перехватывающих» парковок. Наиболее приемлемым методом решения этой задачи является моделирование ТП. Матрица корреспонденций позволяет выполнить сегментирование транспортного спроса в узлах расположения «перехватывающих» парковок по территориальному признаку.

Для изучения транспортного спроса в узлах расположения «перехватывающих» парковок необходимо также провести анкетное обследование водителей пригородов, регулярно выполняющих поездки в г. Харьков. Такая информация позволит сегментировать транспортный спрос по различным признакам, которые необходимо предварительно определить.

Заключительный этап предполагает обработку результатов моделирования транспортных корреспонденций, анкетных обследований водителей и сегментирование спроса на «перехватывающие» парковки в городе.

Согласно мировому опыту устройство «перехватывающих» парковок целесообразно на входных магистралях городов в крупных транспортно-пересадочных узлах, у станций метрополитена, остановок городского пассажирского транспорта. Для определения узлов транспортной сети, которые пригодны для устройства «перехватывающих» парковок, изучены топологическая схема транспортной сети города, схемы линий метрополитена и маршрутов наземных видов МПТ. По результатам этого рассмотрения выделены семь потенциальных мест для устройства «перехватывающих» парковок (рис. 1). Такие стоянки могут располагаться вблизи узлов транспортной сети, которые имеют соответствующие номера.

Эти узлы расположены:

- три (375, 484, 662) у конечных станций метрополитена и остановок МПТ;

– четыре (448, 606, 712, 731) возле остановок МПТ.

В перечисленных узлах проведены натурные обследования интенсивности и состава ТП. Обработка результатов данных обследований позволила определить интенсивность ТП, которые входят в город в утренний час пик.

Но не все водители транспортных средств могут быть потенциальными клиентами «перехватывающих» парковок. Вероятность того, что водители грузовых автомобилей, автобусов, микроавтобусов будут пользоваться «перехватывающими» парковками, очень мала. Поэтому было принято допущение, что потенциальными клиентами «перехватывающих» парковок будут только водители легковых автомобилей. Согласно этому допущению, во всех входящих в город ТП была определена интенсивность легковых автомобилей.

Для узлов, которые являются потенциальными местами для устройства «перехватывающих» парковок (рис. 1), с помощью компьютерной программы были рассчитаны транспортные корреспонденции в другие узлы транспортной сети. В этом программном обеспечении для расчетов транспортных корреспонденций использовалась гравитационная модель [1, 2, 5, 6].

Для определения параметров потенциального спроса на пользование «перехватывающими» парковками целесообразно проанализировать корреспонденции из узлов, которые являются потенциальными местами для устройства «перехватывающих» парковок по признаку расстояния сообщения по городу. Поэтому было определено расстояние сообщения каждой корреспонденции по матрице кратчайших расстояний. Для решения задач исследования необходима информация о распределении корреспонденций легковых автомобилей.

Машиностроение



Рис. 1. Схема расположения узлов транспортной сети, пригодных для устройства «перехватывающих» парковок: (712) – номер узла транспортной сети

Fig. 1. Scheme of node location in transport network which are suitable for creation of "park and ride" parking lots: 712 - node number of transport network

С учетом допущения, что распределение корреспонденций легковых автомобилей пропорционально распределению корреспонденций всех видов транспортных средств, объем корреспонденций легковых автомобилей рассчитывается по формуле

$$HOL_{im} = HO_{im} \frac{NL_i}{N_i},\tag{1}$$

где HOL_{im} – объем корреспонденций легковых автомобилей из узла *i* на расстояние в *m*-м интервале диапазона расстояний сообщения по городу, ед./ч; HO_{im} – общий объем корреспонденций из узла *i* на расстояние в *m*-м интервале диапазона расстояний сообщения по городу, ед./ч; NL_i — интенсивность движения легковых автомобилей в транспортном потоке, который входит в город через узел *i*, авт./ч; N_i — общая интенсивность движения транспортного потока, который входит в город через узел *i*, авт./ч.

После выполнения расчетов получены данные о распределении корреспонденций легковых автомобилей по признаку расстояния передвижения по городу от узлов возможного расположения «перехватывающих» парковок (табл. 1).

По данным табл. 1 проведено сегментирование транспортного спроса в целом по всем узлам возможного расположения «перехватывающих» парковок по признаку расстояния передвижения по городу (рис. 2).

| наука итехника. Т. | 17, | N⁰ | 1 | (201 | 8) |
|-----------------------|--------|-----|----|-------|-----|
| Science and Techniq | ue. V. | 17, | No | 1 (20 | 18) |

Таблииа 1

Распределение корреспонденций легковых автомобилей по признаку расстояния передвижения по городу от узлов возможного расположения «перехватывающих» парковок Distribution of vehicle correspondence according to urban travel distance from nodes of possible "park and ride" parking lot location

| | - | | - | - | | |
|-----------|-------------|---------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Номер | Ра при р | аспреде: асстоян | ление ко ии перед | рреспон цвижени | денций я по гој | , ед., роду, км |
| узла сети | До 2 | 2-5 | 5-8 | 8-12 | 12-16 | Более 16 |
| 375 | 106 | 155 | 197 | 141 | 78 | 28 |
| 448 | 56 | 128 | 145 | 122 | 72 | 33 |
| 484 | 66 | 88 | 96 | 92 | 22 | 4 |
| 606 | 95 | 158 | 252 | 142 | 102 | 39 |
| 662 | 14 | 78 | 95 | 61 | 25 | 6 |
| 712 | 122 | 197 | 281 | 206 | 112 | 19 |
| 731 | 12 | 6 | 92 | 57 | 17 | 8 |
| Сумма | 469 | 809 | 1158 | 818 | 429 | 137 |



Рис. 2. Сегментирование транспортного спроса в узлах возможного расположения «перехватывающих» парковок по признаку расстояния передвижения по городу

Fig. 2. Segmentation of traffic demand in nodes of possible "park and ride" parking lot location according to urban travel distance

Распределения корреспонденций легковых автомобилей по признаку расстояния сообщения от узлов возможного расположения «перехватывающих» парковок недостаточно для определения потенциального спроса на данные парковки. Решение этой задачи требует изучения намерений водителей легковых автомобилей о возможности использования данного вида парковки. Для этого был проведен анкетный опрос водителей, в ходе которого определены:

 уровень удовлетворения водителей эффективностью (временем сообщения, материальными затратами) передвижения по городу;

 удельный вес водителей, являющихся потенциальными клиентами системы «перехватывающих» парковок;

 условия, на которых водители согласны пользоваться «перехватывающими» парковками во время поездок в город;

| Наука | 1 | | |
|-------------|--------------|------------|--------|
| итехника. | T. 17, № 1 | l (2018) | |
| Science and | Technique, V | . 17. No 1 | (2018) |

 среднее расстояние сообщения автомобилей к пунктам назначения в г. Харькове;

– регулярность поездок водителей в г. Харьков.

В соответствии с задачами анкетного опроса была разработана форма анкеты. Опросы достаточного количества водителей и дальнейшая обработка информации из анкет позволили определить потенциальный спрос на пользование «перехватывающими» парковками. Всего было опрошено 412 водителей, проживающих в населенных пунктах Харьковской области и периодически осуществляющих поездки в г. Харьков в рабочие дни недели.

По результатам обработки анкет можно сделать следующие выводы о перспективах использования «перехватывающих» парковок.

Подавляющее большинство водителей недовольно характеристиками эффективности своих поездок по городу. По результатам опроса 82 % водителей недовольны затратами времени (рис. 3) и 73 % недовольны материальными затратами (рис. 4) на передвижение по городу.



Рис. 3. Сегментирование транспортного спроса по признаку удовлетворенности водителей затратами времени на передвижение по городу: 1 – удовлетворены; 2 – не довольны

 Fig. 3. Segmentation of traffic demand according to drivers' satisfaction with time expenditure for urban travel: 1 – satisfied; 2 – dissatisfied

Как известно, «перехватывающие» парковки устраивают именно для повышения эффективности передвижения по городу. Особенно это касается поездок в центральную его часть. Поэтому полученная информация об отношении водителей к эффективности передвижения по городу свидетельствует о наличии большого потенциального спроса на пользование «перехватывающими» парковками. Однако это еще не означает, что такой потенциальный спрос может быть удовлетворен самим фактом устройства «перехватывающих» парковок. Необходимо определить условия, которые дают возможность реализовать данный спрос.

Для определения таких условий в анкету были включены соответствующие вопросы. Водителям легковых автомобилей был задан вопрос о регулярности поездок в Харьков на собственном автомобиле в рабочие дни недели.

Машиностроение

Обработка анкет по этому вопросу позволила определить распределение спроса на «перехватывающие» парковки в зависимости от регулярности поездок в город и расстояния передвижения по городу (табл. 2).



 Рис. 4. Сегментирование транспортного спроса по признаку удовлетворенности водителей
 материальными затратами на передвижение по городу: 1 – удовлетворены; 2 – не довольны
 Fig. 4. Segmentation of traffic demand according to drivers' satisfaction with material expenditure for urban travel: 1 – satisfied; 2 – dissatisfied

Таблица 2 Распределение ответов водителей легковых автомобилей на вопрос о регулярности поездок в город

на собственном автомобиле в рабочие дни недели Distribution of vehicle drivers' answers to question pertaining to regularity of trips to city while using own vehicle on weekdays

| Вариант | Распределение ответов водителей при расстоянии передвижения по городу, км | | | | | | | |
|--------------------------|--|-----|-----|------|-------|--------------|--|--|
| ответа | До 2 | 2–5 | 5-8 | 8-12 | 12–16 | Бо- лее16 | | |
| Каждый день | 17 | 37 | 49 | 31 | 21 | 6 | | |
| Два-три раза в неделю | 13 | 20 | 28 | 23 | 10 | 5 | | |
| Несколько раз в месяц | 14 | 22 | 33 | 22 | 12 | 4 | | |
| Один раз в месяц | 5 | 8 | 14 | 12 | 4 | 2 | | |
| Сумма | 49 | 87 | 124 | 88 | 47 | 17 | | |

По данным табл. 2 проведено сегментирование транспортного спроса по признаку регулярности поездок в город на собственном автомобиле в рабочие дни недели (рис. 5).

В ходе опроса водителей также определены условия, которые дают возможность реализации потенциального спроса на «перехватывающие» парковки. Согласно мировой практике организации «перехватывающих» парковок пользование таким видом парковки может осуществляться на различных условиях. Поэтому в анкету был включен вопрос о приемлемости условий пользования «перехватывающими» парковками.

Ответы водителей сформированы с учетом расстояния передвижения по городу (табл. 3). По данным табл. 3 проведено сегментирование транспортного спроса по признаку приемлемости условий пользования «перехватывающими» парковками в рабочие дни недели (рис. 6).



Pacпределение ответов водителей легковых автомобилей на вопрос о приемлемости условий пользования «перехватывающими» парковками в рабочие дни недели Distribution of vehicle drivers' answers to question pertaining to acceptability of conditions provided for usage of "park and ride" parking lots on weekdays

| | Распределение ответов водителей | | | | | | | |
|-------------------|---------------------------------|-----|--------|---------|-------|-------|--|--|
| D | при расстоянии передвижения | | | | | | | |
| Вариант ответа | |] | по гој | зоду, і | CM | 1 | | |
| | До 2 | 2–5 | 5-8 | 8-12 | 12-16 | Более | | |
| | r 1- | | | - | | 16 | | |
| При условии мини- | | | | | | | | |
| мального тарифа | | | | | | | | |
| на парковку | 0 | 1 | 9 | 10 | 6 | 3 | | |
| При условии бес- | | | | | | | | |
| платной парковки | 0 | 3 | 24 | 19 | 11 | 5 | | |
| При условии бес- | | | | | | | | |
| платных парковки | | | | | | | | |
| и поездки на МПТ | 0 | 5 | 26 | 21 | 12 | 2 | | |
| «Перехватывающие» | | | | | | | | |
| парковки мне | | | | | | | | |
| не нужны» | 49 | 78 | 65 | 38 | 18 | 7 | | |
| Сумма | 49 | 87 | 124 | 88 | 47 | 17 | | |

В результате сегментирования транспортного спроса в узлах возможного расположения «перехватывающих» парковок по признаку расстояния сообщения можно сделать вывод, что в ТП, которые входят в город, наибольшее количество легковых автомобилей (30 %) перемещается на расстояние от 5 до 8 км. Практически одинаковое количество легковых автомобилей (21 %) осуществляют перемещения в диапазонах 2–5 и 8–12 км.

На диапазоны расстояний сообщения до 2 и 12–16 км приходится соответственно 12 и 11 % всех передвижений.

| Наука | | | | | |
|------------------------|----|-----|----|-------|------|
| итехника. Т. 1 | 7, | N⁰ | 1 | (20 | 18) |
| Science and Technique. | ۷. | 17, | No | 1 (20 |)18) |



Рис. 6. Сегментирование транспортного спроса по признаку приемлемости условий пользования «перехватывающими» парковками в рабочие дни недели:
– при условии минимального тарифа на парковку;
– при условии бесплатной парковки;
– при условии бесплатной парковки;
– при условии бесплатной парковки;
– при условии бесплатных парковки и поездки на МПТ;
– «перехватывающие» парковки и поездки на МПТ;
– «перехватывающие» парковки мне не нужны» *Fig. 6.* Segmentation of traffic demand according to acceptability of conditions provided for usage of "park and ride" parking lots on weekdays:
– on condition of free parking;
– on condition of free parking;
– on condition of free parking lots are not required

Сегментирование транспортного спроса по признаку регулярности поездок (рис. 5) показывает, что подавляющее большинство (63 %) поездок являются регулярными (39 % – каждый день, 24 % – в среднем через день).

Расстояние передвижения по городу не зависит от регулярности поездок в город. Во всех диапазонах расстояния передвижения по городу наблюдается примерно одинаковое распределение спроса по признаку регулярности поездок в город.

В современных условиях большинство водителей (62 %) не хотят пользоваться «перехватывающими» парковками на любых условиях. Только 7 % водителей согласны пользоваться «перехватывающими» парковками при условии минимальной платы за парковку. Если парковки будут бесплатными, количество желающих пользоваться этим видом услуг возрастет до 22 %. В случае предоставления бесплатной парковки и еще бесплатной поездки на МПТ удельный вес желающих достигнет 38 %. Наблюдается зависимость количества водителей, которые хотят пользоваться «перехватывающими» парковками на определенных условиях, от расстояния передвижения по городу (рис. 7). Рост расстояния передвижения вызывает увеличение спроса на «перехватывающие» парковки. При расстоянии перемещения до 2 км спроса совсем нет, а при расстоянии передвижения 2-5 км спрос минимальный (6 %).



выводы

1. Представленная методика исследования, основанная на объективных данных, позволила получить характеристики спроса на «перехватывающие» парковки в современных условиях г. Харькова. Установлено, что, несмотря на негативную оценку эффективности передвижений по городу, только 38 % водителей на различных условиях готовы пользоваться «перехватывающими» парковками.

2. С помощью математического моделирования определены количественные параметры распределения транспортных корреспонденций в узлах возможного расположения «перехватывающих» парковок по признаку расстояния передвижения по городу.

3. Анализ полученных объективных данных позволил провести сегментирование спроса на «перехватывающие» парковки по признакам регулярности поездок в г. Харьков, расстояния передвижения по городу, приемлемости условий пользования «перехватывающими» парковками. Определено, что:

 – при расстоянии передвижения по городу до 5 км спрос на «перехватывающие» парковки почти отсутствует;

 – большая часть спроса на «перехватывающие» парковки (почти 70 %) приходится на расстояние передвижения по городу в диапазоне 5–12 км;

 менее 19 % спроса приходится на условия предоставления услуг парковки по минимальному тарифу;

 – 58 % спроса на «перехватывающие» парковки соответствует условиям бесплатной парковки.

4. Полученные результаты являются исходными данными для определения потребности в «перехватывающих» парковках.

ЛИТЕРАТУРА

 Автомобильные перевозки и организация дорожного движения / В. У. Рэнкин [и др.]. М.: Транспорт, 1981. 592 с.

Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17. № 1 (2018

- Системологія на транспорті: у 5 кн. / Е. В. Гаврилов [та ін.]; під ред. М. Ф. Дмитриченка. Киев: Знання України, 2007. Кн. 4: Організація дорожнього руху. 452 с.
- 3. Дульфан, С. Б. Про напрямки зниження завантаження дорожнім рухом транспортних мереж міст / С. Б. Дульфан, О. О. Лобашов // Технологический аудит и резервы производства. 2013. № 6/1 (14). С. 35–38. DOI: 10. 15587/2312-8372.2013.19545
- 4. Власов, Д. Н. «Перехватывающая» стоянка как ключевой элемент транспортно-пересадочного узла / Д. Н. Власов, Н. В. Данилина // Недвижимость: экономика, управление. 2011. № 2. С. 55–58.
- Лобашов, О. О. Моделювання впливу мережі паркування на транспортні потоки у містах / О. О. Лобашов. Харьков: Харк. нац. акад. міськ. госп-ва, 2010. 170 с.
- Лобашов, О. О. Моделювання транспортних потоків в містах з урахуванням мережі парковки автомобільного транспорту / О. О. Лобашов, О. В. Прасоленко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Вып. 1/5 (43). С. 8–9.
- Potter, H. S. Parking Strategies Across the Subregion / H. S. Potter // Proc. Inst. Civ. Eng. Munic. Eng. 2001. Vol. 145, No 1. P. 3–6. DOI: 10.1680/muen.2001.145.1.3.
- Mukhija, V. Quantity Versus Quality in Off-Street Parking Requirements / V. Mukhija, D. Shoup // Journal of the American Planning Association. 2006. Vol. 72, No 3. P. 296–308. DOI: 10.1080/01944360608976752.
- Данилина, Н. В. Определение потребности транспортно-пересадочных узлов в «перехватывающих» стоянках / Н. В. Данилина // Современные проблемы науки и образования. Приложение «Технические науки». 2012. № 6. С. 6.
- Артемова, С. Г. Разработка полицентрической системы организации паркирования автомобилей в городах / С. Г. Артемова. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2014. 177 с.
- 11. Куприянова, А. Б. Оптимизация транспортного обслуживания центра крупного города в условиях приоритета общественного транспорта и системы перехватывающих стоянок / А. Б. Куприянова. Иркутск: Иркутск. гос. техн. ун-т, 2008. 20 с.
- Науменко, Е. Ю. Факторные и регрессионные модели оценки потребности спроса на парковки / Е. Ю. Науменко // Инженерный вестник Дона. 2011. Т. 16, № 6. С. 56–62.
- Choy, Peng. The Development of Model Estimation to Determine Parking Needs at LRT Stations in Suburban Area / Peng Choy, Dadang Mohamad // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2005. Vol. 5. P. 877–890.
- Maršanić, R. Planning Model of Optimal Parking Area Capacity / R. Maršanić, Z. Zenzerović, E. Mrnjavac // Promet – Traffic&Transportation. 2010. Vol. 22, No 6. P. 449–457. DOI: 10.7307/ptt. v22i6.210.
- Arnott, R. Modeling Parking / R. Arnott, J. Rowse // Journal of Urban Economics. 1999. Vol. 45, No 1. P. 97–124. DOI: 10.1006/juec.1998.2084.
- 16. Дульфан, С. Б. Про вплив «перехоплюючих» парковок на транспортні потоки у м. Харкові / С. Б. Дульфан, О. О. Лобашов // Технологический аудит и резервы производства. 2015. № 1/3 (21). С. 19–22. DOI: 10. 15587/2312-8372. 2015.36019.
- Дульфан, С. Б. К вопросу об организации «перехватывающих» парковок / С. Б. Дульфан, А. О. Лобашов // Совершенствование дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2015. С. 58–65.

Поступила 14.08.2017 Подписана в печать 27.10.2017 Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

- Renkin V. U., Klafi P., Khalbert S., Oppenlender Dzh. K., Levinson G. S., Kvinbi G. D. (1981) *Highway Transportation Operation and Organization of Road Traffic*. Moscow, Transport. 592 (in Russian).
- Gavrilov E. V., Dmitrichenko M. F., Dolya V. K. (2007) *Transport Systemology. Book 4: Organization of Road Traffic.* Kiev, Znannya Ukrainy. 452 (in Ukrainian).
- Dulfan S. B., Lobashov O. O. (2013) Ways to Reduce Road Traffic Load of City Transport Networks. *Technology Audit and Production Reserves*, 6/1 (14), 35–38 (in Ukrainian). DOI: 10.15587/2312-8372.2013.19545
- Vlasov D. N., Danilina N. V. (2011) "Park and Ride" Site as a Key Element of Transport Interchange Hub. Nedvizhimost: Ekonomika, Upravlenie = Real Estate: Economics, Management, (2), 55–58 (in Russian).
- Lobashov O. O. (2010) Modeling of Network Parking Influence on Traffic Flows in Cities. Kharkov, Kharkov National Academy of Urban Economy. 170 (in Ukrainian).
- Lobashov O. O., Prasolenko O. V. (2010) Simulation of Traffic Flows in Cities Taking into Account Parking Network of Automobile Transport. Vostochno-Evropeysky Zhournal Peredovykh Tekhnology = East European Journal of Advanced Technologies, 1/5 (43), 8–9 (in Russian).
- Potter H. S. (2001) Parking Strategies Across the Subregion. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Municipal Engineer, 145 (1). 3–6. DOI: 10.1680/muen.2001.145.1.3
- Mukhija V., Shoup D. (2006) Quantity Versus Quality in Off-Street Parking Requirements. *Journal of the American Planning Association*, 72 (3), 296–308. DOI: 10.1080/019 44360608976752
- Danilina N. V. (2012) Determination of Transport Interchage Hub Re Uirements in "Park and Ride" Sites. Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovianiya. Prilozhenie «Tekhnicheskie Nauki» [Modern Problems of Science and Education. Supplement Technical Sciences], (6), 6 (in Russian).
- Artemova S. G. (2014) Development of Polycentric System for Organization of Automobile Parking in Cities. Volgograd, Volgograd State Technical University. 177 (in Russian).
- 11. Kuprianova A. B. (2008) Optomization of Transport Service for Centre of Large City in Terms of Public Transport Priority and System of "Park and Ride" Sites. Irkutsk, Irkutsk State Technical University. 20 (in Russian).
- 12. Naumenko E. Yu. (2011) Factor and Regression Models for Assessment of Requirements in Parkings. *Inzhenerny Vestnik Dona = Engineering journal of Don*, 16 (6), 56–62 (in Russian).
- Choy Peng, Mohamad Dadang (2005) The Development of Model Estimation to Determine Parking Needs at LRT Stations in Suburban Area. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 877–890.
- Maršanić R., Zenzerović Z., Mrnjavac E. (2010) Planning Model of Optimal Parking Area Capacity. *Promet – Traffic& Transportation*, 22 (6), 449–457 DOI: 10.7307/ptt. v22i6.210
- Arnott R., Rowse J. (1999) Modeling Parking. *Journal of Urban Economics*, 45 (1), 97–124. DOI: 10.1006/juec.1998.2084.
- Dulfan S. B., Lobashov O. O. (2015) About the Influence of Intercepting Parking on Traffic Flows in Kharkiv. *Technology Audit and Production Reserves*, 1/3 (21), 19–22. (in Ukrainian). DOI: 10.15587/2312-8372. 2015.36019.
- Dulfan S. B., Lobashov O. O. (2015) On the Organization of "Park and Ride" Parkings. Sovershenstvovanie Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozok Passazhirov i Gruzov: Sb. Nauch. Tr. [Improvement of Road Traffic and Passenger and Cargo Transportation: Collection of Research Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, 58–65 (in Russian).

Received: 14.08.2017 Accepted: 27.10.2017 Published online: 29.01.2018

Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018)

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-51-55

УДК 621.79 (075.8)

Определение размерных параметров кольцевого концентратора ультразвуковой системы

Канд. техн. наук, доц. В. П. Луговой¹⁾, инж. И. В. Луговой¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018 Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Традиционные ультразвуковые системы содержат концентраторы продольного типа для усиления и передачи колебаний инструменту. Наряду с ними в качестве концентраторов ультразвуковых колебаний акустических систем могут быть эффективно использованы упругие кольца с переменной толщиной сечения. Для их практического применения необходима научно обоснованная методика определения геометрических параметров. В статье дано обоснование методу определения размеров кольцевых концентраторов с переменным сечением, которые могут повысить эффективность работы ультразвукового оборудования для выполнения различных технологических задач. Визуальный анализ акустических волн, излучаемых кольцевыми концентраторами, показал, что наиболее интенсивные колебания возбуждаются в наиболее тонких сечениях. Компьютерное моделирование колебаний колец наружным диаметром 50 мм с переменным сечением показало, что наибольшее усиление амплитуды колебаний достигается при определенном соотношении толщин и диаметров кольца. Анализ численных значений коэффициента усиления амплитуды колебаний К_л показал, что существует предельная граница соотношения толщин стенок кольца, которая в свою очередь зависит от соотношения наружного и внутреннего диаметров кольца при определенных значениях эксцентриситета оси отверстия. Количественно соотношение диаметров выражается коэффициентом К_{д.} Анализ результатов численных расчетов коэффициента усиления амплитуды, выполненных для указанной модели кольца диаметром 50 мм, показал, что это соотношение должно находиться в пределах $1,30 > K_{\pi} > 1,15$. Полученные результаты могут быть использованы в ультразвуковых устройствах с кольцевыми концентраторами для выполнения различных технологических залач

Ключевые слова: ультразвуковая система, кольцевой концентратор, коэффициент усиления амплитуды колебаний, геометрические параметры

Для цитирования: Луговой, В. П. Определение размерных параметров кольцевого концентратора ультразвуковой системы / В. П. Луговой, И. В. Луговой // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 1. С. 51–55. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-51-55

Determination of Dimensional Parameters for Annular Concentrator of Ultrasonic System

V. P. Lugovoi¹⁾, I. V. Lugovoi¹⁾

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

Abstract. Conventional ultrasonic systems contain concentrators of longitudinal type to amplify and transfer vibrations to a tool. Along with them, elastic rings with variable cross section thickness can be used effectively as concentrators for ultrasonic vibrations of acoustic systems. Their practical application requires a scientifically substantiated methodology for determination of geometric parameters. The paper provides substantiation of the method used to determine dimensions of annular concentrators with a variable cross section which can enhance effectiveness of the ultrasound equipment while performing various technological tasks. Visual analysis of acoustic waves radiated by annular concentrators has shown that the most intensive vibrations are produced in the most thin sections. Computer simulation of oscillations in rings with an external diameter of 50 mm and a variable cross section has demonstrated that the largest increase of vibration amplitude is achieved

Адрес для переписки

Луговой Вячеслав Петрович Белорусский национальный технический университет ул. Я. Коласа, 22, 220013, г. Минск, Республика Беларусь Тел.: +375 17 293-91-01 kipp@bntu.by

Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17. No 1 (201 Address for correspondence Lugovoi Vyacheslav P. Belarusian National Technical University 22 Ya. Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus Tel: +375 17 293-91-01 kipp@bntu.by

Машиностроение

at a certain ratio of ring thicknesses and diameters. An analysis of numerical values for amplication factor of vibrational amplitude K_{μ} has revealed that there is a limit boundary for the ratio of ring wall thicknesses which, in its turn, depends on the ratio of ring outer and inner diameters at certain values of hole axis eccentricity. The ratio of diameters is expressed quantitatively by the coefficient K_{μ} . An analysis of the results concerning numerical calculations of amplitude amplification factor performed for the specified model of the ring having 50 mm diameter have illustrated that this ratio should lie between $1.3 > K_{\mu} > 1.15$. The obtained results can be used in ultrasonic devices with annular concentrators in order to perform various technological tasks.

Keywords: ultrasound system, annular concentrator, amplification factor of vibrational amplitude, geometric parameters

For citation: Lugovoi V. P., Lugovoi V. I. (2018) Determination of Dimensional Parameters for Annular Concentrator of Ultrasonic System. *Science and Technique*. 17 (1), 51–55. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-51-55 (in Russian)

Введение

Одно из перспективных направлений развития ультразвуковой техники - совершенствование акустических систем, в частности по применению упругих элементов в качестве резонаторов, концентраторов и инструментов. Достоинством таких систем является возможность использования упругих свойств элементов для накопления и передачи потенциальной энергии рабочему инструменту. Упругие элементы широко используются в механизмах и приборах для различных целей, в том числе для усиления колебаний [1, 2]. Некоторые из них нашли применение в ультразвуковой технике в качестве инструментов для осуществления ряда технологических операций: абразивной обработки хрупких материалов, пластического деформирования пластичных материалов, измерений и т. д. [3, 4]. Известна также акустическая система с упругим элементом в виде трубы с переменной жесткостью, которая является резонатором ультразвуковой системы [5]. Однако вопросам, посвященным применению упругих элементов в качестве концентраторов колебаний, уделено недостаточное внимание. Решение данной проблемы может открыть новые возможности по использованию ультразвуковой технологии в ряде отраслей народного хозяйства, что требует научного обоснования и разработки акустических систем с упругими элементами [6]. В связи с этим авторами проведены теоретические исследования по обоснованию выбора геометрических параметров кольцевых концентраторов, обладающих упругими свойствами.

Анализ влияния размерных параметров кольца на коэффициент усиления амплитуды колебаний

Возможность усиления амплитуды колебаний концентраторами кольцевого типа под-

тверждается результатами визуального анализа фигур Хладни, образующихся при акустическом излучении колец. Для сравнения результатов были исследованы кольцо одной толщины сечения и кольца с переменной толщиной сечения. Все они имели одинаковый наружный диаметр 50 мм и ширину 10 мм. В образцах колец с переменным сечением изменялись размер отверстия d и величина смещения оси этих отверстий относительно оси симметрии кольца e (рис. 1).



Рис. 1. Фигуры Хладни, образованные акустическим излучением колец: а – толщина сечения кольца 5 мм, e = 0; b – d = 20 мм, e = 7 мм; c – d = 40 мм, e = 4 мм *Fig. 1.* Chladni figures formed by acoustic radiation of rings: a – ring section thickness 5 mm, e = 0; b – d = 20 mm, e = 7 mm; c – d = 40 mm, e = 4 mm

Номинальная частота ультразвуковых колебаний акустической системы f = 20 кГц. На фотографии рис. 1 отчетливо виден волновой характер распределения колебаний в виде повторяющихся узловых линий. В первом случае узловые линии образуются из равномерно расположенных линий по периметру кольца, что указывает на равномерное распределение энергии колебаний по всему периметру кольца. При изменении формы колец наблюдаются усиление изгибных колебаний и концентрация энергии на участках с наиболее тонкими сечениями (рис. 1b, c). Форма распространения волн по периметру круговых колец с переменным сечением свидетельствует об усиле-

> Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018)

нии амплитуды колебаний по мере уменьшения размера толщины кольца. Эпюры распределения амплитуды колебаний представлены на рис. 2.



- Рис. 2. Эпюры изменения амплитуды колебаний по периметру колец с постоянным (а) и переменным (b) сечениями
- *Fig. 2.* Epure for oscillatory amplitude changes along the perimeter of ringswith constant (a) and variable (b) sections

Кольцевой концентратор с переменным сечением преобразует продольные колебания акустической системы в изгибные, которые всегда более эффективны, чем продольные.

Теоретические исследования и анализ влияния двух геометрических параметров на усиление амплитуды колебаний были проведены с использованием компьютерных программ моделированием колебаний в кольцах наружным диаметром 50 мм. Для сравнения изучались кольца с переменным сечением, в которых изменялись диаметр отверстия d и толщина в результате смещения оси отверстия относительно оси кольца. Такое изменение размеров позволило изменить форму кольца при увеличении значения эксцентриситета осей e. Результаты численного расчета амплитуды колебаний в тонком сечении представлены на рис. 3, 4.





| Наука | | | | |
|---------------|-----------|----|--------|---------|
| итехника. Т | . 17, Nº | 1 | (201 | 8) |
| Science and 1 | echnique. | ν. | 17. No | 1 (2018 |



Рис. 4. Зависимость амплитуды колебаний *А* кольца от внутреннего диаметра кольца *d* для эксцентриситета *e*: ______ – 1 мм; ______ – 3 мм; ______ – 5 мм



Анализ результатов показывает, что увеличение амплитуды колебаний на выходе кольцевого концентратора достигается одновременным увеличением размера внутреннего отверстия и эксцентриситета осей окружностей.

Для количественной оценки трансформации колебаний в кольцевом концентраторе введен коэффициент усиления амплитуды колебаний K [7], который рассчитывается как отношение амплитуды колебаний ξ_1 на входе к амплитуде на выходе ξ_0 :

$$K = \xi_1 / \xi_0.$$
 (1)

Результатами численных расчетов установлено, что коэффициент усиления амплитуды колебаний К в кольцевых концентраторах с переменной толщиной сечения зависит от соотношения толщин сечения, выражаемого коэффициентом

$$N = \frac{t_1}{t_2} = \frac{(D-d)/2 + e}{(D-d)/2 - e},$$
 (2)

где t_1 , t_2 – толщина кольца в верхнем и нижнем сечениях; e – эксцентриситет окружностей.

Таким образом, из (1) и (2) следует, что коэффициент усиления амплитуды колебаний зависит от размеров наружного и внутреннего диаметров кольца, а также от величины эксцентриситета осей.

Даная зависимость установлена в результате теоретического анализа для кольца с наружным диаметром 50 мм, диаметр отверстия которого изменялся в пределах 20–40 мм, а эксцентриситет – в пределах 0,5–12,0 мм. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость коэффициента N отношения толщин кольца от размера внутреннего диаметра d и эксцентриситета e Dependence of ring thickness ratio N on internal diameter d and eccentricity e

| Эксцентри- | Значение коэффициента N при внутреннем диаметре кольца d, мм | | | | | | |
|---------------------|--|------|------|-----|-----|-----|-----|
| ситет <i>e</i> , мм | 20 | 30 | 35 | 40 | 45 | 47 | 49 |
| 0,5 | 1,06 | 1,10 | 1,14 | 1,2 | 1,5 | 4,0 | 3,0 |
| 1 | 1,14 | 1,20 | 1,30 | 1,5 | 2,3 | 5,0 | |
| 2 | 1,30 | 1,50 | 1,70 | 2,3 | 9,0 | | |
| 3 | 1,50 | 1,85 | 2,30 | 4,0 | | | |
| 4 | 1,70 | 2,30 | 3,20 | 9,0 | | | |
| 5 | 2,00 | 3,00 | 5,00 | | | | |
| 6 | 2,30 | 4,00 | 9,00 | | | | |
| 7 | 2,75 | 5,60 | | | | | |
| 8 | 3,20 | 9,00 | | | | | |
| 9 | 4,00 | | | | | | |
| 10 | 5,00 | | | | | | |
| 12 | 9,00 | | | | | | |

Из табл. 1 видно, что увеличение внутреннего диаметра кольца даже при незначительном эксцентриситете приводит к резкому повышению численного значения коэффициента *N*.

По полученным данным был построен график зависимости (рис. 5) предельных значений коэффициента толщин N от внутреннего диаметра кольца d, имеющего наружный диаметр 50 мм.



