МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

Юго-Западного государственного университета

Научный журнал

Том 23 № 5 / 2019

Proceedings

of the Southwest State University

Scientific Journal

Vol. 23 № 5 / 2019

Известия Юго-Западного государственного университета (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

До 2011 года журнал издавался под названием «Известия Курского государственного технического университета».

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как технология и оборудование механической и физико-технической обработки, сварка, роботы, мехатроника и робототехнические системы, управление в социальных и экономических системах, методы и системы защиты информации, информационная безопасность, автоматизация и управление технологическими процессами, строительные конструкции, теплоснабжение, вентиляция, газоснабжение и освещение, строительная механика.

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

Машиностроение и машиноведение: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Информатика, вычислительная техника и управление: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Емельянов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Бредихин Владимир Викторович, д-р экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агеев Евгений Викторович, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Алексеев Юрий Владимирович, д-р архитектуры, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

Бобырь Максим Владимирович, д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Бок Томас, д-р техн. наук, профессор, Мюнхенский технический университет (г.Мюнхен, Германия);

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор международной академии архитектуры, профессор Университета архитектуры, строительства и геодезии (г. София, Болгария), старший преподаватель Университета Мальты (Мальта);

Дегтярев Сергей Викторович, д-р техн.наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Димитров Любомир Ванков, д-р техн. наук, профессор, Технический университет Софии (г.София, Болгария);

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич, д-р техн.наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Кобелев Николай Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Колчунов Виталий Иванович, академик РААСН, д-р техн.наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Кузнецов Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Кукарас Даниэль, д-р философии (PhD), профессор, факультет гражданского строительства, Нови-Садский университет (г.Суботица, Сербия);
Куц Вадим Васильевич, д-р техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);
Пановко Григорий Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, Институт машиноведения РАН (г.Москва, Россия);
Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);
Смирнов Игорь Михайлович, д-р техн. наук, доцент, член-корреспондент РАРАН, АО «Научно-исследовательский инженерный институт» (г. Балашиха, Россия);
Титов Виталий Семенович, д-р техн.наук, профессор, заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);
Турков Андрей Викторович, д-р техн. наук, профессор, Орловский государственный университет им. И.С.Тургенева (г.Орел, Россия);
Щербаков Владимир Иванович, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г.Воронеж, Россия);
Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия).

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Емельянов Сергей Геннадьевич, (председатель) д-р техн.наук, профессор, чл.-кор. РААСН, Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, ректор, Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)
Бертрам Торстен, д-р техн. наук, профессор, Институт теории управления и системного проектирования Технического университета (г. Дортмунд, Германия);
Гриднев Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г.Воронеж, Россия);
Ежов Владимир Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, Изобретатель СССР, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);
Зотов Игорь Валерьевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);
Ивахненко Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);
Колмыков Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);
Колчунов Владимир Иванович, член РААСН, д-р техн.наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);
Кореневский Николай Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);
Латыпов Рашит Абдулхакович, д-р техн. наук, профессор, Московский политехнический университет (г.Москва, Россия);
Локтионова Оксана Геннадьевна, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);
Шах Райнер, д-р техн. наук, профессор, Дрезденский технический университет (г.Дрезден, Германия).

Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
Адрес учредителя, издателя и редакции:
305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94
Телефон: +7(4712) 22-25-26,
Факс: +7(4712) 50-48-00.
E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-42691 от 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)
ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

Сайт журнала: https://science.swsu.ru

© Юго-Западный государственный университет, 2019

Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:
Полиграфический центр Юго-Западного государственного университета, 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Подписка и распространение:
журнал распространяется по подписке.
Подписной индекс журнала 41219 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность: один раз в два месяца

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 25.10.2019. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 22,8.
Тираж 1000 экз. Заказ 87.

Proceedings of the Southwest State University

Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

"Proceedings of the Kursk State Technical University"

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as mechanical technologies and equipment; machine building; physical and engineering processing of materials; welding; robotics, mechatronics and robot systems, management and administration of social and economic systems; information protection methods and systems; information security; production process automation and control; building structures; heat supply; ventilation; gas supply and lightning systems; construction mechanisms and machines.

The journal publishes scientific articles, critical reviews, reports and discussions in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

Target readers are scientists, university professors and teachers, experts, young scholars, graduate and post-graduate students, stakeholders and interested public.

The Editorial Board of the journal pursues open access policy. Complete articles are available at the journal web-site and at eLIBRARY.RU .

The journal is included into the Register of the Top Scientific Journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation as a journal recommended for the publication of the findings made by the scientists working on a doctorial or candidate thesis in the following areas:

Mechanical engineering and machine science: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Computer science, computer engineering and control: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

Construction: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei G. Emelianov, Dr. of Sci. (Engineering)**,** Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Vladimir V. Bredikhin, Dr. of Sci. (Economic), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL BOARD

Yevgenii V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Yurii V. Alekseev, Dr. of Sci. (Architecture), Professor, Moscow State National Research University of Civil Engineering (Moscow, Russia);

Maksim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Thomas Bock, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Munich (Munich, Germany);

Lino Bianco, Dr. of Sci. (Philosophy), Professor of IAA, Visiting Professor at UACEG (Sofia), Senior Lecturer, University of Malta (Malta);

Sergey V. Degtyarev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Lyubomir V. Dimitrov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria);

Zhanybaj T. Zhusubaliev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Nikolai S. Kobelev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vitalii I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of RAACS, Southwest State University (Kursk, Russia);

Sergey N. Kuznetsov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Danijel Kukaras, Associate Professor, PhD, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering (Subotica, Serbia);

Grigorii Ya. Panovko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Igor M. Smirnov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Corresponding Member of RARAN, JSC "Research engineering Institute» (Balashikha, Russia);

Vitalii S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Andrey V. Turkov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russia);

Vladimir I. Shcherbakov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL COUNCIL

Sergei G. Emelianov, Chairman**,** Dr. of Sci. (Engineering)**,** Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

Torsten Bertram, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Institute of Control Theory and System Design, Technical University of Dortmund (Dortmund, Germany);

Sergey Yu. Gridnev, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Vladimir S. Ezhov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Igor V. Zotov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Alexander G. Ivakhnenko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Valerii I. Kolmykov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vladimir I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, RAACS Advisor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Nikolay A. Korenevskii, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Rashit A. Latypov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

Oksana G. Loktionova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Schah R., Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Dresden (Dresden, Germany)

Founder and Publisher :
"Southwest State University"
Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:
305040, Russia, Kursk, ul. 50 Let Oktyabrya, 94
Phone: +7(4712) 22-25-26,
Fax: +7(4712) 50-48-00.
E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:
The Federal Supervising Authority in the Field of Communication, Information Technology and Mass media
(PI №FS77-42691 of 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)
ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix:10.21869

Web-site: https://science.swsu.ru

© Southwest State University, 2019

Publications are available in accordance with the Creative Commons Attribution 4.0 License

Printing office:
Printing Center
of the Southwest State University,
305040, Russia, Kursk,
ul. 50 Let Oktyabrya, 94
Subscription and distribution:
the journal is distributed by subscription.
Subscription index 41219 in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Frequency: once in two months

Free-of-control price

Original lay-out design: E. Mel'nik

Sent to the printer 25.10.2019. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets: 22,8.
Circulation 1000 copies. Order 87.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Влияние масштабного фактора и состояния поверхности на чувствительность стали 20ГС2 к водородному растрескиванию 8

Сергеев Н. Н., Извольский В. В., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Гвоздев А. Е., Агеева Е. В., Клементьев Д. С., Кругляков О.В.

Механизмы управления погрешностью аддитивного формообразования с применением устройств с гибридной компоновкой 23

Гречухин А. Н., Куц В. В., Олешицкий А. В., Разумов М. С.

Морфология объёмных зон пластичности у газонаполненных пор в литых и порошковых сталях в условиях стресс-коррозии 35

Чуканов А. Н., Терешин В. А., Гвоздев А. Е., Кутепов С. Н., Сергеев А. Н., Агеев Е. В., Яковенко А. А.

Рекомендации по выбору сменных режущих многогранных пластин для оснащения проходных токарных резцов 53

Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Гришин Д.В.

Анализ характеристик износостойкости аддитивных изделий из электроэрозионных кобальтохромовых порошков 67

Агеева Е. В., Локтионова О. Г., Алтухов А. Ю., Сабельников Б. Н.

Моделирование фрезы с радиальной конструктивной подачей для обработки РК-профильных отверстий 82

Куц В. В., Разумов М. С., Митрофанов М. В.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Основные проблемы, выявленные при обследовании многоквартирных жилых домов в г. Курске после проведения капитального ремонта 94

Дубраков С.В., Куценко О.И., Дубракова К.О.

Разработка инженерной методики расчета сезонной гелиосистемы горячего водоснабжения.....103

Умеренков Е.В., Умеренкова Э.В., Семичева Н.Е.

Устойчивость рамно-стержневых конструктивных систем на просадочных грунтах 117

Дубракова К.О., Дубраков С.В., Завалишин И.В.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Оценка влияния эффекта системности на результативность антагонистических игр.....129

Гайдук А.Р., Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Плаксиенко В.С., Гонтарь Д.Н.

Нечеткое параллельно-конвейерное устройство и способ управления термоэлементом 145

Бобырь М.В., Милостная Н.А., Алтухов Д.О.

Алгоритм и устройство планирования расписания загрузки процессоров в мультипроцессорных системах 161

Борзов Д.Б., Титов В.С., Басов Р.Г.

Совершенствование метода обработки геологических данных с помощью применения программы Surfer на примере моделирования геохимической карты.....175

Добрица В. П., Горюшкин Е. И., Иванова Т. В.

Управляемое движение малогабаритного подводного комплекса (МБПК) 185

Яцун С.Ф., Князев С.И., Яцун А.С.

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Influence of Scale Factor and Surface Condition on 20GS2 Steel Sensitivity to Hydrogen Cracking 8
Sergeev N. N., Izvolsky V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageeva E. V., Klementyev D. S., Kruglyakov O. V.

Control Mechanisms of Additive Shaping Error with the Use of Hybrid Design Devices..... 23
Grechukhin A. N., Kuts V. V., Oleshitsky A. V., Razumov M. S.

The Morphology of the Volume Plasticity Zones at the Gas-Filled Pores in Cast and Powder Steels under Stress Corrosion 35
Chukanov A. N., Tereshin V. A., Gvozdev A. E., Kutepov S. N., Sergeev A. N., Ageev E. V., Yakovenko A. A.

Recommendations for the Selection of Changeable Indexable Inserts for Straight Turning Tools..... 53
Kudryashov E. A., Smirnov I. M., Grishin D. V.

Analysis of Wear Resistance Characteristics of Additive Products Made from Electroerosive Cobalt-Chromium Powders 67
Ageeva E. V., Loktionova O. G., Altuhov A. Y., Sabel'nikov B. N.

Modeling of a Milling Cutter with radial Constructional Feed for EC-Profile Holes Machining..... 82
Kuts V. V., Razumov M. S., Mitrofanov M. V.

CONSTRUCTION

Original articles

The Main Problems Revealed during the Ispection of Apartment Buildings in Kursk after Total Renovation 94
Dubrakov S. V., Kutsenko O. I., Dubrakova K. O.

Development of Engineering Methods for Calculating Seasonal Solar System of Hot-Water Supply 103
Umerenkov E. V., Umerenkova E. V., Semicheva N. E.

Stability of Frame-Rod Structural Systems on Subsiding Soils 117
Dubrakova K. O., Dubrakov S. V., Zavalishin I. V.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Influence Estimation of the Systemic Effect on Performance Antagonistic Games..... 129
Gaiduk A.R., Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Plaksienko V.S., Gontar D.N.

Fuzzy Parallel-Conveyor Device and Thermal Element Control Method 145
Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Altukhov D. O.

Algorithm and Planning Device for CPU Loading in Multiprocessor Systems..... 161
Borzov D. B., Titov V. S., Basov R.G.

Improving of Geological Data Processing with the Use of Surfer Program on the Example of Geochemical Simulation Map 175
Dobritsa V. P., Goryushkin E. I., Ivanova T. V.

Controlled movement of portable underwater system (PUS) 185
Yatsun S. F., Knyazev S. I., Yatsun A. S.

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-8-22

CC BY 4.0

Влияние масштабного фактора и состояния поверхности на чувствительность стали 20ГС2 к водородному растрескиванию

Н. Н. Сергеев [1], В. В. Извольский [2], А. Н. Сергеев [1], С. Н. Кутепов [2], А. Е. Гвоздев [1], Е. В. Агеева [3] ✉, Д. С. Клементьев [1], О.В. Кругляков [3]

[1] ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация

[2] ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
пр. Ленина, 92, г. Тула, 300012, Российская Федерация

[3] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. *В настоящее время установлено, что процесс коррозионно-механического разрушения протекает в несколько стадий. Однако, как показывает практика и анализ многочисленных разрушений конструкционных элементов из высокопрочных материалов в строительной и машиностроительной отраслях, очень часто в реальных конструкциях уже имеются технологические дефекты типа трещин. В таких случаях процесс коррозионно-механического разрушения начинается непосредственно с роста трещины, минуя подготовительные стадии – инкубационный период и образование концентратора напряжения.* ***Целью*** *настоящей работы являлось исследование влияния масштабного фактора и состояния поверхности на чувствительность стали 20ГС2 к водородному растрескиванию.*

Методы. *Для определения влияния состояния поверхности и масштабного фактора на длительную коррозионную прочность в среде, вызывающей водородное растрескивание, была выбрана арматурная сталь марки 20ГС2 (четыре плавки). Испытаниям подвергли натурные образцы (l = 300…400 мм) различного диаметра (10, 12 и 14 мм) с гладкокатаным и с периодическим профилем. Также из натурных стержней (гладкокатаных и с периодическим профилем) диаметром 10, 12 и 14 мм были выточены образцы с диаметром рабочей части от 6 до 10 мм через 1 мм с чистотой поверхности Ra2,5. Длительную коррозионную прочность оценивали временем до разрушения по результатам испытаний четырех образцов на каждую точку графика. Для создания условий эксперимента, максимально приближенных к эксплуатационным, испытания проводили в водном растворе серной кислоты с добавлением роданистого аммония при комнатной температуре с катодной поляризацией и различном уровне растягивающих напряжений.*

© Сергеев Н. Н., Извольский В. В., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Гвоздев А. Е., Агеева Е. В., Клементьев Д. С., Кругляков О.В., 2019

Результаты. *Экспериментально установлено, что натурные образцы арматурной стали 20ГС2 по сравнению с точеными обладают меньшей чувствительностью к водородному растрескиванию. Данное обстоятельство обусловлено тем фактом, что после механической обработки резанием в точеных образцах значение уровня остаточных растягивающих напряжений значительно выше, чем в натурных образцах. Показано, что натурные образцы арматурной стали 20ГС2 с периодическим профилем обладают меньшей стойкостью к водородному растрескиванию, по сравнению с натурными гладкокатаными образцами. Меньшая стойкость к водородному растрескиванию арматуры периодического профиля обусловлена наличием на ее поверхности ребер, которые играют роль естественных концентраторов напряжений. Полученные экспериментальные результаты позволяют рекомендовать для испытаний на коррозионно-механическое разрушение в средах, вызывающих наводороживание, натурные образцы, так как их использование позволяет приблизить условия эксперимента к реальным условиям эксплуатации изделий.*

Заключение. *Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов.*

Ключевые слова: *арматурная сталь; длительная коррозионная прочность; растягивающие напряжения; водородное растрескивание.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Финансирование: *Работа выполнена при финансовой поддержке проекта №11.6682.2017/8.9.*

Для цитирования: Влияние масштабного фактора и состояния поверхности на чувствительность стали 20ГС2 к водородному растрескиванию / Н. Н. Сергеев, В. В. Извольский, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеева, Д. С. Клементьев, О.В. Кругляков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 8-22. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-8-22.

Статья поступила в редакцию 08.07.2019

Статья подписана в печать 06.08.2019

Статья опубликована 25.10.2019

Influence of Scale Factor and Surface Condition on 20GS2 Steel Sensitivity to Hydrogen Cracking

Nikolay N. Sergeev [1], Valeriy V. Izvolsky [2], Aleksandr N. Sergeev [1], Sergey N. Kutepov [2], Aleksandr E. Gvozdev [1], Ekaterina V. Ageeva [3] ✉, Denis S. Klementyev [1], Oleg V. Kruglyakov [3]

[1] Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy
125 Lenin str., Tula 300026, Russian Federation

[2] Tula State University
92 Lenin str., Tula 300012, Russian Federation

[3] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of reseach. *At present, it is found that the process of corrosion-mechanical destruction proceeds in several stages. However, as practice and analysis of numerous destructions of structural elements made of high-strength materials in the construction and engineering industries show, very often in real structures there are already technological defects such as cracks. In such cases, the process of corrosion-mechanical destruction begins directly with crack growth, bypassing the preparatory stages – the incubation time and the formation of a stress concentrator. The*

goal of this paper is to study the influence of scale factor and surface condition on the sensitivity of 20GS2 steel to hydrogen cracking.

Methods. *Reinforcing steel of 20GS2 grade (four melts) was chosen to determine the influence of surface condition and scale factor on the long-term corrosion strength in the environment causing hydrogen cracking. Full-scale specimens (l = 300.400 mm) of different diameters (10, 12 and 14 m) with smooth-rolled and die-rolled sections were tested. Also, from 10, 12 and 14 mm diameter full-scale rods (smooth-rolled and with die-rolled sections) there were turned samples with a diameter of the working part from 6 to 10 mm every 1 mm with surface condition of Ra2,5. The long-term corrosion strength was estimated through time preceding failure by testing four samples at each point of the graph. To create the experimental conditions as close as possible to the operational ones, the tests were carried out in an aqueous solution of sulfuric acid with the addition of ammonium rhodanide at room temperature with cathodic polarization and different levels of tensile stresses.*

Results. *It has been experimentally found that full-scale specimens of 20GS2 reinforcing steel in comparison with turned ones have less sensitivity to hydrogen cracking. This circumstance is due to the fact that after mechanical processing by cutting in turned samples, the value of residual tensile stresses is much higher than in full-scale specimens. It has been shown that full-scale specimens of 20GS2 reinforcing steel with a die-rolled section have less resistance to hydrogen cracking, as compared with full-scale smooth-rolled samples. The lower resistance to hydrogen cracking of die-rolled section reinforcement is due to the presence of ribs on its surface which play the role of natural stress concentrators. The experimental results obtained allow us to recommend full-scale specimensto to be tested for corrosion and mechanical destruction in environments that cause hydrogenation of full-scale specimens, since their use makes it possible to approximate the experimental conditions to the actual conditions of operation of products.*

Conclusion. *The results obtained can be used in the creation of resource-saving processes for processing metal alloys and composite materials.*

Keywords: *reinforcing steel; long-term corrosion strength; tensile stresses; hydrogen cracking.*

Conflict of interest. *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

Financing: *The work was carried out according to project No. 11.6682.2017 / 8.9.*

For citation: Sergeev N.N., Izvolsky V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageeva E.V., Clementyev D.S., Kruglyakov O.V. Influence of Scale Factor and Surface Condition on 20GS2 Steel Sensitivity to Hydrogen Cracking. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 8-22 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-8-22.

Received 08.07.2019

Accepted 06.08.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

Коррозионно-механическое разрушение (КМР), к которому относится и водородное растрескивание, проявляющееся при одновременном воздействии коррозионной среды и механических напряжений (приложенных или остаточных), является одним из наиболее часто встречающихся видов хрупкого разрушения металлических и композиционных железобетонных конструкций на предприятиях химической, газонефтедобывающей, металлургической, машиностроительной и других отраслей промышленности [1-4].

В настоящее время установлено, что процесс КМР протекает в несколько стадий [3]: 1) инкубационный период; 2) стадия стабильного роста трещины до критического размера; 3) стадия нестабильного (лавинообразного) роста макротрещины. Однако, как показывает

практика и анализ многочисленных разрушений конструкционных элементов из высокопрочных материалов в строительной и машиностроительной отраслях, очень часто (некоторые исследователи полагают, что всегда) в реальных конструкциях уже имеются технологические дефекты типа трещин [4]. В таких случаях процесс КМР начинается непосредственно с роста трещины, минуя подготовительные стадии – инкубационный период и образование концентратора напряжения.

В соответствии с этим исторически сложились два научных направления и два принципиально различных способа испытания материалов на чувствительность к КМР [4]:

1) испытания гладких образцов или образцов с мягкими концентраторами напряжений;

2) испытания образцов с предельно острыми концентраторами напряжений в виде усталостных трещин.

Методика первого способа испытаний заключается в определении времени до разрушения или образования трещин заданного размера при различных видах нагружения в коррозионной среде. Большое значение для воспроизводимости результатов коррозионно-механических испытаний гладких образцов имеет подготовка поверхности, обычно состоящая из шлифовки и последующего удаления наклепанного слоя металла электрополировкой.

Методика второго способа испытаний фактически заключается в определении развития трещины до критического размера, которое не учитывает начальные стадии роста трещин, во многих случаях имеющих весьма существенное значение. Состояние поверхности образца в этом случае значит много меньше, поскольку нанесением острого надреза фактически задают направление развития трещины.

Выбор типа испытательного образца в конечном итоге определяется задачами исследований. Более полные результаты получают при использовании двух типов испытательных образцов – гладких и с надрезами.

Имея в наличии данные о влиянии среды, состоянии поверхности образца и масштабного эффекта, можно проводить испытания по определению длительной коррозионной прочности на образцах одного диаметра и профиля, что намного упростит эксперимент и его анализ, а также повысит качество экспериментальных данных.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния масштабного фактора и состояния поверхности на чувствительность стали 20ГС2 к водородному растрескиванию.

Материалы и методы

Для определения влияния состояния поверхности и масштабного фактора на длительную коррозионную прочность в среде, вызывающей водородное растрескивание, была выбрана арматурная сталь марки 20ГС2 (четыре плавки). Химический состав исследуемых плавок приведен в таблице. Испы-

таниям подвергли натурные образцы (l = 300…400 мм) различного диаметра (10, 12 и 14 мм) с гладкокатаным и с периодическим профилем. Также из натурных стержней (гладкокатаных и с периодическим профилем) диаметром 10, 12 и 14 мм были выточены образцы (рис. 1) с диаметром рабочей части от 6 до 10 мм через 1 мм с чистотой поверхности Ra2,5.

Длительную коррозионную прочность оценивали временем до разрушения по результатам испытаний четырех образцов на каждую точку графика. Для создания условий эксперимента, максимально приближенных к эксплуатационным, испытания проводили в водном растворе серной кислоты с добавлением роданистого аммония (4,5 % H_2SO_4 + +2,5 % NH_4CNS) при комнатной температуре с катодной поляризацией $D_К$ = = 60 А/м^2 и различном уровне растягивающих напряжений $\sigma_Э$ = 300…1000 МПа.

Таблица 1

Химический состав и механические свойства исследованных плавок стали 20ГС2

Table 1

Chemical composition and mechanical properties of heat of 20GS2 steel under study

№ плавки	Содержание элементов, %					Механические свойства			Вид обработки поверхности, диаметр
	C	Mn	Si	S	P	$\sigma_В$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	
1	0,19	1,13	2,17	0,040	0,016	1300	1200	14,3	ВТМО, периодический профиль, Ø10 мм
2	0,18	1,30	2,04	0,032	0,017	1200	1080	15,0	Гладкокатаная, Ø10 мм
3	0,20	1,08	1,62	0,029	0,015	1280	1130	15,2	Периодический профиль, Ø12 мм
4	0,23	1,20	2,00	0,026	0,014	1300	1180	14,8	Периодический профиль, Ø14 мм

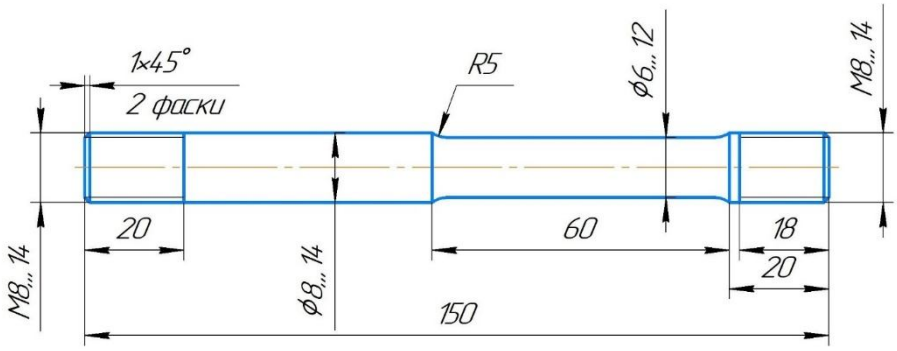


Рис. 1. Эскиз точеного образца для испытаний на длительную коррозионную прочность

Fig. 1. Sketch of turned sample to be tested for long-term corrosion strength

Длина рабочей части образца, находившейся в специальной коррозионной камере в контакте с агрессивной средой, составляла 80…100 мм. Для устранения разрушения в зоне пробки и на линии раздела (поверхность агрессивной среды – воздух) образцы изолировали клеем БФ. В целях исключения разброса данных из-за повреждений или загрязнений поверхности (задиры, окалина, масляные пятна и т. д.) образцы перед испытанием тщательно осматривали, а отобранные подвергали обезжириванию.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены кривые длительной коррозионной прочности, отображающие стойкость натурных образцов гладкокатаных и с периодическим профилем в зависимости от уровня растягивающих напряжений (на каждую точку было испытано по 4 образца).

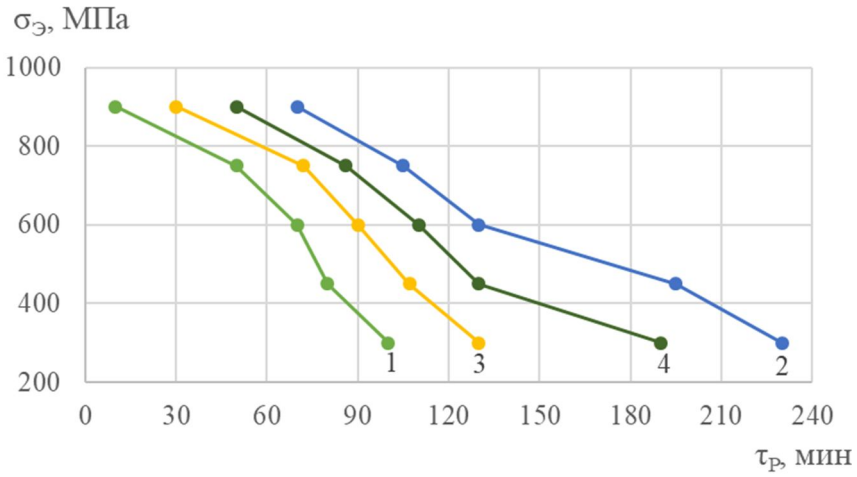


Рис. 2. Длительная коррозионная прочность точеных (1, 3) и натурных (2, 4) образцов из стали 20ГС2 в среде, вызывающей ВР: 1 – изготовленные из стали с гладкокатаным (Ø6 мм); 2 – натурные гладкокатаные; 3 – изготовленные из стали с периодическим профилем (Ø6 мм); 4 – натурные с периодическим профилем

Fig. 2. Long-term corrosion strength of turned (1, 3) and full-scale (2, 4) specimens of 20GS2 steel in the environment causing hydrogen cracking: 1 – made of steel with smooth-rolled (Ø6 mm); 2 – full-scale smooth-rolled; 3 – made of steel with a die-rolled section (Ø6 mm); 4 – full-scale with a a die-rolled section

По расположению этих кривых видно, что увеличение диаметра испытываемых образцов от 6 мм до исходного размера стержневой арматуры повышает длительную коррозионную прочность. Причем увеличение стойкости для образцов гладкокатаной стали значительно больше, чем с периодиче-ским профилем. Отсюда следует, что несмотря на то, что точеные образцы Ø 6 мм, изготовленные из арматурной стали периодического профиля, имеют лучшую стойкость по сравнению с точеными образцами из гладкокатаной стали; натурные образцы с периодическим профилем наоборот имеют меньшую стойкость, чем гладкокатаные натурные образцы. Это можно объяс-

нить тем, что элементы периодического профиля являются концентраторами напряжений, наличие которых облегчает и ускоряет зарождение и развитие субмикротрещин и микротрещин.

Влияние диаметра испытываемых образцов на длительную коррозионную прочность приведено на рис. 3, из которого видно, что изменение стойкости образцов, изготовленных из гладкокатаной арматуры и из арматуры периодического профиля при различных уровнях растягивающего напряжения, происходит по-разному.

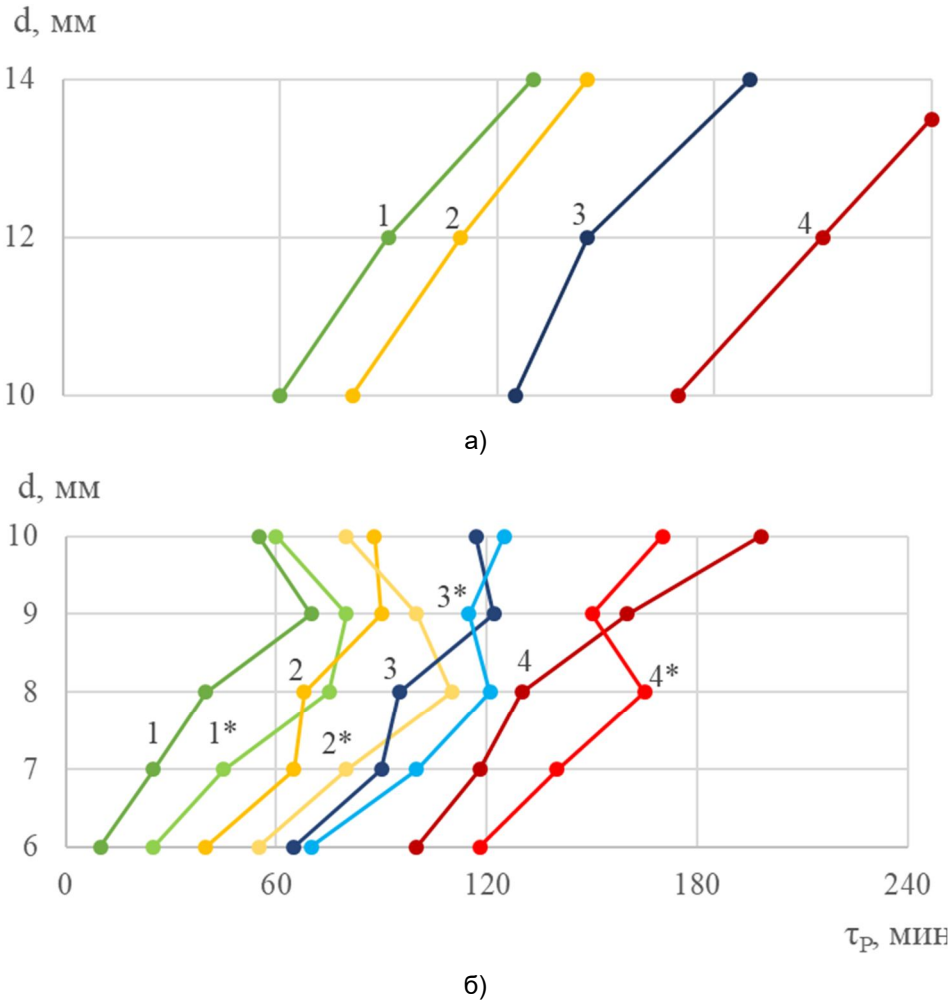


Рис. 3. Изменение длительной коррозионной прочности стали 20ГС2 при испытаниях на водородное растрескивание в зависимости от диаметра испытываемых натурных (а) и точеных (б) образцов и уровня растягивающих напряжений: 1 и 1*) $\sigma_Э = 0{,}7\sigma_В$; 2 и 2*) $\sigma_Э = 0{,}6\sigma_В$; 3 и 3*) $\sigma_Э = 0{,}5\sigma_В$; 4 и 4*) $\sigma_Э = 0{,}6\sigma_В$; на графике (а) цифры 1–2 соответствуют гладкокатаным образцам; цифры 3–4 – образцам периодического профиля; на графике (б) цифры 1–4 соответствуют образцам из гладкокатаной стали; цифры 1*–4* – образцам из стали с периодическим профилем

. Fig. 3. Change of long-term corrosion strength of 20GS2 steel when testing hydrogen cracking depending on diameter of the tested full-scale (a) and turned (б) specimens and tensile stresses level: 1 и 1*) $\sigma_Э = 0{,}7\sigma_В$; 2 и 2*) $\sigma_Э = 0{,}6\sigma_В$; 3 и 3*) $\sigma_Э = 0{,}5\sigma_В$; 4 и 4*) $\sigma_Э = 0{,}6\sigma_В$; on the graph (a) figures 1-2 correspond to smooth-rolled specimens; figures 3-4 correspond to the specimens with a die-rolled section; on the graph (b) figures 1-4 correspond to smooth-rolled steel specimens; figures 1*-4* – steel specimens with a die-rolled section

При уровне растягивающих напряжений 1000…600 МПа с возрастанием диаметра образца наблюдается увеличение длительной коррозионной прочности, а при переходе от точеных образцов к натурным наблюдается резкое понижение стойкости, причем для образцов с периодическим профилем уменьшение стойкости начинается с диаметра 8 мм.

При уменьшении растягивающих напряжений до 400 МПа видим, что начинает изменяться характер кривых, уменьшается влияние поверхности на длительную коррозионную прочность, а для образцов, изготовленных из гладкой арматурной стали, влияние поверхности при растягивающем напряжении 400 МПа практически отсутствует.

Для образцов, изготовленных из периодической арматурной стали, снижение стойкости наблюдается в интервале размеров диаметра от 8 мм до 9 мм с последующим повышением стойкости при переходе к натурным образцам. Это можно объяснить влиянием поверхности и живого сечения арматуры периодического профиля. При обтачивании арматуры до диаметра 9 мм нарушается поверхностная сплошность образца, но остаются концентраторы напряжений, в которых и происходит локальное накопление микронапряжений под воздействием внешних растягивающих напряжений, среды и диффундирующего водорода, которое может привести к зарождению и развитию микротрещин. При высоких уровнях растягивающих напряжений и наличии концентраторов внутренних напряжений на поверхности происходит быстрое зарождение, а чаще всего развитие уже имеющихся на поверхности и в поверхностном объеме дефектов, которые и являются зародышами микротрещин. Ускорению этого процесса способствует совместное воздействие среды и водорода, которые на первых этапах облегчают процесс зарождения микротрещин за счет адсорбции этого эффекта, а затем могут способствовать упрочнению поверхности, доводя внутренние напряжения до критического значения в локальных микрообъемах приводящее к образованию микротрещин, а затем облегчают развитие и распространение этих микротрещин. Уменьшение внешних растягивающих напряжений замедляет протекание перечисленных процессов, а наличие остаточных локальных напряжений в поверхностном слое металла является недостаточным для быстрого зарождения субмикротрещин, в результате чего удлиняется инкубационный период.

Наблюдаемый масштабный эффект был проверен на натурных образцах высокопрочной арматурной стали марки 20ГС2, периодического профиля различного диаметра в состоянии поставки рис. 3, из которого также видно, что увеличение живого сечения испытываемых образцов приводит к увеличению стойкости. Из приведенных на рис. 2 и 3 графиков видно, что увеличение диаметра испытываемых образцов приводит к возрастанию длительной

коррозионной прочности, а дефектность поверхности (наличие окалины, задиров, микроязв и несплошностей, а также неравномерное распределение внутренних напряжений, обусловленное профилем) оказывает обратное влияние – уменьшает стойкость образцов при испытании в водородосодержащих средах.

Увеличение длительной коррозионной прочности высокопрочной арматурной стали как точеных, так и натурных образцов можно объяснить специфической особенностью распределения диффундирующего водорода в напряженном поверхностном объеме металла. При увеличении сечения образца возрастает время диффузии водорода вглубь образца и в то же время наличие большого количества дефектов приводит к более равномерному распределению водорода в них и, следовательно, увеличивает время создания критического содержания водорода в локальных микрообъемах, которое способствует охрупчиванию металла и созданию высокого уровня локальных микронапряжений, приводящих к зарождению и развитию микротрещин. Зарождение большого количества субмикротрещин в поверхностном слое образца приводит к релаксации и перераспределению локальных микронапряжений, замедляя развитие этих субмикротрещин. Требуется определенное время для создания в этих локальных объемах соответствующего напряженного состояния, необходимого для развития микротрещин. Величина этого напряжения зависит от внешних растягивающих напряжений и концентрации водорода в этих микрообъемах.

Выводы

1. Установлено, что натурные образцы арматурной стали 20ГС2 по сравнению с точеными обладают меньшей чувствительностью к водородному растрескиванию. Данное обстоятельство обусловлено тем фактом, что после механической обработки резанием в точеных образцах значение уровня остаточных растягивающих напряжений значительно выше, чем в натурных образцах.

2. Показано, что натурные образцы арматурной стали 20ГС2 с периодическим профилем обладают меньшей стойкостью к водородному растрескиванию, по сравнению с натурными гладкокатаными образцами. Меньшая стойкость к водородному растрескиванию арматуры периодического профиля обусловлена наличием на ее поверхности ребер, которые играют роль естественных концентраторов напряжений.