Как видно из рис. 5, оптимальный размер отверстия исследуемого кольца наружным диаметром 50 мм, который позволяет получить предельный коэффициент N = 9, примерно 46 мм. Дальнейшее увеличение размера отверстия приводит к постепенному уменьшению коэффициента N, а следовательно, и коэффициента усиления амплитуды колебаний K. Таким образом, введя еще один коэффициент, равный отношению наружного диаметра кольца D к внутреннему диаметру d, можно установить оптимальные соотношения геометрических параметров кольца

$$K_{\mathrm{g}} = \frac{D}{d}.$$

Анализ полученных результатов показал, что рациональные размеры круглого кольцевого концентратора могут быть назначены при соблюдении условия соотношения толщин $1,30 > K_{\rm g} > 1,15$.

Полученные результаты предложены в виде новых технических решений для практического применения в ультразвуковых системах технологического назначения [8–10].

выводы

1. Результаты теоретических расчетов показывают, что кольцевые концентраторы позволяют получить значительное усиление амплитуды колебаний.

2. Предложенная модель кольцевого концентратора с переменным сечением может быть использована в ультразвуковых колебательных системах вместо стержневых концентраторов, а также совместно с ними, что обеспечивает еще большее усиление амплитуды колебаний инструмента.

3. Коэффициент усиления амплитуды колебаний кольцевого концентратора зависит от соотношения диаметров кольца и отверстия, а также от их взаимного расположения.

4. Установлено, что рациональное соотношение наружного и внутреннего диаметров кольца лежит в пределах 1,30–1,15.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Андреева, Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. М.: Машиностроение, 1981. 392 с.
- Попов, Э. А. Упругие накопители энергии в текстильных машинах / Э. А. Попов, Ф. Б. Караев, Л. М. Квартин. М.: МТИ, 1984. 5 с.

Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018)

- Ультразвуковой инструмент: а. с. 382439 СССР: МКИ В 06 В3/00 / А. А. Горбунов, В. М. Салтанов, В. Г. Моисеев, Н. В. Савенков, Е. П. Калинин; дата публ.: 23.05.1973.
- 4. Устройство для ультразвукового полирования: а. с 854685 СССР: МКИ В 24 В1/04 / В. Ф. Зимовец, П. М. Герасемчук, С. Н. Стручков, С. Д. Вуйцик; дата публ.: 15.08.1981.
- Ультразвуковая колебательная система с промежуточным резонатором: пат. 2106205 Рос. Федерации: МКИ В 06 ВЗ/00 / В. Н Аленичев, Л. О. Макаров, А. А. Рухман; дата публ.: 10.03.1998.
- Марков, А. И. Ультразвуковая обработка материалов / А. И. Марков. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.
- 7. Разработка и исследование нового типа концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов / Д. А. Степаненко [и др.] // Материалы. Технологии. Инструменты. 2013. Т. 18, № 2. С. 90–94.
- Ультразвуковой инструмент для обработки или измерения детали: пат. 19219 Респ. Беларусь: МПК В 06В 1/00 / И. В. Луговой, В. Т. Минченя, В. П. Луговой; дата публ. 30.06.2015.
- Ультразвуковой инструмент для обработки отверстий: пат. 8169 Респ. Беларусь: МПК В 24 В1/04 / И. В. Луговой, В. Т. Минченя, В. П. Луговой; дата публ.: 30.04.2012.
- Устройство для ультразвуковой обработки детали: пат. 19108 Респ. Беларусь: МПК В 06В 1/00 / И. В. Луговой, В. Т. Минченя, В. П. Луговой; дата публ.: 30.04.2015.

Поступила 02.05.2017 Подписана в печать 27.07.2017 Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

- 1. Andreeva L. E. (1981) *Elastic Elements of Instruments*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 392 (in Russian).
- Popov E. A., Karaev F. B., Kvartin L. M. (1984) *Elastic Energy Storage System in Textile Machines*. Moscow, Moscow Technological Institute. 5 (in Russian).
- Gorbunov A. A., Saltanov V. M., Moiseev V. G., Savenkov N. V., Kalinin E. P. (1973) *Ultrasonic Tool*. Inventor's Certificate USSR No 382439 (in Russian).
- Zimovets V. F., Gerasimchuk P. M., Struchkov S. N., Wojcik S. D. (1981) *Device for Ultrasonic Polishing*. Inventor's Certificate USSR No 854685 (in Russian).
- Alenichev V. N., Makarov L. O., Rukhman A. A. (1998) Ultrasound Vibration System with Intermediate Resonator. Patent Russian Federation No 2106205 (in Russian).
- Markov A. I. (1980) Ultrasonic Treatment of Materials. Moscow, Mashinostroenie Publ. 237 (in Russian).
- Stepanenko D. A., Minchenya V. T., Lugovoi V. P., Lugovoi I. V. (2013) Development and Research of New Ultrasonic Vibration Concentrators on the Basis of Ring Elastic Elements. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technologies. Tools], 18 (2), 90–94 (in Russian).
- Lugovoi I. V., Minchenia V. T., Lugovoi V. P. (2015) Ultrasonic tool for Processing or Measurement of Part. Patent of the Republic of Belarus No 19219 (in Russian).
- Lugovoi I. V., Minchenia V. T., Lugovoi V. P. (2012) Ultrasonic Tool for Hole Processing. Patent of the Republic of Belarus No 8169 (in Russian).
- Lugovoi I. V., Minchenia V. T., Lugovoi V. P. (2015) Device for Ultrasonic Treatment of a Part. Patent of the Republic of Belarus No 19108 (in Russian).

Received: 02.05.2017 Accepted: 27.07.2017 Published online: 29.01.2018

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-56-63

УДК. 621.891:621.793

Параметры лазерной обработки и их влияние на трибологические характеристики покрытий на основе железа

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018 Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Рассмотрены вопросы повышения физико-механических и эксплуатационных свойств клеевых покрытий после лазерного оплавления с дополнительным легированием B₄C, TaB и MoB. Изучено влияние лазерного оплавления с дополнительным легированием на структуру, микротвердость и износостойкость клеевых покрытий системы Fe–Cr–B–Si. С увеличением скорости лазерного луча микроструктура изменяется от равновесной до квазиэвтектической. Присутствие боридов молибдена и тантала повысило чувствительность покрытия к особенностям лазерного переплава. В обоих случаях изменились условия теплообмена, увеличилось количество боридов железа и хрома, в результате чего молибден и тантал частично перешли в свободное состояние, способствуя измельчению структурных составляющих. При введении твердых частиц В₄С в покрытие происходит их растворение в матрице железа при нагреве лазерным лучом, при охлаждении они выделяются в виде отделенных включений боридов Fe и Cr. Лазерное оплавление и легирование повышают износостойкость покрытий. Увеличение нагрузки с 30 до 70 Н повышает износ покрытий в среднем на 15-26 %, а нелегированных покрытий - на 26-43 %. Повышение скорости оплавления и диаметра лазерного пятна не оказывает значительного влияния на износ, увеличение же коэффициента перекрытия приводит к снижению износа покрытия. Наличие твердых частиц ТаВ в покрытии и повышение скорости оплавления лучом лазера снижают износостойкость покрытия. Такая довольно сложная зависимость скорости износа покрытий от условий лазерного оплавления и износа обусловлена комплексом структурных и фазовых превращений, которые способствовали формированию вторичных твердых включений и повысили микротвердость.

Ключевые слова: лазерная обработка, скорость луча лазера, микротвердость, микроструктура, покрытие, фазовый состав, интенсивность изнашивания

Для цитирования: Дьяченко, О. В. Параметры лазерной обработки и их влияние на трибологические характеристики покрытий на основе железа / О. В. Дьяченко, М. А. Кардаполова // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 56–63. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-56-63

Parameters of Laser Processing and Their Influence on Tribological Characteristics of Iron-Based Coatings

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

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

Abstract. The paper considers improvement of physic-mechanical and operational properties of adhesive coatings after laser infusion with additional alloying B_4C , TaB and MoB. Influence of the laser infusion with additional alloying on structure, microhardness and wear-resistance of adhesive coatings of the Fe–Cr–B –Si system has been studied in the paper. While increasing a laser beam velocity microstructure is changed from equilibrium to quasi-eutectic. Presence of molybdenum boride and tantalum increases sensitivity of the coating to specific features of laser remelting. In both cases heat exchange conditions have been changed, a number of iron and chromium borides has been increased and due to this molybdenum

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

Address for correspondence

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



and tantalum have been partially passing to free state that contributes to a disintegration of structural components. While introducing solid particles B_4C into a coating they are dissolved in an iron matrix while being heated by a laser beam and under cooling they are isolated in the form of separated Fe an Cr boride inclusions. Laser infusion and alloying increase coating wear-resistance. Load increase from 30 to 70 H improves coating wear resistance averagely by 15–26 % and wear resistance of non-alloyed coatings is improved by 26–43 %. An increase of melting rate and laser spot diameter does not exert significant influence on wear but an increase in overlapping coefficient leads to reduction of coating wear. Presence of solid particles in a coating and an increase in rate of melting by laser beam reduce coating wear resistance. Such rather complicated dependence of coating wear rate on conditions of laser melting and wearing process is due to a complex of structural and phase transformations which have contributed to formation of secondary solid inclusions and increased microhardness.

Keywords: laser processing, laser beam velocity, microhardness, microstructure, coating, phase composition, wear intensity

For citation: Diachenko O. V., Kardapolova M. A. (2018) Parameters of Laser Processing and Their Influence on Tribological Characteristics of Iron-Based Coatings. *Science and Technique*. 17 (1), 56–63. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-56-63 (in Russian)

Методы плазменного напыления покрытий находят широкое применение при упрочнении, защите и восстановлении деталей во многих отраслях промышленности [1, 2]. Способы лазерного оплавления широко используются для формирования поверхностей с повышенными эксплуатационными характеристиками. Они позволяют упрочнять обрабатываемые поверхности путем закалки или дополнительного легирования [3, 4].

Среди материалов, применяемых для нанесения покрытий и последующей лазерной обработки, большое место занимают самофлюсующиеся порошки на основе никеля и кобальта, состав которых обеспечивает формирование износостойких покрытий с высоким комплексом физико-механических свойств [5, 6]. Самофлюсующиеся сплавы широко распространены в качестве универсальных материалов в процессе создания износо- и коррозионностойких покрытий. Однако существенным недостатком данных материалов является их высокая стоимость. Поэтому было предложено использовать самофлюсующиеся порошки на основе железа.

Высокая стоимость и технологическая сложность методов плазменного напыления делают проблематичным их использование для небольших по площади частей детали или единичного производства. Возможная альтернатива данному методу обработки – нанесение покрытий клеевым методом. Легирующие материалы при этом наносятся на клеевой слой покрытия [7, 8].

Железо, углерод, марганец, кремний, бор и другие легирующие элементы используются в качестве основных составляющих порошковой смеси для варьирования свойствами эвтектических покрытий на основе железа. Эти элементы образуют эвтектику и иные высокопрочные компоненты (карбиды, бориды, сложнолегированные фазы), которые взаимодействуют между собой при температуре формирования эвтектики. Данные компоненты также обеспечивают высокую твердость и износостойкость, позволяют получить покрытия с относительно высокой пластичностью. В связи с этим при кристаллизации образуется высокодисперсная квазиэвтектическая структура. Отмеченная специфика во многом предопределила преимущества использования покрытий на основе железа по сравнению с другими материалами [9].

При лазерном легировании боридами и карбидами можно добиться повышения эксплуатационных характеристик и варьирования необходимыми характеристиками получаемых покрытий [3].

Цель работы – изучение влияния параметров лазерной обработки и дополнительного легирования на формирование структуры и износостойкость порошков системы Fe–Cr–B–Si.

Методика исследования

Для исследования микроструктуры использовали образцы из стали 45 прямоугольной формы сечением 10×10 и длиной 30 мм, на поверхность которых кистью наносили пасту, приготовленную смешиванием трех компонентов: клея AGO, ацетона и порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф (табл. 1). Композицию выдерживали на воздухе при комнатной температуре один час для полного удаления растворителя из клеевого слоя. Толщина слоя составляла 0,6 мм. Оплавление осуществляли непрерывным лазером ЛГН-702 мощностью N = 800 Вт при диаметре лазерного луча d = $= 3,0 \cdot 10^{-3}$ м, со скоростями движения детали относительно луча лазера (скоростями луча лаsepa), M/c: $v_1 = 0.83 \cdot 10^{-3}$; $v_2 = 1.67 \cdot 10^{-3}$; $v_3 =$ = 3,33 · 10^{-3} ; $v_4 = 5 · <math>10^{-3}$, с коэффициентом перекрытия 0,8 после предварительного нанесения порошковых обмазок B₄C, TaB, MoB на клеевой связке (3 % клея AGO в ацетоне). Содержание легирующих элементов в обмазке выбрали исходя из матрицы планирования, соответственно в долях ед.: 0, 1/3, 2/3 и 1. Толщина слоя обмазки составила 0,09-0,11 мм и контролировалась толщиномером МТ-40НЦ. После нанесения клеевого покрытия и оплавления образцы разрезали поперек лазерных дорожек для исключения влияния нестабильности температурных условий нагрева и охлаждения на краях образца.

Таблица 1

Химический состав порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф Chemical composition of ПР-Х4Г2Р4С2Ф powder

| Элемент, % | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| Fe B Cr Si Mn C V Al Cu | | | | | | | | |
| Основа | 3,3– 4,3 | 3,5- 4,5 | 2,0– 2,5 | 2,0– 2,5 | 1,0- 1,2 | 0,5– 0,9 | 0,05– 0,50 | 0,05– 0,50 |

Точечный микрорентгеноспектральный анализ проводили на рентгеновском микроскопе МРЭМ-200. Микрошлифы травили в 5%-м растворе пикриновой кислоты в спирте, затем – в 5%-м растворе азотной кислоты в спирте.

Протравленные образцы изучены на световом металлографическом микроскопе Unimet (Япония) при увеличении ×400.

Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3.

Для исследования влияния технологических параметров на фазовый состав и некоторые физико-механические свойства покрытий использовали методы математического планирования – метод полного факторного эксперимента и центральный ортогональный композиционный план для двух факторов [4–7].

Анализ микротвердости и скорости износа выполняли с использованием метода полного факторного эксперимента. Поскольку число варьируемых параметров невелико, оказалось возможным реализовать полную реплику, в которой число опытов Q = 2 в степени, соответствующей числу факторов *n*. Это позволяет в ходе эксперимента варьировать одновременно несколько параметров различной физической природы и получать раздельную, независимую оценку коэффициентов, что невозможно, например, при реализации дробной реплики. При этом необходимо, чтобы все независимые переменные, влияющие на процесс, изменялись на двух уровнях: минимальном и максимальном.

Серия состояла из восьми основных опытов. Полученная модель считалась линейной и учитывала взаимодействие факторов

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3.$$
(1)

Для составления таблицы данных (матрицы планирования) находили пределы изменения основных входных параметров, в качестве которых были приняты технологические характеристики лазерной обработки. Технологические факторы x_1 (скорость луча лазера относительно детали), x_2 (диаметр лазерного пятна) и x_3 (коэффициент перекрытия) выбирали, исходя из возможности их изменения при условии точного измерения их величин, а также учитывая их взаимную независимость (ортогональность).

Покрытие с самофлюсующимся сплавом на основе железа и с легирующими добавками оплавляли лазерным лучом. Введение легирующих добавок еще более усложнило проведение структурных исследований.

Определение износа покрытий выполнено на машине трения, предназначенной для ускоренных сравнительных испытаний (рис. 1).

Абразивный диск 1, изготовленный из закаленной стали 50 мм в диаметре и толщиной 2 мм, фиксировался на вертикально расположенной оси. Исследуемый образец 2 был повернут торцом к диску 1.

Образцы клеевых покрытий, оплавленные горелкой и после легирования ТаВ, МоВ и B_4C обработанные лазером (на режиме: $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с; $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м, k = 0,8), до и после износа взвешены при помощи аналитических весов с точностью измерения 0,1 мг.

| Наука итехника. | а Т. | 17, | N⁰ | 1 | (20 | 18) |
|--------------------|---------|--------|-----|----|-------|------|
| Science and Tech | niqu | le. V. | 17, | No | 1 (20 |)18) |



Puc. 1. Схематическая диаграмма для изучения износа *Fig. 1.* Schematic diagram for studying wear

Обсуждение результатов

Как было показано в предыдущих исследованиях [7], лазерное оплавление приводит к формированию метастабильных структур, армированных дендритами первого, второго и третьего порядков, состоящих из высоколегированной тонкодисперсной эвтектики α–Fe–Cr–B, кристаллизующейся между осями дендритов. Фазовый состав покрытий для различных условий лазерного оплавления без легирования показан на рис. 2.



Рис. 2. Фазовый состав покрытий без армирующих добавок в зависимости от условий лазерного переплава при значении параметров: а – минимальном; b – максимальном



| Наука | а | | | |
|-------------|-----------|----------|---------|-------|
| итехника. | T. 17, | Nº 1 (| (2018) |) |
| Science and | I Technic | ue. V. 1 | 7. No 1 | (201) |

Влияние параметров лазерной обработки на структуру клеевого покрытия, армированного твердыми частицами B₄C, TaB и MoB, изучено при различных условиях оплавления покрытия.

Для всех клеевых покрытий, оплавленных лазерным лучом, наблюдалась одинаковая тенденция изменения структуры, зависящая от увеличения скорости лазерного луча. Скорость лазерного луча изменила структуру от равновесной до квазиэвтектической (рис. 3). Тем не менее характеристики структуры и фазового состава зависят от состава армирующих частиц.