3. Полученные экспериментальные результаты позволяют рекомендовать для испытаний на коррозионно-механическое разрушение в средах, вызывающих наводороживание, натурные образцы, так как их использование позволяет приблизить условия эксперимента к реальным условиям эксплуатации изделий.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов [5-24].

Список литературы

1. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н. Водородное охрупчивание и растрескивание высокопрочной арматурной стали: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 180 с.

2. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 430 с.

3. Основы повышения долговечности высокопрочных сталей, эксплуатируемых в водородсодержащих средах: монография / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 348 с.

4. Извольский В.В., Сергеев Н.Н. Коррозионное растрескивание и водородное охрупчивание арматурных сталей железобетона повышенной и высокой прочности. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2001. 163 с.

5. Влияние условий отпуска на механические и коррозионные свойства стали 23Х2Г2Т / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2018. № 2(45). С. 128-135.

6. Влияние химического состава стали 23Х2Г2Т на стойкость против коррозионного растрескивания / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.Н. Чуканов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 409-442.

7. Влияние уровня растягивающих напряжений на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 6-19.

8. Применение технологии изготовления «корковым» способом формообразующих вставок для литья под давлением медных сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 3(78). С. 67-83. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83.

9. Влияние микроструктурных факторов и термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса А600 / Н. Н. Сергеев, В. В. Извольский, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 2(77). С. 52-63. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63.

10. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 235 с.

11. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 12. С. 9-13.

12. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // Материаловедение. 2017. № 7. С. 11-22.

13. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч.I (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 3. С. 27-33.

14. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч.II (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 4. С. 20-29.

15. Формирование пластических зон около сферической полости в упрочненных низкоуглеродистых сталях в условиях водородной стресс-коррозии / Н.Н. Сергеев, В.А. Терешин, А.Н. Чуканов, А.Г. Колмаков, А.А. Яковенко, А.Н. Сергеев, И.М. Леонтьев, Д.М. Хонелидзе, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2017. № 12. С. 18-25.

16. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением // Технология металлов. 2015. № 11. С. 17-29.

17. Влияние разнозернистости аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. 2014. № 7. С. 23-26.

18. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов второго рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 1. С. 15-21.

19. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. No. 1. C. 126-129.

20. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е. В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

21. Принятие решений по статистическим моделям в управлении качеством продукции / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, С.В. Сапожников, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 5(74). С. 78-92. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92.

22. Диффузия водорода в сварных соединениях конструкционных сталей / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 6(75). С. 85-95. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-6-85-95.

23. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. № 1. С. 148-152.

24. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // Сталь. 2017. № 6. С. 26-39.

References

1. Sergeev N.N., Sergeev A.N. *Vodorodnoe ohrupchivanie i rastreskivanie vysokoprochnoj armaturnoj stali* [Hydrogen embrittlement and cracking of high-strength reinforcing steel]. *Tula, Izd-vo TulGU Publ.,* 2017, 180 p. (In Russ.).

2. Sergeev N.N., Sergeev A.N. *Mekhanicheskie svojstva i vnutrennee trenie vysokoprochnyh stalej v korrozionnyh sredah* [Mechanical properties and internal friction of high-strength steels in corrosive environments]. *Tula, Izd-vo TulGU Publ.,* 2018, 430 p. (In Russ.).

3. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., ZHuravlev G.M., Gvozdev A.E. *Osnovy povysheniya dolgovechnosti vysokoprochnyh stalej, ekspluatiruemyh v vodorodsoderzhashchih sredah* [Bases of increase of durability of the high-strength steels operated in hydrogen-containing environments]. *Tula, Izd-vo TulGU Publ.,* 2019, 348 p. (In Russ.).

4. Izvol'skij V.V., Sergeev N.N. *Korrozionnoe rastreskivanie i vodorodnoe ohrupchivanie armaturnyh stalej zhelezobetona povyshennoj i vysokoj prochnosti* [Corrosion cracking and hydrogen embrittlement of reinforced concrete reinforcement steels of high and high strength]. *Tula, Izd-vo TGPU im. L. N. Tolstogo Publ.,* 2001, 163 p. (In Russ.).

5. Sergeev N.N., Izvol'skij V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., A.E. Vliyanie uslovij otpuska na mekhanicheskie i korrozionnye svojstva stali Gvozdev 23H2G2T [Influence of tempering conditions on mechanical and corrosion properties of steel 23X2G2T]. *Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tekhnologicheskoj akademii im. P.A. Solov'eva = Bulletin of Rybinsk state aviation technological Academy. P. A. Solovyov*, 2018, no. 2(45), pp. 128-135 (In Russ.).

6. Sergeev N.N., Izvol'skij V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., CHukanov A.N., Pantyuhin O.V. Vliyanie himicheskogo sostava stali 23H2G2T na stojkost' protiv korrozionnogo rastreskivaniya [Influence of chemical composition of steel 23X2G2T on resistance against corrosion cracking]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical science*, 2018, is. 9, pp. 409-442 (In Russ.).

7. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Gvozdev A.E., Tihonova I.V., Kutepov S.N., Ageev E.V. Vliyanie urovnya rastyagivayushchih napryazhenij na dlitel'nuyu prochnost' armaturnyh stalej v vodorodsoderzhashchih sredah [Influence of the level of tensile stresses on the long-term strength of reinforcing steels in hydrogen-containing media]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 6-19 (In Russ.).

8. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V., Klement'ev D.S. Primenenie tekhnologii izgotovleniya «korkovym» sposobom formoobrazuyushchih vstavok dlya lit'ya pod davleniem mednyh splavov [Application of technology in the production of «cortical» method of forming inserts for die casting copper alloys]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2018, vol. 22, no. 3(78), pp. 67-83 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83.

9. Sergeev N. N., Izvol'skij V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klement'ev D. S. Vliyanie mikrostrukturnyh faktorov i termicheskoj obrabotki na korrozionnuyu stojkost' armaturnoj stali klassa A600 [The influence of microstructural factors and heat treatment on corrosion resistance of reinforcing steel class A600]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2018, vol. 22, no. 2(77), pp. 52-63 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63.

10. SHorshorov M.H., Gvozdev A.E., Zolotuhin V.I., Sergeev A.N., Kalinin A.A., Breki A.D., Sergeev N.N., Kuzovleva O.V., Starikov N.E., Malij D.V. *Razrabotka progressivnyh tekhnologij polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovyh i kompozicionnyh nanomaterialov* [Development of progressive technologies for obtaining and processing metals, alloys, powder and composite nanomaterials]. *Tula, Izdatel'stvo TulGU Publ.,* 2016, 235 p. (In Russ.).

11. ZHuravlev G.M., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A. Vliyanie deformacionnoj povrezhdaemosti na formirovanie mekhanicheskih svojstv malouglerodistyh stalej [Influence of deformation damage on formation of mechanical properties of low-carbon steels]. *Proizvodstvo prokata = Production of rolled products*, 2015, no. 12, pp. 9-13 (In Russ.).

12. Baranov V.P., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Sergeev N.N., CHukanov A.N. Mnogourovnevyj podhod k probleme zamedlennogo razrusheniya vysokoprochnyh konstrukcionnyh stalej pod dejstviem vodoroda [Multilevel approach to the problem of delayed destruction of high-strength structural steels under the action of hydrogen]. *Materialovedenie = Materials science*, 2017, no. 7, pp. 11-22 (In Russ.).

13. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys. Pt.I.]. *Materialovedenie = Materials science*, 2018, no. 3, pp. 27-33 (In Russ.).

14. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys. Pt.II]. *Materialovedenie = Materials science*, 2018, no. 4, pp. 20-29 (In Russ.).

15. Sergeev N.N., Tereshin V.A., CHukanov A.N., Kolmakov A.G., YAkovenko A.A., Sergeev A.N., Leont'ev I.M., Honelidze D.M., Gvozdev A.E. Formirovanie plasticheskih zon okolo sfericheskoj polosti v uprochnennyh nizkouglerodistyh stalyah v usloviyah vodorodnoj stress-korrozii [Formation of plastic zones near a spherical cavity in hardened low-carbon steels under conditions of hydrogen stress corrosion]. *Materialovedenie = Materials science*, 2017, no. 12, pp. 18-25 (In Russ.).

16. Gvozdev A.E., ZHuravlev G.M., Kolmakov A.G. Formirovanie mekhanicheskih svojstv uglerodistyh stalej v processah vytyazhki s utoneniem [Formation of mechanical properties of carbon steels in the processes of drawing with thinning]. *Tekhnologiya metallov = Technology of metals*, 2015, no. 11, pp. 17-29 (In Russ.).

17. Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Provotorov D.A., Minaev I.V., Sergeev N.N., Tihonova I.V. Vliyanie raznozernistosti austenita na kinetiku perlitnogo prevrashcheniya v malo- i sredneuglerodistyh nizkolegirovannyh stalyah [Effect of austenite grain diversity on the kinetics of perlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels]. *Materialovedenie = Materials science*, 2014, no. 7, pp. 23-26 (In Russ.).

18. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Tihonova I.V., Kolmakov A.G. Rol' processa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotoryh fazovyh perekhodov vtorogo roda [The role of the embryo formation process in the development of some phase transitions of the second kind]. *Materialovedenie = Materials science*, 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

19. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeyev N.N., Khonelidze D.M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. *Inorganic Materials: Applied Research,* 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

20. Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Tihonova I.V., Kutepov S.N., Kuzovleva O.V., Ageev E. V. Perspektivnye stali dlya kozhuhov domennyh agregatov [Promising steels for blast furnace casings]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*., 2017, vol. 7, no. 2(23), pp. 6-15 (In Russ.).

21. ZHuravlev G.M., Gvozdev A.E., Sapozhnikov S.V., Kutepov S.N., Ageev E.V. Prinyatie reshenij po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produkcii [Decisions on Statistical Models in Quality Control of Products]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2017, vol. 21, no. 5(74), pp. 78-92 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92.

22. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E.V. Diffuziya vodoroda v svarnyh soedineniyah konstrukcionnyh stalej [Diffusion of hydrogen in welded joints of structural steels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2017, vol. 21, no. 6(75), pp. 85-95 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-6-85-95.

23. Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Minayev I.V., Tikhonova I.V., Sergeyev A.N., Khonelidze D.M., Maliy D.V., Golyshev I.V., Kolmakov A.G., Provotorov D.A. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting. *Inorganic Materials: Applied Research,* 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

24. ZHuravlev G.M., Gvozdev A.E., CHeglov A.E., Sergeev N.N., Gubanov O.M. Variant opredeleniya maksimal'nogo plasticheskogo uprochneniya v instrumental'nyh stalyah [Variant of determination of maximum plastic hardening in tool steels]. *Stal' = Steel*, 2017, no. 6, pp. 26-39 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Сергеев Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация
e-mail: technology@tspu.tula.ru

Nikolay N. Sergeev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: technology@tspu.tula.ru

Извольский Валерий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительства, строительных материалов и конструкций», ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация,
e-mail: kafedrassmik@mail.ru

Valeriy V. Izvolsky, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Construction, Building Materials and Structures Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation,
e-mail: kafedrassmik@mail.ru)

Сергеев Александр Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация
e-mail: ansergueev@mail.ru

Aleksandr N. Sergeev, Cand. of Sci. (Pedagogical) Sciences, Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: ansergueev@mail.ru

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergey N. Kutepov, Cand. of Sci. (Pedagogical), Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Aleksandr E. Gvozdev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Агеева Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация
e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Ekaterina V. Ageeva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Клементьев Денис Сергеевич, магистрант, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого» Тула, Российская Федерация
e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Denis S. Klement'yev, Undergraguate, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Кругляков Олег Викторович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация,
e-mail: krug_ov@yandex.ru

Oleg V. Kruglyakov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: krug_ov@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-23-34

CC BY 4.0

Механизмы управления погрешностью аддитивного формообразования с применением устройств с гибридной компоновкой

А. Н. Гречухин [1] ✉, В. В. Куц [1], А. В. Олешицкий [1], М. С. Разумов [1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Исследование посвящено повышению точности формирования поверхностного слоя изделий машиностроения аддитивными методами.*

Методы. *Формообразование поверхностей деталей аддитивными методами характеризуется высокими значениями величины погрешности формообразования (аппроксимации), для снижения величины которой необходимо обеспечить ориентацию поверхности, при которой нормаль в точке формообразуемой поверхности будет совпадать с осью конечного звена формообразующей системы. Для обеспечения ориентации формообразуемой поверхности предложено применение оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой.*

Результаты. *Разработана модель формообразующей системы оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой. Решена задача параметрического синтеза технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой, в результате которой были обеспечены необходимые формообразующие возможности оборудования. Разработана методика расчета кинематической погрешности аддитивного формообразования, позволяющая подобрать такие двигатель и драйвер аддитивного оборудования, которые позволят получить необходимую точность формообразования.*

Заключение. *Разработанная методика позволяет решить задачу параметрического синтеза технологического оборудования с гибридной компоновкой из условия обеспечения заданной величины кинематической составляющей погрешности аддитивного формообразования.*

Ключевые слова: *аддитивные технологии; послойный синтез; формообразование; погрешность.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Финансирование: *Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых МК-6406.2018.8.*

Для цитирования: Механизмы управления погрешностью аддитивного формообразования с применением устройств с гибридной компоновкой / А. Н. Гречухин, В. В. Куц, А. В. Олешицкий, М. С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 23-34. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-23-34.

Статья поступила в редакцию 02.08.2019

Статья подписана в печать 20.09.2019

Статья опубликована 25.10.2019

© Гречухин А. Н., Куц В. В., Олешицкий А. В., Разумов М. С., 2019

Control Mechanisms of Additive Shaping Error with the Use of Hybrid Design Devices

Alexander N. Grechukhin [1] ✉, Vadim V. Kuts [1], Alexey V. Oleshitsky [1], Michael S. Razumov [1]

[1] Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Abstract

***Purpose of research**. The study is aimed at improving the accuracy of shaping the surface layer of mechanical engineering products by additive methods.*

***Methods.** Shaping of parts surfaces by additive methods is characterized by high values of shaping error (approximation.)To reduce this error it is necessary to ensure the orientation of the surface at which the normal at the point of the surface being shaped will coincide with the axis of the final link of the shape-generating system. To ensure the orientation of the surface being shaped, the use of equipment for additive shaping with a hybrid design is proposed.*

***Results.**The model of shape-generating system of the equipment for additive shaping with hybrid design has been developed. The problem of parametric synthesis of hybrid design technological equipment for additive shaping has been solved, as a result of which the necessary shaping capabilities of the equipment have been provided. The calculation method of kinematic error of additive shaping has been developed, which allows you to choose such engine and driver of additive equipment that wiil make it possible to obtain the necessary accuracy of shaping.*

***Conclusion.**The developed technique allows us to solve the problem of parametric synthesis of hybrid design technological equipment based on the condition of providing a given value of the kinematic component of additive shaping error.*

***Keywords**: additive technologies; layer-by-layer synthesis; shaping; error.*

***Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

***Financing:** The study was supported by the Grant of the President of the Russian Federation for young scientists MK-6406.2018.8.*

For citation: Grechukhin A. N., Kuts V. V., Oleshitsky A. V., Razumov M. S. *Control Mechanisms of Additive Shaping Error with the Use of Hybrid Design Devices*. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 23-34 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-23-34.

Received 02.08.2019

Accepted 20.09.2019

Published 25.10.2019

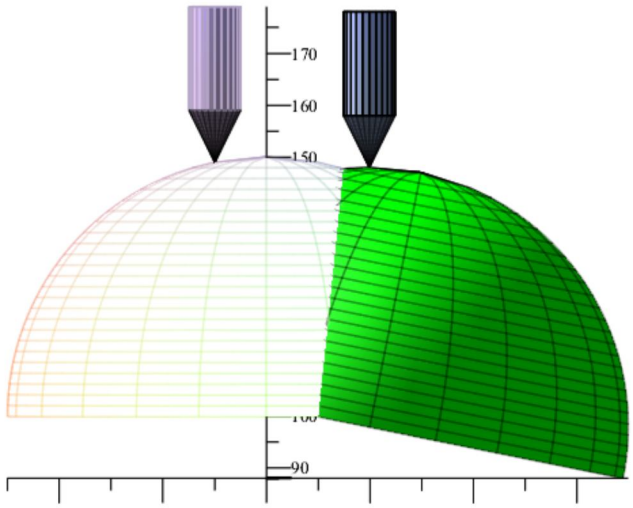
***

Введение

Формообразование деталей аддитивными методами характеризуется высокими величинами погрешности формы. Это связано с тем, что формирование поверхностного слоя детали сложной формы происходит построчно (сло-

ями), а ориентация конечного звена формообразующей системы (экструдера) аддитивной установки при этом неизменна и независима от кривизны формируемой поверхности [1-11].

Для снижения величины погрешности формы детали необходимо при формировании точек поверхности обеспечить её ориентацию, при которой нормаль в точке формообразуемой поверхности будет совпадать с осью конечного звена формообразующей системы (рис. 1) [12-16].



а) *б)*

Рис. 1. Формирование точки на поверхности детали: *а* – традиционным способом; *б* – с динамической ориентацией детали относительно оси экструдера

Fig. 1. Forming a point on the part surface: **а** – in the traditional way; **б** – with the dynamic orientation of the part relative to the axis of the extruder

Материалы и методы

Для решения задачи динамического управления процессом аддитивного формообразования в работе [14] было предложено создать установку на базе механизма с гибридной компоновкой (рис. 2).

Модель формообразующей системы проектируемой установки представляет собой основное уравнение формообразования [17-20]:

$$\overline{r}_0(u,v) = [A_{32} \cdot A_{21}(q_1, K, q_4) \times \times A_{10}(q_5) \cdot A_{0_j}(u,v)]^{-1} \overline{e}_4, \quad (1)$$

и системы геометрических связей:

$$\begin{cases} L = \left| \overline{R}_1(q_1) - A_{21}(q_1,\ldots,q_4)\overline{S}_1 \right|; \\ L = \left| \overline{R}_4(q_2) - A_{21}(q_1,\ldots,q_4)\overline{S}_4 \right|; \\ L = \left| \overline{R}_5(q_3) - A_{21}(q_1,\ldots,q_4)\overline{S}_5 \right|; \\ L = \left| \overline{R}_6(q_4) - A_{21}(q_1,\ldots,q_4)\overline{S}_6 \right|, \end{cases} \quad (2)$$

где A_{32} – матрица, определяющая положение экструдера в системе координат основания; $A_{21}(q_1,\ldots,q_4)$ – матрица, определяющая положение подвижной платформы экструдера в системе координат основания при заданных параметрах движения $q_1,\ldots,q_4$; $A_{10}(q_5)$ –

матрица, определяющая поворот стола с формируемой деталью на величину q5 относительно его исходного положения; $A_{0_j}(u,v)$ – матрица перехода из системы координат детали в систему координат точки формируемой поверхности с координатами (*u, v*); *L* – длины штанг; $\overline{R}_1(q_1), \overline{R}_2(q_1), \ldots, \overline{R}_6(q_4)$ – векторы, определяющие положение подвижных шарниров в системе координат основания установки; $q_1,...,q_4$ – управляемые координаты установки, определяющие положение шарниров по оси Z; $\overline{S}_1, \overline{S}_2, .., \overline{S}_6$ – векторы, задающие положение шарниров подвижной платформы в её собственной системе координат; $\overline{e}_4$ – вектор с нулевой длинной $\overline{e}_4 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^{\mathrm{T}}$.

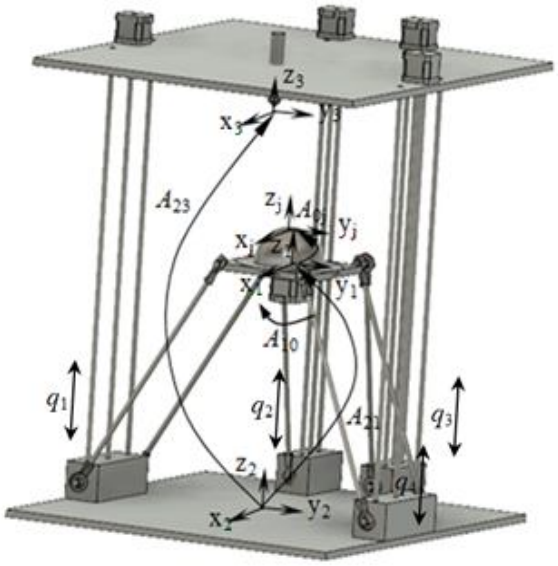


Рис. 2. Модель установки для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой

Fig. 2. Plant model for additive shaping with hybrid layout

В ходе решения задачи параметрического синтеза при проектировании технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой необходимо обеспечить формообразующие возможности установки [21], такие как:

– возможность контакта экструдера со всеми точками формообразуемой детали (внутренними точками детали и точками на её поверхности);

– возможность установки нормали к поверхности детали для всех точек поверхности детали вдоль оси экструдера [22-24].

Однако в процессе формообразования могут возникать смещения детали от её номинального положения, что приводит возникновению погрешности формообразования. Возникновение данных смещений является результатом воздействия различных факторов, в том числе факторов, связанных с кинематической погрешностью применяемых шаговых двигателей.

В связи с этим, необходимо решить задачу параметрического синтеза проектируемого технологического оборудования с гибридной компоновкой, обеспечив заданную кинематическую составляющую погрешности аддитивного формообразования.

Для этого, модель формообразующей системы приведем к виду

$$\overline{r_0}(u,v) = [A_{32} \cdot A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \ldots, q_4 + \Delta q_4) \cdot A_{10}(q_5 + \Delta q_5) \cdot A_{0_j}(u,v)]^{-1} \cdot \overline{e_4}, \qquad (3)$$

$$\begin{cases} L = \left|\overline{R}_1(q_1 + \Delta q_1) - A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \ldots, q_4 + \Delta q_4)\overline{S}_1\right|; \\ L = \left|\overline{R}_4(q_2 + \Delta q_2) - A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \ldots, q_4 + \Delta q_4)\overline{S}_4\right|; \\ L = \left|\overline{R}_5(q_3 + \Delta q_3) - A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \ldots, q_4 + \Delta q_4)\overline{S}_5\right|; \\ L = \left|\overline{R}_6(q_4 + \Delta q_4) - A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \ldots, q_4 + \Delta q_4)\overline{S}_6\right|, \end{cases} \quad (4)$$

где $\Delta q_1, \ldots, \Delta q_5$ – величины отклонений параметров движения от их номинальных значений $q_1, \ldots, q_5$.

Матрицу $A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \ldots, q_4 + \Delta q_4)$, входящую в (3) и (4) при заданных величинах $\Delta q_1, \ldots, \Delta q_5$ определим путем её замены в (4) на эквивалентную матрицу

$$A_{21}(q_1 + \Delta q_1, \ldots, q_4 + \Delta q_4) = A_{21}(x, y, z, \beta_x) = A^{\{1\}}(x) \cdot A^{\{2\}}(y) \cdot A^{\{3\}}(z) \cdot A^{\{4\}}(\beta_x) \quad (5)$$

и решением системы (4) относительно параметров x, y, z, β_x.

Тогда отклонение точки детали $\overline{r}_0(u, v)$ от её номинального положения при заданных величинах $\Delta q_1, \ldots, \Delta q_5$ определим как

$$\overline{\Delta}(\Delta q_1, \ldots, \Delta q_5) = [A_{21}(q_1, \ldots, q_4) A_{10}(q_5) - A_{21}(x, y, z, \beta_x) A_{10}(q_5 + \Delta q_5)] \cdot A_{0j}(u, v) \cdot \overline{e}_4. \quad (6)$$

Абсолютную величину погрешности формообразования определим в виде проекции вектора $\overline{\Delta}(\Delta q_1, \ldots, \Delta q_5)$ на вектор нормали к поверхности детали в точке $\overline{r}_0(u, v)$

$$\Delta_{\perp}(\Delta q_1, \ldots, \Delta q_5) = = \overline{\Delta}(\Delta q_1, \ldots, \Delta q_5) \cdot \overline{n}(u, v), \quad (7)$$

где $n(u, v)$ - орт нормали к поверхности детали [2]:

$$\overline{n}(u, v) = A_{21}(q_1, \ldots, q_4) \cdot A_{10}(q_5) \cdot A_{0j}(u, v) \cdot \overline{e}_3, \quad (8)$$

где $\overline{e}_3$ – орт, определяющий положительное направление оси Z_j системы координат точки на поверхности детали $\overline{e}_3 = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]^T$.

Рассматривая различные сочетания отклонений в крайних точках $\pm \Delta q_1, \ldots, \pm \Delta q_5$ можно определить максимальную величину погрешности формообразования $\Delta_{\max}$.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим в качестве примера процесс формировании деталей типа полусферы с радиусом 75 мм, описываемой уравнением

$$r_0(\theta, z) = \begin{bmatrix} \sqrt{R^2 - z^2} \cdot \cos(\theta) \\ \sqrt{R^2 - z^2} \cdot \sin(\theta) \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где θ, z – криволинейные координаты поверхности; R – радиус полусферы.

Приняв длину штанг *L*=350 мм, шаг ходового винта примем *P*=10 мм, и взяв для примера распространенные шаговые двигатели Nema 17, с погрешностью двигателей Δq=1,8° были получены следующие закономерности изменения погрешности формообразования от параметра полусферы z, представленные в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Рассчитанные величины погрешности формообразования поверхности полусферы

Table 1

Calculated values of shaping error of hemisphere surface

z, мм	Δmax, мм
0	24,913
1	23,895
5	10,200
15	0,762
30	0,318
45	0,192
60	0,122
75	0,051

Анализ табл. и графика (см. рис. 3) показывает, что наибольшие отклонения обеспечиваются при параметре z=0, когда подвижная платформа установки принимает положение параллельно экструдеру, поэтому дальнейший анализ отклонений целесообразно вести для параметра z=0.

При z=0 был выполнен расчет изменения погрешности формообразования для различных значений погрешности шаговых двигателей, результаты которого показаны в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2

Рассчитанные величины погрешности формообразования для различных погрешностей Δq

Table 2

Calculated values of forming error for different errors Δq

Δq, °	Δ_{max}, мм
1	2,520
0,9	2,081
0,45	0,980
0,23	0,482
0,11	0,240
0,06	0,120
0,01	0,022

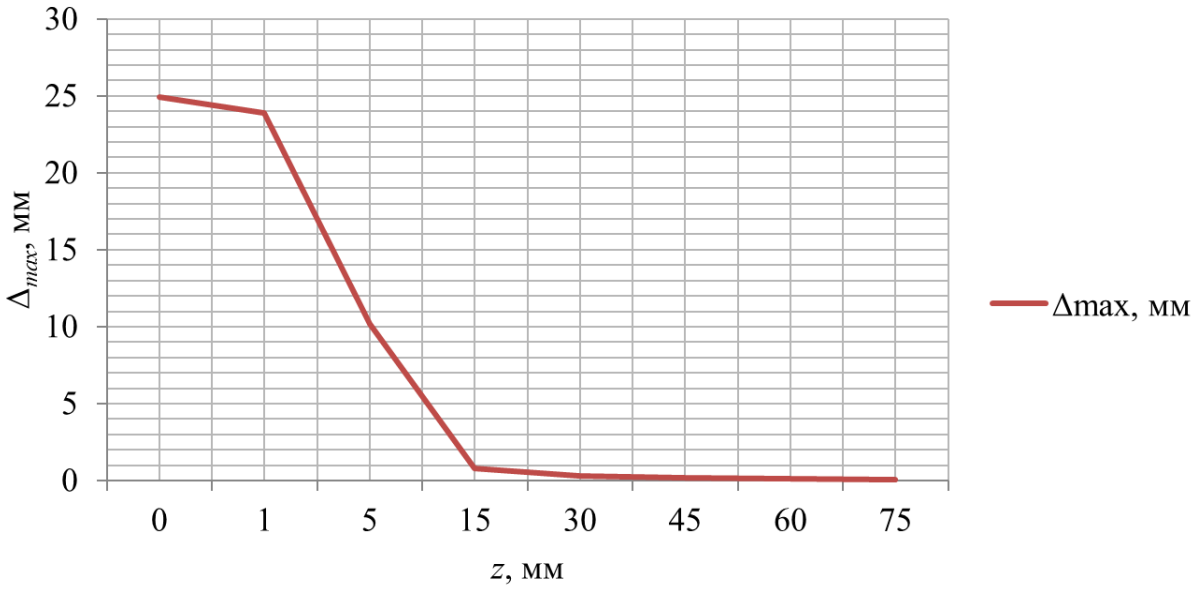


Рис. 3. Изменение погрешности формообразования полусферы от параметра z

Fig. 3. Changing the error of hemisphere shaping on z parameter

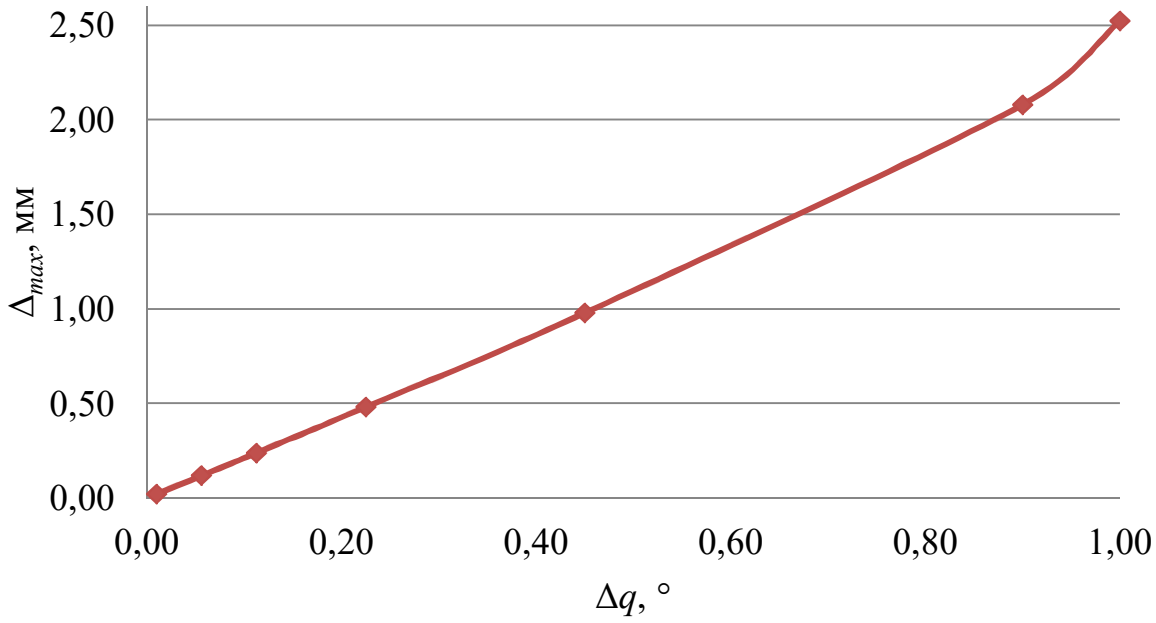


Рис. 4. Изменение погрешности формообразования от величины погрешности шаговых двигателей

Fig. 4. Changing the error of shaping on the magnitude of stepper motors error

Выводы

Таким образом, с применением данного метода расчета становится возможным решить задачу параметрического синтеза технологического оборудования с гибридной компоновкой из условия обеспечения заданной величины кинематической составляющей погрешности аддитивного формообразования.

Список литературы

1. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Englewood Cliffs, N.J., USA: PTR Prentice Hall, 1993. 369 pp.

2. Сапрыкин А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: дис... канд. техн. наук: 05.03.01. Юрга: Томский политехнический университет, 2006.

3. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms / V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, N.A. Bychkova // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11, no. 24. P. 11832-11835.

4. Доброскок В.Л., Абдурайимов Л.Н., Чернышов С.И. Рациональная ориентация изделий при их послойном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3d

модели // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2010. № 24. С. 13-21.

5. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S. K. Singhal, A. P. Pandey, P. M. Pandey, A. K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. 2005. Vol. 2. No. 1–4. P. 319–328.

6. Hong S. Byun, Kwan H. Lee Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2006. №. 28. P. 307–313.

7. Hong S. Byun, Kwan H. Lee Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm // Computers & Industrial Engineering. 2004. P. 426–431.

8. Kim J. Y., Lee K., Park J.C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping // Technical Report, Department of Mechanical Design and Production Engineering. Seoul : Seoul National University. 1994.

9. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus / P.T. Lan, S. Y. Chou, L. L. Chent, D. Gemmill // Computer- Aided Design. 1997. Vol. 29. No. 1. P. 53– 62.

10. Massod S. H., Rattanawong W., Iovenitti P. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping // J. Mater. Process. Technol. 2003. Vol. 139. № 1–3. P. 110–116.

11. Егоров И. Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир, 2010. 243 с.

12. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Управление пространственной ориентацией узлов робота в процессе аддитивного формообразования изделий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 122-129.

13. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Экспериментальное определение параметров поперечного сечения единичного слоя при аддитивном формообразовании изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 264-270.

14. Проектирование технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий, Ю.Э. Симонова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4. С. 111-118.

15. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Решение задачи аппроксимации криволинейных поверхностей слоями с постоянным и переменным сечением при формообразовании аддитивными методами // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 3 (76). С. 38-40.

16. Динамическое управление процессом аддитивного формообразования с применением 5-координатного технологического оборудования / А.Н. Гречухин, В.В. Куц,

М.С. Разумов, И.В. Ванин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 1. С. 9-20. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-9-20.

17. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 1997. 391с.

18. Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ..д-ра техн. наук. Курск, 2012. 366 с.

19. Определение погрешности формы детали при формообразовании планетарным механизмом методами геометрической теории резания / В.А. Гречишников, В.В. Куц, М.С. Разумов [и др.] // СТИН. 2017. № 4. С. 24-26.

20. Errors in shaping by a planetary mechanism / V.A. Grechishnikov, V.B. Romanov, P.M. Pivkin, V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, S.Y. Yurasov // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. No. 9. P. 824-826.

21. Grechukhin A.N., Anikutin I.S., Byshkin A.S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry. MATEC Web of Conferences.Volume 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University. Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842.

22. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S.Ways to reduce the error of additive methods of forming. MATEC Web of Conferences. Volume 226, 7 November 2018, Номер статьи 0100214th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems", DTS 2018; Don State Technical University. Rostov-on-Don; Russian Federation; 12 September 2018 до 14 September 2018; Код 141842.

23. Grechukhin A.N., Kudelina D.V., Razumov M.S. Development of information-analytical system for technological requests monitoring, taking intoaccount regional specifics // International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering. Vol. 157. P. 198-202.

24. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. Calculation of the controlled parameters of the 6-coordinate robot in the process of additive forming of products. Journal of Physics: Conference Series. 2019. 1210 (1). Статья № 012053.

References

1. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Englewood Cliffs. N.J. USA: PTR Prentice Hall, 1993, 369 pp.

2. Saprykin A. A. Povyshenie proizvoditel'nosti protsessa selektivnogo lazernogo spekaniya pri izgotovlenii prototipov [Increasing the productivity of the process of selective laser sintering in the manufacture of prototypes] Diss. kand. tekhn. nauk. Yurga, 2006, p. 153 (In Russ.).

3. Kuts V. V., Razumov M. S., Grechukhin A. N., Bychkova N. A. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 24, pp. 11832-11835.

4. Dobroskok V L, Abdurayimov L. N., Chernyshov S. I. Ratsional'naya orientatsiya izdelii pri ikh posloinom formoobrazovanii na baze iskhodnoi triangulyatsionnoi 3d modeli [Rational orientation of products with their layer-by-layer shaping on the basis of the original triangulation 3d model]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta = Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*, 2010, no. 24, pp. 13-21 (In Russ.).

5. Singhal S. K., Pandey A. P., Pandey P. M. and Nagpal A. K. Optimum part deposition orientation in stereolithography. *Computer-Aided Design & Applications,* 2005, vol. 2, pp. 319–328.

6. Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol,* 2006, no. 28, pp. 307–313.

7. Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 2004, pp. 426–431.

8. Kim J Y, Lee K and Park J. C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping. *Technical Report. Department of Mechanical Design and Production Engineering.* Seoul: Seoul National University, 1994, pp. 356-366.

9. Lan P. T., Chou S., Chent Y., Gemmill L. D. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus. *Computer-Aided Design,* 1997, no. 29, pp. 53– 62.

10. Massod S. H., Rattanawong W., Iovenitti P. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping. *J. Mater. Process. Technol,* 2003, vol. 139, pp 110–116.

11. Egorov I. N. *Pozitsionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroistvami* [Position-force control of robotic and mechatronic devices]. Vladimir, 2010, 243 p. (In Russ.).

12. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S. Upravlenie prostranstvennoi orientatsiei uzlov robota v protsesse additivnogo formoobrazovaniya izdelii [Control of spatial orientation of robot units in the process of additive forming of products]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2018, no. 4, pp. 122-129 (In Russ.).

13. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S. Eksperimental'noe opredelenie parametrov poperechnogo secheniya edinichnogo sloya pri additivnom formoobrazovanii izdelii [Experimental determination of the cross-section parameters of a single layer in the additive forming products]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhniches-*

kie nauki = News of Tula State University. Technical science, 2018, no. 10, pp. 264-270 (In Russ.).

14. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Olesnicki A. V., Simon J. E. Proektirovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya additivnogo formoobrazovaniya s gibridnoi komponovkoi [Design of technological equipment for additive shaping with hybrid layout]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University,* 2019, vol. 15, no. 4, pp. 111-118 (In Russ.).

15. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M. S. Reshenie zadachi approksimatsii krivolineinykh poverkhnostei sloyami s postoyannym i peremennym secheniem pri formoobrazovanii additivnymi metodami [Solution of the problem of approximation of curvilinear surfaces by layers with constant and variable cross-section at forming by additive methods]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2019, no. 3 (76), pp. 38-40 (In Russ.).

16. Grechukhin A. N.., Kuts V. V., Razumov M. S., Vanin I. V. Dinamicheskoe upravlenie protsessom additivnogo formoobrazovaniya s primeneniem 5-koordinatnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Dynamic Management of Additive Shaping Process with the Use of 5-Coordinate Processing Equipment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2019, vol. 23, no. 1, pp. 9-20 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-9-20.

17. Lashnev S. I., Borisov A. N., Emelyanov S. G. *Geometricheskaya teoriya formirovaniya poverkhnostei rezhushchimi instrumentami* [Geometric theory of surface formation by cutting tools]. Kursk, 1997, 391 p. (In Russ.).

18. Kuts V. V. Metodologiya predproektnykh issledovanii spetsializirovannykh metallorezhushchikh sistem [Methodology of pre-project studies of specialized metal-cutting systems] Diss. dokt. tehn. nauk. Kursk, 2012, p. 366 (In Russ.).

19. Grechishnikov V. A., Kuts V. V., Razumov M. S. et al. Opredelenie pogreshnosti formy detali pri formoobrazovanii planetarnym mekhanizmom metodami geometricheskoi teorii rezaniya [Determination of the error in the shape of a part shaping by a planetary mechanism using the methods of geometric cutting theory], *STIN = STIN*. 2017, no.4, pp. 24-26 (In Russ.).

20. Grechishnikov V. A., Romanov V. B., Pivkin P. M. Errors in shaping by a planetary mechanism. R*ussian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 9, pp. 824-826.

21. Grechukhin A. N., Anikutin I. S., Byshkin A. S. Management of space orientation of the end effector of generation of geometry system fiveaxis manufacturing machinery for additive generation of geometry MATEC Web of Conferences 226, 2018, pp. 010-021.

22. Grechukhin A.N, Kuts V.V, Razumov M.S. Ways to reduce the error of additive methods of forming MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 226, pp. 023-029.

23. Grechukhin A N, Kudelina D V, Razumov M. S. at al. Development of information-analytical system for technological requests monitoring, taking intoaccount regional specifics. *International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering*, 157, pp. 198-202.

24. Grechukhin A. N., Kuts V. V., Razumov M.S. Calculation of the controlled parameters of the 6-coordinate robot in the process of additive forming of products. *Journal of Physics: Conference*, 2019, Series 1210, pp. 1210-1220.

Информация об авторах / Information about the Authors

Гречухин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Alexander N. Grechukhin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine Building and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine Building and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Олешицкий Алексей Вячеславович, магистрант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация, e-mail: oav46@yandex.ru

Alexey V. Oleshitsky, Undergraduate, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: oav46@yandex.ru

Разумов Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация, e-mail: mika_1984_@mail.ru

Michael S. Razumov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mika_1984_@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-35-52

CC BY 4.0

Морфология объёмных зон пластичности у газонаполненных пор в литых и порошковых сталях в условиях стресс-коррозии

А. Н. Чуканов [1], В. А. Терешин [1], А. Е. Гвоздев [1], С. Н. Кутепов [1], А. Н. Сергеев [1], Е. В. Агеев [2] ✉, А. А. Яковенко [3]

[1] ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»
пр. Ленина, 125, г. Тула, 300026, Российская Федерация

[2] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

[3] ООО «Металлург-Туламаш»
ул. Мосина, 2, г. Тула, 300002, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Целью настоящей работы являлась разработка метода расчета параметров объёмных зон пластичности в порошковых и литых сталях, развивающихся в окрестности пор под действием внешнего растягивающего напряжения и внутреннего давления газов.*

Методы. *Задачу решали на базе анализа распределения компонент тензора напряжений в окрестностях несплошностей (пор) различной формы. Поэтапно рассматривали образец, находящийся под действием растягивающих напряжений (σ) и содержащий единственный концентратор напряжения – сферическую пору радиусом «a», а также пору в форме двояковыпуклой линзы. Выбор морфологии пор был обусловлен их экспериментальным наблюдением в структуре реальных промышленных сталей, а также наличием решения для оценки поля напряжений около сферической поры, выполненного Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем. По сравнению с такими концентраторами напряжений, как узкая трещина или пора в виде двояковыпуклой линзы, концентрация напряжений около сферической поры выражена слабее. Однако для процессов диффузии атомов через зону повышенных напряжений важна не только величина напряжения, но и размер самой зоны. Около сферической полости размер перенапряженной зоны наибольший, поэтому анализ её морфологии был взят за основу. В работе использовали моделирование функций, описывающих распределение напряжений около поры по аналогии с полем скоростей идеальной жидкости.*

Результаты. *Как объёмный объект описанные зоны пластичности представляют собой поверхности сфероида и эллипсоида, окружающие сферические и линзообразные поры. Очевидно, что чем меньше отношение h/l для поры, тем дальше в поперечном направлении распространяется зона пластичности (больше ρ_{max} –l), становясь при этом всё более узкой (z_1 примерно пропорциональна h). В качестве характерных геометрических параметров зон пластичности около линзообразной поры были определены: её наибольшая протяжённость в радиальном направлении от вершины; характерная толщина зоны (ρ_{max}–l)/a; площадь линзы; объём зоны и его доля от объёма линзы. Развитие зон пластичности около пор различной морфологии в сталях в условиях стресс-коррозии стимулирует изменение (рост) кинетических характеристик металла и создание благоприятных условий для ускоренной диффузии (обезуглероживания). В области зон пластичности в окрестностях пор под действием внешнего и внутреннего (давление газов) напряжений создание каналов облегченной диффузии формирует в точках D, B и C очаги зарождения субмикротрещин. Образующиеся в радиальных направлениях ювенильные свободные поверхности создают зоны реализованных аккомодационных возможностей среды – зоны пластичности. Вместе с ростом радиальных трещин к их вершинам от поры, находящейся под высоким давлением, ускоренно диффундируют газы.*

© Чуканов А. Н., Терешин В. А., Гвоздев А. Е., Кутепов С. Н., Сергеев А. Н., Агеев Е. В., Яковенко А. А., 2019

Заключение. *Предложенный в работе алгоритм анализа распределения напряжений позволяет прогнозировать интенсивность развития зон пластичности (трещинообразования) в зависимости от соотношения параметров β (β = σ_T/ σ) и s (s = p/σ), то есть от соотношения величин внешнего напряжения, предела текучести стали и давления газов в поре. Сделанный расчет позволил уточнить место зарождения, форму и масштаб развития зон пластичности (трещинообразования) в окрестностях пор различной морфологии в зависимости от соотношения внешнего напряжения и давления газов в порах.*

Ключевые слова: *стали; растяжение; замедленное разрушение; порообразование; зона пластичности; тензор напряжений; функции комплексных переменных.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Финансирование: *Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.*

Для цитирования: Морфология объёмных зон пластичности у газонаполненных пор в литых и порошковых сталях в условиях стресс-коррозии / А. Н. Чуканов, В. А. Терешин, А. Е. Гвоздев, С. Н. Кутепов, А. Н. Сергеев, Е. В. Агеев, А. А. Яковенко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 35-52. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-35-52.

Статья поступила в редакцию 25.07.2019

Статья подписана в печать 04.09.2019

Статья опубликована 25.10.2019

The Morphology of the Volume Plasticity Zones at the Gas-Filled Pores in Cast and Powder Steels under Stress Corrosion

Alexander N. Chukanov [1], Valery A.Tereshin [1], Alexander E. Gvozdev [1], Sergey N. Kutepov [1], Alexander N. Sergeev [1], Evgeny V. Ageev [2] ✉, Alexandra A. Yakovenko [3]

[1] Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy
125 Lenin str., Tula 300026, Russian Federation

[2] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

[3] LLC "Metallurg-Tulamash"
2 Mosina str., Tula 300002, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. *The purpose of this work is to develop a method for calculating parameters of volumetric zones of plasticity in powder and cast steels, occurring in the vicinity of pores under external tensile stress and internal gas pressure.*

Methods. *The problem was solved on the basis of the analysis of the distribution of stress tensor components in the vicinity of discontinuities (pores) of different shapes. A sample under tensile stresses (σ), containing a single stress raiser - a spherical pore with radius "a", and a pore in the form of a biconvex lens, was studied stepwise. The choice of pores morphology was determined by their experimental observation in the structure of real commercial steels, and the presence of a solution for estimating the stress field near the spherical pore, performed by L. D. Landau and E. M. Lifshitz. In comparison with such stress raisers as a tight crack or a pore in the form of a biconvex lens, the stress concentration near a spherical pore is weaker. However, for the processes of diffusion of atoms through the zone of increased stress, not only the intensity of stress is important, but also the size of the zone itself. Near the*

spherical cavity, the size of the overstressed zone is the largest, so the analysis of its morphology was taken as a basis. In this paper, we used the modeling of functions describing the stress distribution around the pores similarly to the velocity field of an ideal fluid.

Results. *As a volume object, the described zones of plasticity are the surfaces of a spheroid and an ellipsoid surrounding spherical and lenticular pores. It is obvious that the smaller the ratio h/l for the pore is, the further in the transverse direction the plasticity zone (more than pmax-l) spreads, becoming tighter and tighter (z1 is approximately proportional to h). The following geometric parameters of the plasticity zones near the lenticular pore were determined as characteristic ones: its greatest length in the radial direction from the apex; the characteristic thickness of the zone (ρ_{max}– l)l/a; the area of the lens; the volume of the zone and its share of the volume of the lens. The development of plasticity zones near pores of different morphologies in steels under stress-corrosion conditions stimulates the change (increase) of the kinetic characteristics of the metal and the creation of favorable conditions for accelerated diffusion (decarburization). In the area of plasticity zones in the vicinity of pores under external and internal (gas pressure) stresses, the creation of channels of facilitated diffusion forms places of nucleation of submicrocracks at points D, B and C. Juvenile free surfaces formed in radial directions create zones of realized accommodation opportunities of the medium - zones of plasticity. Along with the growth of radial cracks to their tops from the pore under high pressure, gases diffuse rapidly.*

Conclusion. *The stress distribution analysis algorithm proposed in this paper allows predicting the intensity of plasticity zones (crack formation) development depending on the ratio of parameters β (β = σT/ σ) and s (s = p/σ), that is, on the ratio of external stress values, steel yield stress and gas pressure in the pore. The calculation made it possible to clarify the place of nucleation, the shape and scale of the development of zones of plasticity (cracking) in the vicinity of pores of different morphology depending on the ratio of external stress and gas pressure in the pores.*

Keywords: *steel; tensile; delayed fracture; pore formation; zone of plasticity; stress tensor; complex-variable functions.*

Conflict of interest. *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

Financing: *The work was carried out for Project No. 11.6682.2017 / 8.9.*

For citation: *Chukanov A. N., Tereshin V. A., Gvozdev A. E., Kutepov S. N., Sergeev A. N., Ageev E.V., Yakovenko A. A. The morphology of the volume plasticity zones at the gas-filled pores in cast and powder steels under stress corrosion*. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 35-52 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-35-52.

Received 25.07.2019

Accepted 04.09.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

Последствием температурно-силового воздействия на структуру литых, порошковых железоуглеродистых композиций и сплавов при их контакте с агрессивными средами является формирование газонаполненных несплошностей (пор, трещин). Образование несплошностей в литых и порошковых сталях при высоких температурах и давлениях в присутствии водорода хорошо известно. Порообразование существенно влияет на уровень физико-механических свойств порошковых композиций при их селективном спекании лучом лазера в условиях аддитивных технологий. Однако морфология зон пластичности в окрестностях пор, определяющая изменение структуры и свойств литых и порошковых сталей, требует более глубокого изучения. Контакт с агрессивными средами в ходе механического нагружения усложняет

эволюцию развивающихся несплошностей (пор), ведет к накоплению в них газов (например, водорода) и увеличению внутреннего давления [1, 2]. В результате вокруг поры формируется область повышенных напряжений. Наличие градиента таких напряжений, усиленного внешними растягивающими напряжениями в окрестностях такой области, стимулирует процесс их перераспределения и ускоряет диффузию к концентраторам примесей внедрения (водорода и углерода) из окружающей матрицы [3]. Водород под действием напряжений транспортирует атомы углерода к перенапряженным микрообъёмам [4]. Создаваемые водородные потоки диспергируют цементитные частицы, а также «вымывают» углерод из феррита [5]. Кроме того, в порах происходит взаимодействие водорода и углерода с образованием метана, дополнительно увеличивающего давление в порах [6]. Описанные процессы ведут к обезуглероживанию прилегающих к порам областей. По данным рентгеноструктурного и дюрометрического анализов [7] феррит в обезуглероженных микрообъёмах подвергается наклёпу. Это ведет к формированию радиальных, а затем и кольцеобразных (сферических) трещин, окружающих пору.

Развитие радиальных и сферических трещин в сталях у пор иллюстрирует перераспределение и аккомодацию накопленных в их окрестностях напряжений [1]. Эти процессы порождают в указанных микрообъёмах зоны пластичности. Механизм формирования объёмных зон пластичности около газонаполненных пор в железоуглеродистых композициях и сплавах, подвергаемых стресс-коррозии, отсутствует. Образование таких зон у концентраторов играет существенную роль в ускорении диффузионных процессов и развитии замедленного разрушения. Изучение и прогнозирование механизма зарождения и развития зон пластичности является важным для научного анализа и эксплуатации как порошковых композиций, так и литых сталей.

Целью настоящей работы являлась разработка метода расчета параметров объёмных зон пластичности в порошковых и литых сталях, развивающихся в окрестности пор под действием внешнего растягивающего напряжения и внутреннего давления газов.

Материалы и методы

Задачу решали на базе анализа распределения компонент тензора напряжений в окрестностях несплошностей (пор) различной формы. Поэтапно рассматривали образец, находящийся под действием растягивающих напряжений (σ) и содержащий единственный концентратор напряжения – сферическую пору радиусом «a», а также пору в форме двояковыпуклой линзы. Выбор морфологии пор был обусловлен их экспериментальным наблюдением в структуре реальных промышленных сталей, а также наличием решения для оценки поля напряжений около сферической поры, выполненного Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем [8]. По сравнению с

такими концентраторами напряжений, как узкая трещина или пора в виде двояковыпуклой линзы, концентрация напряжений около сферической поры выражена слабее. Однако для процессов диффузии атомов через зону повышенных напряжений важна не только величина напряжения, но и размер самой зоны. Около сферической полости размер перенапряженной зоны наибольший [9], поэтому анализ её морфологии был взят за основу.

Наиболее разработанные методики решения поставленной цели относятся к аппарату теории функций комплексных переменных [10]. В представленной работе использовали моделирование функций, описывающих распределение напряжений около поры по аналогии с полем скоростей идеальной жидкости. Эти функции σ_{zz}, $\sigma_{z\rho}$, $\sigma_{\rho\rho}$, (z и ρ – координаты в цилиндрической системе с началом в центре поры (рис. 1)).

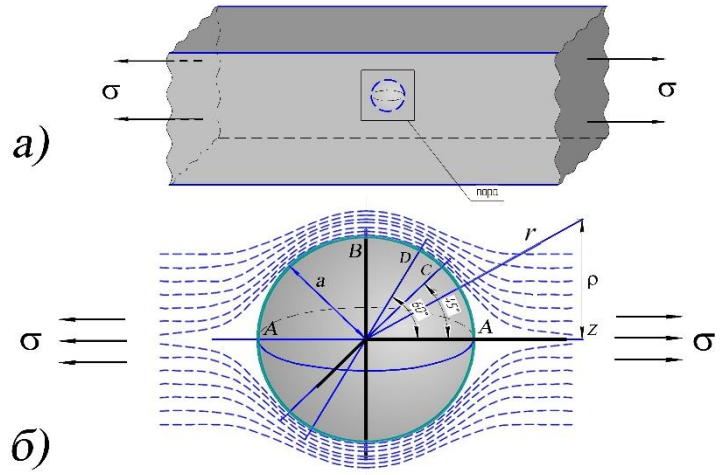


Рис. 1. Сферическая пора в растянутом образце (а); цилиндрические координаты и характерные точки (A, B, C, D) поверхностей зон пластичности (б)

Fig. 1. Spherical pore in a tensile sample (a); cylindrical coordinates and characteristic points (A, B, C, D) of the surfaces of plasticity zones (б)

Считали, что у поверхности поры нормальная проекция вектора силы взаимодействия между двумя соседними элементами среды равна нулю. В терминах теории функций комплексных переменных решаемая задача аналогична описанию потенциального обтекания идеальной жидкостью поверхности твёрдого тела. Вместо силы использовали скорость частицы жидкости. Вектор скорости частицы жидкости на поверхности твёрдого тела направлен по касательной к ней. Ближайшие к поверхности линии тока проходят по самой поверхности. При рассмотрении упруго напряжённого состояния металлической среды в данной работе в качестве аналога линии тока использовали термин «силовая линия». Под ним понимали линию, касательная к которой в каждой её точке совпадает с направлением максимальной силы взаимодей-

ствия между соседними элементами среды. Ввели также функции φ (потенциал) и ψ (аналог функции тока).

Описанный подход предварительно применили для оценки распределения напряжений около поверхности поры в форме цилиндра (цилиндрическая пора) в образце, подвергнутом одноосному растяжению в ходе наводороживания. Длину цилиндра принимали много больше его диаметра. Точка наблюдения была далека от торцов цилиндра. Решали плоскую задачу: второй координатой (помимо z) являлась координата «y», определяющая расстояние от точки наблюдения до плоскости, содержащей ось z и ось цилиндра (рис. 2).

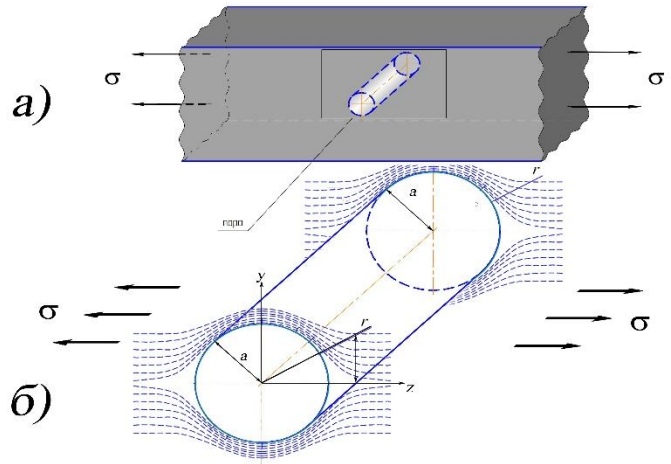


Рис. 2. Цилиндрическая пора в растянутом образце (а); планарные координаты в сечении поры (б)

Fig. 2. A cylindrical pore in a tensile sample (a); planar coordinates in the pore section (б)

$$\sigma_{zz} = \sigma\left[1 + \frac{a^2\left(y^2 - z^2\right)}{r^2}\right]; \sigma_{zy} = \sigma\frac{-2a^2 zy}{r^4}.$$

Функции $\sigma_{zz}(z,y)$ и $\sigma_{zy}(z,y)$ подчиняются условию равновесия

$$\frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial\sigma_{zy}}{\partial y} = 0.$$

Компоненту тензора напряжений σ_{yy} определяли с помощью дополнительного условия равновесия

$$\frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} = 0.$$

Для σ_{yy} получили выражение

$$\sigma_{yy} = \sigma\left[const\left(z\right) - \frac{a^2\left(y^2 - z^2\right)}{r^4}\right].$$

Результаты и их обсуждение

Определение компонент тензора напряжений в окрестностях поры в форме двояковыпуклой линзы

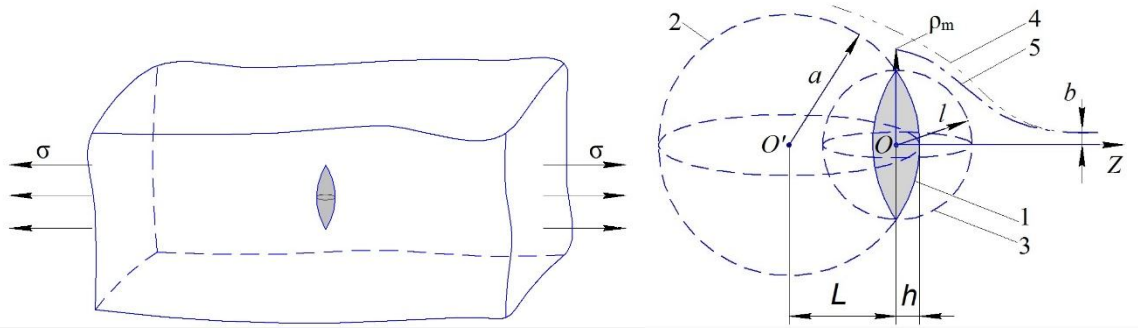
Учитывали, что, наряду с объёмом и поверхностью заметную роль в окрестностях таких пор могут играть их заострённый край (рис. 3).

На большом удалении от центра линзы силовая линия проходит по прямой на расстоянии «b» от оси линзы. Вблизи вершины и за ней форма этой условной линии близка к окружности с центром в точке О. В отличие от неё, истинная силовая линия возле края лин-

зы проходит ниже. На большом удалении от поры истинная (5 на рис. 3) и условная (4 на рис. 3) силовые линии совпадают. Расстояние «*b*» от линии до оси *z* (прицельное расстояние) есть параметр, фигурирующий в уравнениях обеих линий.

Уравнение истинной силовой линии описывает связь между ρ и z в виде ρ = ρ(z,*a*,*b*), (ρ,*z* – координаты в цилиндрической системе, «*a*» и «*b*» – параметры). С помощью функции ρ(*z*,*b*) компоненты тензора напряжений σ_{zz} и $\sigma_{z\rho}$ определяются следующим образом:

$$\sigma_{z\rho}^{-1} = \frac{\partial \rho^2}{\partial b^2} = \frac{\rho}{b}\frac{\partial \rho}{\partial b}; \sigma_{z\rho}^{-1} = \frac{\rho}{b}\frac{\partial z}{\partial b}. \qquad (1)$$



а) б)

Рис. 3. Пора в образце (а). Поэтапное представление поры в форме двояковыпуклой линзы (1) в виде сферических пор радиуса «a» (2) и «l» (3). Условная (4) и истинная (5) силовые линии (б)

Fig. 3. A pore in the sample (a). Step-by-step representation of the pore in the form of a biconvex lens (1) as spherical pores of radius "a" (2) and "l" (3). Datum (4) and true (5) force lines (б)

Здесь и далее под σ_{zz} и $\sigma_{z\rho}$ понимали приведённые величины, то есть, результаты деления истинных величин на величину внешнего напряжения σ. Уравнение условной линии (или реальной линии при $z > h$) имеет вид $\rho_a = \rho_a(z,a,b)$ в уравнении

$$b^2 = \rho_a^2\left[1 - \frac{a^4}{\left(\rho_a^2 + L_z^2\right)^2}\right], \left(L_z = L + z\right). \qquad (2)$$

Функция ρ_a задана в неявном виде. При установлении вида зависимости использовали результаты мысленного эксперимента, когда силовые линии проходят мимо сферической полости радиусом $a = l$. Силовая линия с прицельным расстоянием b пересекает плоскость $z = 0$ на расстоянии ρ_1 от центра сферы, причём, согласно ранее полученному результату [11],

$$b^2 = \rho_1^2\left[1 - \frac{l^4}{\rho_1^4}\right].$$

Предполагали, что в случае сферической линзы того же габарита l силовая линия с параметром b пересечёт плоскость $z = 0$ на расстоянии от центра, не превышающем ρ_1. Величина ρ_1 является первой приблизительной оценкой ρ_m. Дальнейшее уточнение основывали на том, что край поры – двояковыпуклой линзы сильнее концентрирует

силовые линии нежели край поры – сферы. При этом использовали схему мысленного эксперимента, когда силовая линия «*b*» встречает на своём пути сферическую пору радиусом «*a*» ($a^2 = l^2 + L^2$). Искривление первоначально прямой силовой линии начинается у полюса сферической поверхности радиусом «*a*». В итоге, для ρ_m получили выражение

$$\rho_m^2 = l^2 + b^2 + \frac{l^2}{2a^2}b^2 + Bb^4, \quad B = \frac{3l^2L^2 + a^4}{8l^2a^4}. \qquad (3)$$

При опоре на этот результат были получены приблизительные формулы, описывающие поле напряжений около сферической линзы. При этом рассуждали следующим образом. Для истинной функции силовой линии $\rho = \rho(z,a,b)$ можно записать

$$\rho = \rho_a - S(z,b).$$

О вспомогательной функции $S(z,b)$ считали известным следующее:

$$z = 0,\ S = \rho_b - \rho_m = f_{(b)}, \quad S = f_{(b)}g. \qquad (4)$$

Функция g – безразмерная. График её – ниспадающая линия, имеющая горизонтальные касательные в точке $z = 0$ и в бесконечно удалённой точке.

При малых z($z \ll h$)можно записать

$$\rho = \rho_m + \frac{d^2\rho}{dz^2}|_0\ z^2$$

(в точке $z = 0$ первая производная равна нулю).

Применяя правило

$$\sigma_{zz}^{-1} = \frac{\rho}{b}\frac{d\rho}{db}|_z,$$

получим для σ_{zz} в точке $z = 0$, $\rho = l$

$$z = 0,\ \sigma_{zz}^{-1} = \frac{l^2}{2a^2},\ldots.\sigma_{zz} = \frac{2a^2}{l^2}. \qquad (5)$$

На основании этого результата считали, что в точке $z = 0$, $\rho = l$ (вершина профиля линзы) величина σ_{zz} будет превышать в a^2/l^2 раз таковую в случае, когда вместо линзы будет сфера радиусом «*a*» (и точка $z = 0$, $\rho = l$ есть обычная точка сферы). Аналогичные рассуждения применяли и к другим точкам окрестности $z = 0$, $\rho = l$.

Представим, что вначале в нагруженном образце имеется полость в виде сферы радиусом *l*. Функции σ_{zz} и $\sigma_{z\rho}$ при этом имеют вид:

$$\sigma_{zz}^{(o)} = 1 + \frac{l^4\left(\rho^2 - z^2\right)}{\left(\rho^2 + z^2\right)^3};\ldots. \quad \sigma_{z\rho}^{(o)} = \frac{l^4 2\rho z}{\left(\rho^2 + z^2\right)^3}. \qquad (6)$$

(символом «о» отмечен случай сферической поры).

При этом, в соответствии с формулами (6) в точке $z = 0$, $\rho = l$ получим $\sigma_{zz}^{(o)} = 2$, $\sigma_{z\rho}^{(o)} = 0$; а в точке $z = l$, $\rho = 0$ обе эти величины равны нулю.

Далее сферическая пора «*l*» эволюционирует в линзу с параметрами *l* (внешний радиус), *h* (полутолщина в центре), «*a*» (радиус кривизны поверхности). Допускаем, что для такого объекта в точке $z = 0$, $\rho = l$ результатом будет $\sigma_{zz} = 2a^2/l^2 = 2(1+L^2/l^2)$,$(L^2 = a^2 - l^2)$.

Второе допущение состоит в том, что в точке, являющейся полюсом поверхности (как сферической, так и линзообразной поры) величины σ_{zz} и $\sigma_{z\rho}$

должны равняться нулю. В новой ситуации («линза *l, h*») это должно происходить при $z = h$.

При синтезе обеих описанных допущений, в отношении общей формулы для σ_{zz} или $\sigma_{z\rho}$ приняли следующее: 1) при $L = 0$, $l =$ «a» и малых z она должна иметь вид (6); 2) при $L \neq 0$, $l<a$ и z, близких к hона должна иметь вид

$$\sigma_{zz} = 1 + \frac{\left(l^2 + L^2\right)^2 \left[\rho^2 - \left(L + z\right)^2\right]}{\left[\rho^2 + \left(L + z\right)^2\right]^3}$$

(это выражение можно получить из (1) и (2), считая $\rho = \rho_a$).

Исходя из этих соображений, для σ_{zz} было получено выражение

$$\sigma_{zz} = 1 + \frac{A_{(z)}\left[\rho^2 - Z_{(z)}^2\right]}{\left[\rho^2 + Z_{(z)}^2\right]^3}. \qquad (7)$$

Здесь $A_{(z)}$ – переходная функция от начального значения A_0 β_0 $l^4 = a^2 l^2$ к значению $A_1 = a^4$ при $z = h$; $Z_{(z)}$ – функция z, описывающая переход от z при $z << h$ к $L + z$ при $|z - h| << h$.

При использовании уравнения (7) и условии равновесия

$$\partial\sigma_{zz} / \partial z + (1/\rho)(\rho\sigma_{z\rho}) / \partial\rho = 0 \qquad (8)$$

для $\sigma_{z\rho}$получаем:

$$\sigma_{z\rho} = \frac{-2A\rho Z Z_z^l}{\left(\rho^2 + Z^2\right)^3} + \frac{A_z^l \rho}{2\left(\rho^2 + Z^2\right)^2} + \frac{f}{\rho},$$

где $Z_z^l = dZ/dz$, $A_z^l = \partial A/\partial z$, f – постоянная интегрирования (может быть функцией z).

Постоянная f принята равной нулю, как это имеет место в аналогичном хрестоматийном случае $l = a$, $L = 0$. Выражение для $\sigma_{z\rho}$ можно упростить и дальше, воспользовавшись некоторой свободой подбора функций Z и A, в частности потребовав для них соотношения

$$\frac{A_z^l}{A} = \frac{4Z\left(Z_z^l - 1\right)}{\rho^2 + Z^2}, \quad \left(Z_z^{\,l} = dZ / dz\right). \qquad (9)$$

В этом случае функция $\sigma_{z\rho}$ будет выглядеть как

$$\sigma_{z\rho} = \frac{-2AZ\rho}{\left(\rho^2 + Z^2\right)^3}. \qquad (10)$$

Функция A должна быть решением уравнения (9). При численном решении уравнения функция Z моделировалась выражением

$$Z = hx + L2^n x^n / (1 + x)^n, \qquad (11)$$

где $x = z/h$. $n = 2hB/(1\text{-}B)L$, а B есть выражение

$$B = \left(\ln A_1 - lnA_0\right) / \left[\ln\left(\rho^2 + a^2\right) - \ln\rho^2\right]. \qquad (12)$$

Рабочая формула для A имеет вид

$$\ln\left(A / A_0\right) = Bx\ln(1 + Z^2/\rho^2). \qquad (13)$$

Итоговые формулы для σ_{zz} и $\sigma_{z\rho}$ – имеют вид (7) и (10). Формулы (11), (12), (13) являются вспомогательными.

В случае, когда полость имеет форму сферы, величины «a» и «l» совпадают, поэтому при $z = 0$. $b \to 0$, $\rho \to 1$ будет $\sigma_{zz} = 2$. Чем острее кромка полости в виде двояковыпуклой линзы (чем больше a/l), тем больше σ_{zz}.

Обсуждение результатов

При выяснении геометрии границы зон пластичности около полостей, необходимо рассмотреть главные слагаемые, входящие в левую часть критерия пластичности Губера – Мизеса. Речь должна идти только о точках области,

окружающей кромку линзы. К главным слагаемым были отнесены σ_{zz}^2 и $3\sigma_{z\rho}^2$. Слагаемые $\sigma_{\rho\rho}\sigma_{zz}$ и $\sigma_{\rho\rho}^2$ можно считать поправочными, так как по оценкам максимальная величина $\sigma_{\rho\rho}$ составляет лишь несколько процентов от величины $(\sigma_{zz})_{max}$. В общем виде уравнение по условию пластичности записали как

$$\sigma_{zz}^2 + 3\sigma_{z\rho}^2 = \left(\sigma_T/\sigma\right)^2 = \beta^2, \qquad (14)$$

где σ_T– предел текучести при растяжении; $\sigma_T/\sigma = \beta$ – приведённый к внешнему напряжению предел текучести.

Сказанное относится к случаям, когда между параметрами полости «*l*» и «*a*» нет сильного неравенства.

Комбинируя уравнение (14) с формулами (7) и (10), можно привести его к виду:

$$3\left(\frac{\rho^2 + Z^2}{\rho^2 - Z^2}\right)^2 \left(\sigma_{zz} - 1\right)^2 + + \qquad (15)$$
$$2\left(\sigma_{zz} - 1\right)\left(2 - \sigma_{zz}\right) = \beta^2 - 1.$$

Уравнение (14) или (15) с сопутствующими ему формулами (9), (12), (13) - (16) можно решить численно. Помимо этого, можно дополнительно указать характерные точки граничной поверхности зон пластичности. Проще всего это можно сделать для случая $\beta = 2$.

Первой такой точкой является точка зоны, наиболее удалённая от поверхности линзы. Координаты её – $z = 0$, $\rho = \rho_{max}$. Последняя определяется из равенства (вырожденного уравнения (14) как: $z = 0$, $\sigma_{zz} = \beta$, $\rho_m = [a^2 l^2/(\beta - 1)]^{1/4}$. При $\beta = 2$ получаем $\rho_{max} = (al)^{1/2}$.

Ещё одной характерной точкой является точка, находящаяся на линии пересечения граничной поверхности зоны пластичности и плоскости $\rho = l$. Координата этой точки –z_l.

Третьей характерной точкой можно считать крайнюю точку зоны пластичности на поверхности полости. Координаты точки – z_r, ρ_r.

В табл. 1 показаны результаты вычислений для величин ρ_{max}/a; ρ_{max}/l; z_l; z_l/h; z_r, ρ_r при разных l/a.

Для последующего сопоставления с экспериментальными данными был сделан переход на базовые величины l и h (вместо a и l), что осуществлено в третьей и пятой строках табл. 1.

В табл. 2 приведены размеры (в микронах) зон пластичности около пор при разных значениях l(продольный размер) и h/l (форма поры).

Таблица 1

Параметры пор (результаты вычислений) для разных l/a

Table 1

Pore parameters (calculation results) for different l/a

l/a	0,8	0,707	0,6	0,5
ρ_{max}/a	0,895	0,841	0,775	0,707
ρ_{max}/l	1,118	1,189	1,291	1,414
z_l/a	0,158	0,142	0,117	0,103
z_l/h	0,395	0,485	0,587	0,760
z_r/a	0,226	0,154	0,09	0,065
ρ_r/a	0,555	0,508	0,456	0,37
ρ_r/l	0,694	0,718	0,760	0,740

Таблица 2

Количественная оценка размеров пластической зоны около полости при разных значениях l и $h^{*)}$

Table 2

Quantitative estimation of the plastic zone size near the cavity at different values of l and $h^{*)}$

h/l	0,5	0,4085	0,3335	0,268
$\rho_{max}- l$, мкм	1,18 5,9 11,8	1,89 9,45 18,9	2,91 14,6 29,1	4,14 20,7 41,4
z_1, мкм	1,98 9,9 19,8	1,98 9,9 19,8	1,96 9,8 19,6	2,04 10,2 20,4
$l-\rho_r$, мкм	3,06 15,3 30,6	2,82 14,1 28,2	2,40 12,0 24,0	2,6 13,0 26,0

*) Данные в микронах для зоны пластичности около пор при разных значениях l и h. Цифры в строчках по порядку сверху-вниз относятся к случаям l = 10 мкм, 50 мкм и 100 мкм, соответственно. Цифры в верхней строке соответствуют цифрам l/L = 4/3…1..3/4..1/$3^{1/2}$, получаемым из верхней строки табл. 2.

Выводы

1. Как объёмный объект описанные зоны пластичности представляют собой поверхности сфероида и эллипсоида, окружающие сферические и линзообразные поры. При l/a, близких к единице (например, в случае l = 0,8a), сечение такой поры близко к сечению, полученному ранее [11] для случая пор сферической формы (формально это случай l/a = 1, h/a = 1). Очевидно, что чем меньше отношение h/l для поры, тем дальше в поперечном направлении распространяется зона пластичности (больше $\rho_{max} - l$), становясь при этом всё более узкой (z_1 примерно пропорциональна h).

2. В качестве характерных геометрических параметров зон пластичности около линзообразной поры были определены: 1) её наибольшая протяжённость в радиальном направлении от вершины, а также её доля от длины l - (ρ_{max} – l) и ρ_{max}/l – 1; 2) характерная толщина зоны (ρ_{max}– l)l/a; 3) площадь линзы, закрываемая зоной ($2\pi a z_r$), и её доля $\varepsilon = z_r/h$ от площади поверхности линзы; 4) объём зоны и его доля от объёма линзы $2\pi lz[0,5\pi(\rho_m - l) + l - \rho_r)]$ и $\frac{2lz}{h}\frac{0,\pi(\rho_{max}-l)+l-\rho_r}{l^2-Lh-0,333h^2}$.

3. Развитие зон пластичности около пор различной морфологии в сталях в условиях стресс-коррозии стимулирует изменение (рост) кинетических характеристик металла и создание благоприятных условий для ускоренной диффузии (обезуглероживания). В области зон пластичности в окрестностях пор под действием внешнего и внутреннего (давление газов) напряжений создание каналов облегченной диффузии [2] фор-

мирует в точках *D*, *B* и *C* очаги зарождения субмикротрещин. Образующиеся в радиальных направлениях ювенильные свободные поверхности создают зоны реализованных аккомодационных возможностей среды – зоны пластичности. Вместе с ростом радиальных трещин к их вершинам от поры, находящейся под высоким давлением, ускоренно диффундируют газы. Считали, что образование кольцеобразных трещин на периферии поры является результатом концентрации напряжений на сферическом фронте встречных газовых потоков: водорода извне и газов от поры [11].

4. Предложенный в работе алгоритм анализа распределения напряжений позволяет прогнозировать интенсивность развития зон пластичности (трещинообразования) в зависимости от соотношения параметров β (β = σ_T/ σ) и *s* (*s* = *p*/σ), то есть от соотношения величин внешнего напряжения, предела текучести стали и давления газов в поре. Сделанный расчет позволил уточнить место зарождения, форму и масштаб развития зон пластичности (трещинообразования) в окрестностях пор различной морфологии в зависимости от соотношения внешнего напряжения и давления газов в порах.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [12-26].

Список литературы

1. Development of Damage and Decarburization of High-Strength Low-Alloy Steels Under Hydrogen Embrittlement / N.N. Sergeev, A.N. Chukanov, V.P. Baranov, A.A. Yakovenko // Metal Science and Heat Treatment. 2015. Vol. 57. № 1. P. 63-68.

2. Взаимосвязь повреждаемости и перераспределения примесей внедрения в конструкционных сталях при деформации и коррозионном воздействии / А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, А.А. Яковенко, И.М. Леонтьев // Деформация и разрушение. 2015.№ 6. С.37-42.

3. Давыдов Ю.И., Агеев В.С., Сергеев Н.Н. Обезуглероживание стали в агрессивной среде // Технология машиностроения. 1974. Вып. 35. С. 145-152.

4. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 217 с.

5. Chukanov A.N., Levin D.M., Yakovenko A.A. Use and Prospects for the Internal Friction Method in Assessing the Degradation and Destruction of Iron-Carbon Alloys // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2011.Vol. 75. № 10. P. 1340-1344. ISSN1062-8738.

6. Термодинамическое обоснование «метанового» механизма деструкции упрочненных конструкционных сталей при электролитическом наводороживании под напряжением / А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, В.А. Терешин, Р.Н. Ростовцев, А.А. Яковенко, И.М. Леонтьев // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 10. С. 32–39.

7. Обезуглероживание, водородная хрупкость и старение высокопрочных сталей в условиях электролитического наводороживания / И.М. Леонтьев, А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, А.А. Яковенко // «XXI Петербургские Чтения по проблемам прочности: матер. межд. конф. (15-17.04. 2014 г.). СПб., 2014. С. 194-197.

8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 т. Т. VII. Теория упругости. М.: Наука, Гл. ред. физматлитературы, 1982. 248 с.

9. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.

10. Свешников А.Г., Тихонов А.Н. Теория функций комплексной переменной. М.: Физматлит, 2010. 336 с.

11. Formation of Plastic Zones near Spherical Cavity in Hardened Low-Carbon Steels under Conditions of Hydrogen Stress Corrosion / N.N. Sergeev, V.A. Tereshin, A.N. Sergeev, D.M. Khonelidze, A.E. Gvozdev, A.N. Chukanov, I.M. Leont'ev, A.G. Kolmakov, A.A. Yakovenko // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9. № 4. P. 663-669.

12. Влияние микроструктурных факторов и термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса А600 / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 2(77). С. 52-63. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63.

13. Влияние технологических режимов упрочнения арматурного проката для композиционных железобетонных конструкций на чувствительность к коррозионно-механическому разрушению / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 558-568.

14. Кинетика распространения трещин в металлических материалах при коррозионно-механическом разрушении / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 1 (26). С. 24-37.

15. Исследование сравнительной стойкости арматурных сталей в процессе ускоренных лабораторных испытаний на водородное растрескивание / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 1 (26). С. 38-48.

16. Влияние уровня растягивающих напряжений на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 6-19.

17. Влияние температуры отпуска на стойкость арматурной стали 20ГС2 против водородного растрескивания / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев,

Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 54-67.

18. Взаимодействие дисперсных компонентов смазочного композиционного материала, содержащего наночастицы дихалькогенидов вольфрама / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 5. Ч. 2. С. 136-144.

19. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3-7.

20. Технология конструкционных, эксплуатационных и инструментальных материалов / А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Д. Бреки. Тула, 2018. 406 с.

21. Жидкие и консистентные смазочные композиционные материалы, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния, для узлов трения управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, Д.А Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий / под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 166 с.

22. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: ИздательствоТулГУ, 2016. 235 с.

23. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. No. 1. P. 126-129.

24. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов первого рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 1. С. 15-21.

25. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 12. С. 9-13.

26. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // Материаловедение. 2017. № 7. С. 11-22.

References

1. Sergeev N. N., Chukanov A. N., Baranov V. P., Yakovenko A. A. Development of Damage and Decarburization of High-Strength Low-Alloy Steels Under Hydrogen Embrittlement. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 57, no. 1, pp. 63-68.

2. Chukanov A. N., Sergeev N.N., Tikhonov I. V., Yakovenko A. A., Leontiev I. M. Vzaimosvyaz' povrezhdaemosti i pereraspredeleniya primesei vnedreniya v konstruktsionnykh stalyakh pri deformatsii i korrozionnom vozdeistvii [The relationship of damage and redistribution of impurities introduction in structural steels under deformation and corrosion]. *Deformatsiya i razrushenie = Deformation and destruction*, 2015, no. 6, pp. 37-42 (In Russ.).

3. Davydov Yu. I., Ageev V. S., Sergeev N. N. Obezuglerozhivanie stali v agressivnoi srede [Decarburization of steel in an aggressive environment]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Mechanical engineering technology*, 1974, vol. 35, pp. 145-152 (In Russ.).

4. Kolachev B. A. *Vodorodnaya khrupkost' metallov* [Hydrogen brittleness of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 217 p. (In Russ.).

5. Chukanov A. N., Levin D. M., Yakovenko A. A. Use and Prospects for the Internal Friction Method in Assessing the Degradation and Destruction of Iron-Carbon Alloys. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2011, vol. 75, no. 10, pp. 1340-1344. ISSN 1062-8738.

6. Chukanov A. N., Sergeev N. N., Tereshin V. A., Rostovtsev R. N., Yakovenko A. A., Leontiev I. M. Termodinamicheskoe obosnovanie «metanovogo» mekhanizma destruktsii uprochnennykh konstruktsionnykh stalei pri elektroliticheskom navodorozhivanii pod napryazheniem [Thermodynamic study "methane" mechanism of destruction of reinforced structural steel in the electrolytic hydrogen absorption under stress]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Deformation and fracture of materials,* 2015, no. 10, pp. 32-39 (In Russ.).

7. Leontiev I. M., Chukanov A. N., Sergeev N. N., Yakovenko A. A. [Decarburization, hydrogen brittleness and aging of high-strength steels under conditions of electrolytic hydrogenation]. *Mater. mezhd. konf. "XXI Peterburgskie Chteniya po problemam prochnosti"* [Mater. intl. Conf. "XXI Petersburg Readings on strength problems]. Saint-Petersburg, 2014, pp. 194-197 (In Russ.).

8. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Teoriya uprugosti* [Theoretical physics]. Vol. VII. Theory of elasticity. Moscow, Nauka Publ., 1982, 248 p. (In Russ.).

9. Vladimirov V. I. *Teoriya funktsii kompleksnoi peremennoi* [Physical heat of metal destruction]. Moscow, Metallurgy Publ., 1984, 280 p. (In Russ.).

10. Sveshnikov A. G., Tikhonov A. N. *Teoriya funktsii kompleksnoi peremennoi* [Theory of functions of a complex variable]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010, 336 p. (In Russ.).

11. Sergeev N. N., Tereshin V. A., Sergeev A. N., Khonelidze D. M., Gvozdev A. E., Chukanov A. N., Leont ev I. M., Kolmakov A. G., Yakovenko A. A. Formation of Plastic Zones near Spherical Cavity in Hardened Low-Carbon Steels under Conditions of Hydrogen Stress Corrosion. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 663-669.

12. Sergeyev N. N., Izvolsky V. V., Sergeyev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Clementyev D. S. Vliyanie mikrostrukturnykh faktorov i termicheskoi obrabotki na korrozionnuyu stoikost' armaturnoi stali klassa A600 [The influence of microstructural factors and heat treatment on the corrosion resistance of reinforcing steel of class A600].

Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 2(77), pp. 52-63 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-2-52-63.

13. Sergeev N. N., Izvol'skiy V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Pantjuhin O. V. Vliyanie tekhnologicheskikh rezhimov uprochneniya armaturnogo prokata dlya kompozitsionnykh zhelezobetonnykh konstruktsii na chuvstvitel'nost' k korrozionno-mekhanicheskomu razrusheniyu [The impact of technological modes of hardening of reinforcing bars for composite concrete structures for sensitivity to corrosion-mechanical failure]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science,* 2019, vol. 3, pp. 558-568 (In Russ.).

14. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V.. Kinetika rasprostraneniya treshchin v metallicheskikh materialakh pri korrozionno-mekhanicheskom razrushenii [Kinetics of crack propagation in metal materials under corrosion-mechanical fracture]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University*. *Series Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 1 (26), pp. 24-37 (In Russ.).

15. Sergeev N.N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Clementyev D. S. Issledovanie sravnitel'noi stoikosti armaturnykh stalei v protsesse uskorennykh laboratornykh ispytanii na vodorodnoe rastreskivanie [Study of the comparative resistance of reinforcing steels in the process of accelerated laboratory tests for hydrogen cracking]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University*. *Series Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 1 (26), pp. 38-48 (In Russ.).

16. Sergeev N., Sergeev A. N., Gvozdev A. E., Tikhonov I. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Vliyanie urovnya rastyagivayushchikh napryazhenii na dlitel'nuyu prochnost' armaturnykh stalei v vodorodsoderzhashchikh sredakh [Influence of the level of tensile stresses on the long-term strength of reinforcing steels in hydrogen-containing media]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University*. *Series Engineering and Technologies,* 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 6-19 (In Russ.).

17. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., A Gvozdev. E., Ageev E. V. Vliyanie temperatury otpuska na stoikost' armaturnoi stali 20GS2 protiv vodorodnogo rastreskivaniya [The influence of the tempering temperature of for resistance of reinforcing steel 20GS2 against hydrogen cracking]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University*. *Series: Engineering and Technologies,* 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 54-67 (In Russ.).

18. Breki A. D., Tolochko O. V., Vasilyeva E. S., Gvozdev A. E., Starikov N. E. Vzaimodeistvie dispersnykh komponentov smazochnogo kompozitsionnogo materiala, soderzhashchego nanochastitsy dikhal'kogenidov vol'frama [Interaction of dispersed components of lubricant composite material containing nanoparticles of tungsten dichalcogeni-

des*]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical science*, 2015, no. 5, pt. 2, pp. 136-144 (In Russ.).

19. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Kolmakov A. G., Tikhonova I. V., Sergeev A. N., Provotorov D., Janelidze D. M., Maly D. V., Golyshev I. V. Raspredelenie temperatur i struktura v zone termicheskogo vliyaniya dlya stal'nykh listov posle lazernoi rezki [The distribution of temperature and structure in the heat affected zone for steel sheets after laser cutting]. *Materialovedenie = Materials Science,* 2016, no. 9, pp. 3-7 (In Russ.).

20. Gvozdev A. E., Starikov N. E., Sergeev N.N., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Breki A. D. *Tekhnologiya konstruktsionnykh, ekspluatatsionnykh i instrumental'nykh materialov* [Technology of structural, operational and tool materials]. Tula, 2018, 406 p. (In Russ.).

21. Breki A. D., Medvedev V. V., Krylov N.A., Aleksandrov S. E., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Starikov N. E., Provotorov D.A., Sergeev N. N., Mali D. V. *Zhidkie i konsistentnye smazochnye kompozitsionnye materialy, soderzhashchie dispersnye chastitsy gidrosilikatov magniya, dlya uzlov treniya upravlyaemykh sistem* [Liquid and grease lubricants composite materials containing dispersed particles of magnesium hydrosilicates, for friction control systems]. Tula, 2016. 166 p. (In Russ.).

22. Shorshorov M. Kh., Gvozdev A. E., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Breki A. D., Sergeev N. N., Kuzovlev O. V., Starikov N. E., Mali D. B. *Razrabotka progressivnykh tekhnologii polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovykh i kompozitsionnykh nanomaterialov* [Development of progressive technologies for the production and processing of metals, alloys, powder and composite nanomaterials]. Tula, 2016. 235 p. (In Russ.).

23. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Starikov N. E., Provotorov D. A., Sergeyev N. N., Khonelidze D. M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

24. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonov I. V., Kolmakov A. G. Rol' protsessa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotorykh fazovykh perekhodov pervogo roda [The role of nucleation in the development of some phase transitions of the first kind]. *Materialovedenie = Materials Science,* 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

25. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Provotorov D. A. Vliyanie deformatsionnoi povrezhdaemosti na formirovanie mekhanicheskikh svoistv malouglerodistykh stalei [Influence of deformation damage on the formation of mechanical properties of low-carbon steel]. *Proizvodstvo prokata = Production of rolled products*, 2015, no. 12, pp. 9-13 (In Russ.).

26. Baranov V. P., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Sergeev N. N., Chukanov A. N. Mnogourovnevyi podkhod k probleme zamedlennogo razrusheniya vysokoprochnykh konstruktsionnykh stalei pod deistviem vodoroda [Multilevel approach to the problem of delayed destruction of high-strength structural steels under the action of hydrogen]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2017, no. 7, pp. 11-22 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Чуканов Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии и сервиса, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Alexander N. Chukanov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: technology@tspu.tula.ru

Терешин Валерий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры технологии и сервиса, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: e-mail: technology@tspu.tula.ru

Valery A. Tereshin, Cand. of Sci. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Associate Professor of the Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: technology@tspu.tula.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Aleksandr E. Gvozdev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergey N. Kutepov, Cand. of Sci. (Pedagogical), Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Сергеев Александр Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: ansergueev@mail.ru

Aleksandr N. Sergeev, Dr. of Sci. (Pedagogical), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation
e-mail: ansergueev@mail.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3862-8624

Evgeniy V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3862-8624

Яковенко Александра Александровна, кандидат технических наук, инженер, ООО «Металлург-Туламаш», г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: AlexYakovenk@gmail.com

Alexandra A. Yakovenko, Cand. of Sci. (Engineering), Engineer, LLC«Metallurg-Tulamash", Tula, Russian Federation,
e-mail: AlexYakovenk@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-53-66

CC BY 4.0

Рекомендации по выбору сменных режущих многогранных пластин для оснащения проходных токарных резцов

Е.А. Кудряшов [1], И.М. Смирнов [1], Д.В. Гришин [1,2] ✉

[1] АО «Научно-исследовательский инженерный институт»
ш. Энтузиастов, 6, г. Балашиха, 143912, Московская обл., Российская Федерация

[2] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: kea-swsu@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Основной технологической проблемой инструментального обеспечения операций механической обработки точением поверхностей деталей различной конструктивной сложности является выбор рациональной конструкции сменной режущей многогранной пластины для оснащения проходных резцов. Известные технические решения связаны с подбором формы сменной пластин и рациональных геометрических параметров ее режущего элемента к практически максимально приближенному искомому варианту. Однако в условиях действующего машиностроительного производ-ства невозможно, да и экономически невыгодно иметь большое количество стандартных режущих пластин с пошаговой градацией геометрических параметров. Следует учитывать, что операция точения конструктивно сложных поверхностей деталей класса 71-Тела вращения характеризуется мно-говариантностью инструментального оснащения, касающегося как выбора оптимальной конструкции инструмента, так и рациональной марки его режущей части. Наиболее трудоемкая часть решаемой задачи связана с исполнением комплексного требования, предъявляемого к марке инструментального материала, а именно: сохранению необходимой стойкости в условиях прерывистого резания, в пределах границ заданной партии деталей, при обеспечении установленных производственным заданием производительности, точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей сложного профиля.*

Методы. *Для решения поставленной задачи использованы методы системного анализа, позволившие установить функциональную взаимосвязь между конструктивной сложностью обрабатываемых резанием поверхностей сложного профиля и конструкцией сменной режущей многогранной пластиной проходного токарного резца.*

Результаты. *Показано, что потенциально лучшей маркой инструментального материала, для условий чистого точения конструктивно сложных поверхностей, является композит 10. Представлены характеристики инструментальных материалов, позволяющие альтернативным выбором рациональной марки сменной режущей многогранной пластины подтвердить адекватность принятых решений.*

Заключение. *Разработаны рекомендации по выбору конструктивной формы и марки инструментального материала сменных режущих многогранных пластин для операций чистого точения поверхностей сложного профиля деталей класса 71-Тела вращения. Показано, что применение рациональной формы режущего элемента способно, в условиях прерывистого резания, обеспечить заданные показатели производительности, точности и качества обработки.*

© Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Гришин Д.В., 2019

Ключевые слова: *поверхность сложного профиля; проходной резец; сменная режущая многогранная пластина; композит; работоспособность режущего элемента; точность; качество обработки.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Гришин Д.В. Рекомендации по выбору сменных режущих многогранных пластин для оснащения проходных токарных резцов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 53-66. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-53-66.

Статья поступила в редакцию 19.08.2019

Статья подписана в печать 25.09.2019

Статья опубликована 25.10.2019

Recommendations for the Selection of Changeable Indexable Inserts for Straight Turning Tools

Evgeny A. Kudryashov [1], Igor M. Smirnov [1], Dmitry V. Grishin [1,2] ✉

[1] JSC Scientific Research Engineering Institute
6 Enthusiastov str., Balashikha, Moscow Region 143912, Russian Federation

[2] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: kea-swsu@mail.ru

Abstract

Perpose of research. *The main technological problem of tooling backup of machining operations by turning the surfaces of parts of various structural complexities is the choice of the rational design of a changeable indexable insert for equipping straight-turning tool. Known technical solutions are associated with the selection of the shape of the changeable insert and the rational geometric parameters of its cutting element to the closest possible desired option. However, in the current engineering industry it is impossible, and it is economically unprofitable to have a large number of standard cutting inserts with step-by-step gradation of geometric parameters. It should be noted that the operation of turning structurally complex surfaces of parts of the class 71-Body of rotation is characterized by the multivariance of tooling backup, concerning both the selection of the optimal tool design and the rational grade of its cutting part. The most time-consuming part of the task is related to the fulfillment of the multiple requirements for the grade of tool material, namely: maintaining the necessary resistance in the conditions of interrupted cutting, within the boundaries of a given batch of parts, while ensuring the productivity, accuracy and roughness of the machined surfaces of complex profiles established by the production task.*

Methods. *To solve this problem, methods of system analysis were used, which made it possible to establish a functional relationship between the structural complexity of surfaces machined by cutting of complex profile and the design of changeable indexable insert of straight turning tool.*

Results*. It has been shown that the composite10 is potentially the best grade of tool material, for clean turning of structurally complex surfaces. The characteristics of tool materials are presented that allow, by alternative choice of a rational grade of changeable indexable insert, to confirm the adequacy of the decisions made.*

Conclusion *Recommendations have been developed on choosing the structural form and grade of tool material of changeable indexable inserts for clean turning operations on surfaces of complex profiles of parts of the class 71-Body of rotation. It is shown that the use of a rational shape of the cutting element is capable, under intermittent cutting, to provide predetermined performance indicators, accuracy and processing quality.*

***Keywords**: surface of complex profile; straight turning tool; changeable indexable insert; composite; cutting element operability; accuracy; processing quality.*

***Conflict of Interest:** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Kudryashov E. A., Smirnov I. M., Grishin D. V. *Recommendations for the selection of changeable indexable inserts for straight turning tools. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 53-66 (In Russ.). https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-5-53-66.

Received 19.08.2019

Accepted 25.09.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

Современное состояние технологии обработки резанием, с позиции повышения эффективности применения металлорежущего инструмента, базируется на фундаментальных и прикладных знаниях инструментального обеспечения процессов изготовления поверхностей различной конструктивной и технологической сложности. Основу инструментального обеспечения современных машиностроительных производств составляют сборные конструкции режущего инструмента с механическим креплением сменных многогранных пластин (СМП).

Характерной особенностью лезвийного инструмента, применяемого для обработки точением конструктивно сложных поверхностей деталей, образованных сочетанием поверхностей вращения с элементами разрыва, является наличие высоких требований, предъявляемых не только к качеству подготовки режущих кромок СМП, но и к работоспособности в условиях прерывистого резания. Известно, что наиболее слабым звеном системы точения является режущая часть СМП, поскольку большинство отказов в работе сборного инструмента приходится на его режущий элемент. Поэтому совершенствованием процесса механической обработки с сохранением высокой работоспособности инструмента за счет усовершенствования классической формы передней поверхности режущего элемента на более сложную, позволяющей совместить высокую точность с производительностью чистовой токарной обработки в условиях прерывистого резания, является актуальной научной задачей.

Материалы и методы

Практическим решением важнейшей научной и производственной задачи по интенсификации процесса металлообработки деталей машин высокой конструктивной и технологической сложности является применение инструментов, оснащенных СМП из различных модификаций кубического нитрида бора (торговая марка – композиты).

Эти искусственные лезвийные сверхтвердые материалы находят применение на различных операциях механической обработки, однако широкое их внедре-

ние сдерживается из-за высокой хрупкости режущих элементов вследствие отсутствия необходимой размерной стойкости в условиях точения поверхностей сложного профиля (прерывистые поверхности, точение с ударом).

Вместе с тем, использование современных конструкций токарного инструмента, в том числе обладающих встроенным устройством демпфирования ударных нагрузок, является привлекательным не только для достижения высокой производительности, но и для гарантированного отсутствия прижогов обрабатываемой поверхности, а также ее шаржирования, что обычно свойственно операциям круглого наружного шлифования.

Поскольку главной тенденцией развития технологии лезвийной обработки является обеспечение работоспособности инструмента при высоких скоростях резания, характерных для современных станков и станочных систем, использование композитов в технологии лезвийной обработки отвечает требованиям разработчиков наукоемкой и конкурентной техники как в области качества, так и точности исполнения поверхностей различной конструктивной сложности. Кроме того, точение композитами обладает рядом существенных преимуществ, среди которых:

1) улучшенные характеристики качества обработанной поверхности, включая возможность придания микрорельефу регулярного характера, способного удерживать масляный слой для создания комфортных условий парам трения;

2) простота технологической наладки, в том числе:

– возможность применения стандартной конструкции проходного резца, оснащенной устройством демпфирования нагрузок прерывистого точения СМП, прототипированной аддитивной технологией под рациональные условия резания поверхности сложного профиля;

– возможность получения при помощи аддитивной технологии радиуса округления режущей кромки многогранной пластины не более 1,5 мкм, что в совокупности с высокими скоростями резания (5,0 м/с и выше) позволяет достигнуть шероховатости обработанной поверхности в диапазоне показателя Ra от 1,25 до 0,32 мкм и менее;

3) снижение производственных затрат, в том числе:

– основного времени, в сравнении с операцией круглого наружного шлифования;

– за счет меньшей стоимости основного оборудования и выполнения токарных работ менее квалифицированным станочником, в сравнении с трудоемкостью кругло-шлифовальных работ [1-4].

Результаты и их обсуждение

При выборе рациональной марки инструментального материала следует иметь в виду, что большинство деталей класса 71 – Тела вращения имеют на обрабатываемых поверхностях как отдельные, так и групповые вспомогательные элементы конструкции (разного рода пазы, шпонки, вспомогательные

отверстия и др.), различной формы и размеров, являющиеся источниками прерывистости точения базовой поверхности заготовки и вызывающими преждевременный износ и разрушение режущего элемента СМП. Поэтому важное значение приобретает способность инструментального материала противостоять негативным факторам прерывистого точения, в том числе за счет необходимого запаса прочности и износостойкости (табл. 1).

Таблица 1

Требования к свойствам инструментальных материалов, рекомендуемых к применению в условиях прерывистого точения

Table 1

Requirements for the properties of tool materials recommended for use in intermittent cutting

Свойства инструментального материала / Tool material properties	Условное обозначение / Symbol	Содержание предъявляемых требований / Content of requirements
Прочность и ударная вязкость / Strength and toughness	ПУВ / ST	ИМ должен обладать достаточными значениями механической прочности при растяжении и изгибе и иметь высокое сопротивление разрушению при циклическом нагружении прерывистого точения / MI must have sufficient values of mechanical strength under tension and bending and have a high resistance to fracture under cyclic loading of intermittent turning
Твердость / Hardness	Т / H	Твердость ИМ должна более чем в 2,5 раза превосходить твердость ОМ / The hardness of IM should be more than 2.5 times greater than the hardness of OM
Теплостойкость / Heat resistance	ТС / HR	ИМ должен сохранять прочность и износостойкость при высоких температурах резания, быть малочувствительным к циклическим изменениям температуры прерывистого резания / MI should maintain durability and wear resistance at high cutting temperatures, be insensitive to cyclic changes in the temperature of intermittent cutting
Износостойкость / Wear resistance	И / WR	ИМ должен иметь высокую степень сопротивляемости к удалению с контактных поверхностей РЭ своих частиц, что обеспечивается комплексом механических свойств: И=*f*(ПУВ,Т,ТС) / MI should have a high degree of resistance to the removal of its particles from the contact surfaces of the CE, which is ensured by the complex of mechanical properties: WR=*f*(ST,H,HR)

Окончание табл. 1 / End of table 1

Свойства инструментального материала / Tool material properties	Условное обозначение / Symbol	Содержание предъявляемых требований / Content of requirements
Сродство с ОМ / Affinity with OM	СОМ / AOM	Кристаллохимические свойства ИМ и ОМ должны существенно отличаться / Crystal-chemical properties of MI and OM should be significantly different
Теплопроводность / Thermal conductivity	ТП / ТС	ИМ должен иметь хорошую способность для быстрого отвода теплоты из зоны резания / MI should have a good ability to quickly remove heat from the cutting zone
Технологичность / Manufacturability	ТЛ / М	ИМ должен исключить затруднения с подготовкой РЭ к заточке и обработке точением / MI should eliminate the difficulty of preparing the OM for grinding and turning
Дополнительные условные обозначения: ИМ – инструментальный материал; ОМ-обрабатываемый материал; РЭ-режущий элемент / Additional conventions: IM - instrumental material; OM-processed material; CE-cutting element		

Из большого количества известных марок инструментальных материалов, в большей мере соответствующих требованиям табл. 1, выделим несколько способных, в условиях серийного производства, обеспечить точением поверхностей сложного профиля точность не грубее 7-го квалитета при параметре шероховатости *Ra* не более 1,25 мкм:

– композит 01 (эльбор-Р) – синтетический поликристаллический материал на основе кубического нитрида бора. Он имеет однородную мелкозернистую кристаллическую структуру темно-серого цвета без видимых включений;

– композит 03 (исмит) – синтетический поликристаллический материал на основе кубического нитрида бора. Его мелкозернистая структура состоит из сросшихся кристаллов кубического нитрида бора;

– композит 10 (гексанит-Р) – синтетический поликристаллический материал на основе вюрцитоподобного нитрида бора. Имеет тонкозернистую однородную структуру темно-серого или черного цвета.

К отличительным особенностям композитов относится наивысшая, среди инструментальных материалов, твердость. Композиты характеризуются высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения и, следовательно, малым износом, инструментальной стойкостью, теплопроводностью, коррозионной устойчивостью, надежностью, долговечностью и большим ресурсом. Особое достоинство композитов – химическая инертность по отношению к сталям и сплавам (табл. 2) [5-10].

Таблица 2

Физико-механические и химические характеристики инструментальных материалов

Table 2

Physicomechanical and chemical characteristics of tool materials

Условное обозначение марок композитов / Cutting tool material		Модуль упругости / Elasticity modulus	Предел прочности при изгибе / Ultimate bending strenght	Предел прочности при растяжении / Ultimate tensile strenght	Термостойкость / Heat stability	Коэффициент трещиностойкости / Cracking resistance factor
		E, ГПа	σ_b, ГПа	σ_t, ГПа	T, °C	K_{IC}, МПа·м$^{1/2}$
К01	— — —	840	0,98	0,49	1470	4,17
К05	— — —	700	0,50	0,22	1050	7,00
К10	———	880	1,50	0,39	1500	7,12
Т15К6	— — —	500	1,10	0,36	900	8,00
ВОК-60	-- -- -	350	0,60		1200	3,10

Произвести выбор потенциально лучшей марки инструментального материала позволяет критическое сопоставление физико-механических и химических характеристик, а также удельных параметров деформационно-спектрального анализа из которого следует, что предпочтение следует отдать композиту 10 как объективно лучшей марке инструментального материала, предназначенного для чистового точения поверхностей сложного профиля (рис. 1).

На рис.1 и в табл. 2: К01, К05, К10, Т15К6 и ВОК60 – условное обозначение марок инструментального материала композит 01, композит 05, композит 10, твердый сплав и режущая керамика, соответственно.

Альтернативный выбор рациональной марки инструментального материала СМП может быть осуществлен и расчетным методом, посредством коэффициента, характеризующего численное соотношение твердости инструментального материала с твердостью обрабатываемого материала:

$$K = \frac{HV_{\text{им}}}{HV_{\text{ом}}}, \quad (1)$$

где $HV_{\text{им}}$ – твердость инструментального материала; $HV_{\text{ом}}$ – твердость обрабатываемого материала.

Чем больше результат соотношения (1), тем выше ожидаемая эффективность от применения конкретной марки инструментального материала. Из нескольких материалов предпочтение имеет тот, для которого величина K окажется наибольшей.

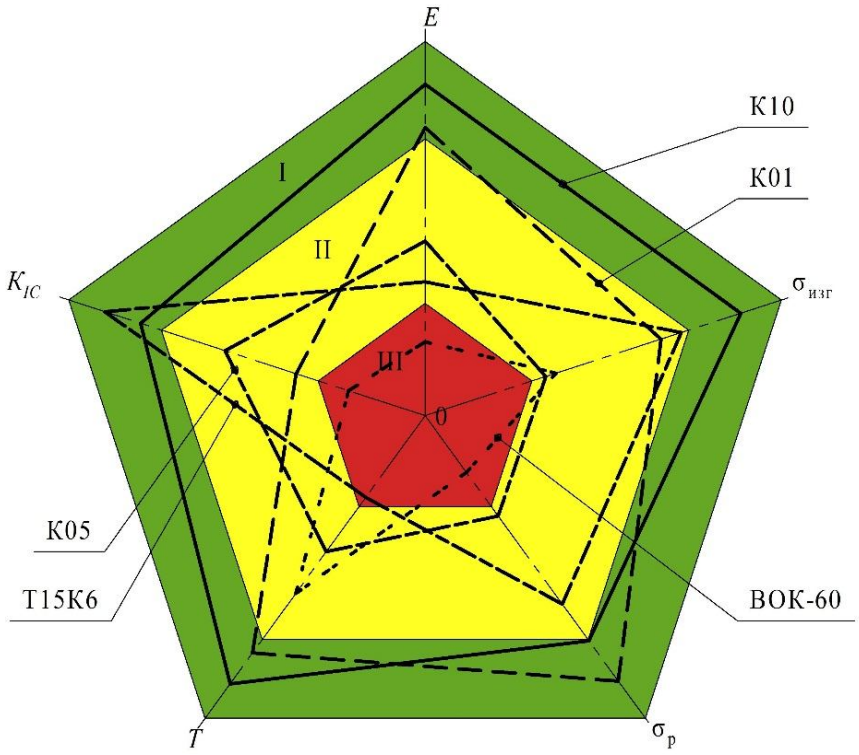


Рис. 1. Сопоставление характеристик инструментальных материалов

Fig. 1. Comparison of the characteristics of tool materials

Таким образом, назначая инструментальное обеспечение технологической операции точения поверхности сложного профиля, технолог может удостовериться, что выбранный способ обработки является высокопроизводительным, а инструментальный материал СМП способен обеспечить заданные чертежом правильную геометрическую форму детали с точным пространственным расположением поверхностей и шероховатостью [11-14].

Рекомендации в области работоспособности сменных режущих пластин в условиях точения поверхностей сложного профиля могут быть представлены следующими обобщениями:

– увеличение угла при вершине режущего элемента от 35 до 90 градусов положительно влияет на повышение прочности режущей кромки (табл. 3). Однако одновременное нарастание вероятности появления вибраций, вследствие увеличения прерывистости резания, отрицательно сказывается не только на работоспособности инструмента, но и на качестве точения;

– разрушение режущей кромки (скалывание) можно отдалить выполнением особой фаски, увеличивающей стойкость режущего элемента (рис.2);

– больший радиус скругления и меньшие значения переднего и заднего углов способствуют благоприятному распределению сил прерывистого точения, сохраняя от выкрашивания потенциально хрупкую вершину режущего элемента;

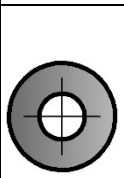
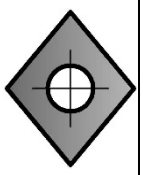
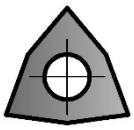
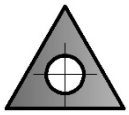
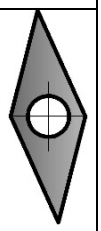
– в информационной карте (табл. 4) представлены рекомендации по выбору режимов резания инструментами из композита 10 в зависимости от состояния конструктивной сложности поверхности точения из стали 45 и серого чугуна СЧ21 (табл.5).

Таблица 3

Влияние геометрических особенностей СМП на работоспособность проходного резца

Table 3

The influence of the geometric features of the changeable indexable insert on the performance of the straight turning tool

Угол, град / Angle, hail	–	90	80	80	60	55	35
Обозначение по ISO 1832:2017 / ISO designation 1832:2017	*R*	*S*	*C*	*W*	*T*	*D*	*V*
Форма / The form							
Уменьшение силы резания / Cutting force reduction							
Увеличение прочности и нарастание вибраций вследствие увеличения прерывистости точения / Increased strength and increased vibration due to increased intermittent cutting							

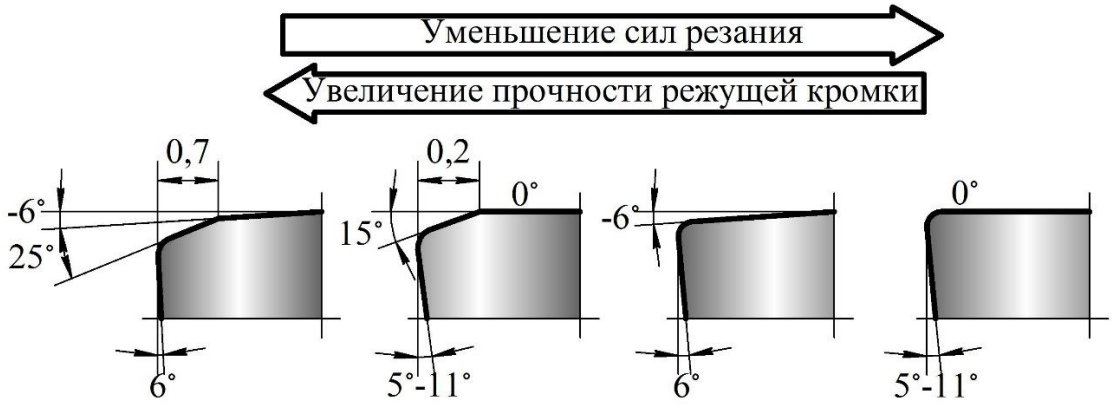


Рис.2. Влияние фаски на работоспособность инструмента

Fig.2. The effect of chamfer on tool performance

Таблица 4

Информационная карта. Рекомендации к выбору режимов резания

Table 4

Information card. Recommendations for the choice of cutting modes

Информационная карта. Точение поверхности сложного профиля / Information card. Turning the surface of a complex profile											
Поверхность точения / Turning surface	*t*, мм	Режимы резания / Cutting conditions									
		Сталь 45, *V*- м/мин / Steel 45, *V*- m / min					Серый чугун, *V*- м/мин / Gray cast iron, *V*- m / min				
гладкая / smooth	0,10	196	182	178	171	160	600	591	584	570	552
прерывистая / interrupted		180	174	170	165	158	560	546	540	525	490
гладкая / smooth	0,20	174	169	163	158	142	580	570	555	539	532
прерывистая / interrupted		168	160	156	151	139	525	501	497	482	466
гладкая / smooth	0,30	169	165	160	155	140	541	533	529	518	505
прерывистая / interrupted		158	153	149	136	121	488	465	451	438	420
гладкая / smooth	0,40	154	150	146	141	127	524	519	503	483	461
прерывистая / interrupted		140	135	130	120	108	460	436	420	414	407
гладкая / smooth	0,50	150	147	141	138	120	482	460	450	429	391
прерывистая / interrupted		135	131	128	117	103	444	428	400	382	340
S, мм/об		0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14

Таблица 5

Поправочные коэффициенты на скорость резания в зависимости от состояния прерывистости обрабатываемой поверхности

Table 5

Correction factors for cutting speed depending on the state of discontinuity of machinable surface

Величина периода резания, % / Cutting period, %	94,7	89,4	84,1	78,8	73,5	68,2	62,9	57,6	52,3	47,0
Точение, период стойкости инструмента, мин / Turning, tool life, min	29,2	30,8	33,2	35,7	36,0	35,6	33,8	26,4	22,1	14,0
Поправочный коэффициент точения / Turning correction factor	1,50	1,30	1,20	1,10	1,00	1,10	1,15	1,40	1,60	2,40

Выводы

Разработаны рекомендации по выбору конструктивной формы и марки рационального инструментального материала для сменных режущих многогранных пластин, применяемых на операции чистового точения поверхностей сложного профиля деталей класса 71-Тела вращения. Представлены практические рекомендации по выбору геометрии режущих элементов сменных пластин, применяемых для проходных токарных резцов, и решения, направленные на совершенствование технологий производства изделий резанием.