Рис. 3. Структура покрытий, армированных твердыми частицами: а – при скорости лазерного луча $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3} \text{ м/c}, d = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$ b – при $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ м/c}, d = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ Fig. 3. Structure of coatings reinforced by solid particles: a – at lase beam velocity $v_1 = 0.83 \cdot 10^{-3} \text{ m/sec}, d = 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ m;}$ b – at $v_2 = 1.67 \cdot 10^{-3} \text{ m/sec}, d = 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Когда дополнительные твердые частицы B₄C вводятся в покрытие, они успевают растворить-

ся в матрице железа при нагреве лазерным лучом, а при охлаждении выделяются в виде отделенных включений. После растворения часть частиц B_4C кристаллизуется в виде боридов Fe и Cr. Тем не менее более высокие скорости нагрева и охлаждения способствуют тому, что все структурные компоненты сплава не выпадают в осадок в чистом виде, а остаются в легированной форме. Поэтому существует высокая вероятность того, что карбиды в покрытии становятся сложнолегированными, имеют высокую твердость и образуют армированную сетчатую структуру. Изменения структуры покрытий после легирования с B_4C более детально рассмотрены в [9, 10].

С увеличением скорости нагрева (рис. 3b) размер карбидо-боридных компонентов, кристаллизующихся из сплава, существенно уменьшается. Фазовый состав покрытия показан на рис. 4. Можно сделать вывод, что условия лазерного оплавления незначительно влияют на фазовый состав.



Рис. 4. Фазовый состав покрытия, армированного частицами B₄C в зависимости от условия лазерного переплава, при значении параметров: а – минимальном; b – максимальном

 Fig. 4. Phase composition of coating reinforced
 by particles B₄C according to conditionds of laser remelting, at the following parameter values: a – minimum; b – maximum При легировании боридом молибдена часть его кристаллизуется в форме оксида молибдена, а другая переходит в железную матрицу.

Структура состоит в основном из твердых растворов и дендритов, легированных Мо, Сг и V, с осями первого и второго порядков и включениями карбидов и боридов. При увеличении скорости лазерного луча дендритные включения более выражены, степень легирования твердого раствора невелика и карбидоборидная фаза более тонко диспергирована. Фазовый состав покрытия показан на рис. 5.



Рис. 5. Фазовый состав покрытия, армированного частицами МоВ в зависимости от условия лазерного переплава, при значении параметров: а – минимальном; b – максимальном

Fig. 5. Phase composition of coating reinforced by particles MoB according to conditionds of laser remelting, at the following parameter values: a – minimum; b – maximum

Присутствие боридов молибдена сделало покрытие более чувствительным к особенностям лазерного переплава. Во время нагрева лазерным лучом происходит изменение условий теплообмена и протекают химические реакции, которые приводят к увеличению коли-

> Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018)

чества железа и боридов хрома, а молибден переходит в свободное состояние.

Изменения в отношениях между α–Fe и γ–Fe приводят к изменениям в структуре дендритов, описанным выше. Присутствие боридов тантала в покрытии тоже воздействует на структуру. Для скорости лазерного луча 50 мм/мин дендритные компоненты сплава можно еще выделить, но при увеличении скорости до 100 мм/мин наблюдается квазиэвтектическая структура (рис. 3). Фазовый состав покрытия показан на рис. 6.

Присутствие боридов тантала делает покрытие более чувствительным к условиям лазерного оплавления. При изменении условий теплообмена в процессе нагрева лазерным лучом бориды хрома разрушаются, количество γ–Fe и комплекса V–Cr–B₄C карбидов возрастает и тантал появляется частично в свободном состоянии.



Рис. 6. Фазовый состав покрытия, армированного частицами ТаВ в зависимости от условия лазерного переплава, при значении параметров: а – минимальном; b – максимальном

Fig. 6. Phase composition of coating reinforced by particles TaB according to conditionds of laser remelting, at the following parameter values: a – minimum; b – maximum

| Наука | а | | | |
|-------------|-----------|---------|----------|--------|
| итехника. | T. 17, | Nº 1 | (2018) |) |
| Science and | l Technic | aue. V. | 17. No 1 | (2018) |

Изменения износа покрытий со временем носят типичный характер: в течение 1–2 мин наблюдается время приработки, а затем появляется период равномерного износа (рис. 7). Самый высокий уровень износа наблюдается в покрытии, содержащем ТаВ. Для покрытий без легирования, а также содержащих В₄С и МоВ скорость износа при более высоких нагрузках независимо от состава покрытия остается неизменной. При низких нагрузках легированные покрытия имеют определенные преимущества на начальной стадии цикла трения.



С помощью уравнения регрессии (табл. 2) проведен анализ изменений параметров лазерного оплавления, состава покрытия и величины нагрузки на скорости износа оплавленных покрытий. При армировании покрытий порошками В₄С и МоВ в исследуемом диапазоне нагрузок скорость оплавления не оказывает

влияния на скорость износа покрытия (рис. 7). В случае армирования твердыми частицами ТаВ скорость износа растет с увеличением скорости луча лазера. Рост диаметра лазерного пятна увеличивает износ при легировании B₄C и в случае легирования частицами TaB независимо от нагрузки.

Таблица 2

Уравнения регрессии, полученные для интенсивностей изнашивания покрытий, оплавленных лазером

Regression equations obtained for intensities of coating wear melted by laser

| Легирую- щий элемент | Нагрузка, Н | Уравнение регрессии |
|----------------------------|----------------|--|
| Без 30 | | $Y = 0,722 + 0,088x_1 + 0,1x_2 + + 0,135x_3 + 0,08x_1x_3$ |
| легирова- ния | 70 | $Y = 0,945 + 0,109x_1 + 0,111x_2 + 0,15x_3 + 0,108x_1x_3$ |
| TaB | 30 | $Y = 0,753 + 0,09x_1 + 0,146x_2 + 0,088x_3 + 0,079x_1x_3$ |
| 70 | | $Y = 0,862 + 0,098x_1 + 0,07x_2 + 0,13x_3$ |
| MoR | 30 | $Y = 0,571 + 0,142x_1 + 0,105x_2 + + 0,203x_3 + 0,103x_1x_3$ |
| WIOD | 70 | $Y = 0,795 + 0,172x_1 + 0,105x_2 + 0,245x_3 + 0,115x_1x_3$ |
| B.C | 30 | $Y = 0,571 + 0,142x_1 + 0,105x_2 + 0,203x_3 + 0,103x_1x_3$ |
| B4C | 70 | $Y = \overline{0,6 + 0,05x_1 + 0,08x_2 + 0,093x_1x_3 + 0,11x_2x_3 + 0,1x_1x_2x_3}$ |

Наименее износостойкими в условиях трения без смазочного материала являются покрытия после оплавления газовой ацетиленовой горелкой. Лазерное оплавление и легирование повышают износостойкость покрытий. Максимальная износостойкость по сравнению с оплавлением газовой ацетиленовой горелкой (примерно в три раза) достигается в покрытиях после лазерного легирования карбидом бора.

Параметры лазерного упрочнения оказывают влияние на интенсивность изнашивания. Наибольшее управляющее воздействие на интенсивность изнашивания оказывают диаметр луча лазера и коэффициент перекрытия.

Содержание в покрытии твердых армирующих частиц B₄C влияет на него следующим образом: увеличение скорости оплавления и диаметра лазерного пятна не влияет на износ покрытия, повышение же коэффициента перекрытия приводит к снижению износа покрытия. Наличие твердых частиц ТаВ в покрытии и повышение скорости оплавления лучом лазера увеличивают его износ. Такая довольно сложная зависимость скорости износа покрытий от условий лазерного оплавления и износа обусловлена описанным выше комплексом структурных и фазовых превращений, которые способствовали формированию вторичных твердых включений и повысили микротвердость.

Сравнение значений скоростей износа для легированных и нелегированных покрытий показало преимущество армированных покрытий при скорости лазерного луча 50 мм/мин, диаметре лазерного луча 1,0 мм, коэффициенте перекрытия 0,8. Изменение в параметрах лазерной обработки может привести к увеличению износа: для порошка B₄C – в 1,2–1,25 раза, для MoB – в 1,2–1,6 раза, для частиц TaB – в 2–3,3 раза.

выводы

1. Для всех клеевых покрытий тенденция изменения в структуре одинаковая — от глобулярной до квазиэвтектической. Структура становится квазиэвтектической с ростом скорости сканирования лазерного луча.

2. В структуре покрытия, легированного МоВ, преобладают дендритные образования. При лазерном переплаве наличие частиц МоВ и ТаВ приводит к дополнительным химическим реакциям и фазовым изменениям в композиции покрытия. Наличие частиц В₄С не влияет на изменение фазового состава покрытия. Износ зависит от условий оплавления покрытия, значений нагрузки, а также от состава покрытия. Наилучшие результаты были достигнуты благодаря формированию равновесной твердой структуры при оплавлении лазерным лучом с малым диаметром и низкой скоростью лазерного луча.

ЛИТЕРАТУРА

 Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильющенко [и др.] / под общ. ред. А. Ф. Ильющенко. Минск: Бестпринт, 2002. 480 с.

- Витязь, П. А. Основы нанесения износостойких, коррозионно-стойких и теплостойких покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов. Минск: Беларус. навука, 2006. 363 с.
- Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров / под ред. А. Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2006. 664 с.
- Яндимиркин, Е. М. Фазовый состав и структура поверхностных слоев конструкционных и инструментальных сталей при лазерном легировании карбидом бора / Е. М. Яндимиркин // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 3. С. 38–41.
- Vencl, A. Microstructures and Tribological Properties of Ferrous Coatings Deposited by APS (Atmospheric Plasma Spraying) on Al-Alloy Substrate / A. Vencl, M. Mrdak, I. Cvijović // FME Transactions. 2006. Vol. 34, No 3. P. 151–157.
- Microstructural Design of Hardfacing Ni–Cr–B–Si–C Alloys / I. Hemmati, [et al.] // Acta Materialia. 2013. Vol. 61, No 16. P. 6061–6070. DOI: 10.1016/j.actamat. 2013.06.048.
- Дьяченко, О. В. Перспективы получения покрытий системы Fe–Cr–B–Si лазерным модифицированием / О. В. Дьяченко, М. А. Кардаполова, Ю. О. Девойно // Вестник Брестского государственного технического университета. 2005. № 4. С. 12–15.
- Дьяченко, О. В. Изучение трибологических характеристик клеевых покрытий на железной основе с помощью симплекс метода / О. В. Дьяченко, М. А. Кардаполова // Инженерия поверхности: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 25–27 окт. Брест: БГТУ, 2007. С. 33–37.
- Feldshtein, E. Structure, Phases and Tribological Behaviour of Fe-Based Self-Fluxing Alloy Coatings Formed by Plasma Spraying and Follow-Up Flame and Laser Remelting / E. Feldshtein, M. Kardapolava, O. Dyachenko // International Journal of Surface Science and Engineering. 2015. Vol. 9, No 5. P. 395–406. DOI: 10.1504/IJSURFSE. 2015.072059.
- Improvement of the Corrosion Behavior of Low Carbon Steel by Laser Surface Alloying / B. Abdolahi [et al.] // Applied Surface Science. 2011. Vol. 257, No 23. P. 9921–9924. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.06.108.

Поступила 09.03.2017 Подписана в печать 19.05.2017 Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Il'iushchenko, A. F., Okovityi, V. A., Kundas, S. P., Formanek, B. (2002) Formation of Gas and Thermal Coatings: Theory and Practice. Minsk, Bestprint. 480 (in Russian).

- Vityaz P. A., Il'yushchenko A. F., Shevtsov A. I. (2006) Fundamentals on Deposition of Wear-Resistant, Corrosion-Resistant and Heat-Resistant Coatings. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 363 (in Russian).
- Grogoryants A. G., Shiganov I. N., Misiourov A. I. (2006) *Technological Processes of Laser Processing*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 664 (in Russian).
- 4. Yandimirkin E. M. (2006) Phase Composition and Structure of Surface Layers of Constructional and Instrument Steel During Laser Doping with the Help of Boron Carbide. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, (3), 38–41.
- Vencl A., Mrdak M., Cvijović I. (2006) Microstructures and Tribological Properties of Ferrous Coatings Deposited by APS (Atmospheric Plasma Spraying) on Al-Alloy Substrate. *FME Transactions*, 34 (3), 151–157.
- Hemmati I., Huizenga R. M., Ocelík V., De Hosson J. T. M. (2013) Microstructural Design of Hardfacing Ni–Cr–B–Si–C Alloys. *Acta Materialia*, 61 (16), 6061–6070. DOI: 10.1016/ j.actamat.2013.06.048.
- Dyachenko O. V., Kardapolova M. A., Devoyno Yu. O. (2005) Prospects for Obtaining Coatings of System-Fe-Cr-B-Si while Using Laser Modification. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Brest State Technical University], (4), 12–15 (in Russian).
- Dyachenko O. V., Kardapolova M. A. (2007) Study of Tribological Characteristics for Adhesive Iron-Based Coatings with the Help of Simplex Method. *Inzheneriya Poverkhnosti: sb. tr. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Brest,* 25–27 okt. [Surface Engineering: Collected Papers of International Scientific and Technical Conference. Brest, October 25–27]. Brest, Brest State Technical University, 33–37.
- Feldstein E., Kardapolova A., Dyachenko O. (2015) Structure, Phases and Tribological Behaviour of Fe-Based Self-Fluxing Alloy Coatings Formed by Plasma Spraying and Follow-Up Flame and Laser Remelting. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 9 (5), 395–406. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2015.072059.
- Abdolahi B., Shahverdi H. R., Torkamany M. J., Emami M. (2011) Improvement of the Corrosion Behavior of Low Carbon Steel by Laser Surface Alloying. *Applied Surface Science*, 257 (23), 9921–9924. DOI: 10.1016/j. apsusc.2011.06.108.

Received: 09.03.2017 Accepted: 19.05.2017 Published online: 29.01.2018 DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-64-71

UDC 681.583.35; 681.587.357

Features of Controlling Electropneumatic Valves of Actuator to Control its Clutch with Acceleration Valve

O. A. Yaryta¹⁾, M. G. Mychalevych¹⁾, D. N. Leontiev¹⁾, V. I. Klymenko¹⁾, V. A. Bogomolov¹⁾, I. V. Gritsuk²⁾, Y. B. Novikova¹⁾

¹⁾Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine), ²⁾Kherson State Maritime Academy (Kherson, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2018 Belarusian National Technical University, 2018

Abstract. The article deals with one of the ways to control an actuator of the automated clutch control system. The aim is to design control of the electropneumatic actuator, to control its coupling with the acceleration valve on the basis of experimental research as well as to provide rational parameters of the automated clutch control system for the robotic transmission. The feature of the system is an acceleration valve in the design of the electropneumatic actuator to control the clutch. New links demand to adjust the way to control the actuator. The connection of Pulse-Width Modulation (PWM) with single power supply pulses to control electropneumatic valves is substantiated. The quantitative characteristics of single control pulses and PWM ones are determined. The error of operation accuracy for various ways of the control of the electropneumatic actuator to control the clutch of the robotic transmission is determined. Obtained separate PWM area is designed to suppress the initial hysteresis when the rod of the clutch actuator is moved. An algorithm for the operation of a clutch control system is proposed, taking into account the use of two modes of operation of solenoid valves. A graphical interpretation of the clutch control algorithm is presented, which gives an idea of the location of the constant signal feeding zones to the solenoid valve, as well as the operation areas of the solenoid valve in PWM mode. The control algorithm of the clutch booster provides a mode of guaranteed absence of excess pressure in the pneumatic cylinder after releasing the clutch pedal, provided that two normally closed solenoid valves are used. This configuration of the electro-pneumatic clutch control system allows the use of an emergency clutch release system in case of voltage absence. The reference algorithm for filtering the array of data coming from the feedback sensor, as well as the numerical values of the delay caused by the presence of a filter, are given.

Keywords: automated clutch control system, actuator with acceleration valve, pulse-width modulation, electropneumatic valve

For citation: Yaryta O. A., Mychalevych M. G., Leontiev D. N., Klymenko V. I., Bogomolov V. A., Gritsuk I. V., Novikova Y. B. (2018) Features of Controlling Electropneumatic Valves of Actuator to Control its Clutch with Acceleration Valve. *Science and Technique*. 17 (1), 64–71. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-64-71

Особенности управления электропневматическими клапанами исполнительного механизма управления сцеплением с ускорительным клапаном

А. А. Ярита¹⁾, кандидаты техн. наук, доценты Н. Г. Михалевич¹⁾, Д. Н. Леонтьев¹⁾, канд. техн. наук, проф. В. И. Клименко¹⁾, докт. техн. наук, проф. В. А. Богомолов¹⁾, докт. техн. наук, доц. И. В. Грицук²⁾, канд. филолог. наук, доц. Е. Б. Новикова¹⁾

¹⁾Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (Харьков, Украина), ²⁾Херсонская государственная морская академия (Херсон, Украина)

Реферат. В статье рассмотрен один из способов управления исполнительным механизмом автоматизированной системы управления сцеплением. На основе экспериментальных исследований предложены способ управления электро-

Адрес для переписки Клименко Валерий Иванович Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет ул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, г. Харьков, Украина Тел.: +38 050 565-77-97 valeriy.klimenko@gmail.com Address for correspondence Klymenko Valery I. Kharkiv National Automobile and Highway University 25 Yaroslava Mudrogo str., 61002, Kharkiv, Ukraine Tel.: +38 050 565-77-97 valeriy.klimenko@gmail.com пневматическим исполнительным устройством управления сцеплением с ускорительным клапаном, а также рациональные параметры автоматизированной системы управления сцеплением для роботизированной трансмиссии. Особенностью рассматриваемой системы является наличие в конструкции электропневматического исполнительного механизма управления сцеплением ускорительного клапана. Наличие новых связей требует корректировки способа управления исполнительным механизмом. Обосновано объединение широтно-импульсной модуляции с одиночными импульсами питания для управления электропневматическими клапанами. Определены количественные характеристики управляющих импульсов как для случая одиночных, так и в случае использования широтноимпульсной модуляции. Определена ошибка точности работы во время разных способов управления электропневматическим исполнительным устройством управления сцеплением роботизированной трансмиссии. Выделена отдельная зона широтно-импульсной модуляции, предназначенная для подавления начального гистерезиса при перемещении штока исполнительного устройства управления сцеплением. Предложен алгоритм работы системы управления сцеплением с учетом использования двух режимов работы электромагнитных клапанов. Представлена графическая интерпретация алгоритма управления сцеплением, дающая представление о расположении зон подачи постоянного сигнала на электромагнитный клапан, а также зон работы электромагнитного клапана в режиме широтно-импульсной модуляции. В алгоритме управления усилителем предусмотрен режим гарантированного сброса давления из пневматического цилиндра после отпускания педали сцепления при условии использования двух нормально закрытых электромагнитных клапанов. Такая конфигурация электропневматической системы управления сцеплением позволяет задействовать систему аварийного выключения сцепления при отсутствии электропитания. Приведены опорный алгоритм фильтрации массива данных, поступающих от датчика обратной связи, а также численные значения запаздывания, вызванного наличием фильтра.

Ключевые слова: автоматизированная система управления сцеплением, исполнительный механизм с ускорительным клапаном, широтно-импульсная модуляция, электропневматический клапан

Для цитирования: Особенности управления электропневматическими клапанами исполнительного механизма управления сцеплением с ускорительным клапаном / А. А. Ярита [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 64–71. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-64-71

Introduction

A large number of freight vehicles and buses having the automated clutch control system (ACCS) with the electropneumatic actuator are produced nowadays. Most serial models of ACCS executive devices consist of a power cylinder and four electropneumatic valves that control air pressure in the power cylinder [1]. The availability of many electromagnetic valves causes the reduction in reliability and increase in the cost of the whole system. Besides, electromagnetic valve durability requirements are much higher compared to the reliability of the actuator mechanics. It is because of electropneumatic valve operating in pulse-width modulation mode to ensure the accuracy of the whole system operation. Reducing the quantity of electropneumatic valves the contradiction appears between ACCS speed and the accuracy of its operation.

Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU) proposes the design of the ACCS actuator for the robotic transmission with only two control electropneumatic valves. They ensure the good accuracy of their operation. The required speed of ACCS is guaranteed due to the acceleration valve in the design of its actuator. It is possible to eliminate the contradiction between ACCS speed and accuracy due to the special design of the acceleration valve [2–6]. The operation quality of the above-mentioned acceleration valve depends on both its design parameters and the parameters of electropneumatic valve control pulses that the electronic control unit (ECU) of ACCS generates. This fact stipulates the necessity of rationalization of the control mode implemented by means of the ECU algorithm.

The choice of the way to control the electropneumatic valves of the automated clutch control system

The research of the ACCS operation is carried out with the help of the test unit (fig. 1). The choice of an optimal control mode is made on the basis of the range of experimental research of the developed ACCS design (fig. 2, 3), when a control signal is first delivered to the electropneumatic valves continuously and then in the form of the pulse-width modulation (PWM). Besides, pulse-width modulation parameters are changed for the purpose of determining the most favourable values of electropneumatic valve open time.

The oscillograms illustrated the transitions in the ACCS actuator, use the following symbols: X_{rod} – the transition of an actuator rod, mm; p_c – the pressure in a power chamber, MPa; p_{av} – the pressure in an acceleration valve control chamber, MPa; t_{pulse} – the time of an electropneumatic valve being under pressure, s; ΔX – the inertial transition of an ACCS actuator rod, mm; a_1 , b_1 – the position of an ACCS actuator rod during electropneumatic valve closing; a_2 , b_2 – the stable position of an ACCS actuator rod after electropneumatic valve closing.



Fig. 1. Block diagram of a test unit: 1 – compressor; 2 – receiver; 3 – gauge; 4 – valve; 5 – pressure regulator;
6 – pressure control unit; 7 – rod displacement sensor; 8 – power cylinder; 9 – vehicle powertrain; 10 – clutch fork;
11 – pressure sensor; 12 – switch; 13 – measuring system; 14 – PC; 15 – power supply unit



We will present the example of the most significant examples of ACCS operation in different modes. In the case of voltage delivery to the electropneumatic valve as a continuous signal with duration $t_{pulse} = 0.25$ s (fig. 2a) there is a considerable inertial transition of the actuator rod.



Fig. 3. Process of overcoming hysteresis in the ACCS actuator: a – clutch disengagement; b – clutch engagement

According to the oscillogram (fig. 2a) the case of actuator rod stopping at the point a_1 seems to be ideal, directly during electropneumatic valve closing. However, experiment results show that after valve closing the rod continues moving at the distance ΔX that makes about 45 % from a rod transition for the nonce. Concerning a general rod stroke

> Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018)

distance ΔX makes about 10 %. In this case it is necessary to establish the dead space of an appropriate size for switching off the vibrational nature of a rod movement. The dead space which corresponds to the value 10 % (2.2 mm) is unacceptable in terms of a positioning accuracy.

In the case of usage for the PWM electropneumatic valve control (fig. 2b) there is a small increase in the duration of an actuator rod transition process, but at the same time its more accurate positioning should be marked as well.

After stopping a voltage delivery to the electropneumatic valve at point b1 there is an inertial rod movement to point b_2 , the length of transition makes up near 10 % of the rod transition. The total time of the electropneumatic valve operation in the given case equals $\Sigma t_{pulse} = 0.4$ s. Concerning the general rod stroke transition ΔX is about 2.7 %.

The analysis of the conducted research [7] has confirmed the appropriateness of PWM usage for the electropneumatic valves control. The further development of an ACCS control algorithm is closely connected to the choice of pulse-width modulation optimal parameters. It is known that [8–10], a large quantity of used moving rubber packings increase the friction by parts movement causing the appearance of a considerable hysteresis loop in drive static characteristics and worsening its sensibility. As there are moving rubber packings in the design of the ACCS developed actuator, it is necessary to determine the level of a hysteresis influence on the ACCS operation before the development of a control system operation algorithm.

The results of the experimental research have shown (fig. 3) that filling the power cylinder the pressure burst in the rod end up to 0.215 MPa causes the rod movement to the value less than 2 mm which can be compared with the choice of clearance in the drive (fig. 3a). There is a similar effect by emptying the rod end of the power cylinder. A pressure reduction by 0.135 MPa causes the rod movement to less than 1 mm (fig. 3b).

As a result of the experimental data of the analysis which was carried out we can make a conclusion that to ensure ACCS qualitative maintenance characteristics such as good tracking action and high speed, the use of the pulse-width modulation by the electropneumatic valves control is inevitable.

The presence of hysteresis in the actuator emphasizes the need of using different parameters of PWM depending on a drive operating mode. The choice of PWM optimal parameters can be made on the basis of the results of the experimental research or the mathematical modelling of electropneumatic clutch drive operation.

Taking into account experimental research results, it was decided to divide clutch engagement and disengagement processes into two phases with PWM different parameters (fig. 4).

PWM parameters in phase 1 (F_1) and phase 3 (F_3) (fig. 4) are chosen taking into account the need for overcoming hysteresis in operation by clutch engagement and disengagement respectively. It is suggested to calculate pulse on-time impulst1 in phase 1 (F_1) depending on a rod current position, pulse on-time impulst3 – depending on a clutch pedal movement speed. In phases 1 and 3 it is suggested to exercise control on a pulses on-time change, pauses on-time pauset1 and pauset3 are chosen minimal from the view of electropneumatic valves technical specifications.



Fig. 4. Phases of an ACCS control system operation: impulst1 – pulse on-time in phase 1 of a clutch engagement process; pauset1 – pause on-time in phase 1 of a clutch engagement process; impulst2 – pulse on-time in phase 2 of a clutch engagement process; impulst3 – pulse on-time in phase3 of a clutch disengagement process; pauset3 – pause on-time in phase 3 of a clutch disengagement process; impulst4 – pulse on-time in phase 4 of a clutch disengagement process; pauset4 – pause on-time in phase 4 of a clutch disengagement process;

| Наука | | | | |
|-----------------------|---|----|------|-------|
| итехника. Т. 17, № | 1 | (2 | 018 |) |
| Science and Technique | V | 17 | No 1 | (2018 |

Phases 2 (F_2) and 4 (F_4) (fig. 4) are necessary for actuator rod positioning respectively. It is proposed to calculate pulse on-time impulst2 not only depending on the clutch pedal movement speed, but also to set time pauset2 minimal. During the clutch disengagement process impulst4 is suggested to set minimal but to control by means of a pause on-time change pauset4 depending on the pedal movement speed.

Taking into account the literary review and the analysis of experimental studies performed before, the operation of the ACCS control system was built on the basis of the three-position algorithm, presented in fig. 5.

Fig. 5 demonstrate the following accepted symbols: U_{FB} – a signal from the rod position sensor (feedback sensor); U_{RS} – a signal from the pedal position sensor (reference signal sensor); p – a parameter that provides guaranteed pressure drop from the rod end of the power cylinder with the clutch pedal fully released in the case of using a normally closed exhaust valve; δ_1 , δ_2 – the limits of the upper and lower null zones of the rod position sensor respectively; EK_1 – inlet electropneumatic valve; t_{off} – temporal value of taking the initial position of the pedal; t_i – current time value.

At the initial moment of time the ECU receives data from the pedal position sensor U_{RS} and the rod position sensor U_{FB} , as well as data whether the first round of computing this branch of the algorithm takes place. The algorithm has four main branches [8–14].

The first branch of the algorithm operation describes the case when the system is at rest (fig. 5). The ECU verifies whether the clutch control actuator is in its original position ($U_{RS} = 0$). If the signal from the pedal position sensor indicates that it is in the starting position, this may be a sign of two operational modes: the system has not come out of the resting or the operator has acted on the pedal and brought it to its original position.

This is verified by means of the condition P = 1 (dimensionless quantity). If the condition is fulfilled the operator has acted on the control actuator and returned it to its original position, then we have the first round of the algorithm computing. To exclude the availability of residual pressure in the actuator dead space, the ECU supplies the voltage to EK_2 for 3 seconds and ensures that there is no residual pressure. At every next step of computing the condition p = 1 is not fulfilled and the ECU brings the system to the rest, there is no voltage on both electro-pneumatic valves.



Fig. 5. Operational algorithm of automated control system

The second branch is the algorithm operation in the case when the rod of the actuator has travelled more than was specified by the operator (fig. 6a).



b - rod travels less than specified

If the condition when the rod is in its original position $(U_{RS} = 0)$ is not fulfilled, the ECU concludes that the operator has acted on the actuator and introduces a new setting P = 1, that will provide the first round of computing this branch of the algorithm. Then the ECU defines the current state of the actuator rod in relation to the position specified by the operator. If the signal from the feedback sensor is larger than from the pedal position sensor, taking into account the upper null zone $(U_{FB} > U_{RS} + \delta_1)$, the ECU concludes that the system has reacted to the operator's impact but has crossed the position specified by him. The next step of the ECU is determining to what extent the rod is far from the specified position, checking if the condition $U_{FB} > U_{RS} + \delta'_1$ is fulfilled. If the condition is fulfilled, the ECU supplies the voltage as a continuous signal to EK_2 to return the rod into the specified position, if not – in the PWM mode.

The third branch of the algorithm describes the case when the actuator rod has not reached the position specified by the operator (fig. 6b).

When working out the second branch of the algorithm if the condition $U_{FB} > U_{RS} + \delta_1$ is not fulfilled the condition $U_{FB} < U_{RS} - \delta_2$. If it is fulfilled,

| Наука | |
|------------------------------|---------------|
| итехника. Т. 17, № 1 (2 | 2018) |
| Science and Technique, V. 17 | . No 1 (2018) |

the ECU concludes that the system has reacted onto the operator's act, but the rod has not reached the specified position. The next step of the ECU is determining how far the rod is from the specified position checking the fulfilment of the condition $U_{FB} > U_{RS} - \delta'_2$. If the condition is fulfilled, the ECU supplies the voltage as a continuous signal to EK_1 to return the rod into the specified position, if not – in the PWM mode.

The fourth branch describes the case when the actuator rod has taken up the position according to the specified pedal position. If none of the conditions $U_{FB} > U_{RS} + \delta_1$ and $U_{FB} < U_{RS} - \delta_2$ is fulfilled, the ECU concludes that the rod has reached the position specified by the operator. The system is at rest before the change U_{RS} , there is no voltage on both electro-pneumatic valves.

During the operation of the algorithm the ECU conducts a constant scanning of pedal position and rod position sensors at the set frequency. Making a comparison of these signals directly to each other is not possible either in analogue or in digital forms. This is due to such two factors:

- a range of the signal change from the feedback sensor during the total travel of the actuator differs in 2.5–3 times from the signal coming from the pedal position sensor;

- a range of the signal change from the feedback sensor while in operation constantly shifts, due to the wear of the clutch friction facings.

Correct comparison of two signals is possible only in percentage terms. It is suggested to perform the determination of the current range limits of the feedback sensor operation in the calibration mode. This mode is activated automatically at each loading of the ECU. When the driver presses the clutch pedal for the first time, the system memorizes two extreme points of the voltage range from the feedback sensor and then interprets them as a maximum and a minimum.

The required parameters of the null zone δ_1 and δ_2 are chosen in terms of ensuring steady operation of the system and the required precision of ACCS operation.

For the correct operation of the automated control system ACCS it is necessary to ensure a high degree of signal reliability and smoothness of the pedal position and the actuator rod incoming from the sensors to the ECU. When using sensors without high protection, noise can be made by any accidental event such as an electric discharge. In this case the signal can acquire a deliberately impossible false meaning. In order to exclude the influence of this false value on the operation of the control system, it is necessary to elimina te it from the data array incoming in the ECU. The easiest and the most convenient way to do this is to use a filter.

There are two types of filter forms: hardware and software. Hardware filters are implemented on the elements of integrated circuits, while the digital ones – using programs executed by the processor or microcontroller. The advantage of software filters prior to hardware ones is the ease of implementation, configuration and change. Application of a software filter does not result in increasing the price of the ECU as a whole because it does not require additional components.

Many types of digital software filters are known. The median filter providing a high degree of protection against erroneous values while not slowing down the ECU was selected for implementing in the developed automated control system ACCS.

Median filtering is a method of nonlinear signal processing, developed by J. Tuckey in 1971.

The principle of filtering

The median of the numerical sequence x_1 , x_2 , ..., x_n , when *n* is odd, is the average term of the series obtained by arranging this sequence in increasing (or decreasing) order [15].

The central value is substituted by the obtained average value in the window for the processed signal. Thereby the median filter belongs to nonlinear filters replacing anomalous points and spikes by the median values regardless of their peak values. It is steady and capable of removing even spikes enormously large by value.

The median filtering algorithm excludes isolated spikes, both negative and positive, that are on the edge of the ranked list from the signals effectively. Taking into consideration the list ranking the median filters suppress some noise and interference with the length less than half the window. A permanent point is a sequence (in a one-dimensional case) or an array (in a two-dimensional case) that do not change with median filtering. Due to this feature, median filters with optimally selected number of elements can store preserved edges of objects, obstacles and small dimensional details without changes. Under similar conditions, linear filtering algorithms inevitably smooth out the sharp edges and forms of objects.

Different strategies of implementing a median filter for noise suppression are possible. One of them recommends starting with a median filter, whose window covers three elements of the input data array. If the signal attenuation is insignificant, the filter window is expanded to five elements.

This is done as long as median filtering starts to do more harm than good. Another possibility is to implement a cascade median filtering of the signal using a fixed or variable window width. In general those areas having been constant after a single filter treatment are not changed after reprocessing. The areas where the pulse signal duration is less than half the width of the window will be changed after each processing cycle.

Advantages of median filters:

- a simple filter structure;

a filter does not change step and powder functions;

- a filter suppresses single impulse interference and accidental noise spikes.

Disadvantages of median filters:

– median filtering is nonlinear because the median of the sum of two random sequences does not equal the sum of their medians, that in some cases can complicate the mathematical analysis of signals;

- a filter causes the flattening of vertices of triangular functions;

- delays in one reading with continuously increasing input values.

An example of signal processing by five points:

 $x[7] = x_i; x_{i-1}; x_{i-2}; x_{i-3}; x_{i-4}; x_{i-5}; x_{i-6} - an input data array obtained directly from the sensor;$

 $XFm[5] = XFm_{i-2}; XFm_{i-3}; XFm_{i-4}; XFm_{i-5}; XFm_{i-6} - a data array for the median filter.$

Median filtering can be recursive and nonrecursive. Non-recursive filtering processes only input array data

 $XFm_{i-4} = mediana(x_{i-2}; x_{i-3}; x_{i-4}; x_{i-5}; x_{i-6}).$ (1)

Recursive filtration processes both input and filtered array data at the same time

$$XFm_{i-4} =$$
= mediana(XFm_{i-2}; XFm_{i-3}; x_{i-4}; x_{i-5}; x_{i-6}). (2)

Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018) A data array for derivative of rod travel

$$\frac{\Delta XFm}{\Delta t} [3] = XFm_4; XFm_{i-5}; x_{i-6}.$$
 (3)

Five-point differentiation with simultaneous using the filter

$$\frac{\Delta XF_{i-4}}{\Delta t} = \frac{(XFm_{i-2} - XFm_{i-6}) + (XFm_{i-3} - XFm_{i-5})}{5(t_i - t_{i-1})},$$
(4)

where i - a quantization step.

The displacement of the derivative relative to the real time will be four steps of quantization, for a predicted sampling rate of 200 Hz this will be approximately 0.02 s.

CONCLUSIONS

1. It has been proved that the two modes for controlling the electropneumatic valves to ensure an actuator rod rapid movement and its accurate positioning are necessary.

2. The use of electropneumatic valves with reaction time of 0.03 s enables us to achieve a rod positioning accuracy of 0.59 mm, this rate allows to reduce the control system dead space by 2.7 %.