Показано, что применение рациональной формы режущего элемента способно, в условиях прерывистого резания, обеспечить заданные показатели производительности, точности и качества обработки.

Технические материалы будут полезны для подготовки инженеров машиностроителей – технологов по разработке, в условиях как универсального, так и автоматизированного производств, технологических процессов механической обработки деталей различной конструктивной сложности.

Список литературы

1. Kudryashov E.A., Nikonov A.M., Stetsurin A.V. General Approach to the Optimization of Machining by Composite Tools // Russian Engineering Research. 2008. Vol. 28, no. 6. P. 611-613.

2. Kudryashov E.A., Stetsurin A.V More Efficient Repair of Machine Parts by a Group Method // Russian Engineering Research. 2008. Vol. 28, no. 9. P. 924-925.

3. Kudryashov E.A., Nikonov A.M. Machining parts made from diverse materials by means of a composite tools // Russian Engineering Research. 2008. Vol. 29, no. 3. P. 313-315.

4. Kudryashov E.A., Nikonov A.M., Rogovskii V.S., Stetsurin A.V. Using superhard tools in discontinuous cutting // Russian Engineering Research. 2009. Vol. 29, no. 2. P. 210-213.

5. Кудряшов Е.А., Лунин Д.Ю., Павлов Е.В. Преимущества лезвийной технологии обработки деталей инструментом из композита // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. №5. С. 77-80.

6. Обеспечение точности отверстий при ремонте деталей машин / Е.А. Кудряшов, Е.В. Павлов, Е.И. Яцун [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2010. №10. С. 37-38.

7. Carou D., Rubio E.M., Davim J.P. Discontinuous cutting: failure machanisms, tool materials and temperature studya review // Reviews on Advanced Materials Science. 2014. Vol. 38, no. 2. P. 110-124.

8. Способы достижения надежности работы гидроцилиндров высокого давления буровых установок / Е.А. Кудряшов, Е.В. Павлов, Е.И. Яцун [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т.12. №1-2. С.401-403.

9. Stahl J.E. Metal cutting – Theories and models. Lund, Lund University, 2012. 580 p.

10. Zhao D. et al. The application of СИТ on the lunar rock drill // AEMT. 2015. P. 789-793.

11. Количественная оценка процессов в обработанном композитом поверхностном слое деталей машин / Е.А. Кудряшов, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. Т. 6. №12 (72). С. 10-15.

12. Технологические преимущества инструментального материала композит при обработке конструктивно сложных поверхностей / Е.А. Кудряшов, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин [и др.] // Известия ВолГТУ. 2010. №12. С. 15-20.

13. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. Эффективная работа инструмента из композита при скоростном фрезеровании резьбы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2013. №2(59). С. 25-32.

14. Кудряшов Е.А., Алтухов А.Ю., Яцун Е.И. Эффективная работа инструмента из композита в условиях прерывистого резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. №6. С. 79.

References

1. Kudryashov E.A., Nikonov A.M., Stetsurin A.V. General Approach to Composite Tools. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 6, pp. 611-613.

2. Kudryashov E.A., Stetsurin A.V. More Efficient Repair Method. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 9, pp. 924-925.

3. Kudryashov E.A., Nikonov A.M. Machining parts made from diverse materials. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 313-315.

4. Kudryashov E.A., Nikonov A.M., Rogovskii V.S., Stetsurin A.V. Using superhard tools in discontinuous cutting. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29, no. 2, pp. 210-213.

5. Kudryashov E.A., Lunin D.Yu., Pavlov E.V. Preimushchestva lezviinoi tekhnologii obrabotki detalei instrumentom iz kompozita [Advantages of blade technology for machining parts with a composite tool]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2011, no.5, pp. 77-80 (In Russ.).

6. Kudryashov E.A., Pavlov E.V., Yatsun E.I. at al. Obespechenie tochnosti otverstii pri remonte detalei mashin [Ensuring the accuracy of STI holes in the repair of machine parts]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya = Repair. Recovery. Modernization*, 2010, no.10, pp. 37-38 (In Russ.).

7. Carou D., Rubio E.M., Davim J.P. Discontinuous cutting: failure machanisms, tool materials and temperature studya review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2014, vol. 38, no. 2, pp. 110-124.

8. Kudryashov E.A., Pavlov E.V., Yatsun E.I. et al. Sposoby dostizheniya nadezhnosti raboty gidrotsilindrov vysokogo davleniya burovykh ustanovok [Ways of achieving reliability of operation of high-pressure hydraulic cylinders of drilling rigs]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no.1-2, pp.401-403 (In Russ.).

9. Stahl J.E. Metal cutting - Theories and models. Lund, Lund University, 2012. 580 p.

10. Zhao D. et al. The application of SIT on the lunar rock drill. *AEMT*, 2015, pp. 789-793.

11. Kudryashov E.A., Altukhov A.Yu., Lunin D.Yu. et al. Kolichestvennaya otsenka protsessov v obrabotannom kompozitom poverkhnostnom sloe detalei mashin [Quantitative assessment of processes in the composite-treated surface layer of machine parts]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd State Technical University*. 2010, vol. 6, no. 12 (72), pp. 10-15 (In Russ.).

12. Kudryashov E.A., Altukhov A.Yu., Lunin D.Yu. et al. Tekhnologicheskie preimushchestva instrumental'nogo materiala kompozit pri obrabotke konstruktivno slozhnykh poverkhnostei [Technological advantages of the instrumental material composite when pro-

cessing constructively complex surfaces]. *Izvestiya VolGTU = Izvestia VolSTU*, 2010, no.12, pp. 15-20 (In Russ.).

13. Kudryashov E.A., Smirnov I.M. Effektivnaya rabota instrumenta iz kompozita pri skorostnom frezerovanii rez'by [Efficient operation of a composite tool for high-speed thread milling]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal processing (technology, equipment, tools),* 2013, no. 2 (59), pp. 25-32 (In Russ.).

14. Kudryashov E.A., Altukhov A.Yu., Yatsun E.I. Effektivnaya rabota instrumenta iz kompozita v usloviyakh preryvistogo rezaniya [Effective operation of a composite tool under intermittent cutting conditions]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2011, no. 6, p. 79 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Кудряшов Евгений Алексеевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник сектора боеприпасов отдела БПССМР, АО «Научно-исследовательский инженерный институт», г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: kea-swsu@mail.ru

Evgeny A. Kudryashov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Leading Researcher of the Ammunition Sector of the BPSSMR Department, JSC Scientific Research Engineering Institute, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: kea-swsu@mail.ru

Смирнов Игорь Михайлович, доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «Научно-исследовательский инженерный институт», г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: kea-swsu@mail.ru

Igor M. Smirnov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, General Director, JSC Scientific Research Engineering Institute, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: kea-swsu@mail.ru

Гришин Дмитрий Вадимович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация, e-mail: kea-swsu@mail.ru

Dmitry V. Grishin, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: kea-swsu@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-67-81

CC BY 4.0

Анализ характеристик износостойкости аддитивных изделий из электроэрозионных кобальтохромовых порошков

Е. В. Агеева [1] ✉, О. Г. Локтионова [1], А. Ю. Алтухов [1], Б. Н. Сабельников [1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. *Целью настоящей работы являлось проведение исследования характеристик износостойкости аддитивных изделий из электроэрозионных кобальтохромовых порошков.*

Методы. *Для проведения намеченных исследований использовались отходы кобальтохромового сплава марки КХМС «ЦЕЛЛИТ». В качестве рабочей жидкости применяли спирт бутиловый. Для изготовления экспериментальных образцов использовалась установка для послойного нанесения порошковых материалов плазмой. Интенсивность и скорость износа поверхности образца и контртела измеряли на автоматизированной машине трения Tribometer, CSM Instruments. Образец устанавливали в держателе, перпендикулярно плоскости образца закрепляли стержень, на конце которого находился шарик диаметром 6 мм из стали Stainless Steel AISI 420 (твердость по Виккерсу 5000-8000 HV). С помощью регулировки датчика перемещения выбирали радиус кривизны износа, еще один датчик компенсировал силу трения и позволял установить значение коэффициента трения в определенный момент времени. Состояние поверхностей трения изучали с помощью оптического инвертированного микроскопа Olympus GX 51, оснащенного системой автоматизированного анализа изображений «SIMAGIS Photolab» и электронно-ионного сканирующего микроскопа Quanta 200 3D.*

Результаты. *На основании выполненного анализа характеристик износостойкости аддитивных изделий, полученных из электроэрозионных кобальтохромовых порошков, установлено следующее: коэффициент трения колеблется от 0,144 до 0,602; среднее значение коэффициента трения составляет 0,526; фактор износа образца на два порядка выше фактора износа контртела.*

Заключение. *Проведенные исследования позволят расширить сведения о свойствах аддитивных изделий, полученных из электроэрозионных кобальтохромовых порошков, и снизить себестоимость производства конечного продукта.*

Ключевые слова: *кобальтохромовый сплав; отходы; электроэрозионное диспергирование; порошок; аддитивные изделия; износостойкость.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Финансирование: *Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда. Номер проекта 17-79-20336.*

Для цитирования: Анализ характеристик износостойкости аддитивных изделий из электроэрозионных кобальтохромовых порошков / Е. В. Агеева, О. Г. Локтионова, А. Ю. Алтухов, Б. Н. Сабельников // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 67-81. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-67-81.

Статья поступила в редакцию 13.06.2019

Статья подписана в печать 22.07.2019

Статья опубликована 25.10.2019

© Агеева Е. В., Локтионова О. Г., Алтухов А. Ю., Сабельников Б. Н., 2019

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-67-81

Analysis of Wear Resistance Characteristics of Additive Products Made from Electroerosive Cobalt-Chromium Powders

Ekaterina V. Ageeva [1] ✉, Oksana G. Loktionova [1], Aleksandr Y. Altuhov [1], Boris N. Sabel'nikov [1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of reseach *of this research is to study wear resistance characteristics of additive products made from electroerosive cobalt-chromium powders.*

Methods. *Wastes of cobalt-chromium "CELLIT" alloy were used for the research [27]. Butyl alcohol was used as a working fluid. A unit for layer-by-layer application of powder materials with plasma was used for experimental samples production. The intensity and wear rate of the sample surface and counterface were measured on Tribometer automated friction machine, CSM Instruments. The sample was mounted in a holder. A rod was fixed perpendicular to the surface of a sample. A 6 mm diameter ball made of Stainless Steel AISI 420 (Vickers hardness 5000-8000 HV) was at the end of the rod. Radius of wear curvature was selected by adjusting the displacement sensor. Another sensor compensated the friction force and allowed to set the friction coefficient value at a certain time. The condition of friction surfaces was studied with the help of optical inverted microscope Olympus GX 51 equipped with "SIMAGIS Photolab" automated image analysis system and Quanta 200 3D electron ion scanning microscope.*

Results. *According to the performed analysis of wear resistance characteristics of additive products made from electroerosive cobalt-chromium powders friction coefficient varies from 0.144 to 0.602. An average friction coefficient is 0.526. A wear factor of the sample is two times higher than the wear factor of counterface.*

Conclusion. *Performed research allows expanding the information about properties of additive products made from electroerosive cobalt-chromium powders and reducing production cost.*

Keywords: *instrument steel; cold brittleness; impurities; austenite; original charge; hardenability; thermal treatment.*

Conflict of interest. *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

Financing: *The work was performed on the project No. 11.6682.2017 / 8.9.*

For citation: Ageeva E. V., Loktionova O. G., Altuhov A. Y., Sabel'nikov B. N. Analysis of Wear Resistance Characteristics of Additive Products Made from Electroerosive Cobalt-Chromium Powders. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 67-81 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-67-81.

Received 13.06.2019

Accepted 22.07.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

На сегодняшний день фирмы-производители аддитивных машин в то же время являются и поставщиками расходных материалов для своего оборудования. Причем, эти организации не занимаются самостоятельно производством порошковых материалов, но принимают непосредственное участие в их подготовке для использования на машинах именно собственного производства. Закупка порошка осуществляется у фирм-изготовителей, деятельность которых заключается в производстве расходных материалов для всевозможных потребностей такой отрасли, как порошковая металлургия. Производители аддитивных машин обеспечивают себе подобным образом страховку вероятных жалоб от потребителей к качеству поставленных порошковых материалов [1-9].

Для российских потребителей расходные материалы являются достаточно серьезной проблемой. Вследствие недостаточного развития отечественного рынка закупку металлопорошковых композиций для аддитивных технологий в большинстве своем приходится осуществлять у зарубежных фирм-изготовителей.

Важнейшим требованием к порошковым материалам для аддитивных машин является форма частиц, которая должна иметь сферический вид. Частицы одинаковой формы располагаются наиболее плотно в определенном объеме и обеспечивают достаточную, для систем подачи материала с наименьшим сопротивлением, «текучесть» порошка [10-20].

Отталкиваясь от особенностей методов получения сферических порошковых материалов с целью получения гранул сферической формы и регламентированной зернистости предлагается технология электроэрозионного диспергирования, отличающаяся относительно невысокими энергозатратами и экологической чистотой процесса [20-26].

Главным преимуществом предлагаемого метода является использование в качестве исходных материалов отходов, которые в значительной степени дешевле относительно чистых компонентов, применяющихся в традиционных технологиях.

Целью настоящей работы являлось проведение исследования характеристик износостойкости аддитивных изделий из электроэрозионных кобальтохромовых порошков.

Материалы и методы

Для проведения намеченных исследований использовались отходы кобальтохромового сплава марки КХМС «ЦЕЛЛИТ» [27]. В качестве рабочей жидкости применяли спирт бутиловый. Использовали установку для ЭЭД токопроводящих материалов. На рис. 1 представлена блок-схема проведения процесса получения порошковых материалов из отходов ранее упомянутого сплава методом электроэрозионного диспергирования.

Для изготовления экспериментальных образцов использовалась установка для послойного нанесения порошковых материалов плазмой (рис. 2).

Экспериментальные образцы аддитивных изделий получены при температуре сплавления частиц кобальтохромового порошка 1060°С.

Интенсивность и скорость износа поверхности образца и контртела измеряли на автоматизированной машине трения Tribometer, CSM Instruments [28]. Блок-схема испытаний представлена на рис. 3.

На рис. 4 и 5 представлены схема-внешний вид автоматизированной машины трения Tribometer, CSM Instruments, и стандартная схема процесса испытания «шарик-диск» соответственно.

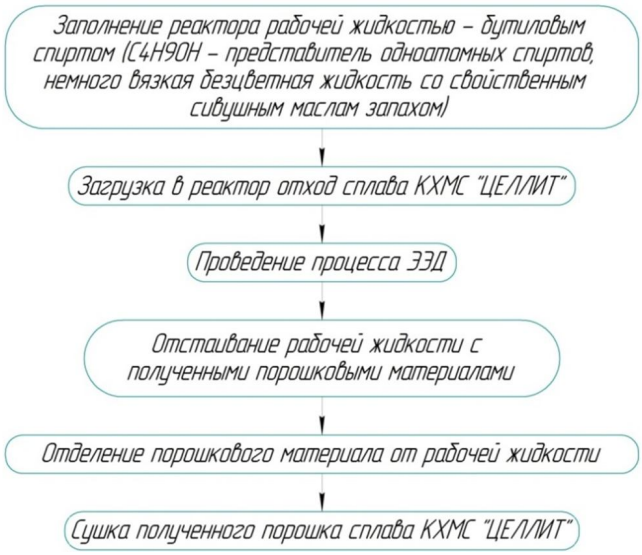


Рис. 1. Блок-схема проведения вышеуказанного процесса получения порошкового материала

Fig. 1. Block diagram of above-mentioned powder material production process

Рис. 2. Установка для послойного нанесения порошков

Fig.2. Device for layer-by-layer application of powders

Результаты и их обсуждение

После проведения испытаний образцов были изучены поверхности разрушения обоих компонентов пары трения – контртела (шарик) и образца (рис. 5, 6) [28].

Результаты трибологических испытаний представлены на рис. 7.

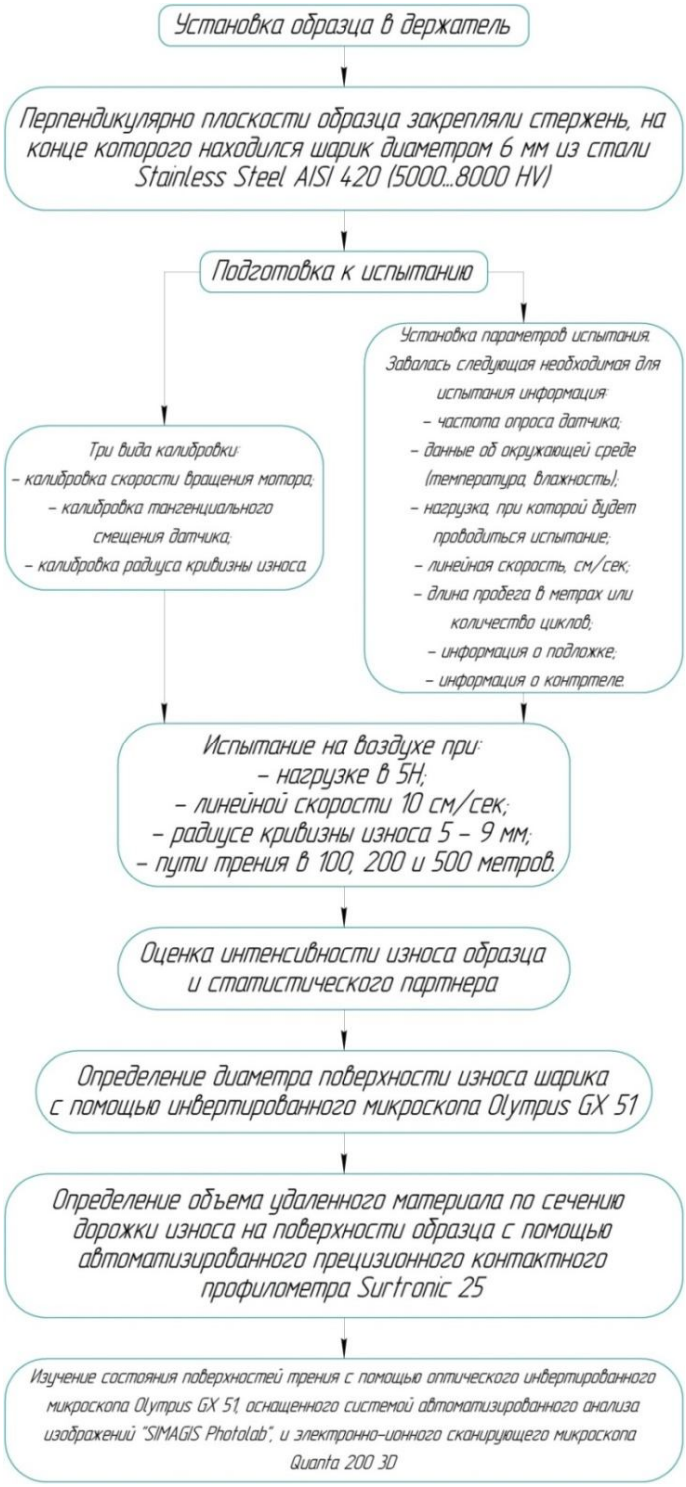


Рис. 3. Блок-схема измерения интенсивности и скорости износа поверхности образца

Fig. 3. Block diagram of sample surface wear rate and intensity measurement

Рис. 4. Схема-внешний вид автоматизированной машины трения (Tribometer, CSM Instruments, Швейцария) [28]

Fig.4. Diagram-appearance of automated friction machine (Tribometer, CSM Instruments, Switzerland) [28]

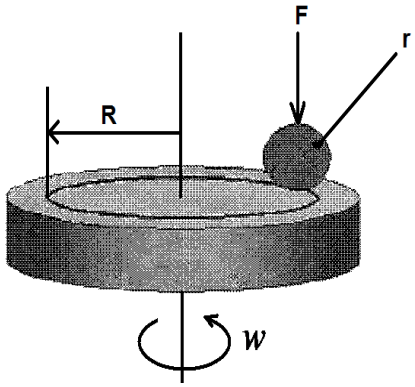
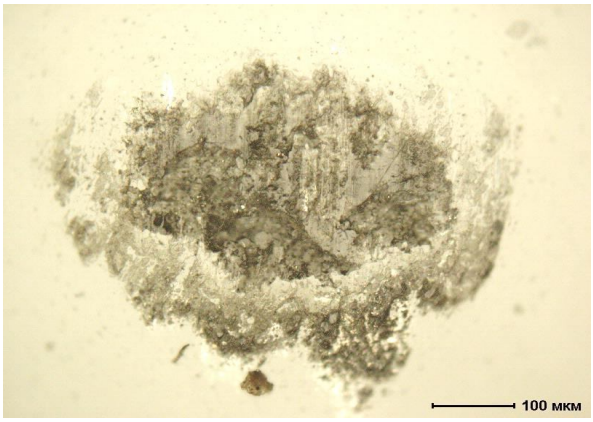
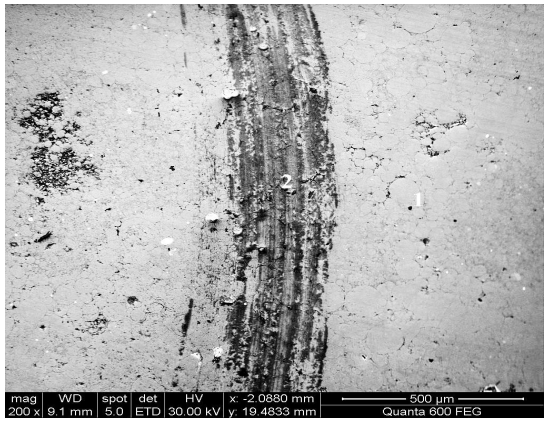


Рис. 5. Стандартная схема процесса испытания «шарик-диск»

Fig.5. Standard ball-to-disk test process diagram



а)



б)

Рис. 6. Состояние пары трения: а – оптическое изображение пятна износа контртела (шарика) после многократных проходов по исследуемой поверхности образца (OLYMPUSGX51); б – зона механического контактаконтртело – образец с точками проведения рентгеноспектрального микроанализа (Quanta 600 FEG); в – элементный состав в точке 1; г – элементный состав в точке 2; д – профиль бороздки износа поверхности образца (автоматизированный прецизионный контактный профилометр SURTRONIC 25) (окончание см. на с. 73)

Fig.6. Friction condition: a – optical image of counterface wear spot (ball) after multiple passes on the test sample surface (OLYMPUSGX51); б – mechanical contact zone - sample with X-ray spectral microanalysis points (Quanta 600 FEGв) elemental composition at point 1; г – elemental composition at point 2; д – sample surface wear groove profile (automatic precision contact profilometer SURTRONIC 25) (for the end, see p. 73)

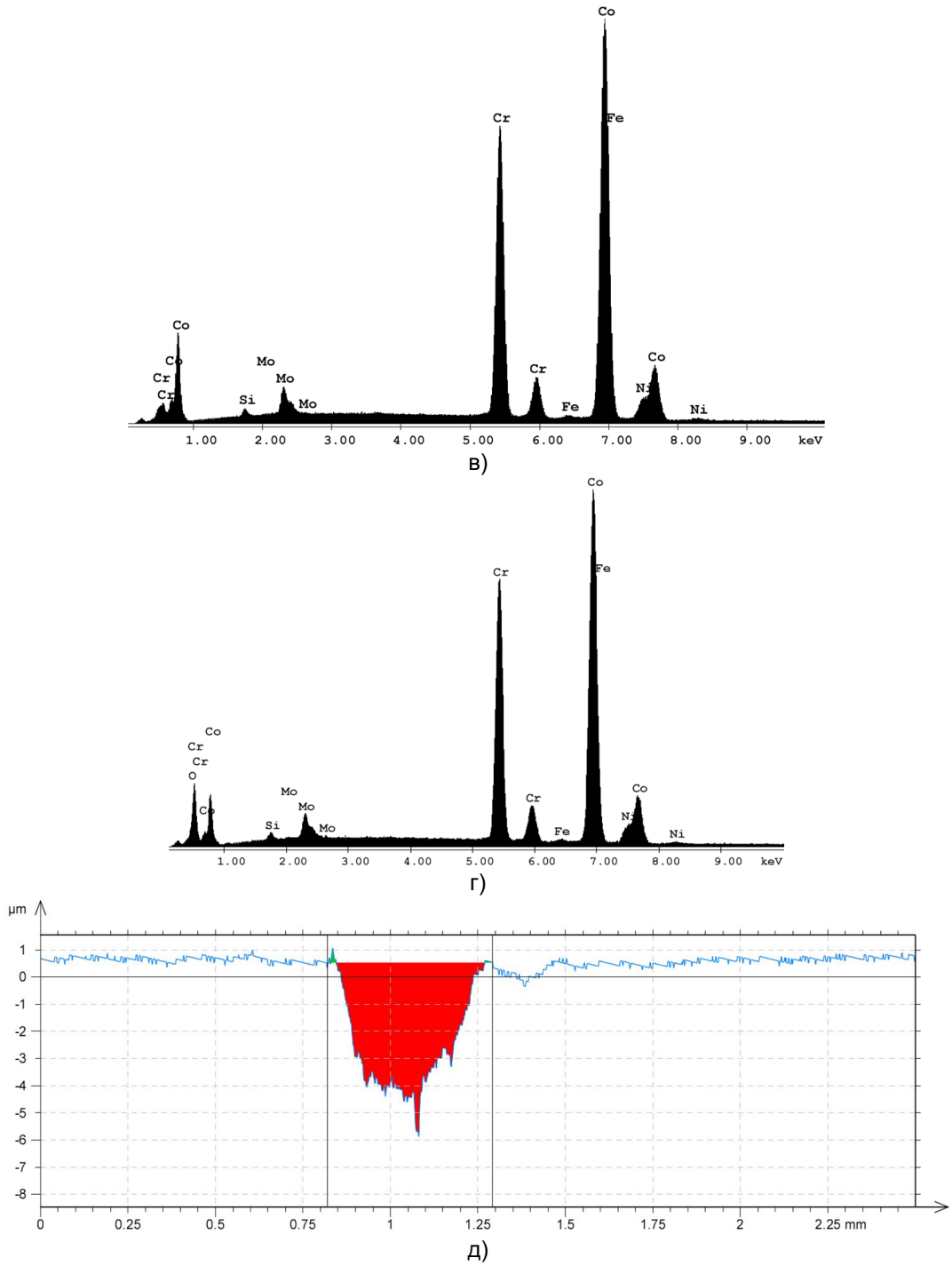


Рис. 6. Состояние пары трения: а – оптическое изображение пятна износа контртела (шарика) после многократных проходов по исследуемой поверхности образца (OLYMPUSGX51); б – зона механического контактаконтртело – образец с точками проведения рентгеноспектрального микроанализа (Quanta 600 FEG); в – элементный состав в точке 1; г – элементный состав в точке 2; д – профиль бороздки износа поверхности образца (автоматизированный прецизионный контактный профилометр SURTRONIC 25

(начало см. на с. 72)

Fig.6. As the friction pair: a) optical image of the spot of wear of the counterbody (ball) after multiple passes over the surface of the sample (OLYMPUS GX51); б) the area of mechanical contact contrale sample points of carrying out x-ray microanalysis (Quanta 600 FEG); в) elemental composition of point 1; г) elemental composition of point 2; д) the profile of the groove of the wear surface of the sample (automated precision contact profilometer SURTRONIC 25) (beginning see p. 72)

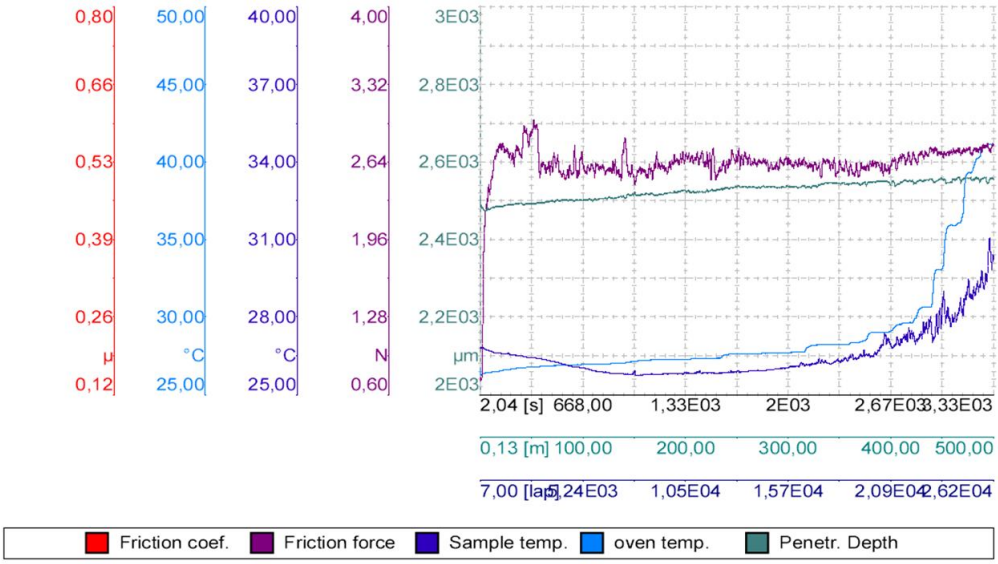


Рис. 7. Результаты трибологических испытаний

Fig.7. Results of tribological tests

Трибологические характеристики
Tribologicalcharacteristics

Коэффициент трения (μ)				Фактор износа статистического партнера, $мм^3 \cdot Н^{-1} \cdot м^{-1}$ x10^{-6}	Фактор износа образца, $мм^3 \cdot Н^{-1} \cdot м^{-1}$ x10^{-6}
начальный	минимальный	максимальный	средний		
0,150	0,144	0,602	0,526	0,092	9,913

Проведенный анализ характеристик износостойкости аддитивных изделий, полученных из электроэрозионных кобальтохромовых порошков, показал, что в течение испытаний образцов аддитивных изделий в паре с контртелом образец изнашивается значительно интенсивнее контртела.

Выводы

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований, а также выполненного анализа характеристик износостойкости аддитивных изделий, полученных из электроэрозионных кобальтохромовых порошков, установлено следующее:

– коэффициент трения колеблется в пределах от 0,144 до 0,602;

– среднее значение коэффициента трения составляет 0,526;

– фактор износа образца на два порядка выше фактора износа контртела.

Проведенные исследования позволят расширить сведения о свойствах аддитивных изделий, полученных из электроэрозионных кобальтохромовых порошков, и снизить себестоимость производства конечного продукта.

Список литературы

1. Loeber L., Biamino S., Ackelid U. et al. Comparison of Selective Laser and Electron Beam Melted Titanium Aluminides // Conference paper of 22nd International symposium “Solid freeform fabrication proceedings”. University of Texas, Austin, 2011. P. 547-556.

2. Biamino S., Penna A., Ackelid U. et al. Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation // Intermetallics. 2011. Vol. 19. P. 776–781.

3. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms // International Materials Reviews. 2012. Vol. 57 (3). P. 133-164.

4. Song B., Dong S., Zhang B. et al. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V // Materials & Design. 2012. Vol. 35. P. 120–125.

5. Song B., Dong S., Coddet P. et al. Fabrication and microstructure characterization of selective laser melted FeAl intermetallic parts // Surface and Coatings Technology. 2012. Vol. 206. P. 4704–4709.

6. Wang Z., Guana K., Gaoa M. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting //Journal of Alloys and Compounds. 2012. Vol. 513. P. 518–523.

7. Safdar A., Wei L.Y., Snis A., Lai Z. Evaluation of microstructural developmentin electron beam melted Ti–6Al–4V // Materials Characterization. 2012. Vol. 65. P. 8–15.

8. Safdar A., He H.Z., Wei L.Y., Snis A. et al. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti–6Al–4V // Rapid Prototyping Journal. 2012. Vol. 18 (5). P.401–408.

9. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder fractions // Journal of Materials Processing Technology. 2013. Vol. 213 (12). P. 2109–2118.

10. Ковалев О.Б. Моделирование процессов в технологиях лазерного аддитивного изготовления объемных металлоизделий // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2016. Т. 80. N 4. С. 408.

11. Смирнов В.В., Шайхутдинова Е.Ф. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. N 2-2. С. 90-94.

12. Григорьянц А.Г., Третьяков Р.С., Фунтиков В.А. Повышение качества поверхностных слоев деталей, полученных лазерной аддитивной технологией // Технология машиностроения. 2015. N 10. С. 68-73.

13. Вулпе М.Н., Колесников Д.Н., Морушкин А.Е. Лазерная сварка заготовок, полученных аддитивными технологиями // Технология машиностроения и материаловедение. 2017. No. 1. С. 142-144.

14. Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Влияние ультразвуковой обработки на шероховатость поверхности деталей, полученных аддитивными технологиями // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. No. (315). С. 47-53.

15. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // Труды МАИ. 2014. No. 78. С. 31.

16. Григорьянц А.Г., Новиченко Д.Ю., Смуров И.Ю. Лазерная аддитивная технология изготовления покрытий и деталей из композиционного материала // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. No. 7. С. 38-46.

17. Моделирование процесса спекания изделий из низкотемпературной керамики, формируемых аддитивными технологиями / В.Н. Лейцин, С.В. Пономарев, М.А. Дмитриева, И.В. Ивонин, И.М. Тырышкин // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. №. 4. С. 21-27.

18. Аддитивные технологии: от технического творчества к инновационным промышленным технологиям / М.А. Волосова, А.А. Окунькова, С.Г. Конов, Д.В. Котобан // Техническое творчество молодежи. 2014. No. 5 (87). С. 9-14.

19. Федоров М.М. Разработка замкнутой технологической цепочки изготовления деталей ГТД по аддитивным технологиям // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. No. 1 (40). С. 115-118.

20. Смирнов В.В., Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей из интерметаллидных сплавов на основе титана // Ползуновский альманах. 2013. No. 2. С. 78-80.

21. Фазовый состав частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием сплава ВК8 в бутиловом спирте / Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, С.С. Гулидин, Е.В. Агеев, А.А. Горохов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016.№ 1 (18). С. 20-25.

22. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов - перспективный материал для восстановления деталей автотракторной техники / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, Е.В. Агеева, Р.В. Бобрышев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1-1 (40). С. 182-189.

23. Размерные характеристики бронзового электроэрозионного порошка, полученного в воде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Чаплыгин, А.А. Горохов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 1 (18). С. 30-35.

24. Агеев Е.В., Латыпов Р.А. Получение и исследование заготовок твердого сплава из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2014. No. 5. С. 50-53.

25. Ageev E.V., Latypov R.A. Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2014. Т. 55. No. 6. С. 577-580.

26. Оптимизация гранулометрического состава электроэрозионных кобальтохромовых порошков / Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, А.А. Сысоев, А.С. Осьминина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. № 1 (26). С. 14-23.

27. Агеева Е.В., Алтухов А.Ю., Валгузов Д.И. Исследование пористости аддитивных изделий из электроэрозионных кобальтохромовых порошков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. № 4 (29). С. 6-14.

28. Анализ характеристик износостойкости нанокомпозиционных покрытий, полученных с использованием электроэрозионных материалов / Е.В. Агеев, С.В. Хардиков, С.В. Пикалов, М.А. Зубарев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 6 (69). С. 40-49.

References

1. Loeber L., Biamino S., U. Ackelid et al. Comparison of Selective Laser and Electron Beam Melted Titanium Aluminides. Conference paper of 22nd International symposium "Solid freeform fabrication procedures", University of Texas, Austin, 2011, pp. 547-556.

2. Biamino S., Penna A., U. Ackelid et al. Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation. *Intermetallics*, 2011, vol. 19, pp. 776-781.

3. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57 (3), pp. 133-164.

4. Song B., Dong S., Zhang B. et al. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V. *Materials & Design*, 2012, vol. 35, pp. 120-125.