3. Rapid rod movement from the spot is possible due to the control pulse delivery to the magnetic coil for 0.07 s.

4. Unlike existing commercial clutch control systems, this system enables to perform the functions using only two electropneumatic valves¹.

REFERENCES

- Zakharik Y. M. (2003) Clutch actuators with electronic control. *Avtomobil'naya Promyshlennost'* [Automotive Industry], (9), 28–30 (in Russian).
- Catalog "Electromagnetic Pneumatic Valves of KEM type". *Association "Rodina"*. Available at: http://www.rodinatech.ru (in Russian).
- 3. Bronshtein M. I. (2001) *Electronic Control of the Engine, Transmission and Chassis of the Car.* Kharkov, Kharkiv National Automobile and Highway University. 150 (in Russian).

- Bukharin N. A., Prozorov V. S., Schukin M. M. (1973) Cars. Construction, Load Modes, Work Processes, Strength of Car Assemblies. Textbook for High Schools. Moscow, Mashinostroenie Publ. 504 (in Russian).
- Girutskiy O. I., Esinovskiy-Lashkov Y. K., Polyak D. G. (2000) *Electronic Control Systems for Car Aggregates*. Moscow, Transport Publ. 213 (in Russian).
- Rumyantseva L. A. (1975) Design of Automated Automobile Clutches. Moscow, Mashinostroenie Publ. 176 (in Russian).
- Bogomolov V. O., Klimenko V. I., Mikhalevich M. G., Yarita O. O. (2015) *Accelerator Valve*. Pat. 109503 Ukraine (in Ukraine).
- Bogomolov V. A., Klimenko V. I., Mikhalevich N. G., Yarita A. A. (2014) The Choice of the Method for Controlling the Work Process and the Construction of an Algorithm for Controlling the Electro-Pneumatic Clutch Drive. *Visnik Kharkivs'kogo Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu imeni Petra Vasilenka* [Bulletin of the Kharkiv National Technical University of the Iman Petra Vasylanka.], 155, 14–20 (in Russian).
- Kusyak V. A., Rushtel O. S. (2015) Design of Automated Mechatronic Control Systems for the Power Unit of Trucks and Road Trains. Minsk, Belarusian National Technical University. 295 (in Russian).
- Bogomolov V. A., Klimenko V. I., Alekseev R. V. (2012) *Amplifier for Drive of Motor Vehicle Clutch*. Pat. 100908 Ukraine (in Ukraine).
- Gerts E. V. (1968) *Pneumatic Actuators*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 359 (in Russian).
- 12. Metlyuk N. F., Avtushko V. P. (1980) *Dynamics of Pneumatic and Hydraulic Actuators Cars.* Moscow, Mashinostroenie Publ. 232 (in Russian).
- Turenko A. N., Mikhalyevych N. G., Leontiev D. N. (2015) *Implementation of Intelligence Functions in Electronic- Pneumatic Brake Control of Vehicles*. Kharkov, Kharkiv National Automobile and Highway University, 2015. 450 (in Russian).
- 14. Lomaka S. I., Ryzhih L. A., Leontiev D. N., Cheban A. A., Krasyuk A. N. (2009) Automatic Control Systems and Practical Implementation of the Control Algorithm. Vestnik Nacional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta "HPI". Informatika i Modelirovanie = Bulletin of the National Technical University "KhPI". A series of "Information and Modeling", 47, 9–18 (in Russian).
- Gruzman I. S., Kirichuk V. S., Kosykh V. P., Peretyagin G. I. (2000) *Digital Processing of Images in Information Systems*. Novosibisrk, Novosibirsk State Technical University. 168 (in Russian).

Received: 25.10.2017 Accepted: 08.01.2018 Published online: 29.01.2018

¹ The authors are grateful to the PJSC Volchansk Aggregate Plant for their contribution in the creation of the ACCS executive device pilot model and KhNAHU for providing the test-bench device to carry out experimental research.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ELECTRONIC SYSTEMS

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-72-78

УДК 621.382.33.073.1 (045) (476)

Усовершенствованный технологический маршрут формирования биполярного транзистора со статической индукцией

Н. Л. Лагунович¹⁾

¹⁾Филиал Научно-технический центр «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018 Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Усовершенствованный маршрут отличается от уже известных тем, что при формировании охранного кольца и металлических контактов используется один и тот же фотошаблон. Это позволило не только сократить количество используемых фотошаблонов, но и получить прибор с требуемыми электрическими характеристиками. Приводятся результаты технологического и приборного моделирования биполярного транзистора со статической индукцией, изготовленного по усовершенствованному маршруту, и данные измерений электрофизических параметров его экспериментальных образцов, а также сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. На сегодняшний день существует большое количество программных продуктов, позволяющих выполнять физико-топологическое моделирование полупроводниковых структур. Частью такого моделирования является приборнотехнологическое, которое еще до получения экспериментальных образцов дает возможность определить, при каких параметрах технологического процесса исследуемая структура будет обладать необходимыми электрическими параметрами и характеристиками. Таким образом, приборно-технологическое моделирование представляет собой некое «виртуальное производство» по изготовлению полупроводниковых приборов и микросхем, начиная от этапа запуска полупроводниковой пластины на производстве и заканчивая измерениями электрических характеристик полученной структуры. В настоящей работе приборное моделирование биполярного транзистора со статической индукцией, являющееся аналогом прямых измерений вольт-амперной характеристики, выполнено с помощью разработанного автором комплекса программ MOD-1D. В основе расчетов прямой ветви вольт-амперной характеристики биполярного транзистора и ее параметров лежит модель, базирующаяся на фундаментальной системе уравнений полупроводника, а процесс рекомбинации носителей заряда описывается выражением Шокли – Рида – Холла и уравнением, отображающим процесс Оже-рекомбинации.

Ключевые слова: биполярный транзистор со статической индукцией, технологический маршрут, физико-топологическое моделирование, приборно-технологическое моделирование, «виртуальное производство», охранное кольцо, металлический контакт, пороговое напряжение

Для цитирования: Лагунович, Н. Л. Усовершенствованный технологический маршрут формирования биполярного транзистора со статической индукцией / Н. Л. Лагунович // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 72–78. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-72-78

Improved Process Flow for Formation of Bipolar Static Induction Transistor

N. L. Lagunovich¹⁾

¹⁾Affiliated Scientific and Technical Center "Belmicrosystems", OJSC "INTEGRAL" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The improved process flow differs from the known ones in the fact that the same photomask is used for formation of a channel stopper and metal contacts. Such approach has made it possible not only to decrease a number of the used photo-

Адрес для переписки Лагунович Наталия Леонидовна Филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» ул. Корженевского, 12, 220108, г. Минск, Республика Беларусь Тел.: +375 17 278-65-87 n_dudarby@tut.by Address for correspondence Lagunovich Nataliya L. Affiliate RDC "Belmicrosystems" OJSC "INTEGRAL" 12 Kozgenevskogo str., 220108, Minsk, Republic of Belarus Tel: +375 17 278-65-87 n_dudarby@tut.by

> Наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) Science and Technique. V. 17, No 1 (2018)
tomasks but it has also permitted to obtain a device with the required electrical characteristics. The paper presnts results of device and process simulation of bipolar static induction transistor (BSIT) manufactured in accordance with the improved process flow, measuring data of electrophysical parameters of its experimental samples and also comparison of simulation results with experimental data. At present there is a large quantity of software products that permit to perform physico-topological simulation of semiconductor structures. The device-process simulation is considered as a part of such simulation and it allows prior to obtaining experimental samples to determine process flow parameters at which the investigated structure will have necessary electrical parameters and characteristics. Thus the device-process simulation represents a certain "virtual production" for manufacturing semiconductor devices and microcircuits beginning from the startup stage of semiconductor wafer at production site and finishing by electrical characteristics measurements of the obtained structure. The BSIT device simulation being an analog of direct measurements of current-voltage characteristics has been performed with help of program system MOD-1D developed by the author. The BSIT model based on the fundamental system of semiconductor equations is mainly used for calculation of the BSIT current-voltage characteristics direct branch and its parameters and charge carrier recombination is described by Shockley – Read – Hall expression and equation depicting the Auger recombination process.

Keywords: bipolar static induction transistor, process flow, physic-topological simulation, device-process simulation, "virtual production", channel stopper, metal contact, threshold voltage

For citation: Lagunovich N. L. (2018) Improved Process Flow for Formation of Bipolar Static Induction Transistor. *Science and Technique*. 17 (1), 72–78. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-72-78 (in Russian)

Введение

Биполярные транзисторы со статической индукцией (БСИТ) [1, 2] представляют собой структуры, пригодные для работы в условиях относительно высоких мощности, температуры и частоты (в рассматриваемом случае до 10 Вт, 85 °С и 100 кГц), которые могут применяться как в качестве дискретных приборов, так и в составе высоковольтных схем различного назначения. Один из общих недостатков БСИТ - сложная технология их изготовления. Целью данной работы является упрощение существующего технологического маршрута формирования БСИТ с пробивным напряжением коллектор – эмиттер более 100 В при токе коллектора 50 мкА, напряжением насыщения коллектор – эмиттер не более 0,3 В при токе коллектора 5,0 А и токе базы 2,5 мА [1], определение электрофизических параметров и характеристик исследуемого транзистора с помощью его приборно-технологического моделирования [3, 4] и тем самым установление степени влияния изменения технологического маршрута на поведение и параметры вольтамперной характеристики (ВАХ) прибора. Моделирование полупроводниковых структур позволяет снизить затраты на изготовление экспериментальных образцов и оптимизировать параметры элементов интегральных схем и приборов [5-9]. На сегодняшний день существует большое количество программных продуктов, позволяющих выполнять физико-топологическое моделирование полупроводниковых структур [8], которое дает возможность определить электрофизические параметры полупроводниковых структур расчетным методом до этапа изготовления экспериментальных образцов, т. е. заменить прямые измерения электрических характеристик приборов на виртуальные.

Структура биполярных транзисторов со статической индукцией

Биполярные транзисторы со статической индукцией представляют собой приборную структуру с коротким каналом, работающую на полевом эффекте. Конструкция исследуемого БСИТ показана на рис. 1; коэффициент усиления такого транзистора при включении по схеме с общим эмиттером не менее 200, пробивное напряжение коллектор – эмиттер должно превышать 100 В, напряжение коллектор – эмиттер в режиме насыщения менее 0,3 В. Структура данного транзистора создается на кремниевой пластине с эпитаксиальным слоем. Область р-базы формируется путем разгонки примеси бора при температуре (1200 \pm 2) °С после ионного легирования. Области *р*-базы и *р*⁺-омических контактов к ней формируются посредством ионного легирования бором через маску нитрида кремния, а n^+ -область эмиттера создается посредством ионного легирования мышьяком в свободную от локального окисла поверхность кремния. Локальный окисел обеспечивает надежную изоляцию p^+ - и n^+ -областей друг от друга. После формирования областей р-базы и n^+ -эмиттера наносится слой поликремния. Роль коллектора в описываемой структуре выполняют эпитаксиальный слой и сама кремниевая пластина.



Puc. 1. Структура биполярного транзистора со статической индукцией *Fig.* 1. Bipolar static induction transistor structure

Получить структуру, изображенную на рис. 1, можно, в частности, с помощью технологического моделирования, которое в настоящей работе выполнялось при помощи программы SUPREM3 фирмы Silvaco [3]. Вольт-амперные характеристики данной структуры получены путем ее приборного моделирования, осуществленного при помощи программы MOD-1D [4], разработанной автором статьи.

Модифицированный маршрут формирования биполярных транзисторов со статической индукцией

С целью получения конструкции биполярного транзистора со статической индукцией, изображенной на рис. 1, разработан технологический маршрут ее изготовления, о котором сообщается в [1]. Однако, как известно, одним из общих недостатков транзисторов со статической индукцией является высокая сложность технологии их изготовления. В данной работе ставилась задача упростить способ изготовления БСИТ с заданными электрическими характеристиками и тем самым снизить себестоимость прибора. Один из методов упрощения маршрута формирования исследуемого транзистора – повторное использование фотошаблона, предназначенного для формирования металлизации, как на фотолитографии, когда требуется стравить слой фоторезиста в области охранного кольца, так и на фотолитографии для формирования металлических контактов к базе и эмиттеру БСИТ.

Наличие охранных колец по периметру прибоpa позволяет повысить его належность за счет повышения пробивных напряжений. При формировании охранных колец транзистора используется фоторезист, по маске которого выполняется ионное легирование примесью р-типа в эпитаксиальную пленку п-типа,

причем в области охранного кольца должен отсутствовать металл, который вытравливается также по маске фоторезиста, что делает возприменение одного и того можным же фотошаблона как для создания охранных колец по периметру транзистора, так и для формирования слоя металлизации при создании контактов к n^+ - и p^+ -областям. При создании области охранного кольца фоторезист, нанесенный на поверхность эпитаксиальной пленки *п*-типа, вытравливается по периметру транзистора. Далее в свободные от фоторезиста области в эпитаксиальную пленку выполняется ионное легирование примесью р-типа. При формировании металлических контактов к базе и эмиттеру на напыленный на поверхность полупроводника металл наносится фоторезист, который вытравливается также по периметру прибора; далее по вытравленным участкам удаляется металл, что позволяет использовать один и тот же фотошаблон при формировании охранного кольца и металлических контактов к базе и эмиттеру. Таким образом, количество применяемых фотошаблонов уменьшается, а следовательно, снижаются затраты на их изготовление. Основные этапы формирования исследуемой структуры БСИТ, использовавшиеся как ранее [1], так и в предлагаемом усовершенствованном технологическом маршруте изготовления, приведены на рис. 2.



Рис. 2. Основные этапы формирования биполярных транзисторов со статической индукцией (БСИТ):
а, с – ранее использовавшийся маршрут изготовления БСИТ; b, d – усовершенствованный маршрут изготовления БСИТ
Fig. 2. Main stages for Bipolar static induction transistor (BSIT) formation:
a, с – previous route used for manufacturing bipolar static induction transistor (BSIT);
b, d – improved route for manufacturing bipolar static induction transistor (BSIT)

Способ изготовления исследуемого транзистора включает в себя следующие основные этапы:

1) в использовавшемся ранее маршруте изготовления на подложке n^+ -типа 1 наращивалась эпитаксиальная пленка n-типа 2, куда наносился слой фоторезиста 3, в котором формировалась маска по фотошаблону для создания охранного кольца «Охрана», по которой путем ионного легирования бором и его последующей разгонки создается охранное кольцо p^+ -типа 4 (рис. 2а); в усовершенствованном маршруте изготовления при создании охранного кольца p^+ -типа 4 (рис. 2b) маска в фоторезисте 3 формируется по фотошаблону для создания металлизации «Металл»;

2) по маске нитрида кремния с помощью ионного легирования бором и его последующей разгонки формируются база *p*-типа 5 и омические контакты p^+ -типа 6 к базе, а после выращивания по маске нитрида кремния локального и разделительного окислов 7 в свободных от окисла областях кремния путем ионного легирования мышьяком и его последующей разгонки формируется эмиттер транзистора n^+ -типа 8, как показано на рис. 2с, d;

3) далее наносится слой поликремния 9 с целью формирования контакта к эмиттеру, после чего напыляется слой металла 10, в котором по маске фоторезиста, проявленного по фотошаблону для формирования металлизации «Металл», создаются металлические контакты к областям базы и эмиттера, металлический контакт к коллектору 11 формируется путем напыления металла на непланарную сторону пластины (рис. 2с, d).

В ранее использовавшемся маршруте количество применяемых фотошаблонов равно семи, а в предлагаемом – шести, что приводит к снижению стоимости их комплекта на 16,7 %, причем уменьшение количества фотошаблонов в предлагаемом маршруте приводит к снижению затрат на их создание, а следовательно, себестоимости кристаллов. Технологическое и приборное моделирование транзистора, проведенное еще до создания экспериментальных образцов БСИТ по усовершенствованному маршруту, выполнено с целью установления того, дает ли возможность улучшенная технология получать приборы с требуемыми параметрами как в дискретном исполнении, так и в составе интегральных микросхем различного назначения.

Результаты технологического моделирования биполярных транзисторов со статической индукцией

Частью физико-топологического моделирования [8] является приборно-технологическое, которое еще до создания экспериментальных образцов позволяет определять такие параметры технологического процесса изготовления, при которых исследуемая структура будет обладать необходимыми электрическими параметрами и характеристиками. Таким образом, приборно-технологическое моделирование на сегодняшний день зачастую представляет собой некое «виртуальное производство» по изготовлению полупроводниковых приборов и микросхем, начиная от этапа запуска полупроводниковой пластины на производстве и заканчивая измерением электрических характеристик полученной структуры.

В данном разделе представлены результаты технологического моделирования усовершенствованного маршрута формирования кремниевого БСИТ, выполненные с помощью программного пакета SUPREM3 фирмы Silvaco [3] и послужившие входными данными для дальнейшего приборного моделирования транзистора, описанного далее. Расчеты выполнялись в одномерном пространстве вдоль координаты X (рис. 1), по которой чередуются области типов p^+ , p, n и n^+ .

С помощью пакета SUPREM3 получены профили распределений легирующих примесей в направлении Х, которые и явились исходными данными для выполнения приборного моделирования. Глубина залегания рассчитанного *р*-*п*-перехода эмиттер – база в моделируемой структуре составила ~2,5 мкм, глубина залегания перехода база – коллектор ~4,8 мкм. Максимальная концентрация примеси р-типа примерно 8,65 · 10¹⁵ см⁻³ в области базы 7 (рис. 2) находится на глубине около 2,84 мкм; максимальная концентрация примеси *п*-типа $1.38 \cdot 10^{20}$ см⁻³ в области эмиттера 10 (рис. 2) находится на глубине ~0,64 мкм. Концентрация легирующей примеси *п*-типа в области эмиттера значительно выше концентрации легирующей примеси р-типа в области базы. При заданных соотношениях концентраций легирующих примесей *n*- и *p*-типов коэффициент усиления транзистора при включении его по схеме с общим эмиттером составляет более 200. Таким образом, конструктивные параметры структуры исследуемого БСИТ были определены еще до выполнения прямых измерений на его экспериментальных образцах.