5. Song B., Dong S., Coddet P. et al. Fabrication and microstructure characterization of selective laser melted FeAl intermetallic parts. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, pp. 4704-4709.

6. Wang Z., Guana K., Gaoa M. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 513, pp. 518-523.

7. Safdar A., Wei L. Y., Snis A., Lai Z. Evaluation of microstructural developmentin electron beam melted Ti–6Al–4V. *Materials Characterization*, 2012, vol. 65, pp. 8-15.

8. Safdar A., He H. Z., Wei L. Y., Snis A. et al. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al–4V. *Rapid Prototyping Journal*, 2012, vol. 18 (5), pp.401-408.

9. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder fractions. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213 (12), pp. 2109-2118.

10. Kovalev O. B. Modelirovanie protsessov v tekhnologiyakh lazernogo additivnogo izgotovleniya ob"emnykh metalloizdelii [Modelling of processes in technology of laser additive manufacturing three-dimensional metal products]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Series physical*, 2016, T. 80, no. 4, pp. 408 (In Russ.).

11. Smirnov V. V., Shaikhutdinova E. F. Vnedrenie additivnykh tekhnologii izgotovleniya detalei v seriinoe proizvodstvo [Introduction of additive manufacturing technologies in serial production]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva = Bulletin of Kazan State Technical University. A. N. Tupolev*, 2013, no. 2-2, pp. 90-94 (In Russ.).

12. Grigoryants A. G., Tretyakov R. S., Funtikov V. A. Povyshenie kachestva poverkhnostnykh sloev detalei, poluchennykh lazernoi additivnoi tekhnologiei [Improving the quality of surface layers of parts obtained by laser additive technology]. *Tekhnologiya mashinostroeniya Publ. = Engineering technology,* 2015, no.10, pp. 68-73 (In Russ.).

13. Vulpe M. N., Kolesnikov D. N., Morushkin A. E. Lazernaya svarka zagotovok, poluchennykh additivnymi tekhnologiyami [Laser welding of billets obtained by additive technologies]. *Tekhnologiya mashinostroeniya i materialovedenie = Technology of mechanical engineering and materials science,* 2017, no. 1, pp. 142-144 (In Russ.).

14. Nigmetzyanov R. I., Sundukov S. K., Fatyukhin D. S. Vliyanie ul'trazvukovoi obrabotki na sherokhovatost' poverkhnosti detalei, poluchennykh additivnymi tekhnologiyami [Influence of ultrasonic treatment on surface roughness of parts obtained by additive technologies]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology,* 2016, no. (315), pp. 47-53 (In Russ.).

15. Chumakov D. M. Perspektivy ispol'zovaniya additivnykh tekhnologii pri sozdanii aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhniki [Prospects for the use of additive technologies

in the creation of aviation and rocket and space technology]. *Trudy MAI = Works of MAI*, 2014, no. 78, pp. 31 (In Russ.).

16. Grigoryants A. G., Novichenko D. Yu., Smurov I. Yu. Lazernaya additivnaya tekhnologiya izgotovleniya pokrytii i detalei iz kompozitsionnogo materiala [Laser additive manufacturing technology of coatings and parts from composite material]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Engineering,* 2011, no. 7, pp. 38-46 (In Russ.).

17. Leitsin V. N., Ponomarev S. V., Dmitrieva M. A., Ivonin I. V., Tyryshkin I. M. Modelirovanie protsessa spekaniya izdelii iz nizkotemperaturnoi keramiki, formiruemykh additivnymi tekhnologiyami [Modeling of sintering process of products from low-temperature ceramics formed by additive technologies]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical mesomechanics,* 2016, vol. 19, no. 4, pp. 21-27 (In Russ.).

18. Volosova M. A., Okunkova A. A., Konov S. G., Kotoban D. V. Additivnye tekhnologii: ot tekhnicheskogo tvorchestva k innovatsionnym promyshlennym tekhnologiyam [Additive technologies: from technical creativity to innovative industrial technologies]. *Tekhnicheskoe tvorchestvo molodezhi = Technical creativity of youth*, 2014, no. 5 (87), pp. 9-14 (In Russ.).

19. Fedorov M. M. Razrabotka zamknutoi tekhnologicheskoi tsepochki izgotovleniya detalei GTD po additivnym tekhnologiyam [Development of the closed technological chain of production of details of GTE on additive technologies]. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva = Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy P. A. Solovyov*, 2017, no. 1 (40), pp. 115-118 (In Russ.).

20. Smirnov V. V., Ganeev A. A., Shaikhutdinova E. F. Primenenie additivnykh tekhnologii dlya izgotovleniya detalei iz intermetallidnykh splavov na osnove titana [Application of additive technologies for manufacturing of parts made of intermetallic alloys based on titanium]. *Polzunovskii al'manakh = Polzunovskii almanac*, 2013, no. 2, pp. 78-80 (In Russ.).

21. Ageeva E. V., Altukhov A. Yu., Gulidin S. S., Ageev E. V., Gorokhov A. A. Fazovyi sostav chastits poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem splava VK8 v butilovom spirte [Phase composition of powder particles obtained by electroerosive dispersion of VK8 alloy in butyl alcohol]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 1 (18), pp. 20-25 (In Russ.).

22. Ageev E. V., Gadalov V. N., Ageeva E. V., Bobryshev R. V. Poroshki, poluchennye elektroerozionnym dispergirovaniem otkhodov tverdykh splavov - perspektivnyi material dlya vosstanovleniya detalei avtotraktornoi tekhniki [Powders obtained by electroerosive dispersion of solid alloy waste - a promising material for the restoration of parts of automo-

tive equipment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2012, no. 1-1 (40), pp. 182-189 (In Russ.).

23. Ageeva E. V., Ageev E. V., Chaplygin V. Yu., Gorokhov A. A. Razmernye kharakteristiki bronzovogo elektroerozionnogo poroshka, poluchennogo v vode [Dimensional characteristics of bronze electroerosive powder obtained in water]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University*. *Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 1 (18), pp. 30-35 (In Russ.).

24. Ageev E. V., Latypov R. A. Poluchenie i issledovanie zagotovok tverdogo splava iz poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem vol'framsoderzhashchikh otkhodov [Preparation and investigation of solid billets of alloy powders produced by electroerosion dispersion of tungsten-containing wastes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya = Proceedings of higher educational institutions. Nonferrous metallurgy*, 2014, no. 5, pp. 50-53 (In Russ.).

25. Ageev E. V., Latypov R. A. Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes [Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals,* 2014, vol. 55, no. 6, pp. 577-580.

26. Ageeva E. V., Altukhov A. Yu., Sysoev A. A., Osminina A. S. Optimizatsiya granulometricheskogo sostava elektroerozionnykh kobal'tokhromovykh poroshkov [Optimization of granulometric composition of electroerosive cobalt-chromium powders]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University*. *Series: Engineering and Technologies*, 2018, no. 1 (26), pp. 14-23 (In Russ.).

27. Ageeva E. V., Altukhov A. Yu., Valguzov D. I. Issledovanie poristosti additivnykh izdelii iz elektroerozionnykh kobal'tokhromovykh poroshkov [Research of porosity of additive products from electroerosive cobalt-chromium powders]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University*. *Series: Engineering and Technologies*, 2018, no. 4 (29), pp. 6-14 (In Russ.).

28. Ageev E. V., Hardikov S. V., Pikalov S. V., Zubarev M. A. Analiz kharakteristik iznosostoikosti nanokompozitsionnykh pokrytii, poluchennykh s ispol'zovaniem elektroerozionnykh materialov [Analysis of characteristics of wear resistance of nanocomposite coatings obtained with the use of electroerosive materials]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2016, no. 6 (69), pp. 40-49 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Агеева Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Ekaterina V. Ageeva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail :ageev-ev@yandex.ru

Локтионова Оксана Геннадиевна, доктор технических наук, профессор, проректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: log@swsu.ru

Oksana G. Loktionova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Vice-rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: log@swsu.ru

Алтухов Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alt997@yandex.ru

Aleksandr Y. Altuhov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: alt997@yandex.ru

Сабельников Борис Николаевич, аспирант кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sabelnikovboris1@mail.ru

Boris N. Sabel'nikov, Post-Graduate Student, Department of Automobiles and Automotive Economy, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail:sabelnikovboris1@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-82-93

CC BY 4.0

Моделирование фрезы с радиальной конструктивной подачей для обработки РК-профильных отверстий

В. В. Куц [1], М. С. Разумов [1] ✉, М. В. Митрофанов [1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: mika_1984_@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Целью данной статьи является поиск новых решений для обработки РК-профильных отверстий и моделирование фрезы с применением радиальной конструктивной подачи.*

Методы. *В статье приведены результаты определения исходного контура инструментальной поверхности фрезы при использовании основ геометрической теории. Теоретические положения основывались на использовании основных положений векторной алгебры, аналитической и дифференциальной геометрии, фундаментальных основ теории резания материалов. Приведены результаты моделирования конструкции фрез с использованием программного обеспечения КОМПАС 3D.*

Результаты. *Приведен анализ существующих методов обработки РК-профильных отверстий. Для повышения производительности обработки внутренних поверхностей с равноосным контуром предложен способ обработки фрезой с радиальной конструктивной подачей. Приведены результаты определения исходного контура инструментальной поверхности фрезы, построены модели её режущих кромок, передней и задней поверхности. Показан результат моделирования передней и задней поверхности зубьев фрезы с R_f = 24 мм, и шириной фрезы 50 мм с передним углом 5°, задним углом 10° и числом зубьев 16. Приведены результаты моделирования конструкции фрез с помощью 3D моделирования, которые в дальнейшем позволят изготовить инструментальную оснастку для предложенного метода и провести экспериментальные исследования по определению оптимальных технологических параметров.*

Заключение. *На основе построенных моделей становится возможным выполнение моделирования процесса фрезерования РК-профильных отверстий с целью определения рациональных значений обработки и конструктивных параметров. Результаты исследования могут быть использованы при разработке конструкторско-технологической документации при подготовке производства профильных отверстий с целью обеспечения заданных характеристик изделия.*

Ключевые слова: *фреза; равноосный контур; геометрическая модель; теория формообразования; отверстие; РК-профиль.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Финансирование: *Работа выполнена в рамках финансирования Стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2018-2020 годы СП-591.2018.1.*

Для цитирования: Куц В. В., Разумов М. С., Митрофанов М. В. Моделирование фрезы с радиальной конструктивной подачей для обработки РК-профильных отверстий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 82-93. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-82-93.

Статья поступила в редакцию 06.08.2019

Статья подписана в печать 30.08.2019

Статья опубликована 25.10.2019

© Куц В. В., Разумов М. С., Митрофанов М. В., 2019

Modeling of a milling cutter with radial constructional feed for EC-profile holes machining

Vadim V. Kuts [1], Mikhail S. Razumov [1] ✉, Maksim V. Mitrofanov [1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: mika_1984_@mail.ru

Abstract

***Purpose of reseach**. The purpose of the paper is to find new solutions for equiaxial- contour (EC) holes machining and milling cutter modeling with the use of radial constructional feed.*

***Methods.** The results of the determination of the original contour of the milling cutter surface using the basics of the geometric theory are provided in the paper. Theoretical considerations were based on the use of the basics of the vector algebra, analytical and differential geometry, theory of material cutting. The results of the milling cutter design modeling with the application of software COMPAS 3D are presented in the paper.*

***Results.** The analysis of the existing methods for EC holes machining is provided. To improve the efficiency of EC internal surface machining there was proposed a method for milling with a miller cutter with radial constructional feed. The results of the determination of the original cutter surface are provided, the models of its cutting edges and front and flank surfaces were developed. The result of the modeling of the front and flank surface of the cutter teeth with R_f = 24 mm, and cutter width of 50 mm with the front rake angle of 5°, back angle of 10° and 16 teeth are presented. There are also provided the results of the milling cutter modeling by means of 3D modeling which in the future will make it possible to manufacture tool equipment for the proposed method and to conduct an experiment research to determine optimum technological parameters.*

***Conclusion.** On the basis of the developed models it's becoming possible to perform the modeling of the milling process of EC shaped holes in order to determine milling rational values and specifications. The research findings can be used for design-engineering documentation development during the preparation of shaped holes manufacturing in order to ensure specified item characteristics.*

***Keywords:** milling cutter; equiaxial contour; geometric model; theory of shaping; hole; EC-profile.*

***Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

***Financing:** The work was carried out within the framework of funding the Scholarship of the President of the Russian Federation to young scientists and graduate students engaged in promising research and development in priority areas of modernization of the Russian economy for 2018-2020 SP-591.2018.1*

For citation: Kuts V. V., Razumov M. S., Mitrofanov M. V. Modeling of a milling cutter with radial constructional feed for EC-profile holes machining. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 82-93 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-82-93.

Received 06.08..2019

Accepted 30.08.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

В последнее время большое внимание отечественными учеными уделяется обработке РК-профильных валов. Однако недостаточное внимание уделяется

обработке ступицы. Исходя из того, что эти детали работают в паре и эксплуатационные характеристики данного соединения зависят в большей степени от точности изготовления ступицы, задача формообразования ступичного профильного отверстия является актуальной [1-9].

Недостатком имеющихся существующих методов обработки РК-профильных отверстий является придание заготовке и инструменту гармонических перемещений [9-20]. Таким образом, целью дальнейшего исследования является: поиск новых решений для обработки РК-профильных отверстий и моделирование фрезы с применением радиальной конструктивной подачи.

Материалы и методы

Для повышения производительности обработки внутренних поверхностей с равноосным контуром предложен способ обработки фрезой, имеющий следующую схему (рис.1). Отсутствие гармонических перемещений обусловлено конструктивным исполнением предлагаемой фрезы.

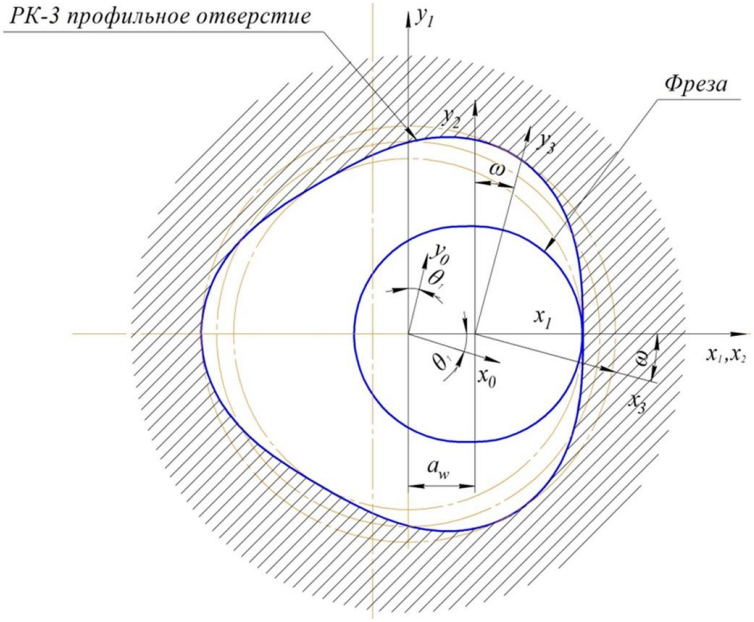


Рис. 1. Схема фрезерования РК-3 профильного отверстия фрезой с переменным радиусом

Fig. 1. Scheme of milling RK-3 profile hole milling cutter with a variable radius

Данная схема формообразования отверстия будет описываться уравнением

$$\bar{r}_0(\theta) = A^{\{6\}}(\theta_1)A^{\{1\}}(x)A^{\{6\}}(\omega)\bar{r}_4, \quad (1)$$

где $\bar{r}_0(\theta)$ – уравнение обрабатываемой поверхности РК-3 профильного отверстия

$$\bar{r}_0(\theta) = \begin{pmatrix} [R - e\cdot\cos(N\cdot\theta)]\cdot\cos\theta - N\cdot e\cdot\sin(N\cdot\theta)\cdot\sin\theta \\ [R - e\cdot\sin(N\cdot\theta)]\cdot\sin\theta - N\cdot e\cdot\sin(N\cdot\theta)\cdot\cos\theta \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

R – радиус средней окружности профильного вала; θ – угловой параметр профиля; e – эксцентриситет профиля; N – количество граней, $A^{\{6\}}(\theta_1)$ – матрица, соответствующая повороту заготовки

$$A^{\{6\}}(\theta_1)=\begin{bmatrix}\cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0\\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},$$

где θ_1 – угол поворота заготовки; $A^{\{1\}}(x)$ – матрица поперечного перемещения фрезы

$$A^{\{1\}}(x)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & x\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},$$

где x – параметр поперечного перемещения фрезы относительно оси x; $A^{\{6\}}(\omega)$ – матрица поворота фрезы

$$A^{\{6\}}(\omega)=\begin{bmatrix}\cos\omega & -\sin\omega & 0 & 0\\ \sin\omega & \cos\omega & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},$$

где ω – угол поворота фрезы; $\bar{r}_4$ – уравнение производящей поверхности фрезы.

Для реализации данного способа необходимо обеспечить следующие кинематические связи:

$$\omega = N\theta_1, \quad (3)$$

$$x = R - R_f, \quad (4)$$

где R_f – средний радиус фрезы с конструктивной подачей.

Для определения исходной инструментальной поверхности инструмента уравнение (1) приведем к виду

$$\bar{r}_4 = A_{\Sigma}^{-1}(\theta_1)\cdot\bar{r}_0(\theta), \quad (5)$$

где $A_{\Sigma}(\theta_1)$ – матрица формообразующей системы технологического оборудования

$$A_{\Sigma} = A^{\{6\}}(\theta_1)A^{\{1\}}(x)A^{\{6\}}(-N\theta_1). \quad (6)$$

На параметр θ_1, входящий в формулу (6), наложим связь огибания, которую определим путем решения относительно параметра θ_1 уравнения,

$$\frac{\partial\bar{r}_4}{\partial\theta_1}\cdot\frac{\partial\bar{r}_4}{\partial\theta}=0. \quad (7)$$

На рис. 2 показан результат расчета исходной инструментальной поверхности фрезы для обработки отверстия под вал РК-профиля $D_{PK}=80\ e/2e=3,4/6,8$, количество граней $N=3$, при радиусе инструмента $R_f=24$ мм.

На основе уравнения профиля исходной инструментальной поверхности $\bar{r}_4(\theta)$, задаваясь величиной θ_i и параметром ширины фрезы z, получаем уравнение прямолинейной i-ой режущей кромки фрезы $\bar{r}_{4i}(\theta_i, z)$.

Построение модели режущих кромок фрезы связано с описанием векторов нормали к передней и задней поверхности зубьев. Для определения уравнения векторов нормали к передней $\overline{N}_i$ и задней поверхности $\overline{N}_{zi}$ i–той режущей кромки фрезы рассчитаем матрицу $A_{wi}(\theta_i, z)$ установки системы

координат радиальной секущей плоскости с центром, проходящим через начало системы координат и режущую кромку [21], по векторам: задающим положительное направление оси x_w, как $\bar{r}_{4i}(\theta_i, z)\big|_{z=0}$; положительное направление оси z_w, как $[0,0,1,0]^{\mathrm{T}}$; положение начала системы координат $X_wY_wZ_w$ как $\bar{r}_{4i}(\theta_i, z)$.

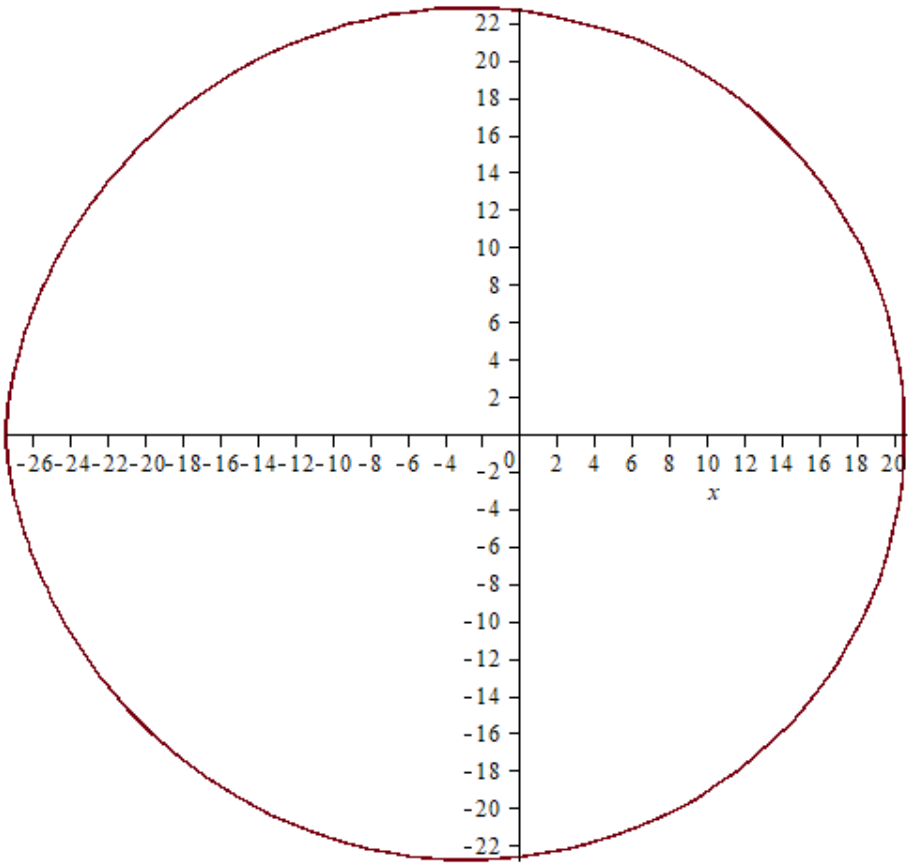


Рис. 2. Производящая поверхность инструмента для обработки РК-3 профильного отверстия с R_f = 24 мм

Fig. 2. The producing surface of the tool for processing RK-3 profile holes with R_f = 24 mm

Тогда уравнение вектора нормали к передней поверхности, определяется как (рис. 3)

$$\bar{N}_{pi}(\theta_i, z, \gamma_i) = A_{wi}(\theta_i, z)A^{\{5\}}(-\gamma_i)\bar{k}_{pi}, \quad (8)$$

где γ_i – передний угол; $A^{\{5\}}(-\gamma_i)$ – матрица поворота секущей плоскости вокруг оси y_{wi} на угол γ_i; $\bar{k}_{pi}$ – орт, соответствующий положительному направлению оси z_{pi}.

Уравнение вектора нормали к задней поверхности определим как (рис. 4)

$$\bar{N}_{zi}(\theta_i, z, \alpha_i) = $$

$$= A_{w_i}(\theta_i, z)A^{\{5\}}\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)\bar{k}_{zi}, \quad (9)$$

где $A^{\{5\}}\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)$ – матрица поворота секущей плоскости вокруг оси y_{wi} на

угол $\frac{\pi}{2}+\alpha$; α – величина заднего угла; $\bar{k}_{zi}$ – орт, соответствующий положительному направлению оси z_{zi}.

На рис. 5 показан результат моделирования передний и задней поверхности зубьев фрезы с R_f = 24 мм, и шириной фрезы 50 мм с передним углом 5°, задним углом 10° и числом зубьев 16.

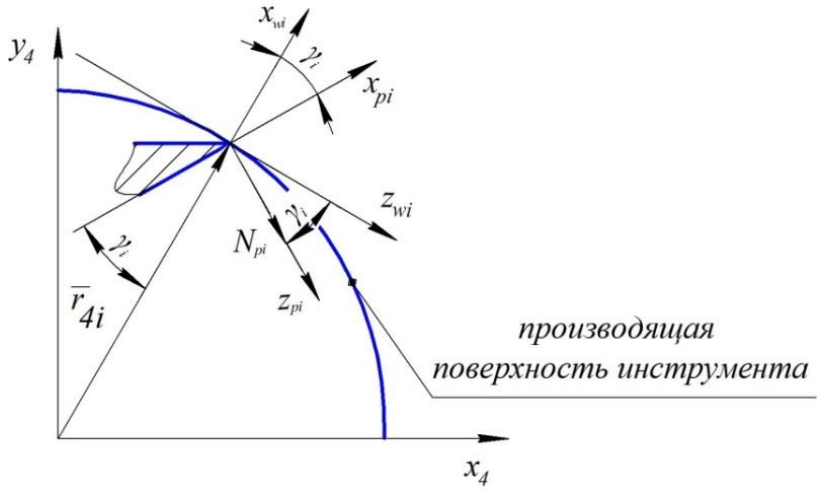


Рис. 3. Схема установки плоскости передней поверхности

Fig. 3. Installation diagram of the front surface plane

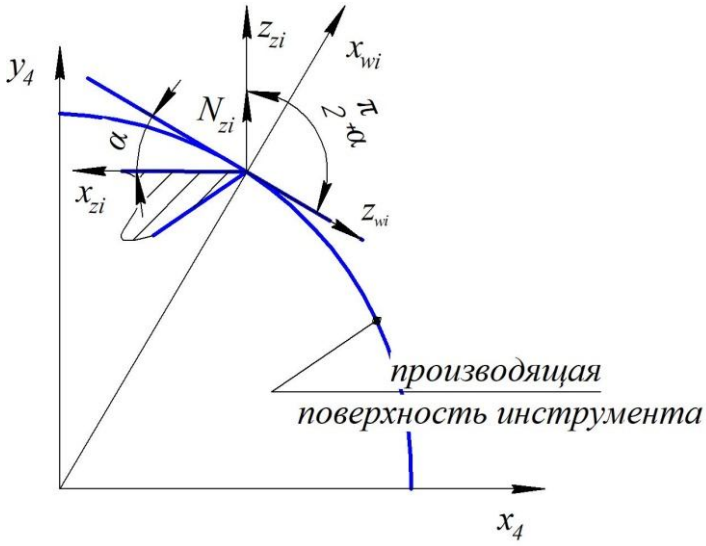


Рис. 4. Схема установки плоскости задней поверхности

Fig. 4. Scheme of installation of the plane of the rear surface

Результаты и их обсуждение

На рис. 6 показан результат построения 3D модели фрезы для обработки РК-профильного отверстия, соответствующего исходной модели инструмента (см. рис. 5).

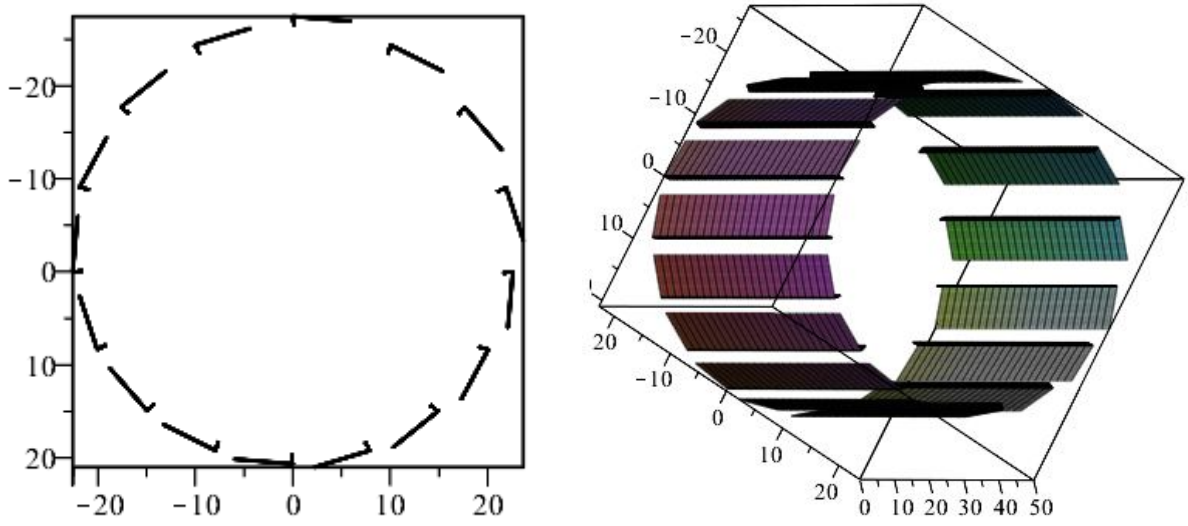
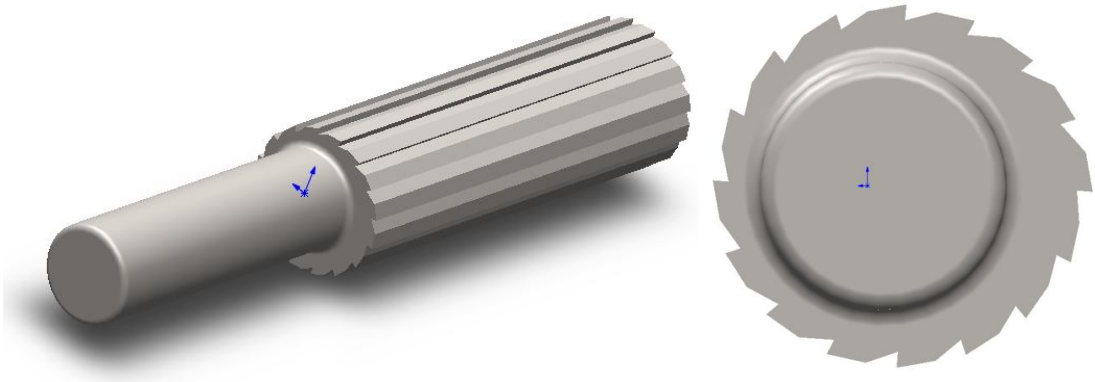


Рис. 5. Результаты моделирования зубьев фрезы для обработки РК-профильных отверстий

Fig. 5. The results of modeling the teeth of the cutter for processing RK-profile holes



а) б)

Рис. 6. 3D модель фрезы для обработки РК-3 профильных отверстий: а – аксонометрия; б – профильный вид

Fig. 6. 3D model of the cutter for processing RK-3 profile holes: a – axonometry; б – profile view

Выводы

На основе построенных моделей становится возможным выполнение моделирования процесса фрезерования РК-профильных отверстий с целью определения рациональных значений обработки и конструктивных параметров.

Полученные данные могут быть полезны при подготовке конструкторско-технологической документации на производственных площадках с целью обеспечения требуемых характеристик детали.

Список литературы

1. Емельянов С.Г. , Гладышкин А.О., Разумов М.С. Автоматизация технологической подготовки производства профильных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1-1. С. 164-168.

2. Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. Анализ погрешности формы профильного вала при обработке фасонным долбяком // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2. Ч.1. С. 54-57.

3. Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. Аспекты контроля профильных соединений на базе треугольника РЕЛО // Сборник научных трудов Sworld. 2013. Т. 4. № 2. С. 92-94.

4. Барботько А.И. , Понкратов П.А., Разумов М.С. Метод генераторной обработки профильных валов долбяками // Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ-2013): материалы V Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2013. С. 440-442.

5. Куц В.В., Разумов М.С., Мальнева Ю.А. Моделирование производящих поверхностей фрез с конструктивной радиальной подачей для обработки эксцентриковых валов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-1. С. 126-131.

6. Моделирование производящих поверхностей охватывающих фрез с конструктивной радиальной подачей для обработки валов с равноосным контуром / В.В. Куц, М.А. Сидорова, М.С. Разумов, Ю.А. Мальнева // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 4 (52). С. 146-150.

7. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем. Курск, 2010. 153 с.

8. Куц О.Г., Емельянов С.Г., Горохов А.А. Моделирование номинальной поверхности тонкостенной детали с малыми углами конусности // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 2 (2). С. 74-80.

9. Куц О.Г., Емельянов С.Г., Горохов А.А. Моделирование профиля производящей поверхности набора фрез, предназначенного для обработки тонкостенной детали с малыми углами конусности // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 2 (2). С. 81-87.

10. Куц О.Г., Горохов А.А. Синтез вариантов схем установки сменных многогранных пластин относительно профиля производящей поверхности фасонных фрез // Прогрессивные технологии и процессы: сборник научных статей 2-й Международной молодежной научно-практической конференции. Курск, 2015. С. 122-130.

11. Мальнева Ю.А., Куц В.В., Горохов А.А. Новый способ обработки валов с равноосным контуром дисковой фрезой с радиальной конструктивной подачей // Моло-

дежь и XXI век -2015: материалы V Международной молодежной научной конференции. Курск, 2015. С. 142-145.

12. Исследование особенностей формирования погрешности обработки при планетарном формообразовании отверстий длинных тонкостенных деталей / В.А. Гречишников, В.В. Куц, И.В. Ванин, М.С Разумов., А.Н. Гречухин // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 1 (16). С. 11-15.

13. Математическое представление режущих кромок спирального сверла в системе MAPLE / О.С. Зубкова, В.В. Куц, Л.Н. Лыкова, Н.Н. Лыкова // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 7 (15). С. 21-28.

14. Кузьменко А.П., Куц В.В., Максименко Ю.А. Построение модели режущих кромок дисковой фрезы для обработки валов с равноосным контуром // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1-1 (40). С. 116-120.

15. Аникеева О.В., Ивахненко А.Г., Куц В.В. Управление качеством этапа планирования процесса ремонта металлорежущих станков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 120-126.

16. Куц В.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л.Синтез производящих поверхностей фрез -протяжек для обработки валов с равноосным контуром // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 8. С. 42-48.

17. Куц В.В., Ивахненко А.Г. Схема структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2009. № 3-2. С. 20-25.

18. Пат. 2463129 Российская Федерация. Способ обработки профильного вала со сторонами равной ширины / Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. 22.03.2011А.

19. Разумов М.С., Куц В.В. Формообразования РК-профильных отверстий на электроэрозионном станке, с применением профильного полого электрода // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 5 (20). С. 4-7.

20. Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С. Особенности изготовления долбежного инструмента для обработки профильных соединений // Техника и технологии: пути инновационного развития: материалы II международной научно-практической конференции. Курск, 2012. С. 36-39.

21. Определение положения зубьев охватывающей фрезы с радиальной конструктивной подачей для обработки РК-профильных валов / А.В. Исаев, В.В. Куц, М.С. Разумов, А.Н. Гречухин, М.А. Сидорова // Вестник МГТУ Станкин. 2018. № 3 (46). С. 112-115.

References

1. Emelyanov S. G., Gladyshkin A. O., Razumov M. S. Avtomatizatsiya tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva profil'nykh valov [Automation of technological preparation of

production of profile shafts]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1, pp. 164-168 (In Russ.).

2. Barbotko A. I., Ponkratov P. A., Razumov M. S. Analiz pogreshnosti formy profil'nogo vala pri obrabotke fasonnym dolbyakom [Analysis of the error of the shape of the profile shaft when processing shaped chisel]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 2-1, pp. 54-57 (In Russ.).

3. Barbotko A. I., Ponkratov P. A., Razumov M. S. Aspekty kontrolya profil'nykh soedinenii na baze treugol'nika RELO [Aspects of control of profile connections on the basis of triangle RE-LO]. *Sbornik nauchnykh trudov Sworld = Collection of scientific papers Sworld*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 92-94 (In Russ.).

4. Barbotko A. I., Ponkratov P. A., Razumov M. S. [Method of generator processing of profile shafts by dolbyaks]. *Mashinostroenie -osnova tekhnologicheskogo razvitiya Rossii (TM-2013). Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Materials of the V International scientific and practical conference "Mechanical engineering-the basis of technological development of Russia (TM-2013)"]. Kursk, 2013, pp. 440-442 (In Russ.).

5. Kuts V. V., Razumov M. S., Malneva Yu. Modelirovanie proizvodyashchikh poverkhnostei frez s konstruktivnoi radial'noi podachei dlya obrabotki ekstsentrikovykh valov [Modeling of producing surfaces of mills with constant radial feed for processing eccentric shafts]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical science*, 2016, no. 8-1, pp. 126-131 (In Russ.).

6. Kuts V. V., Sidorova M. A., Razumov M. S., Malneva Yu. Modelirovanie proizvodyashchikh poverkhnostei okhvatyvayushchikh frez s konstruktivnoi radial'noi podachei dlya obrabotki valov s ravnoosnym konturom [Modeling of producing surfaces covering mills with constructive radial feed for processing shafts with equiaxial contour]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University,* 2016, no. 4 (52), pp. 146-150 (In Russ.).

7. Ivakhnenko A. G., Kutz V. V. Strukturno-parametricheskii sintez tekhnologicheskikh sistem [Structural-parametric synthesis of techno-logical systems]. Kursk, 2010, 153 p. (In Russ.).

8. Kuts O. G., Emelianov S. G., Gorokhov A. A. Modelirovanie nominal'noi poverkhnosti tonkostennoi detali s malymi uglami konusnosti [Modeling of the nominal surface of a thin-walled part with small taper angles]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, techniques and technologies*, 2015, no. 2 (2), pp. 74-80 (In Russ.).

9. Kuts O. G., Emelianov S. G., Gorokhov A. A. Modelirovanie profilya proizvodyashchei poverkhnosti nabora frez, prednaznachennogo dlya obrabotki tonkostennoi detali s malymi uglami konusnosti [Modeling of the profile of the producing surface of a set of cutters intended for processing of a thin-walled detail with small angles of radius]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, technics and technologies*, 2015, no. 2 (2), pp. 81-87 (In Russ.).