Модель биполярного транзистора со статической индукцией

Приборное моделирование исследуемого в данной работе транзистора, исходными данными для которого послужили конструктивнотехнологические параметры структуры БСИТ, описанные в предыдущем разделе, реализовано с помощью разработанного автором комплекса программ MOD-1D [4]. В основе одной из программ указанного комплекса лежит авторская одномерная модель БСИТ, базирующаяся на фундаментальной системе уравнений полупроводника, в состав которой входят:

• уравнение Пуассона

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \left(p - n + N_d - N_a \right), \qquad (1)$$

где φ – электростатический потенциал; x – координата; q – заряд электрона; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; p, n – концентрация электронов и дырок соответственно; N_d , N_a – концентрация доноров и акцепторов;

• уравнения непрерывности для электронов и дырок:

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} - qR - q\frac{\partial n}{\partial t} = 0; \qquad (2)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} + qR + q\frac{\partial p}{\partial t} = 0, \qquad (3)$$

где J_n , J_p – электронная и дырочная составляющие тока; R – скорость рекомбинации носителей заряда; t – время.

Предполагается, что механизм рекомбинации как в объеме, так и на поверхности полупроводника описывается уравнением Шокли – Рида – Холла с учетом выражения Ожерекомбинации [9]

$$R = \left(pn - n_i^2\right) \times \left(\frac{1}{\tau_n(p + n_i) + \tau_p(n + n_i)} + c_n n - c_p p\right), (4)$$

где n_i – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике; τ_n , τ_p – время жизни электронов и дырок; c_n , c_p – коэффициенты Оже-рекомбинации.

Приборное моделирование в рассматриваемом случае, представляющее собой решение

системы уравнений (1)–(4), может быть выполнено только численным способом. Оно осуществлялось методом Гуммеля [6], на каждой итерации численной реализации которого выражения (1)–(4) в дискретной форме решались методом Гаусса [7, 10].

Результаты приборного моделирования биполярного транзистора со статической индукцией

С помощью приборного моделирования исследуемого БСИТ проведены расчеты распределений токов вдоль направления Х и вольтамперной характеристики прибора (рис. 3). Выполнено моделирование только той части структуры, которая работает непосредственно как биполярный транзистор. При расчетах толщина эпитаксиальной пленки, в которой была сформирована структура БСИТ, составляла 30 мкм, а ее удельное сопротивление $\rho_v = 6$ Ом·см. Подложка, на которой наращена эпитаксиальная пленка, имеет удельное сопротивление $\rho_v = 0.01$ Ом-см и толщину 460 мкм. Таким образом, в условиях низкого уровня инжекции можно пренебречь сопротивлением, которое вносит подложка в общее сопротивление БСИТ, а та часть структуры, которой пренебрегалось при моделировании, может рассматриваться просто как резистор с очень низким сопротивлением, включенный последовательно с транзистором.



Рис. 3. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости тока эмиттера биполярных транзисторов со статической индукцией от напряжения база – эмиттер при напряжении база – коллектор U_{бк} = 3 В

Fig. 3. Calculation (1) and experimental (2) dependences of BSIT emitter current on base-to-emitter voltage at base-to-collector voltage $U_{bc} = 3$ V

| Наука | 1 | | |
|-------------|------------|------------|---------|
| итехника. | T. 17, № | 1 (2018 | 3) |
| Science and | Technique. | V. 17. No. | 1 (201) |

Предполагалось, что моделируемый транзистор включен по схеме с общей базой, а токи, протекающие через него, при малом смещении перехода база – эмиттер (0-0,5 В) будут очень малы (рис. 3, кривая 1). По мере увеличения напряжения база – эмиттер U_{бэ} потенциал на эмиттере понижается по отношению к потенциалу базы. В результате потенциальный барьер для подвижных носителей заряда на переходе эмиттер – база понижается, что приводит к росту концентрации дырок в эмиттере *п*-типа и росту концентрации электронов в базе р-типа. В целом с ростом U_{62} при обратно смещенном переходе база – коллектор ($U_{\delta \kappa} = 3$ В) транзистор постепенно открывается, и ток эмиттера растет по экспоненциальному закону (рис. 3).

По предлагаемому в статье технологическому маршруту изготовления БСИТ получены экспериментальные образцы прибора и измерена его ВАХ (рис. 3, кривая 2) для случая диодного включения транзистора (коллектор соединен с базой). Полученное в результате прямых измерений пороговое напряжение БСИТ Uпор.э при токе эмиттера 100 мА составило 0,72 В (рис. 3, кривая 2). Активная площадь исследуемого транзистора 3×3 мм², т. е. при токе эмиттера 100 мА плотность тока составит 1 А/см² (рис. 3, вставка). Тогда U_{пор.р}, полученное при расчетах, будет равно 0,61 В, как видно из рис. 3, а разница между расчетными и экспериментальными данными составит 0,11 В, что соответствует допустимым отклонениям.

выводы

1. Выполнено приборно-технологическое моделирование биполярного транзистора со статической индукцией и разработан усовершенствованный технологический маршрут изготовления, заключающийся в использовании одного и того же фотошаблона на этапах формирования охранного кольца и металлических контактов, что позволило сократить количество используемых фотошаблонов при сохранении требуемых электрических характеристик прибора.

2. Технологическое моделирование биполярного транзистора со статической индукцией, выполненное с помощью пакета SUPREM3, позволило определить конструктивные параметры прибора еще до этапа создания его экспериментальных образцов, заменив тем самым прямые измерения его конструктивных параметров. Распределения примесей и потенциала по структуре биполярного транзистора со статической индукцией, полученные в результате технологического моделирования, послужили исходными данными для приборного моделирования транзистора, выполненного с помощью разработанной автором программы MOD-1D.

3. По усовершенствованному технологическому маршруту изготовлены экспериментальные образцы биполярного транзистора со статической индукцией и измерены его электрические характеристики. Сопоставление результатов моделирования с измеренными электрическими характеристиками экспериментальных образцов показывает возможность получения изготовленного по предлагаемому технологическому маршруту кремниевого биполярного транзистора со статической индукцией с требуемыми вольт-амперными характеристиками. Таким образом, установлено, что усовершенствование технологического маршрута изготовления биполярного транзистора привело к снижению стоимости комплекта фотошаблонов и затрат на технологический процесс в целом, не оказало существенного влияния на конструктивные и электрические параметры прибора и позволило получить транзисторы с требуемыми электрическими характеристиками.

4. Описанный способ усовершенствования технологического маршрута изготовления применен по отношению к структуре биполярного транзистора со статической индукцией с заданными конструктивными и электрическими параметрами. Однако применение такого упрощения согласуется с принципами масштабирования и возможно при изготовлении как менее высоковольтных приборов с меньшими размерами, так и более мощных приборов, обладающих более крупными размерами.

ЛИТЕРАТУРА

- Дудар, Н. Л. Моделирование кремниевого транзистора со статической индукцией / Н. Л. Дудар // Доклады Белор. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. 2005. № 2 (10). С. 79–85.
- Исмаилов, Т. А. Технологическое решение по улучшению параметров кристалла биполярного со статической индукцией транзистора / Т. А. Исмаилов, А. Р. Шахмаева, П. Р. Захарова // Вестник Дагест. гос. техн. ун-та. 2011. Т. 20, № 1. С. 6–11.
- 3. Silvaco [Electronic Resource]. Mode of access: http://www.sil vaco. com/products/tcad.html.
- Компьютерная программа MOD-1D: св-во о гос. рег. № 742 Респ. Беларусь / Н. Л. Лагунович; заявитель ОАО «ИНТЕГРАЛ», № t 20140041; зап. в Реестре, зарегистрированных в Нац. центре интеллект. собств. комп. программ 10.03.2015.

- МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / под ред. П. Антонетти [и др.]: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 490 с.
- Gummel, H. K. A Self Consistent Iterative Scheme for One-Dimentional Steady State Transistor Calculations / H. K. Gummel // IEEE Trans. Electron. Dev. 1964. Vol. ED-11, No 10. P. 455–465. DOI: 10.1109/t-ed.1964. 15364.
- Польский, Б. С. Численное моделирование полупроводниковых приборов / Б. С. Польский. Рига: Зинатне, 1986. 168 с.
- Автоматизация проектирования БИС: в 6 кн. / под ред. Г. Г. Казеннова. М.: Высш. шк., 1990. Кн. 5: Физикотопологическое моделирование структур элементов БИС / В. Я. Кремлев. 144 с.
- 9. Нелаев, В. В. Основы САПР в микроэлектронике / В. В. Нелаев, В. Р. Стемпицкий. Минск: БГУИР, 2008. 220 с.
- Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. М.: Наука, 1978. 532 с.

Поступила 14.03.2017 Подписана в печать 17.06.2017 Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

- 1. Dudar N. L. (2005) Modeling of Silicon Transistor with Static Induction. *Doklady BGUIR*, 10 (2), 79–85 (in Russian).
- Ismailov T. A., Shakhmaeva A. R., Zakharova P. R. (2011) Technological Solution on Improvement of Parameters Pertaining to Bipolar Chips with Satic Induction of Transistor. *Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Herald of Dagestan State University*, 20 (1), 6–11 (in Russian).
- Silvaco. Available at: http://www.sil vaco. com/products/ tcad.html.
- Lagunovich N. L. (2015) Computer Program MOD-1D. Certificate on State Registration No 742 Republic of Belarus (in Russian).
- Antonetti P., Antoniadis D., Datton R. (eds.) (1988) Process and Device Simulation for MOS-VLSI Circuits. Moscow, Radio i Svyaz Publ. 490 (in Russian).
- Gummel H. K. (1964) A Self Consistent Iterative Scheme for One-Dimentional Steady State Transistor Calculations. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 11 (10), 455–465. DOI: 10.1109/t-ed.1964.15364.
- 7. Polsky B. S. (1986) *Numerical Simulation of Semiconductor Devices*. Riga, Znanie Publ. 168 (in Russian).
- Kremlev V. Ya., Kazennov G. G. (1990) Automation of BIS Design. Book 5: Physical and Topological Simulation of LSI-Element Structures. Moscow, Vysshaya Shkola. 144 (in Russian).
- Nelaev V. V., Stempitsky V. R. (2008) Fundamentals of Computer Aided Design Systems in Micro-Electronics. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 220 (in Russian).
- Samarsky A. A., Nikolaev E. S. (1978) *Methods for Solution of Finite-Difference Equations*. Moscow, Nauka Publ. 532 (in Russian).

Received: 14.03.2017 Accepted: 17.06.2017 Published online: 29.01.2018

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86

УДК 681.723.078, 681.775.078, 681.777.078

Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах

Асп. Н. О. Старосотников¹⁾, канд. техн. наук, доц. Р. В. Фёдорцев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018 Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В метрологических оптико-электронных системах, таких как автоколлиматоры, звездные датчики, датчики Шака-Гартмана, в схемах геометрической калибровки цифровых фотокамер для аэро- и космической съемки, в различных системах следящего типа, основанных на определении координат изображений простых форм, одним из важных и существенных параметров является точность определения этих координат. В статье приводится описание математической модели измерительного стенда на базе коллиматора, проецирующего тест-объект на фотоприемник оптико-электронного прибора. Математическая модель учитывает характерные шумы для фотоприемников: дробовый полезного сигнала (фотонный) и дробовый темнового сигнала, считывания и пространственную неоднородность элементов ПЗС-матрицы. С целью снижения влияния шумов предлагается применять фильтр Винера для сглаживания изображения и однозначной его идентификации, а также вводить порог по уровню яркости. Приводится сравнение двух алгоритмов определения координат по энергетическому центру тяжести и по контуру. При определении контура тест-объекта использовались детекторы Собела, Прюитт, Робертса, лапласиана гауссиана, Канни. Сущность алгоритма определения координат заключается в поиске контура изображения в виде окружности с последующей его аппроксимацией и определением центра изображения. Произведен расчет погрешности определения координат центра тяжести для тест-объектов различных диаметров (5, 10, 20, 30, 40, 50 пикс) фотоприемника, а также значений отношения сигнал/шум 200, 100, 70, 20, 10. Отношение сигнал/шум рассчитывалось как разница максимальной интенсивности изображения тест-объекта и фона, деленная на среднеквадратическое отклонение фона. С увеличением отношения сигнал/шум улучшается точность определения координат на 0,5-1 порядок. Улучшение точности с увеличением диаметра тест-объекта характерно для больших отношений сигнал/шум: 70 и более. На основании проведенных исследований установлено, что алгоритм определения координат по энергетическому центру тяжести является более точным по сравнению контурными методами и требует меньших вычислительных мощностей (для программного пакета MatLab), что связано с дискретностью при определении контура.

Ключевые слова: аппроксимация окружностью, коллиматор, определение контуров изображений, оптико-электронный прибор, фотоприемник, центр тяжести

Для цитирования: Старосотников, Н. О. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 79–86. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86

Accuracy Comparison of Algorithms for Determination of Image Center Coordinates in Optoelectronic Devices

M. A. Starasotnikau¹⁾, R. V. Feodortsau¹⁾

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

Abstract. Accuracy in determination of coordinates for image having simple shapes is considered as one of important and significant parameters in metrological optoelectronic systems such as autocollimators, stellar sensors, Shack-Hartmann

Адрес для переписки Фёдорцев Ростислав Валерьевич Белорусский национальный технический университет ул. Я. Коласа, 22, 220013, г. Минск, Республика Беларусь Тел.: +375 17 292-62-86 ltt@bntu.by Address for correspondence Feodortsau Rostislav V. Belarusian National Technical University 22 Ya. Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus Tel: +375 17 292-62-86 Itt@bntu.by

Электронные системы

sensors, schemes for geometric calibration of digital cameras for aerial and space imagery, various tracking systems. The paper describes a mathematical model for a measuring stand based on a collimator which projects a test-object onto a photodetector of an optoelectronic device. The mathematical model takes into account characteristic noises for photodetectors: a shot noise of the desired signal (photon) and a shot noise of a dark signal, readout and spatial heterogeneity of CCD (charge-coupled device) matrix elements. In order to reduce noise effect it is proposed to apply the Wiener filter for smoothing an image and its unambiguous identification and also enter a threshold according to brightness level. The paper contains a comparison of two algorithms for determination of coordinates in accordance with energy gravity center and contour. Sobel, Pruitt, Roberts, Laplacian Gaussian, Canni detectors have been used for determination of the test-object contour. The essence of the algorithm for determination of coordinates lies in search for an image contour in the form of a circle with its subsequent approximation and determination of the image center. An error calculation has been made while determining coordinates of a gravity center for test-objects of various diameters: 5, 10, 20, 30, 40, 50 pixels of a photodetector and also signalto-noise ratio values: 200, 100, 70, 20, 10. Signal-to-noise ratio has been calculated as a difference between maximum image intensity of the test-object and the background which is divided by mean-square deviation of the background. The accuracy for determination of coordinates has been improved by 0.5-1 order in case when there was an increase in a signal-to-noise ratio. Accuracy improvement due to increase of a diameter in a test-object is typical for large signal-to-noise ratios: 70 or more. The conducted investigations have made it possible to establish that the algorithm for determination of coordinates of the energy gravity center is more accurate in comparison with contour methods and requires less computing power (for the MatLab software package), which is related to discreteness while determining a contour.

Keywords: circle approximation, collimator, determination of image contours, optoelectronic device, photodetector, centre of gravity

For citation: Starasotnikau M. A., Feodortsau R. V. (2018) Accuracy Comparison of Algorithms for Determination of Image Center Coordinates in Optoelectronic Devices. *Science and Technique*. 17 (1), 79–86. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-79–86 (in Russian)

Введение

В основе математической обработки данных автоколлиматоров [1], звездных датчиков [2], датчиков Шака-Гартмана [3], схем геометрической калибровки оптико-электронных приборов [4], различных следящиих систем лежит определение координат изображения, спроецированного на фотоприемник оптико-электронного прибора. Для повышения точности измерений необходимо исследовать влияние различных параметров на точность определения координат изображения. В [5] исследованы алгоритм определения координат изображения по центру тяжести и способы повышения его точности. В [6] для калибровки цифровой камеры предложено предварительно определять контур проецируемого массива точек, а в последующем – их центры.

В данной работе исследуется точность алгоритма определения координат, заключающегося в определении контура изображения в виде окружности, аппроксимации данного контура и нахождении его центра, который в свою очередь совпадает с центром изображения. Определение контура выполнялось при помощи детекторов Собела, Прюитт, Робертса, лапласиана гауссиана, Канни. Данные детекторы наиболее часто используются в задачах цифровой обработки изображений для обнаружения границ по разрыву яркости [7]. В программном пакете MatLab математически смоделирована оптическая схема, состоящая из проецирующего тест-объект коллиматора на матричный фотоприемник оптико-электронного прибора. Коллиматор состоит из объектива и установленного в фокальной плоскости тест-объекта, который подсвечивается осветителем. Оптико-электронный прибор состоит из объектива и фотоприемника. Преднамеренное смещение тест-объекта коллиматора на доли пикселя фотоприемника приводит к ошибке определения соответствующего смещения на фотоприемнике, в первую очередь из-за дискретной структуры фотоприемника, а также шумов.