10. Kuts O. G., Gorokhov A. A. [Synthesis of variants of schemes of installation of replaceable polyhedral plates concerning a profile of a producing surface of shaped cutters]. *Progressivnye tekhnologii i protsessy. Sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* = [Collection of scientific articles of the 2nd international youth scientific and practical conference "Progressive technologies and processes"]. Kursk, 2015, pp. 122-130 (In Russ.).

11. Malneva Yu. A., Kuts V. V., Gorokhov A. A. [A new method of processing shafts with an equiaxial contour disk cutter with radial constructive feed]. *Materialy V Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "Molodezh' i XXI vek - 2015"* = [Collection Proceedings of the V International youth scientific conference "Youth and the XXI century - 2015"] Kursk, 2015, pp. 142-145 (In Russ.).

12. Grechishnikov V. A., Kuts V. V., Vanin I. V., Razumov M. S., Grechukhin A. N. Issledovanie osobennostei formirovaniya pogreshnosti obrabotki pri planetarnom formoobrazovanii otverstii dlinnykh tonkostennykh detalei [Research of features of formation of an error of processing at planetary shaping of apertures of long thin-walled details]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, technics and technologies*, 2018, no. 1 (16), pp. 11-15 (In Russ.).

13. Zubkova O. S., Kutz V. V., Lykova L. N., Lykova N. N. Matematicheskoe predstavlenie rezhushchikh kromok spiral'nogo sverla v sisteme MAPLE [Mathematical representation of the cutting edges of a spiral drill in the MAPLE system]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, technique and technology*, 2017, no. 7 (15), pp. 21-28 (In Russ.).

14. Kuzmenko A. P., Kuts V. V., Maksimenko Yu. A. Postroenie modeli rezhushchikh kromok diskovoi frezy dlya obrabotki valov s ravnoosnym konturom [Construction of a model of cutting edges of a disc cutter for cutting shafts with an equi-axial contour]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 116-120 (In Russ.).

15. Anikeeva O. V., Ivakhnenko A. G., Kuts V. V. Upravlenie kachestvom etapa planirovaniya protsessa remonta metallorezhushchikh stankov [Quality management of the planning stage of the repair process of machine tools]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2012, no. 4-2 (43), pp. 120-126 (In Russ.).

16. Kuts V. V., Ivakhnenko A. G., Storublev M. L. Sintez proizvodyashchikh poverkhnostei frez -protyazhek dlya obrabotki valov s ravnoosnym konturom [Synthesis of producing surfaces of milling broaches for processing shafts with equiaxial contour]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Izvestiya Tula State University. Technical science,* 2012, no. 8, pp. 42-48 (In Russ.).

17. Kuts V. V., Ivakhnenko A. G. Skhema strukturno-parametricheskogo sinteza metallorezhushchikh sistem [Scheme of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems].

Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology, 2009, no. 3-2, pp. 20-25 (In Russ.).

18. Barbotko A. I., Ponkratov P. A., Razumov M. S. Sposob obrabotki profil'nogo vala so storonami ravnoi shiriny patent na izobretenie [Method of processing profile shaft with sides of equal width patent for invention]. Patent RF, no. 2463129 22.03.2011 (In Russ.).

19. Razumov M. S., Kuts V. V. Formoobrazovaniya RK-profil'nykh otverstii na elektroerozionnom stanke, s primeneniem profil'nogo pologo elektroda [Forming of RK-profile holes on the electroerosion machine, with application of the profile hollow electrode]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, technics and technologies*, 2018, no. 5 (20), pp. 4-7 (In Russ.).

20. Barbotko A. I., Ponkratov P. A., Razumov M. S. [Features of production of the slotting tool for processing of profile connections in the collection]. *Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiya. Materialy II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Materials of the II international scientific and practical conference "Technics and technologies: ways of innovative development"]. Kursk, 2012, pp. 36-39 (In Russ.).

21. Isaev A.V., Kuts V. V., Razumov M. S., Grechukhin A. N., Sidorova M. A. Opredelenie polozheniya zub'ev okhvatyvayushchei frezy s radial'noi konstruktivnoi podachei dlya obrabotki RK-profil'nykh valov [Determination of position of teeth of the covering mill with radial constructive giving for processing of RK-profile shafts]. *Vestnik MGTU Stankin = Bulletin of MSTU Stankin*, 2018, no. 3 (46), pp. 112-115 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3244-1359

Разумов Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mika_1984_@mail.ru

Митрофанов Максим Владимирович, студент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mitrofanovmaksim@list.ru

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail:kuc-vadim@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3244-1359

Mikhail S. Razumov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: mika_1984_@mail.ru

Maksim V. Mitrofanov, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: mitrofanovmaksim@list.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-94-102

CC BY 4.0

Основные проблемы, выявленные при обследовании многоквартирных жилых домов в г. Курске после проведения капитального ремонта

С.В. Дубраков [1], О.И. Куценко [1], К.О. Дубракова [1] ✉

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: dko1988@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. *Анализ проблем, связанных с проведением капитального ремонта многоквартирных домов в Курской области с учетом состояния указанных зданий после окончания работ.*

Методы. *Приведены результаты визуального и инструментального обследования жилого здания, расположенного по улице Менделеева в г. Курске. Выявлено, что наружные стены из кирпича толщиной 640 мм не удовлетворяют требованиям, предъявляемым нормативными документами к приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций. По результатам анализа проектной документации на капитальный ремонт указанного здания определено, что утепление выполняется теплоизоляционной штукатуркой. Даны результаты теплотехнического расчета наружных стен рассматриваемого жилого дома, выполненного на основании данных о характеристиках материалов существующих конструкций и материалов, применяемых при капительном ремонте, указанных в проектной документации.*

Результаты. *Выявлено, что наружные стены обследуемого жилого дома не соответствуют требованиям, предъявляемым нормативными документами к приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций. Обнаружены также нарушения по технологии оштукатуривания стен из силикатного кирпича.*

Заключение. *При проведении обследования жилого дома, расположенного в г. Курске, определено, что наружные стены после проведения работ по капитальному ремонту здания не соответствуют требованиям, предъявляемым к приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций. Расчетом определено, что утепление ограждающих конструкций теплоизоляционной штукатуркой малоэффективно. Сделан вывод о том, что нарушение технологии оштукатуривания стен из силикатного кирпича влечет за собой резкое снижение срока службы.*

Ключевые слова: *капитальный ремонт; обследование; энергоэффективность; теплотехника; качество выполненных работ.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Дубраков С.В., Куценко О.И., Дубракова К.О., 2019

Для цитирования: Дубраков С.В., Куценко О.И., Дубракова К.О. Основные проблемы, выявленные при обследовании многоквартирных жилых домов в г. Курске после проведения капитального ремонта // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 94-102. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-94-102.

Статья поступила в редакцию 28.06.2019

Статья подписана в печать 15.08.2019

Статья опубликована 25.10.2019

The Main Problems Revealed during the Ispection of Apartment Buildings in Kursk after Total Renovation

Sergey V. Dubrakov [1], Olga I. Kutsenko [1], Kseniya O. Dubrakova [1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: dko1988@yandex.ru

Abstract

Purpose of reseach. *Analysis of residential buildings' condition after the total renovation.*

Methods. *Inspection of buildings and structures – is an important part of the construction industry, which allows to analyze and identify defects and damage to building structures, both by visual and instrumental methods of research. Comparative analysis of design documentation and inspection materials of previous years reveal the dynamics of building structures' condition and moments of poor quality work of contractors at different stages of production.*

Results. *The revealed discrepancies in the process of inspection of buildings of Kursk housing stock have been presented in the article. First of all, it is a disregard for the requirements of existing regulations to the thermal characteristics of enclosing structures. Violations of technology of plastering of walls made of silicate bricks have been also revealed. The following negative moments are the low quality of the materials applied for roof repair, decrease in a grade of wood in comparison with design requirments, violation of the requirement and rules of fire safety. Moreover, it has been established that the strengthening offered by results of the previous inspections wasn't carried out during total renovation.*

Conclusion. *When carrying out works on total renovation it is necessary to pay great attention to each apartment building, its features and damages. At the same time, the project documentation must comply with the instructions of modern rules and regulations. Materials and procedure of works must meet the requirements of the project documentation. To reduce the risk of nonconformities during total renovation, it is necessary to perform acceptance of works after each completed stage of construction.*

Keywords: *total renovation, inspection, energy efficiency, heating engineering, quality of work performed.*

Conflict of Interest: *The authors declare the absence of overt and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Dubrakov S. V., Kutsenko O. I., Dubrakova K. O. The Main Problems Revealed during the Ispection of Apartment Buildings in Kursk after Total Renovation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2019, 23(4): 94-102 (In Russ.). https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-4-94-102.

Received 28.06.2019

Accepted 15.08.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

Во все времена продуктивность работы сферы жилищно-коммунального хозяйства занимала немаловажную роль. По данным, приведенным Минстроем в отчете «Развитие рынков ипотеки и жилищного строительства» со ссылкой на Росстат, в городах с населением 100-150 тысяч человек в аварийном состоянии находятся 11% жилья, требуют капитального ремонта – 24%, в городах с населением 500-950 тысяч человек – от 8%. При этом необходимо отметить, что по данным Центра экономических исследований Курская область находится на третьем месте в рейтинге регионов по доле ветхого и аварийного жилья в общей площади всего жилищного фонда после Москвы и Ставропольского края.

Несмотря на то, что за последние пять лет процент аварийного жилья уменьшился на 0,2%, проблемы, связанные с обеспечением проведения капитального ремонта многоквартирных домов в Курской области, на сегодняшний момент актуальны. В настоящее время данного рода проблемы решаются различного рода региональными программами по капитальному ремонту, но, несмотря на это, процент жилья, требующего восстановления, уменьшается крайне медленно. Следовательно, необходимо рассматривать указанные проблемы с учетом анализа состояния жилых зданий после проведения работ по капитальному ремонту [1,2].

Постановлением администрации Курской области от 27 декабря 2013 года №1038-па была утверждена Региональная программа капитального ремонта общего имущества в многоквартирных домах, расположенных на территории Курской области со сроком реализации с 2014 по 2043 год. Основными задачами при реализации данного проекта являются: создание безопасных и благоприятных условий проживания граждан, улучшение эксплуатационных характеристик общего имущества многоквартирных домов и приведение многоквартирных домов, участвующих в Программе, в соответствие требованиям энергоэффективности, действующим на момент выполнения капитального ремонта [3-5].

С целью анализа соответствия требованиям по обеспечению тепловой защиты зданий, предъявляемым к ограждающим конструкциям действующими нормативными документами, а также для рассмотрения путей решения задач, оговоренных в Программе, было проведено обследование четырехэтажного жилого дома, расположенного по улице Менделеева в г. Курске.

Материалы и методы

При проведении визуального и инструментального обследования жилого здания[1], расположенного по улице Менделеева в г. Курске, выявлено, что ограждающими конструкция являются стены из кирпича толщиной 640 мм [6-8]. Согласно проектной документации на капитальный ремонт указанного зда-

[1] СП 13-102-2003 Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2004.

ния отделка фасадов выполняется теплоизоляционной штукатуркой с коэффициентом теплопроводности 0,09 Вт/м*К. На основе данных о теплотехнических характеристиках материалов стен зданий и материалов, применяемых при капитальном ремонте, указанных в проектной документации, согласно действующим нормативным документам был выполнен теплотехнический расчет наружных стен жилого дома, расположенного по ул. Менделеева[1] (рис. 1,2).

Результаты и их обсуждение

Результаты указанного теплотехнического расчета представлены графически (рис. 3, 4) и в таблице.

При проведении указанных поверочных расчетов[1] ограждающих конструкций выявлено, что наружные стены не соответствуют требованиям, предъявляемым нормативными документами к приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций (рис.3,4). При этом требование к ограничению минимальной температуры и недопущению конденсации влаги на внутренней поверхности ограждающих конструкций в холодный период выполняется как до, так и после проведения ремонтных работ.

Помимо указанных выше нарушений в проектной документации, связанных с теплотехническими характеристиками ограждающих конструкций, были выявлены нарушения по технологии оштукатуривания стен из силикатного кирпича. В частности, штукатурка укладывалась неровным слоем и имеет отклонения по толщине в пределах ±5 мм при средней толщине 30 мм при максимально допустимом отклонении в 3 мм, что влечет за собой резкое снижение срока службы.

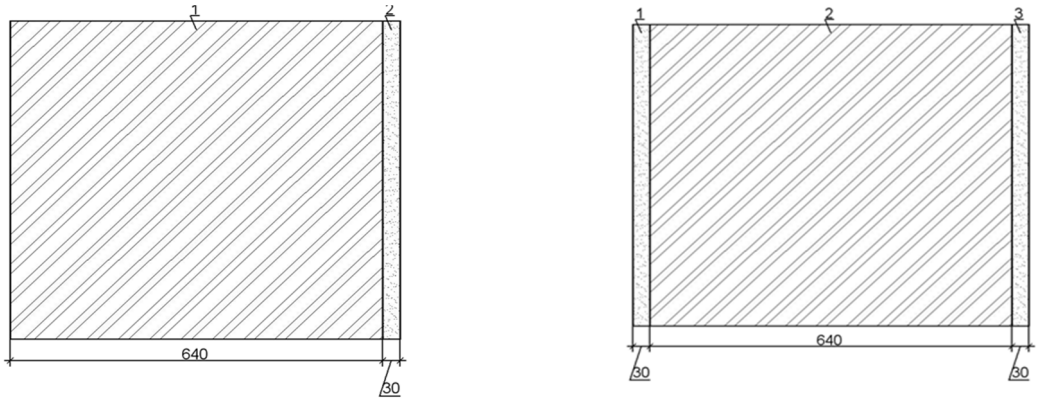
Рис. 1. Жилой дом, расположенный по улице Менделеева в г. Курске, до капитального ремонта

Fig. 1. Residential house located in Mendeleyev street in the city of Kursk before the total renovation

Рис. 2. Жилой дом, расположенный по улице Менделеева в г. Курске, после капитального ремонта

Fig. 2. Residential house located in Mendeleyev street in the city of Kursk, after the total renovation

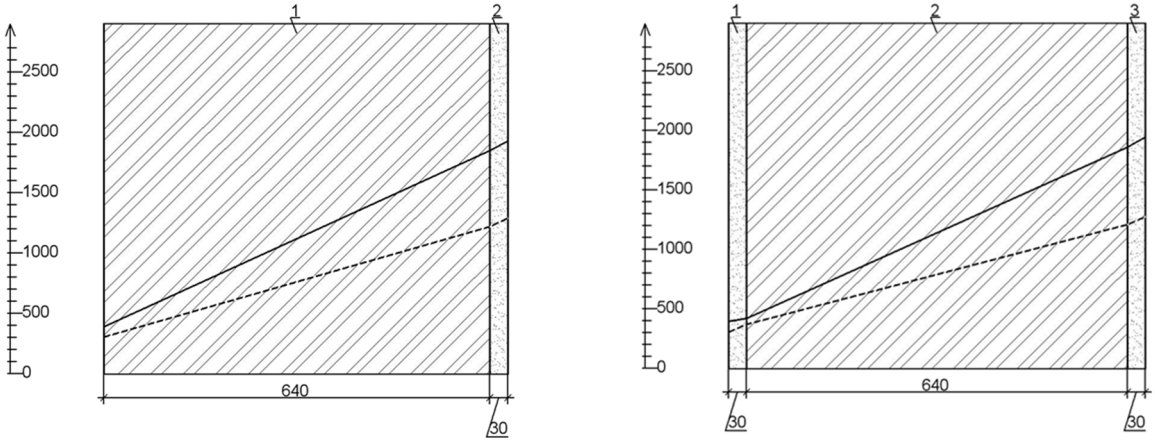
[1] СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНИП 23-02-2003. М.: Минрегион России, 2012.



а) б)

Рис. 3. Схемы ограждающих конструкций: а – стена без наружного слоя штукатурки: 1 – кладка из глиняного кирпича обыкновенного на ц.-перл. р-ре, толщина δ1=0,64м; 2 – раствор цементно-песчаный, толщина δ2=0,03м; б – стена с внутренним и наружным слоем штукатурки: 1 – тепло-изоляционная штукатурка на основе вермикулита, 2 – кладка из глиняного кирпича обыкновенного на ц.-перл. р-ре, толщина δ2=0,64м 3 – раствор цементно-песчаный, толщина δ1=0,03 м

Fig. 3. Schemes of enclosing structures: a – wall without an outer layer of plaster: 1 – laying of clay bricks on a common pearl. p-re, thickness δ1 = 0,64m; 2 – cement-sand mortar, thickness δ2 = 0,03m; б – wall with the inner and outer layers of plaster: 1, 3 – cement-sand mortar, thickness δ1 = 0,03m; 2 –- laying of clay brick ordinary on c.-Pearl. p-re, thickness δ2 = 0,64m



а) б)

Рис. 4. Результаты анализа паропроницаемости ограждающих конструкций: – – – – распределение действительного парциального давления водяного пара, е; ——— распределение максимального парциального давления водяного пара,Е

Fig. 4. The results of the analysis of vapor permeability of enclosing structures:- - - - distribution of the actual partial pressure of water vapor, e; ——— distribution of the maximum partial pressure of water vapor, E

Таблица. Сводная таблица результатов расчетов
Table. Summary table with calculation data

Параметр	Стена из кирпичной кладки до капитального ремонта	Стена из кирпичной кладки после капитального ремонта
Приведённое сопротивление теплопередаче $R_0^{пр}$, м2•°С/Вт	1,01 (<1.83) представленная ограждающая конструкция не соответствует требованиям по теплопередаче	1,05 (<1.83) представленная ограждающая конструкция не соответствует требованиям по теплопередаче
Сопротивление паропроницанию R_n, м2•ч•Па/мг	R1=0.91м2•°С/Вт, R0усл=1.01м2•°С/Вт влагонакопление невозможно	Rn>Rn1тр (4.6>0.23) , Rn>Rn2тр (4.6>0.57) условие выполняется
Возможность образования конденсата в толще стены	Недопустимо, согласно графику (рис. 4, а)	Недопустимо, согласно графику (рис. 4, б)

Выводы

При проведении обследования жилого дома, расположенного в г. Курске, определено, что наружные стены не соответствуют требованиям, предъявляемым к приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций. $R_0^{пр}$ до проведения работ по капитальному ремонту здания составляет 1,01 м^2•°С/Вт при требуемом значении $R_0^{пр} \geq 1{,}83$. При этом согласно проектной документации выбрано утепление теплоизоляционной штукатуркой. Расчетом определено, что приведённое сопротивление теплопередаче после капитального ремонта увеличилось на 4% и составило 1,05 м^2•°С/Вт. Следовательно, указанный в проектной документации тип утепления малоэффективен.

Список литературы

1. Ильина М.В. Проблематика реализации региональных программ капитального ремонта жилищного фонда // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре : материалы 71-й юбилейной Всероссийской конференции по итогам НИР СГАСУ. Электронные текстовые и графические данные. Самара, 2014. С.262-263.

2. Макиева М.Т., Хосроева Н.И. Управление капитальным ремонтом многоквартирного дома в системе ЖКХ: нормативно-правовые аспекты // Вестник Северо-Осетинского государственного университета имени Коста Левановича Хетагурова. 2017. № 2. С. 143-148.

3. Толстых Ю.О., Учинина Т.В., Люлькина Н.М. Особенности и проблемы формирования региональной системы управления капитальным ремонтом многоквартирных жилых домов в современных условиях // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 414.

4. Направления совершенствования региональной системы управления капитальным ремонтом многоквартирных жилых домов / В.С. Ежов, Н.Е. Семичева, С.В. Павлов, А.П. Бурцев, К.В. Жеурова, Ю.Д. Потапенко // Наука молодых - будущее России: сборник научных статей 2-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2017. С. 113-120.

5. Крыгина А.М., Крыгина Н.М. Двенадцатая пятилетка как переломный момент: теория и практика состояния объектов капитального строительства системы коррекционного образования (на материалах Курской области) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 4 (37). С. 193-200.

6. Оценка технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений / А.А. Сморчков, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7 (33). С. 70-75.

7. Неверов А.Н. Обследование технического состояния стен и перекрытий здания // Аллея науки. 2017. Т. 2. № 15. С. 311-315

8. Теоретическое исследование теплотехнических свойств ограждающих конструкций зданий после реконструкции / С.В. Дубраков, О.И. Куценко, В.В. Андриенко, Н.В. Афанасьева, Д.Х. Галаева // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции. Научный центр «Диспут». Вологда, 2016. С. 36-38.

References

1. Ilyin M. V. [The Problems of realization of regional programs of capital repairs of housing Fund] *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Materialy 71-i yubileinoi Vserossiiskoi konferentsii po itogam NIR SGASU.* [Materials of the 71st anniversary of the conference on the results of research to SGAS" Traditions and innovations in construction and architecture"]. Samara, 2014, pp. 262-263 (In Russ.).

2. Makieva M. T., Khosroeva N. I. Upravlenie kapital'nym remontom mnogokvartirnogo doma v sisteme ZhKKh: normativno-pravovye aspekty [Management of capital repairs of an apartment building in the housing and communal services system: legal aspects]. *Vestnik Severo-Osetinskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Kosta Levanovicha Khetagurova = Bulletin of the North Ossetian state University named after Costa Levanovich Khetagurov*, 2017, no. 2, pp. 143-148 (In Russ.).

3. Tolstykh, Yu. O., Usynina T. V., Lushkina N. M. Osobennosti i problemy formirovaniya regional'noi sistemy upravleniya kapital'nym remontom mnogokvartirnykh zhilykh domov v sovremennykh usloviyakh [Peculiarities and problems of formation of regional system of capital repairs of apartment houses in modern conditions]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2013, no. 6, pp. 414 (In Russ.).

4. Ezhov V. S., Semicheva N. E., Pavlov S. V., Burtsev A. P., Zheurova K. V., Potapenko Yu. D. [Directions of improvement of the regional system of capital repairs of apartment houses]. *Nauka molodykh - budushchee Rossii. Sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh* = [Collection of scientific articles of the 2nd International scientific conference of promising developments of young scientists "Science of young - the future of Russia"]. Kursk, 2017, pp. 113-120 (In Russ.).

5. Krygina A. M., Krygina N. M. Dvenadtsataya pyatiletka kak perelomnyi moment: teoriya i praktika sostoyaniya ob"ektov kapital'nogo stroitel'stva sistemy korrektsionnogo obrazovaniya (na materialakh Kurskoi oblasti) [The twelfth five-year plan as a watershed moment: the theory and practice of the state of objects of capital construction of the system of correctional education (on materials of Kursk region)]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2011, no. 4 (37), pp. 193-200 (In Russ.).

6. Smorchkov A. A., Kereb S. A., Orlov D. A., Baranovskaya K. O. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh stroitel'nykh konstruktsii zdanii i sooruzhenii [Assessment of the technical condition of the operated building structures of buildings and structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Civil Engineering journal*, 2012, no. 7 (33), pp. 70-75 (In Russ.).

7. Neverov A. N. Obsledovanie tekhnicheskogo sostoyaniya sten i perekrytii zdaniya [Examination of the technical condition of the walls and floors of the building]. *Alleya nauki = Alley of science*, 2017, vol.2, no. 15, pp. 311-315 (In Russ.).

8. Dobrakov S. V., Kutsenko O. I., Andriyenko V. V., Afanasyeva N. In., Galaev D. X . [Theoretical study of thermal properties of building envelopes after reconstruction]. *Nauka segodnya: problemy i perspektivy razvitiya. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii.* [Materials of the international scientific-practical conference "Science today: problems and prospects of development"]. Vologda, Scientific center "Dispute" Publ., 2016, pp. 36-38 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Дубраков Сергей Валерьевич, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Sergey V. Dubrakov, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Construction, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Куценко Ольга Ивановна, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Olga I. Kutsenko, Associate Professor, Industrial and Civil Construction Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Дубракова Ксения Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dko1988@yandex.ru

Ksenia O. Dubrakova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Industrial and Civil Construction Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: dko1988@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-103-116

CC BY 4.0

Разработка инженерной методики расчета сезонной гелиосистемы горячего водоснабжения

Е.В. Умеренков [1] ✉, Э.В. Умеренкова [1], Н.Е. Семичева [1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. *Целью исследования является разработка упрощенного подхода для дальнейшей алгоритмизации расчета гелиоприемника горячего водоснабжения (ГВС) сезонной работы индивидуального жилого дома и обозначение основных прогнозируемых величин.*

Методы. *Для достижения поставленных целей в работе были определены примерные значения основных характеристик гелиосистемы горячего водоснабжения (ГС ГВС), влияющих на технико-экономические показатели системы и определяющих режим эксплуатации системы, ее комфортность в использовании и обслуживании – коэффициент полезного действия солнечной установки, общие расходы на догрев воды в нагревателе–дублере, ход температуры воды в баке-аккумуляторе по расчетным суткам месяцев эксплуатации ГС ГВС. В качестве критерия эффективности системы принят коэффициент замещения гелиосистемы горячего водоснабжения, т.е. доля тепловой нагрузки ГВС, удовлетворяемой за счет поглощенной солнечной энергии в период работы установки.*

Результаты. *Предложен вариант постановки задачи для разработки алгоритма расчета гелиоприемника горячего водоснабжения индивидуального жилого дома для условий эксплуатации с относительно невысоким уровнем интенсивности солнечной радиации и наличия низких температур в зимнее время, что создает значительные трудности при круглогодичной эксплуатации системы и определяет сезонность ее работы. Разработанная методика позволяет произвести расчет хода температуры воды в баке-аккумуляторе, общее количество тепла, использованного для приготовления горячей воды за счет энергии солнечного излучения, коэффициент замещения и коэффициент полезного действия ГС ГВС.*

Заключение. *Получено универсальное уравнение, которое позволяет определить основные прогнозируемые параметры гелиосистемы для любого режима работы ГС ГВС.*

Ключевые слова: *накопитель тепла; солнечная энергия; гелиосистема; теплоснабжение; горячее водоснабжение.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования Умеренков Е.В., Умеренкова Э.В., Семичева Н.Е. Разработка инженерной методики расчета сезонной гелиосистемы горячего водоснабжения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 103-116. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-103-116.

Статья поступила в редакцию 05.02.2019

Статья подписана в печать 10.09.2019

Статья опубликована 25.10.2019

© Умеренков Е.В., Умеренкова Э.В., Семичева Н.Е., 2019

Development of Engineering Methods for Calculating Seasonal Solar System of Hot-Water Supply

Evgeniy V. Umerenkov [1] ✉, Elina V. Umerenkova [1], Natalya E. Semicheva [1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Abstract

Perpose of research. *The purpose of the research is to develop a simplified approach for the further algorithmization of a hot-water supply solar collector calculation for seasonal operation of an individual residential building and designation of the main predicted values.*

Methods. *To achieve objectives, the approximate values of the main solar system of hot-water supply characteristics was determined, affecting the technical and economic indicators of the system and determining the mode of system operation, its comfort in use and maintenance - the efficiency of the solar installation, the total cost of water heating in the alternate heater, the temperature of the water in the storage tank according to the estimated number of operation days in months of solar system of hot-water supply maintenance. As a criterion for the system effectiveness, the replacement coefficient for the solar system of hot-water supply was adopted, i.e. the share of the hot-water supply heat load satisfied by the absorbed solar energy during the operation of the facility.*

Results. *A variant of the problem statement is proposed for developing an algorithm for calculating a solar water collector for hot-water supply in an individual residential building for operating conditions with a relatively low level of solar radiation intensity and the presence of low temperatures in winter, which creates significant difficulties during the year-round operation of the system and determines the seasonality of its operation. The developed method allows to calculate: the course of the water temperature in the storage tank, the total amount of heat used to prepare hot water due to the energy of solar radiation; the replacement and efficiency coefficients for the solar system of hot-water supply.*

Conclusion. *A universal equation is obtained that allows you to determine the main predicted parameters of the solar system for any mode of operation for solar system of hot-water supply.*

Keywords: *heat accumulator; solar energy; heliosystem; heat supply; hot water supply.*

Conflict of interest. *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Umerenkov E.V., Umerenkova E.V., Semicheva N.E. Development of Engineering Methods for Calculating Seasonal Solar System of Hot-Water Supply. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 103-116 (In Russ.). https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-5-103-116.

Received 05.08.2019

Accepted 10.09.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

Вопрос экономии энергоресурсов путем повышения энергоэффективности инженерных систем[1] приводит, в том числе, к рассмотрению возможности и целесообразности использования возобновляемых источников энергии.

Системы теплоснабжения, использующие традиционные виды тепловой энергии, и альтернативная теплоэнергетика с применением солнечной и других возобновляемых видов энергии предусматривает запасание избыточной тепловой энергии, поскольку периоды поступления теплоты с мощностями, превышающими требуемую, чередуются с промежутками времени, когда теплопроизводительность источника меньше расчетной тепловой нагрузки потребителя или отсутствует вообще [1-10].

Вопросы экономической целесообразности применения систем гелиотеплоснабжения рассмотрены в работах [11-13]. Очевидно, что анализ возможности и целесообразности использования энергосберегающего оборудования – а именно, системы гелиотеплоснабжения – в индивидуальном жилом доме нельзя выполнять в отрыве от конкретного географического положения объекта. Наиболее перспективно использование солнечной энергии в районах с большим количеством солнечных дней в году. В [14] представлен анализ опыта разработки и эксплуатации гелиоустановок в Краснодарском крае.

Материалы и методы

В работе [15] (рис.1) рассмотрена возможность сезонного использования системы гелиотеплоснабжения для обеспечения горячей водой индивидуальный жилой дом, расположенный в сельской местности Курской области. География расположения объекта в данном случае определяет относительно невысокий (по сравнению с южными районами страны) уровень интенсивности солнечной радиации и наличие низких, отрицательных температур в зимнее время (до –30°С), что создает значительные трудности при круглогодичной эксплуатации системы.

Основой для разработки инженерных методик расчета накопителей тепла являются приближенные варианты постановки задачи теплообмена [3-10, 13, 16-18].

В настоящей работе сделана попытка разработать упрощенный подход для дальнейшей алгоритмизации расчета гелиоприемника горячего водоснабжения для индивидуального жилого дома и обозначить основные прогнозируемые величины.

Объектом является гелиосистема ГВС, включающая весь солнечный кон-

[1] "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями, вступающими в силу с 01.01.2018): Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 29.07.2017). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

тур и некоторые элементы контура водоснабжения: бак-аккумулятор, система подпитки и водоразборный трубопровод.

В рассматриваемой гелиосистеме горячего водоснабжения [15] использовано два контура, что обусловлено следующими факторами:

– гелиосистема ГВС скомбинирована с системой отопления, и использование водонагревателя «зимней» системы ГВС удешевляет и упрощает систему в целом;

– в разработанной схеме по солнечному контуру циркулирует теплоноситель, который обеднен воздухом (по сравнению с водопроводной водой, которая бы поступала в коллектор при незамкнутом контуре), выделившимся в нерабочие часы через расширительный бак; это приводит к уменьшению коррозии как труб, так и коллекторов, и змеевика теплообменника, а также отсутствию постоянного (в течение рабочего периода) зарастания труб вследствие осаждения солей;

– при эксплуатации системы с замкнутым солнечным контуром есть возможность его заполнения антифризом, что позволит без дополнительных трудозатрат расширить календарные сроки использования системы; возможны также пробные пуски и остановки системы без опорожнения бака- аккумулятора.

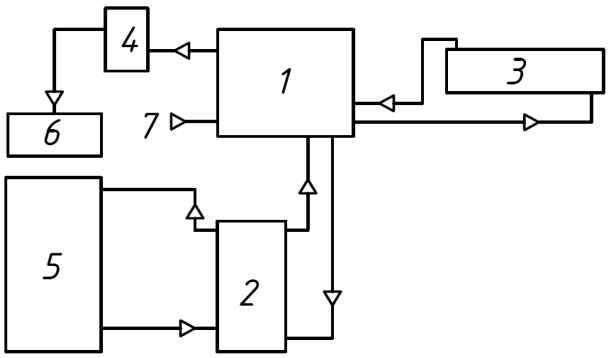


Рис. 1. Блок-схема системы теплоснабжения с гелиосистемой горячего теплоснабжения:
1 – емкостной водоводяной теплообменник; 2 – водогрейный котел; 3 – солнечный коллектор;
4 – электроводонагреватель; 5 – система отопления; 6 – система горячего водоснабжения;
7 – подача воды из водопровода

Fig. 1. Block diagram of a heat supply system with a solar system of hot heat supply: 1 – capacitive water-water heat exchanger; 2 – hot water boiler; 3 – solar collector; 4 – electric water heater; 5 – heating system; 6 – hot-water supply system; 7 – water supply from the water supply system

Целью задачи инженерного расчета гелиоприемника горячего водоснабжения для индивидуального жилого дома является определение примерных значений основных характеристик, влияющих на технико-экономические показатели системы и определяющих режим эксплуатации системы, ее комфортность в использовании и обслуживании.

В качестве критерия эффективности системы принят коэффициент замещения f гелиосистемы горячего водо-

снабжения, представляющий собой величину, равную доле тепловой нагрузки ГВС, удовлетворяемой за счет поглощенной солнечной энергии в период работы установки (6 месяцев).

Кроме того, поставлена цель определения следующих величин:

– коэффициент полезного действия солнечной установки, т.е. доля солнечной энергии, падающей на поверхность гелиоприемников, которая была поглощена и полезно использована;

– общие расходы на догрев воды в нагревателе-дублере, на привод насоса и системы автоматизации системы;

– ход температуры воды в баке-аккумуляторе по расчетным (средним) суткам месяцев эксплуатации ГС ГВС, характеризующей комфортность системы, т.к., определяя и время дополнительной обработки воды перед водоразбором-время догрева.

Постановка задачи предполагает описание следующих основных процессов:

– поглощение солнечной энергии гелиоприемниками;

– нагрев теплоносителя в гелиоприемниках;

– охлаждение теплоносителя в змеевике бака-аккумулятора;

– передача тепла от теплоносителя солнечного контура к воде через поверхность нагрева змеевика бака-аккумулятора;

– нагрев (охлаждение) воды в баке-аккумуляторе под воздействием следующих факторов: теплоотдача змеевика; теплопотери через стояки; отбор горячей воды; подача холодной воды.

Процесс нагрева воды в электроводонагревателе не рассматривается, но подразумевается.

Работа ГС ГВС характеризуется нестационарными процессами тепломассопередачи, что создает определенные трудности для описания их математическими уравнениями. Поэтому при разработке математической модели было введено несколько допущений, обоснованных в [7], которые не оказывают значительного влияния на конечный результат. Некоторые допущения будут проанализированы при составлении модели.

Мощность, поглощенная в гелиоприемниках, может быть найдена по формуле [11] (Вт):

$$Q_K = F_R \cdot A \cdot [E(\tau) \cdot (\tau \cdot \alpha) - \upsilon_L \cdot \times \times (t'_K - t_H)], \quad (1)$$

где F_R – коэффициент отвода тепла из коллектора;

A – площадь поверхности поглощающих пластин солнечных коллекторов,м^2;

$E(\tau)$ – поток солнечной радиации в плоскости солнечных коллекторов, Вт/м^2;

τ – пропускательная способность прозрачного покрытия гелиоприемника по отношению к солнечному излучению, зависящая от угла падения солнечных лучей;

α – поглощательная способность пластины коллектора по отношению к солнечному излучению, зависящая от угла падения солнечных лучей;

υ_L – полный коэффициент тепловых потерь гелиоприемника, Вт/(м^2·℃);

$t'_К$ – температура теплоносителя солнечного контура на входе гелиоприемника, °С;

$t_Н(\tau)$ – температура наружного воздуха, °С.

Мощность, поглощаемая теплоносителем и отводимая из гелиоприемника (Вт):

$$Q''_К = A \cdot G_К \cdot C_{рк} \cdot (t''_К - t'_k), \quad (2)$$

где $G_К$ – расход теплоносителя в солнечном контуре в расчете на 1 м^2 поверхности гелиоприемника, кг/(с·м^2);

$C_{рк}$ – удельная теплоемкость теплоносителя солнечного контура, Дж/(кг·°С);

$t''_К$ – температура теплоносителя солнечного контура на выходе гелиоприемника, °С.

Мощность, отдаваемая теплоносителем солнечного контура в змеевике бака-аккумулятора (Вт):

$$Q'_А = G_К \cdot A \cdot C_{рк} \cdot (t'_А - t''_k), \quad (3)$$

где $t'_А - t''_k$ – температура теплоносителя солнечного контура соответственно на входе и на выходе змеевика бака-аккумулятора, °С.

Мощность, передаваемая через поверхность нагрева змеевика бака-аккумулятора (Вт):

$$Q''_А = R_А \cdot F_А \cdot \Delta\bar{t}, \quad (4)$$

где $R_А$ – коэффициент теплопередачи змеевика, Вт/(м^2·°С);

$F_А$ – площадь поверхности нагрева змеевика, из расчета которой определена величина $R_А$, м^2;

$\Delta\bar{t}$ – средний температурный напор, создаваемый на змеевике между теплоносителем солнечного контура и водой в баке-аккумуляторе, °С.