Описание математической модели

В основе исследований заложена математическая модель часто встречающейся схемы контроля, которая описана в [5]. Объектив коллиматора проецирует тест-объект в виде круга на фотоприемник оптико-электронного прибора. Для упрощения объективы коллиматора и оптико-электронного прибора идентичны, с фокусным расстоянием 1000 мм. Длина волны подсветки тест-объекта коллиматора 0,6 мкм. Расчет производился для тест-объектов диаметрами 5, 10, 20, 30, 40, 50 пикс фотоприемника. Размер пикселя фотоприемника 4,5 мкм. Шаг дискретизации в модели – 5 (0,9 мкм). Таким образом, на один пиксель фотоприемника приходится 5×5 элементов модели. Поскольку основная цель исследования состоит в оценке точности и сравнении по точности алгоритмов определения координат центров изображений, не учитывались температурный дрейф пикселей фотоприемника, аберрации и коэффициент пропускания оптических компонентов.

Смоделированный тест-объект проецируется объективом коллиматора в оптико-электронный прибор, объектив которого формирует изображение на фотоприемнике. В модели данные явления математически описаны операцией свертки функции, задающей рисунок тестобъекта, и функцией рассеяния точки объектива с наименьшим диаметром функции рассеяния точки. В данном случае, как сказано выше, объективы коллиматора и оптико-электронного прибора одинаковые, поэтому их функции рассеяния точки одинаковые.

В модели учитывались следующие шумы, характерные для современных промышленных цифровых камер: дробовый полезного сигнала (фотонный) и дробовый темнового сигнала, считывания и пространственная неоднородность элементов фотоприемника. Дробовый шум описывается распределением Пуассона, шум считывания – распределением Гаусса со среднеквадратическим отклонением (СКО) 15 электрон, темновой сигнал – 15 электрон. Пространственная неоднородность – 1 %. Также учитывалось квантование фотоприемником изображения тестобъекта. Шаг кантования – 10 бит.

Для снижения влияния шумов применялся фильтр Винера размером 5×5 пикс, а также вводился порог [8], значения яркости ниже которого принимались равными нулю. Величина порога была в 10 раз больше среднего значения фоновой яркости. Размер фильтра и величина порога определялись для достижения достоверного вычисления контуров, т. е. при данных значениях определяется только один замкнутый контур изображения тест-объекта. Помимо этого, такие меры повышают точность расчета центра тест-объекта по центру тяжести.

Выполнялось смещение изображения тестобъекта относительно матричной структуры фотоприемника. Из-за дискретности фотоприемника и шумов расчет смещения не соответствовал заданному смещению. Данная погрешность определяет точность, которая будет ос-

| наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) |) |
|--------------------------------------|-------|
| Science and Technique, V. 17, No 1 | (2018 |

...

новным критерием сравнения алгоритмов определения центра изображения. Погрешность является периодической и систематической [5]. Максимум погрешности приходится на 0,25 и 0,75 пикс смещения изображения тест-объекта относительно матричной структуры фотоприемника, минимум – на 0,5 и 1,0 пикс. Однако погрешность также носит случайный характер, поскольку неизвестно первоначальное расположение изображения тест-объекта относительно матричной структуры фотоприемника, и кроме как при математическом моделировании, невозможно предварительно ее исключить. Поэтому стоит задача в ее исследовании, поиске оптимального размера диаметра тестобъекта, других способов математической обработки для уменьшения погрешности.

Описание алгоритмов определения центра изображений

Алгоритм определения координат по центру тяжести осуществляется по следующей формуле

$$x_{0}, y_{0} = \frac{\sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{M} I_{n,m} n, m}{\sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{M} I_{n,m}}, \qquad (1)$$

где $I_{n,m}$ – величина яркости в пикселе *n*, *m*; *n*, *m* – порядковые номера пикселей по столбцам и строкам матрицы яркостей; *N*, *M* – общее число столбцов и строк матрицы яркостей.

С помощью (1) производится непосредственно оценка координат изображения тестобъекта, а также осуществляется интерполяция результатов измерений дискретной матричной структурой на внутренние точки интервалов дискретизации [5].

Алгоритм определения координат по контуру заключается в определении контура изображения и аппроксимации полученного контура геометрической фигурой с известными параметрами (центр, радиус), одни из которых будут центром изображения. В данной работе изображение на фотоприемнике в двухмерном представлении является кругом, тогда его контуром будет окружность, а центр окружности – центром изображения на фотоприемнике. Определение контура заключается в обработке изображения с фотоприемника скользящим детектором, что осуществляется путем свертки. От детектора будут зависеть форма и достоверность контура. Детекторы Собела, Прюитт, Робертса используют следующие фильтры для численного приближения производных [9] по соответствующим направлениям:

• Собела:

$$G_x, G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

• Прюитт:

$$G_x, G_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

• Робертса:

$$G_x, G_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Лапласиан гауссиана обнаруживает края, выполняя поиск пересечений нулевого уровня после фильтрации гауссианом. При использовании детектора Канни [10] изображение первоначально сглаживается гауссовым фильтром для уменьшения шума. В каждой точке вычисляются градиент и направление края. Точки перепада определяются как точки локального максимума градиента. Алгоритм отслеживает этот максимум и присваивает точкам вне максимума нулевые значения. Результатом является контур. Данный контур подвергается двухпороговой обработке, в результате добавляются дополнительные точки для формирования плавного контура. Результатом обработки изображения тест-объекта (рис. 1а) будут логические массивы данных, которые представлены на рис. 1b-1f.



Рис. 1. Представление изображения тест-объекта с указанием центра: а – изображение тест-объекта на фотоприемнике; b, c, d, e, f – результат обработки детекторами Канни, лапласиана гауссиана, Прюитта, Робертса и Собела соответственно

Fig. 1. Representation of test-object image with center indication:a – test-object image on photodetector; b, c, d, e, f – processing results while using Canny, Laplasian Gaussian, Pruitt, Roberts and Sobel detectors, respectively



Описание алгоритма аппроксимации окружностью

Массивы контуров, полученные при помощи применения разных детекторов, аппроксимировались окружностью, чтобы затем определить ее центр. Аппроксимация является минимизацией следующей суммы квадратов путем дифференцирования J по x_0 , y_0 и R [9], где суммирование ведется по всем контурным элементам:

$$J = \sum_{i=1}^{N} w_i \left(\left(x_i - x_0 \right)^2 + \left(y_i - y_0 \right)^2 - R^2 \right)^2,$$

где x_i , y_i — контурные элементы; w_i — вес контурного элемента, $i = 1 \dots n$.

Тогда x_0, y_0 и R задаются формулами:

$$x_{0} = \frac{ByCx - BxCy}{AxBy - AyBx}; \quad y_{0} = \frac{AyCx - AxCy}{AyBx - AxBy};$$
$$R^{2} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^{N} w_{i} \left((x_{i} - x_{0})^{2} + (y_{i} - y_{0})^{2} \right)^{2};$$

где

$$W = \sum_{i=1}^{N} w_{i}; \ \overline{x} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^{N} w_{i} x_{i}; \ \overline{y} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^{N} w_{i} y_{i};$$
$$Ax = \sum_{i=1}^{N} w_{i} (x_{i} - \overline{x}) x_{i}; \ Bx = \sum_{i=1}^{N} w_{i} (x_{i} - \overline{x}) y_{i};$$
$$Cx = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} w_{i} (x_{i} - \overline{x}) (x_{i}^{2} + y_{i}^{2});$$
$$Ay = \sum_{i=1}^{N} w_{i} (y_{i} - \overline{y}) x_{i}; \ By = \sum_{i=1}^{N} w_{i} (y_{i} - \overline{y}) y_{i};$$
$$Cy = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} w_{i} (y_{i} - \overline{y}) (x_{i}^{2} + y_{i}^{2}).$$

Влияние на точность аппроксимации различных факторов, вызывающих отклонение от окружности, может быть уменьшено путем присвоения элементам контура весов w_i . В первоначальной итерации веса всех элементов контура будут равны 1. Затем все контурные точки повторно оцениваются в зависимости от их отклонения от аппроксимированной окруж-

| наука итехника. Т. 17, № 1 (2018) | 1 |
|--------------------------------------|-------|
| Science and Technique V 17 No 1 | (201) |

. . .

ности, и вычисление x_0 , y_0 и R повторяется. Наиболее естественным выбором для весов является обратное квадрату расстояние от отдельных элементов контура x_i , y_i к ранее определенной окружности, т. е. $w_i = 1/d^2_i$, где $d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - R$ – невязки. Помимо этого, исключаются элементы массива, которые явно не относятся к истинной окружности. Веса определяются

$$w_i = \begin{cases} 1 - d_i / (2\sigma) \text{ для } |d_i| < 2\sigma; \\ 0 \text{ иначе,} \end{cases}$$

где σ^2 – СКО

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N d_i^2 / (n-1).$$

Процедура определения весов и пересчета параметров аппроксимирующей окружности выполняется итерационно. Критерием остановки итераций является прекращение уменьшения σ^2 . Обычно необходимо выполнить три итерации.

Центр окружности и будет являться центром изображения тест-объекта на фотоприемнике.

Сравнение двух алгоритмов

Численные исследования проводились на разработанной математической модели. Произведен расчет погрешности определения координат центра тяжести различными алгоритмами – энергетическим и контурными – для тестобъектов диаметров 5, 10, 20, 30, 40, 50 пикс фотоприемника, а также значений отношения сигнал/шум 200, 100, 70, 20, 10. Отношение сигнал/шум рассчитывалось как разница максимальной интенсивности изображения тестобъекта и фона, деленная на СКО фона. Расчет производился в MatLab для выборки, состоящей из 100 изображений, для каждого диаметра тест-объекта. Изображения отличались друг от друга из-за случайного характера шумов фотоприемника. По каждому изображению определялся центр тяжести. Задавалось смещение тест-объекта на 0,25 пикс и вычислялась погрешность как разница между заданным и фактическим смещениями тест-объекта относительно матричной структуры фотоприемника. Затем значения погрешности усреднялись по всей выборке с учетом весов. Полученные средневзвешенные результаты зависимости погрешности определения центра изображения тест-объекта на фотоприемнике от диаметра тест-объекта для различных алгоритмов представлены на рис. 2.



Рис. 2. Погрешность (ось ординат) определения центра изображения тест-объекта на фотоприемнике различными алгоритмами для разных диаметров (ось абсцисс)

Fig. 2. Error (ordinate axis) for determination of test-object image center on photodetector while using various algorithms for different diameters (abscissa axis)



Fig. 2. Termination

Как видно из рис. 2, точность определения координат по энергетическому центру тяжести превосходит контурные алгоритмы для всех рассмотренных диаметров тест-объекта и отношений сигнал/шум примерно на порядок.

С увеличением отношения сигнал/шум улучшается точность определения координат на 0,5–1 порядок. Улучшение точности с увеличением диаметра тест-объекта наиболее характерно для больших отношений сигнал/шум: 70 и более. В этом случае для детектора Канни характерное улучшение точности заметно для тест-объектов диаметром 20 пикс и более, для остальных – 10 пикс и более.

Для тест-объектов диаметром 10 пикс и менее в детекторах Канни и лапласиан гауссиана погрешность оказывается постоянной и, следовательно, СКО равняется нулю при выборке 100, в отличие от других детекторов.

Уступают контурные алгоритмы по величине вычислительных мощностей (табл. 1), на каж-

Таблица 1 Сравнение алгоритмов по величине вычислительных мощностей Comparison of algorithms according to computing power values

| Алгоритм | | | | | | | |
|---------------------|---------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|--|--|
| Энергети- ческий | Контурный | | | | | | |
| | Канни | Лапласиан гауссиана | Прюитт | Робертс | Собел | | |
| x | 14,4 <i>x</i> | 14,1 <i>x</i> | 12,5 <i>x</i> | 12,5 <i>x</i> | 12,2 <i>x</i> | | |

дый из которых необходимо, по сравнению с энергетическим алгоритмом, затратить больше времени, в частности за счет дополнительной операции аппроксимации окружностью и проведения нескольких итераций во время расчета. Значения необходимых вычислительных мощностей определялись средствами MatLab по затрачиваемому времени вычислений на каждый алгоритм.

выводы

1. Математически смоделирована оптическая схема коллиматора, проецирующего тестобъект на фотоприемник оптико-электронного прибора с параметрами, которые часто встречаются в реальных схемах контроля. Для сравнения алгоритмов определения координат изображений проведен численный расчет для отношений сигнал/шум 200, 100, 70, 20, 10 и диаметров тест-объекта 5, 10, 20, 30, 40, 50 пикс с учетом шумов фотоприемника. Установка порога, значения яркости ниже которого принимались нулю, и применение фильтра Винера с подобранными параметрами позволяют сгладить изображение и устранить влияние шумов на автоматическое определение контура. Это дает возможность однозначно его идентифицировать, т. е. исключить определение ложных контуров, а также повысить точность алгоритма определения координат по центру тяжести от 1 до 2 порядков.

2. Алгоритм определения по энергетическому центру тяжести оказался точнее контурных алгоритмов, а также требующим меньших вычислительных мощностей. Главной причиной меньшей точности контурных алгоритмов является дискретность определения контура.

3. Для определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах целесообразнее использовать алгоритм определения по энергетическому центру тяжести по сравнению с контурными алгоритмами.

ЛИТЕРАТУРА

- Старосотников, Н. О. Высокоточный цифровой автоколлиматор для измерения малых углов / Н. О. Старосотников // Новые направления развития приборостроения: материалы 7-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., 23–25 апр. 2014 г. Минск: БНТУ, 2014. С. 244.
- Jinyun, Yan. Dynamic Imaging Model and Parameter Optimization for a Star Tracker / Yan Jinyun, Jiang Jie, Zhang Guangjun // Optics Express. 2016. Vol. 24, Iss. 6. P. 5961–5983. DOI: 10.1364/ oe.24.005961.
- Adaptive Thresholding and Dynamic Windowing Method for Automatic Centroid Detection of Digital Shack– Hartmann Wavefront Sensor / Xiaoming Yin [et al.] // Applied Optics. 2009. Vol. 48, Iss. 32, P. 6088–6098. DOI: 10.1364/ao.48.006088.
- Фотограмметрические параметры оптико-электронной аппаратуры / С. А. Архипов [и др.] // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. № 4. С. 105–115.
- Старосотников, Н. О. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // Наука и техника. 2015. № 5. С. 71–76.
- Accurate Projector Calibration Based on a New Point-to-Point Mapping Relationship Between the Camera and Projector Images / Huang Zhengrong [et al.] // Applied Optics. 2015. Vol. 54, Iss. 3. P. 347–356. DOI: 10.1364/ ao.54.000347.
- Старосотников, Н. О. Метод снижения влияния шумов фонового сигнала при определении координат энергетического центра тяжести изображения в ОЭП / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // Приборостроение-2016: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., 23–25 нояб. 2016 г. Минск: БНТУ, 2016. С. 133–135.
- Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MatLab; пер. с англ. / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. М.: Изд-во «Техносфера», 2006. 616 с.
- Determination of Ocular Torsion by Means of Automatic Pattern Recognition / E. Groe [et al.] // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1996. Vol. 43, Iss. 5. P. 471–479. DOI: 10.1109/10.488795.
- Canny, J. A Computational Approach to Edge Detection / J. Canny // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. PAMI-8, Iss. 6, Nov. P. 679–698. DOI: 10.1109/ tpami.1986.4767851. DOI: 10. 1109/tpami.1986.4767851.

Поступила 14.08.2017 Подписана в печать 10.11.2017 Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

- Starosotnikau N. O. (2014) Highly-Accurate Digital Autocollimator for Measuring Small Angles. Novye Napravleniya Razvitiya Priborostroeniya: Materialy 7-i Mezhdunarodnoi Studencheskoi Nauch.-Tekhn. Konferentsii, 23–25 Aprelya 2014 g. [New Directions in Instrumentation Development: Materials of the 7th International Students' Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 244 (in Russian).
- Jinyun Yan, Jie Jiang, Guangjun Zhang (2016) Dynamic Imaging Model and Parameter Optimization for a Star Tracker. *Optics Express*, 24 (6), 5961–5983. DOI: 10.1364/ oe.24.005961.
- Xiaoming Yin, Xiang Li, Liping Zhao, Zhongping Fang (2009) Adaptive Thresholding and Dynamic Windowing Method for Automatic Centroid Detection of Digital Shack–Hartmann Wavefront Sensor. Applied Optics, 48 (32), 6088–6098. DOI: 10.1364/ao.48.006088.
- Arkhipov S. A., Gasitch G. V., Zavarzin V. I., Morozov S. A. (2008) Photogrammetric Parameters of Optical and Electronic Apparatus. Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni N. E. Baumana = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering, (4), 105–115 (in Russian).
- Starosotnikau N. O., Feodortsau R. V. (2015) Estimation of Accurate Determination for Coordinates of Gravity Energy Center in Collimator Test-Object in Respect of Control Schemes for Optoelectronic Devices with Matrix Photodetectors. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (5), 71–76 (in Russian).
- Zhengrong Huang, Jiangtao Xi, Yanguang Yu, Qinghua Guo (2015) Accurate Projector Calibration Based on a New Point-to-Point Mapping Relationship Between the Camera and Projector Images. *Applied Optics*, 54 (3), 347–356. DOI: 10.1364/ao.54.000347.
- Starosotnikau N. O., Feodortsau R. V. (2016) Method for Decreasing Influence of Background Signal Noise while Determining Energy Gravity Centre Coordinates for Images in Electrooptical Devices. *Priborostroenie-2016: Materialy 9-i Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konferentsii, 23–25 Noyabrya 2016 g.* [Instrumentation-2016: Materials of the 9th International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 133–135 (in Russian).
- 8. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. (2004) *Digital Image Processing Using MatLab*. New Jersey, Prentice Hall.
- Groen E., Bos J. E., Nacken P.F.M., de Graaf B. (1996) Determination of Ocular Torsion by Means of Automatic Pattern Recognition. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43 (5), 471–479. DOI: 10.1109/10.488795.
- Canny J. (1986) A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8 (6), 679–698. DOI: 10.1109/ tpami.1986.4767851.

Received: 14.08.2017 Accepted: 10.11.2017 Published online: 29.01.2018