Уравнение теплового баланса для бака-аккумулятора:

$$Q''_А + Q_х = Q_в + Q_{гв} + Q_{пот}, \quad (5)$$

где $Q_х$ – количество тепла (Вт), поступающего в бак-аккумулятор при его подпитке холодной водой, определяемое по формуле

$$Q_х = G_А \cdot C_{рк} \cdot t_х, \text{ Вт} \quad (6)$$

$Q_в$ – количество тепла, расходуемое на изменение теплоснабжения воды в баке-аккумуляторе, Вт, определяемое по формуле (положительно при повышении температуры, отрицательно- при понижении):

$$Q_В = M \cdot C_{рк} \cdot \frac{d\bar{t}а}{d\tau}; \quad (7)$$

$Q_{гв}$ – количество тепла (Вт), отводимого из бака-аккумулятора при водоразборе, определяемое по формуле

$$Q_{гв} = G_А \cdot C_{рк} \cdot t_{а*}, \quad (8)$$

$Q_{пот}$ – теплопотери бака-аккумулятора (Вт), определяемые по формуле

$$Q_{пот} = R_б \cdot F_б \cdot (\bar{t_а} - t_{Н*}), \text{ Вт} \quad (9)$$

где $G_А$ – расход воды через бак-аккумулятор, определяемый режимом водопотребления, кг/с (табл.);

$t_х$ – температура воды, поступающей из холодного водопровода, °С;

τ – время, с;

$\bar{t_а}$ – среднеинтегральная температура воды в баке-аккумуляторе;

М – масса хранимого в баке-аккумуляторе запаса воды, кг;

$t_{а*}$ – температура воды в баке-аккумуляторе в зоне ее забора водоразборным трубопроводом, °С;

$R_б$ – коэффициент теплопередачи через стенки бака-аккумулятора, м^2;

$t_{Н*}$ – температура воздуха в помещении, где установлен бак-аккумулятор, °С.

Таблица. Средний режим потребления горячей воды в течение суток ($\bar{G}$ доля суточного расхода воды, потребляемая в течение часа)

Table. Average mode of hot water consumption during the day ($\bar{G}$ share of daily water consumption consumed during one hour)

$\tau_р$,час	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
$\bar{G}$ %	1,3	4,8	7,2	8,4	7,0	4,6	3,6	5,2	2,6	2,2	2,0	3,8
$\tau_р$,час	18-9	19-20	20-21	21-22	22-23	23-0	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
$\bar{G}$ %	6,9	11,9	9,7	6,9	5,2	4,7	2,0	0	0	0	0	0

Температура поглощающей пластины гелиоприемника при отсутствии циркулирующего теплоносителя (нет отвода тепла), может быть определена по формуле [18]

$$t_\infty = t_H + \frac{E(\tau)\cdot(\tau\alpha)}{\upsilon_L},\ ℃ \qquad (10)$$

где все величины соответствуют обозначениям в формуле (1).

Надо отметить, что уравнение (1) записано для одного гелиоприемника. Для определения общей величины теплопоступлений необходимо просуммировать результаты, полученные при расчете каждого коллектора отдельно. Но, пренебрегая незначительной величиной неравномерности распределения теплоносителя по коллекторам и потерями тепла в соединительные трубопроводы, можно считать блок гелиоприемников за единую панель, площадь которой равна сумме площадей, составляющих блок гелиоприемников. В этом случае уравнение теплового баланса для гелиоприемников запишется в следующей формуле:

$$Q'_К = Q''_К. \qquad (11)$$

Уравнение теплового баланса для змеевика бака-аккумулятора:

$$Q'_А = Q''_А. \qquad (12)$$

Пренебрегая также теплопотерями трубопроводов солнечного контура, можно записать:

$$Q'_К = Q''_А. \qquad (13)$$

При работе системы в режиме аккумулирования солнечной энергии (с водоразбором и без него), в баке-аккумуляторе будет наблюдаться постоянная естественная циркуляция воды вследствие нагрева нижних слоев змеевика. При этом по всему объему установиться примерно постоянная температура, т.к. стратификация проектом не предусматривается. Возникновение градиента температур возможно только в том случае, когда нет подвода тепла от гелиоприемников ($t_\infty \leq t_А$) Однако пренебрегая этой стратификацией воды, мы получим результат несколько заниженный (по эффективности системы), но с небольшой погрешностью. Учитывая это допущение, можно принять температуру воды в баке постоянной по всему объему в любой момент времени:

$t_{a*} = t_a \cdot \overline{t_a}$. (14)

Средний температурный напор на змеевике (см. формулу (4)) с достаточной точностью можно принять равный среднеарифметическому в любой момент времени, т.е.

$\Delta\bar{t} = \frac{t'_A + t''_A}{2} - t_A$, °С. (15)

Таким образом, уравнениями (11), (13) -(15) записаны все оговоренные пунктом гипотезы, принимаемые для упрощения математической модели и расчетов по ней.

Моделирование нестационарных тепловых процессов всегда связано с затруднениями в составлении и решении балансовых уравнений. Поэтому в [7] рекомендуется моделировать нестационарные процессы стационарными в течение некоторого промежутка времени. При моделировании гелиосистем, основными исходными данными к расчету теплообмена является условно кусочно постоянные функции величины интенсивности солнечной радиации и температуры наружного воздуха. В начальный момент временного интервала $\Delta\tau$ определяются внешние условия и рассматривается тепловой баланс системы.

Применение этого принципа и моделирования дает хорошие результаты [19]. Поэтому она была применена и в этой работе.

Перепишем уравнение (13) с учетом (2) и (3)

$A \cdot G_A \cdot C_{рк} \cdot (t''_К - t'_К) =$

$= A \cdot G_A \cdot C_{рк} \cdot (t'_A - t''_A)$, (16)

$t''_К - t'_К = t'_A - t''_A$. (17)

Результаты и их обсуждение

Учтя, что все четыре температуры в уравнении (17) характеризуют один и тот же теплоноситель в различных точках системы, и в допущении стационарности процесса получаем единственное решение:

$\{t''_К - t'_А;\ t''_А - t'_К$. (18)

То есть температура теплоносителя солнечного контура изменяется только в гелиоприемниках и змеевике бака-аккумулятора, оставаясь величиной постоянной на всем протяжении трубопроводов контура.

Для составления уравнения, решением которого можно было бы найти основные прогнозируемые величины t_A и $Q_{доп}^{общ}$ (ход температуры воды в баке-аккумуляторе и общее количество дополнительной энергии), необходимо решить совместно уравнения (5), (11) и (12) с учетом (14), (15) и (18):

$R_A \cdot F_A \cdot (\frac{t''_К + t'_К}{2} - t_A) + G_A \cdot C_{рк} \cdot t_x = M \cdot C_{рк} \cdot \frac{dt_A}{d\tau} + G_A \cdot C_{рк} \cdot t_A + R_б \cdot F_б \cdot (t_A - t_{H*})$ Вт; (19)

$A \cdot F_R \cdot (\tau\alpha) \cdot E - A \cdot F_R \cdot \mho_L \cdot (t'_K - t_H) = A \cdot G_A \cdot C_{рк} \cdot (t''_K - t'_K)$ Вт; (20)

$A \cdot G_A \cdot C_{рк} \cdot (t''_K - t'_K) = R_A \cdot F_A \cdot (\frac{t'_K + t''_K}{2} - t_A)$, Вт. (21)

Уравнение (20) удобнее использовать после проведения некоторых преобразований:

$$F_R \cdot (\tau\alpha)_n \cdot \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \cdot E - F_R \cdot \text{Ʊ}_L \cdot (t'_K - t_H) = G_A \cdot C_{рк} \cdot (t''_K - t'_K). \quad (22)$$

Здесь $(\tau\alpha)_n$ – оптический КПД гелиоприемника по отношению к солнечному излучению, падающему по нормали к поверхности.

Величины $F_R(\tau\alpha)_n$ и $F_R\text{Ʊ}_L$ характеризуют конструктивное исполнение гелиоприемников и определяются их размерами и устройствами. Далее использованы следующие обозначения:

$$\begin{cases} X = F_R(\tau\alpha)_n;\ У = F_R Ʊ_L; \\ \beta = \frac{\tau\alpha}{(\tau\alpha)_n}; \\ m_a = M \cdot Cpa; \\ f_a = F_R \cdot F_A;\ f_б = R_б \cdot F_б; \\ g_a = G_A \cdot Cpa;\ g_K = G_K Cpk. \end{cases} \quad (23)$$

С учетом введенных обозначений и опуская промежуточные преобразования получим:

$$\begin{cases} f_a \cdot \left(\frac{t'_K + t''_K}{2}\right) + g_a \cdot t_x = m_a \cdot \frac{\alpha t_a}{\alpha\tau} + g_a t_a + f_б(t_A - t_{H*}) & (24) \\ A \cdot g_k \cdot (t''_K + t'_K) = f_a \cdot \left(\frac{t'_K + t''_K}{2} - t_A\right) & (25) \\ x \cdot \beta \cdot E - У \cdot (t'_K - t_H) = g_K \cdot (t''_K - t'_K). & (26) \end{cases}$$

В уравнениях (24) - (26) неизвестными величинами являются t_A; t'_K и t''_K, т.е. имеется три уравнения с тремя неизвестными. Решая систему, в первую очередь необходимо получить аналитическое выражение для нахождения t_A.

$$t'_K = \frac{f_a \cdot t_A + X \cdot \beta\left(A - \frac{f_a}{2 \cdot gk}\right) \cdot E + У\left(A - \frac{f_a}{2 \cdot gk}\right) \cdot t_H}{A \cdot У + f_a - \frac{f_a \cdot У}{2 \cdot gk}}. \quad (27)$$

После ряда преобразований, получаем уравнение, разрешимое относительно по t_A и не включающее t'_K и t''_K:

$$\frac{\alpha t_A}{\alpha\tau} + \frac{1}{m_a} \cdot \left(g_a + f_б + \frac{A \cdot У + f_a}{A \cdot У + f_a - \frac{f_a \cdot У}{2 \cdot gk}}\right) = \frac{1}{m_a} \frac{A \cdot X \cdot \beta \cdot f_a}{A \cdot У + f_a - \frac{f_a \cdot У}{2 \cdot gk}} E + \frac{1}{m_a} \frac{A \cdot Y \cdot f_a}{A \cdot У + f_a - \frac{f_a \cdot У}{2 \cdot gk}} \cdot t_H + \frac{f_б}{m_a} t_{H*} + \frac{g_a}{m_a} + t_x. \quad (28)$$

В уравнение (28) входит величина t_{H*}- температура воздуха в помещении, где устанавливается бак-аккумулятор. Определить зависимость t_{H*} от t_H, E и других факторов с достаточной точностью сложно. Можно утверждать, что t_{H*} будет в среднем не ниже t_H, а поскольку в помещение поступает тепло $Q_{пот}$ от бака-аккумулятора, то $t_{H*} > t_H$.

В расчётах принято, что разница температур постоянная и равна 5°С, более точная оценка возможна после определения ((t_A)). Учтя вышесказанное, введем новые обозначения.

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{m_a} \cdot \left(g_a + f_б + \frac{А \cdot У + f_a}{А \cdot У + f_a - \frac{f_a \cdot У}{2 \cdot gk}} \right); \\ a_1 = \frac{1}{m_a} \cdot \left(\frac{А \cdot X \cdot \beta + f_a}{А \cdot У + f_a - \frac{f_a \cdot У}{2 \cdot gk}} \right); \\ a_2 = \frac{1}{m_a} \cdot f_б + \left(\frac{А \cdot У + f_a}{А \cdot У + f_a - \frac{f_a \cdot У}{2 \cdot gk}} \right); \\ a_3 = \frac{1}{m_a} \cdot (5 \cdot f_б + g_a \cdot t_x). \end{cases}$$

С учетом введенных обозначений:

$$\frac{\alpha t_a}{\alpha \tau} + a_0\, t_A = a_1\, E + a_2\, t_H + a_3. \qquad (29)$$

Согласно сказанному выше, величины E и t_H принимаются условно постоянными в течение интервала времени $\Delta\tau = \tau - \tau_0$. Поэтому можно обозначить правую часть уравнения (29) через некоторую постоянную:

$$c_0 = a_1 \cdot E + a_2 \cdot t_H + a_3. \qquad (30)$$

Уравнение (29) принимает более простой вид:

$$\frac{\alpha t_a}{\alpha \tau} + a_0 \cdot t_A = c_0. \qquad (31)$$

Решим это уравнение методом разделения переменных, как наиболее простым.

Начальное условие выбрано следующим: в начальный момент рассчитываемого промежутка времени $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_0$, т.е. при $\tau = \tau_0 = 0$.

Температура воды в баке равна начальной

$t_A / \tau_0 = t_{AO}$.

Задавшись начальными условиями, получаем интересующее нас частное решение уравнения (31):

$$t_A = (t_{AO} \cdot \frac{c_0}{a_0}) e^{-a_0 \tau} + \frac{c_0}{a_0},\ °C. \qquad (32)$$

Выводы

Предложен вариант постановки задачи для дальнейшей алгоритмизации инженерного расчета гелиоприемника горячего водоснабжения индивидуального жилого дома. Получено универсальное уравнение которое позволяет произвести расчет хода температуры воды в баке-аккумуляторе для любого режима работы ГС ГВС. Это, в свою очередь позволяет рассчитать основные прогнозируемые параметры гелиосистемы, влияющие на технико-экономические показатели системы и определяющих режим ее эксплуатации .

Список литературы

1. Левенберг В. А., Ткач М. П., Гольстрем В. А. Аккумулирование тепла. Киев: Тэхника, 1991. 112 с.

2. Врине Е. Исследование установки, работающей в периодическом режиме, для аккумулирования тепла скрытой теплотой // Revue Generale de Thermique. 1983. Т. 22, № 254. С. 183-188.

3. Кобелев Н. С., Котенко Э. В., Полозов А. Е. Энергосберегающие технологии, трубопроводы и оборудование систем теплогазоснабжения и вентиляции. Курск, 2005. 200 с.

4. Манасыпов Р. Р., Лихтенштейн Э. Л. Математическое и физическое моделирование процессов теплообмена в аккумуляторе фазового перехода // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1988. № 8. С. 88-92.

5. Лукашов Ю. М., Токарь Б. З., Котенко Э. В. Исследование характеристик теплового аккумулятора на фазовом переходе // Труды 1-й рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 1994. Т. 5. С. 109-113.

6. Токарь Б. З., Быковцев Ю. С., Котенко Э. В. Приближенный расчет температуры теплоносителя на выходе из фазопереходного аккумулятора теплоты (режим разрядки) // Труды 2-й рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 1998. Т. 7. С. 217-220.

7. Токарь Б.З., Котенко Э.В., Цепочкин В.Г. Расчет режима разрядки фазопереходного аккумулятора теплоты кожухотрубного типа // Труды 3-й рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 2002. Т. 7. С. 230-234.

8. Котенко Э. В. Разработка математической модели и методики расчета аккумуляторов теплоты на фазовом переходе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.05. Курск, 1996. 15 с.

9. Умеренков Е.В. Разработка аккумуляторов теплоты на фазовом переходе для систем теплоснабжения: автореф. дис. … канд. техн. наук. Курск, 2013. 18 с.

10. Цымбалюк Ю. В. Исследование процессов с фазовыми переходами материалов с пластинчатыми инклюзивами в тепловых аккумуляторах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Астрахань, 2006. 15 с.

11. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения: [пер. с англ.]. М.: Энергия, 1980. 80 с.

12. Дж. А. Даффи, Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: [пер. с англ.]. М.: Мир, 1977. 420 с.

13. Быстров В. П., Ливчак А. В. Теплоаккумуляторы с использованием фазового перехода // Вопросы экономии теплоэнергетических ресурсов в системах вентиляции и теплоснабжения: сб. науч. трудов. М.: Изд-во ЦНИИЭПИО, 1984. С. 75-90.

14. Бутузов В. А. Анализ опыта разработки и эксплуатации гелиоустановок в Краснодарском крае // Энергетическая эффективность. 2002. № 34. С. 54-61.

15. Организация режима работы гелиотеплоснабжения индивидуального жилого дома / Э.В. Умеренкова, Е.В. Умеренков, М.Д. Зайко, А.А. Шпилько // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2018: сборник научных статей 8-ой Международной молодежной научной конференции (Курск, 25-26 апреля 2018 г.): в 4 т. Курск, 2018. Т. 3. 413 с.

16. Умеренков Е.В., Котенко Э.В. Моделирование процесса разрядки фазопереходного аккумулятора теплоты кожухотрубного типа // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2011. №1(21). С. 34-39.

17. Численное моделирование оптимального теплового аккумулятора на фазовом переходе / О.В. Дихтиевский, Г.В. Конюхов, О.Г. Мартыненко, И.Ф. Юревич // ИФЖ. 1991. Т.61,№5. С. 749-753.

18. Математическая модель системы горячего водоснабжения с использованием солнечной энергии, работающей по трёхконтурной схеме: промежуточный отчет / ЭНИН им. Г. М. Кржижановского; рук. темы И. В. Рыбин. М., 1979. 92 с.

19. Математическая модель системы горячего водоснабжения с использованием солнечной энергии, работающей по двухконтурной схеме: промежуточный отчет/ ЭНИН им. Г. М. Кржижановского; рук. темы И. В. Рыбин. М., 1979. 64 с.

References

1. Levenberg V. A., Tkach M. P., Golstrem V. A. Akkumulirovanie tepla [Heat accumulation]. Kiev, Tekhnika Publ., 1991, 112 p. (In Russ.).

2. Vrine E. Issledovanie ustanovki, rabotayushchei v periodicheskom rezhime, dlya akkumulirovaniya tepla skrytoi teploto [Study of a batch-mode installation for heat storage by latent heat]. *Revue Generale de Thermique,* 1983,. vol. 22, no. 254. pp. 183-188 (In Russ.).

3. Kobelev N. S., Kotenko E.V., Polozov A.E. *Energosberegayushchie tekhnologii, truboprovody i oborudovanie sistem teplogazosnabzheniya i ventilyatsii* [Energy-saving technologies, pipelines and equipment for heat and gas supply and ventilation systems]. *Kursk,* 2005, 200 p. (In Russ.).

4. Manasypov P. P., Lihtenshtein E. L. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie protsessov teploobmena v akkumulyatore fazovogo perekhoda [Lichtenstein Mathematical and physical modeling of heat transfer processes in a phase transition accumulator]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = Izv. universities. Construction and architecture*, 1988, no. 8, pp. 88-92 (In Russ.).

5. Lukashov Yu. M., Tokar B.Z., Kotenko E.V. [Investigation of the characteristics of a heat accumulator at a phase transition]. *Trudy 1-i ros. nats. konf. po teploobmenu* [Transactions of the 1st growth. nat. conf. on heat transfer]. *Moscow,* 1994, vol. 5, pp. 109-113 (In Russ.).

6. Tokar B.Z., Bykovtsev Yu. S., Kotenko E.V. [An approximate calculation of the temperature of the coolant at the outlet of the phase-transition heat accumulator (discharge mode)]. *Trudy 2-i ros. nats. konf. po teploobmenu* [Transactions of the 2nd growth. nat. conf. on heat exchange]. *Moscow,* 1998, vol. 7, pp. 217-220 (In Russ.).

7. Tokar B.Z., Kotenko E.V., Tsepochkin V.G. [Calculation of the discharge mode of the phase-transition heat accumulator of the shell-and-tube type]. *Trudy 3-ei ros. nats. konf. po teploobmenu* [Proceedings of the 3rd growing. nat. conf. on heat exchange]. *Moscow,* 2002, vol. 7, pp. 230-234 (In Russ.).

8. Kotenko E. V. Razrabotka matematicheskoi modeli i metodiki rascheta akkumulyatorov teploty na fazovom perekhode. [Development of a mathematical model and methodology for calculating heat accumulators at a phase transition]. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Kursk, 1996, 15 p. (In Russ.).

9. Umerenkov E.V. Razrabotka akkumulyatorov teploty na fazovom perekhode dlya sistem teplosnabzheniya [Development of heat accumulators at the phase transition for heat supply systems]. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Kursk, 2013.18 p. (In Russ.).

10. Tsymbalyuk Yu. V. Issledovanie protsessov s fazovymi perekhodami materialov s plastinchatymi inklyuzivami v teplovykh akkumulyatorakh [Investigation of processes with phase transitions of materials with plate inclusions in thermal batteries]. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. Astrakhan, 2006, 15 p. (In Russ.).

11. Beckman W., Klein S., Duffy J. W. Beckman and others. *Raschet sistem solnechnogo teplosnabzheniya* [Calculation of solar heat supply systems]. Moscow, Energy Publ., 1980, 80 p. (In Russ.).

12. Duffy J. A., Beckman W. A. *Teplovye protsessy s ispol'zovaniem solnechnoi energii* [Thermal processes using solar energy]. Moscow, Mir Publ., 1977, 420 p. (In Russ.).

13. Bystrov V. P., Livchak A. V. [Heat accumulators using a phase transition]. *Voprosy ekonomii teploenergeticheskikh resursov v sistemakh ventilyatsii i teplosnabzheniya.* Sbornik nauch. trudov [Issues of saving heat energy resources in ventilation and heat supply systems. Collection. scientific labor]. Moscow, 1984, pp. 75-90 (In Russ.).

14. Butuzov V. A. Analiz opyta razrabotki i ekspluatatsii gelioustanovok v Krasnodarskom krae [Analysis of experience in the development and operation of solar installations in the Krasnodar Territory]. *Energeticheskaya effektivnost' = Energy Efficiency*, 2002, no. 34,pp. 54-61 (In Russ.).

15. Umerenkova E.V., Umerenkov E.V., Zayko M.D., Shpilko A.A. [Organization of the solar heating operation mode of an individual residential building]. *Pokolenie budushchego: Vzglyad molodykh uchenykh-2018. Sbornik nauchnykh statei 8-oi Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Generation of the future: the View of young scientists-2018. Collection of scientific articles of the 8th international youth scientific conference]. Kursk, 2018, vol. 3, 413 p. (In Russ.).

16. Umerenkov E.V., Kotenko E.V. Modelirovanie protsessa razryadki fazoperekhodnogo akkumulyatora teploty kozhukhotrubnogo tipa [Modeling the process of discharging a phase-transition heat accumulator of a shell-and-tube type]. *Nauchnyi vestnik Voro-*

nezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arkhitektura = Scientific Bulletin of Voronezh State Administrative University. Construction and architecture, 2011, no. 1 (21), pp. 34-39 (In Russ.).

17. Dikhtievsky O.V., Konyukhov G.V., Martynenko O.G., Yurevich I.F. Chislennoe modelirovanie optimal'nogo teplovogo akkumulyatora na fazovom perekhode [Numerical modeling of the optimal heat accumulator at the phase transition]. *IFZh*, 1991, vol. 61, no. 5, pp. 749-753 (In Russ.).

18. Matematicheskaya model' sistemy goryachego vodosnabzheniya s ispol'zovaniem solnechnoi energii, rabotayushchei po trekhkonturnoi skheme. Promezhutochnyi otchet [A mathematical model of a hot water system using solar energy, working on a three-circuit scheme. Interim report]. Moscow, *ENIN im. G. M. Krzhizhanovskogo Publ.,* 1979, 92 p. (In Russ.).

19. Matematicheskaya model' sistemy goryachego vodosnabzheniya s ispol'zovaniem solnechnoi energii, rabotayushchei po dvukhkonturnoi skheme: promezhutochnyi otchet [A mathematical model of a hot water system using solar energy, working on a dual circuit: interim report]. *ENIN im. G. M. Krzhizhanovskogo Publ.,* Moscow, 1979, 64 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Умеренков Евгений Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Evgeny V. Umerenkov, Cand. of Sci. (Engineering),, Associate Professor, Associate Professor Heat and Gas Supply Departament, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Умеренкова Элина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Elina V. Umerenkova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor Heat and Gas Supply Departament, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Семичева Наталья Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, завкафедрой теплогазоводоснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Natalia E. Semicheva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Heat and Gas Supply Departament, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: tgv-kstu6@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-54-117-128

CC BY 4.0

Устойчивость рамно-стержневых конструктивных систем на просадочных грунтах

К.О. Дубракова [1] ✉, С.В. Дубраков [1], И.В. Завалишин [1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: dko1988@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. *Для обеспечения требований Федерального закона №384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» необходимо более глубокое изучение устойчивости рамно-стрежневых конструктивных систем при возникновении аварийной ситуации, связанной с просадкой основания одной из опор, и разработка методики оценки ресурса сопротивления элементов зданий, находящихся в сложных инженерно-геологических условиях.*

Методы. *В качестве критерия устойчивости принят знак работы концевых моментов и поперечных сил. Отрицательное значение указанной работы является признаком "активной" потери устойчивости стержня, положительное - "пассивной". При возникновении аварийной ситуации, связанной с просадкой основания одной из опор рамы, работа продольной силы перестает способствовать потери устойчивости стержня. Следовательно, при определенном значении деформации S_{sl} отдельная стойка может перейти от активной бифуркации к пассивной, изменив критические параметры устойчивости всей системы в целом. Приведена формула для определения критической просадки $S_{sl\,\text{кр}}$.*

Результаты. *Рассмотрена стержневая конструктивная система, центральный элемент которой нагружен силой Ркр, а крайние – силами αРкр. Найдены критические параметры устойчивости указанной рамы и формы бифуркации ее сжатых стоек с применением приведенных уравнений в зависимости от коэффициента приложения нагрузки α до и после возникновения рассматриваемой аварийной ситуации. Представлена оценка влияния просадки основания опор стоек рамы на характер бифуркации стержней конструктивной системы в целом. Выполнен анализ зависимости критического значения просадки $S_{sl,\text{кр}}$ от схемы нагружения рассматриваемой рамы. Показано, что при значении коэффициента приложения нагрузки α=0,6, на первом этапе, когда рассматриваемая система стабильна, первая стойка теряет устойчивость пассивно, остальные – активно. При просадке основания второй стойки на 21 мм и более происходит изменение типа ее бифуркации, при этом критические параметры устойчивости остальных элементов существенно не изменяются. В случае возникновения аналогичной аварийной ситуации с основанием правой стойки рамы, значение критической просадки составляет 140 мм. При этом изменение типа бифуркации третьей стойки приводит к переходу первой стойки к активной потери устойчивости, вследствие чего существенно изменяются критические параметры всей системы в целом.*

Заключение. *Предложенный критерий дает возможность относительно просто выявлять элементы с низкой сопротивляемостью потери устойчивости рамно-стержневых конструктивных систем, основанием которых являются просадочные грунты.*

Ключевые слова: *устойчивость; рамно-стержневая система; активная бифуркация; пассивная бифуркация; просадка основания.*

© Дубракова К.О., Дубраков С.В., Завалишин И.В., 2019

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Дубракова К.О., Дубраков С.В., Завалишин И.В. Устойчивость рамно-стержневых конструктивных систем на просадочных грунтах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 117-128. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-117-128.

Статья поступила в редакцию 19.08.2019

Статья подписана в печать 03.10.2019

Статья опубликована 25.10.2019

Stability of Frame-Rod Structural Systems on Subsiding Soils

Kseniya O. Dubrakova [1] ✉, Sergey V. Dubrakov [1], Ilya V. Zavalishin [1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: dko1988@yandex.ru

Abstract

Purpose of reseach*. To meet the requirements of Federal Law No. 384 "Technical Regulation on the Safety of Buildings and Structures", a deeper study of the stability of frame-rod structural systems in the event of an emergency associated with subsidence of the base of one of the supports, and the development of a methodology for assessing the resource of resistance of building elements located in difficult engineering and geological conditions.*

Methods*. As a stability criterion, the sign of the work of the end moments and transverse forces is adopted. A negative value of this work is a sign of "active" loss of stability of the rod, a positive - "passive". In the event of an emergency related to the subsidence of one of the frame supports, the work of the longitudinal force ceases to contribute to the bifurcation of the rod. Therefore, at a certain strain value S_{sl}, a separate rack can go from active loss of stability to passive, changing the critical stability parameters of the entire system as a whole. The formula for determining the critical drawdown S_cr is given.*

Results. *A two-span frame is considered, in which the central strut is loaded with the force P_{kr}, the extreme - with the forces αP_{kr}. The type of rod bifurcation is determined. Using the above equations, critical parameters and forms of buckling of the structural system under consideration were found before and after the emergency in question. An assessment is given of the influence of the draft of the base of the supports of the frame racks on the character of the bifurcation of the rods of the structural system as a whole. The analysis of the dependence of the critical drawdown value $S_{sl,\ cr.}$on the loading scheme of the frame under consideration is performed. It is shown that when the coefficient of load application is α = 0.6, at the first stage, when the system in question is stable, the first rack loses stability passively, the rest actively. When the base of the second pillar sags by 21 mm or more, a change in the type of its bifurcation occurs, while the critical stability parameters of the remaining elements do not change significantly. In the event of a similar emergency with the base of the right frame pillar, the critical drawdown value is 140 mm. Moreover, a change in the type of bifurcation of the third pillar leads to the transition of the first pillar to active bifurcation, as a result of which the critical parameters of the entire system as a whole change significantly.*

Conclusion*.An analysis of the calculation results showed that with a certain drawdown value, the emergency in question will lead to a change in the nature of the bifurcation of both individual elements and the entire structural system as a whole. The proposed stability criterion for frame-rod structural systems, the basis of which are subsidence soils, makes it possible to relatively easily identify elements with low resistance to buckling in difficult engineering and geological conditions.*

Keywords: *stability; frame-rod system; active bifurcation; passive bifurcation; subsidence of the base.*

Conflict of interest. *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Dubrakova K. O., S Dubrakov. V., Zavalishin I. V. Stability of Frame-Rod Structural Systems on Subsiding Soils. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 117-128 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-117-128.

Received 13.06.2019

Accepted 22.07.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

С целью защиты жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц согласно действующему федеральному закону[1] строительные конструкции и основание здания должны обладать такой прочностью и устойчивостью, чтобы в процессе строительства и эксплуатации не возникало угрозы разрушения отдельных несущих строительных конструкций. При этом чрезвычайно сложно обеспечить безаварийную работу рамно-стержневых конструктивных систем, основанием которых являются просадочные грунты. Известно, что внезапные структурные перестройки, связанные с просадкой основания, могут вызвать изменение критических параметров устойчивости как отдельных элементов, так и всей системы в целом. Следовательно, для обеспечения требований Федерального закона необходимо более глубокое изучение устойчивости рамно-стрежневых конструктивных систем при возникновении аварийной ситуации, связанной с просадкой основания.

Материалы и методы

В качестве критерия устойчивости принят знак работы концевых моментов и поперечных сил. При этом отрицательное значение указанной работы

$$A_i(M_i, Q_i) < 0, \quad (1)$$

служит признаком "активной" бифуркации, а ее положительное значение:

$$A_i(M_i, Q_i) > 0, \quad (2)$$

говорит о том, что стержень теряет устойчивость «пассивно» [1-15].

При возникновении аварийной ситуации, связанной с просадкой основания одной из опор рамы, работа продольной силы перестает способствовать бифуркации стержня [16-21]. Следовательно, при определенном значении деформации S_{sl} отдельная стойка может перейти от активной бифуркации к пассивной, что вызовет структурные и изменит критические параметры устойчивости всей рассматриваемой системы. Указанная ситуация может привести к необратимым деформациям и разрушению как отдельного несущего элемента, так и всего здания. Переход отдельной стойки рамно-стержневой конструктив-

[1] Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: федеральный закон №384-ФЗ от 30.12.2009. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

ной системы от активной бифуркации к пассивной произойдет, когда работа продольной силы компенсирует работу концевых моментов и поперечных сил:

$$A_i'(N) - A_i(M_i, Q_i) > 0. \quad (3)$$

Работа продольной силы $A_i'(N)$ определяется как произведение просадки основания на значение указанной силы:

$$A_i'(N) = S_{кр} \cdot \frac{\nu^2 \cdot E \cdot I_{min}}{l^2}. \quad (4)$$

Работу концевых моментов и поперечных сил можно представить в виде

$$A_i(M_i, Q_i) = i \cdot \sum C \cdot \varphi_{j,i}(\nu_i) \cdot Z_i, \quad (5)$$

где $\varphi_{j,i}(\nu_i)$ – значение функций метода перемещений для сжато-изогнутых стержней;

C – константа, определяемая по правилам строительной механики в зависимости от геометрии, схемы нагружения конструкции и жесткости ее элементов.

Критическую просадку $S_{кр}$ с учетом выражений (3), (4) и (5) можно определить по формуле

$$S_{кр} = \frac{l^2 \cdot \sum C \cdot \varphi_{j,i}(\nu_i) \cdot Z_i}{\nu^2}. \quad (6)$$

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим стержневую конструктивную систему, центральный элемент которой нагружен силой $P_{кр}$, а крайние - силами $\alpha P_{кр}$. (рис. 1 а). Найдем критические параметры устойчивости указанной рамы и формы бифуркации ее сжатых стоек с применением приведенных уравнений в зависимости от коэффициента приложения нагрузки α до и после возникновения рассматриваемой аварийной ситуации. Расчет рамы выполним методом перемещений с применением численного метода последовательных приближений [13-15, 22].

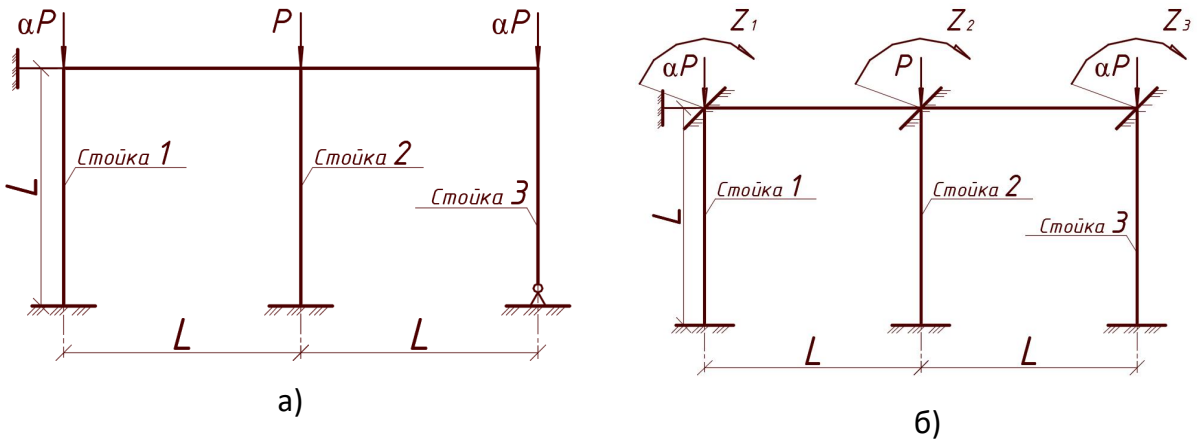


Рис. 1. Расчетная (а) и эквивалентная (б) схема рамно-стержневой конструктивной системы

Fig. 1. Estimated (a) and equivalent (б) schemes of the frame-rod structural system

Приняв за неизвестные углы поворота узлов Z_1, Z_2, Z_3, вычислим работу концевых моментов и поперечных с помощью функций метода перемещений. Тогда однородная система уравнений примет вид:

$$\left.\begin{array}{l} r_{11} \cdot Z_1 + r_{12} \cdot Z_1 + r_{13} \cdot Z_3 = 0 \\ r_{21} \cdot Z_1 + r_{22} \cdot Z_1 + r_{23} \cdot Z_3 = 0 \\ r_{31} \cdot Z_1 + r_{32} \cdot Z_1 + r_{33} \cdot Z_3 = 0 \end{array}\right\}, \quad (7)$$

где $r_{11} = 8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1)$;

$r_{22} = 8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_2)$;

$r_{33} = 4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3)$;

$r_{12} = r_{23} = 2 \cdot i$;

$r_{13} = r_{31} = 0; v_i = l \cdot \sqrt{\frac{P_i}{B_{red}}}, \ (i = 1,2,3)$,

где B_{red} – приведенная жесткость сечения стержня; v_i – параметр векового уравнения.

Детерминант системы (7) определяется выражением

$$Det = (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1)) \cdot (8 \cdot i + $$
$$+4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_2) \cdot \left(4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3)\right) + $$
$$+16 \cdot i^3 - (8 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_1)) \cdot 4 \cdot i^2 - $$
$$-4 \cdot i^2 \cdot \left(4 \cdot i + 4 \cdot i \cdot \varphi_2(v_3)\right). \quad (8)$$

Далее вычисляем углы поворота узлов рассматриваемой рамы. В приведенной двухпролетной конструктивной системе определяем значения изгибающих моментов, продольных и поперечных сил, составляем детерминант системы уравнений метода перемещений, записываем параметр векового уравнения для каждого из сжатых элементов.

Далее численным методом последовательных приближений определяем параметры векового уравнения, при которых детерминант, записанный для рассматриваемой рамы до просадки основания одной из ее опор, равен нулю при различных значениях коэффициента приложения нагрузки α. Аналогично определяем критические параметры устойчивости системы после возникновения приведенной аварийной ситуации. Сравнив работу элементов рамы до и после просадки основания ее опор, оценим влияние деформаций грунта сжимаемой толщи на особенности бифуркации отдельной стойки и всей конструктивной системы. Вычислим значение просадки основания, при котором элементы могут перейти от активной бифуркации к пассивной. Определим критические параметры устойчивости исследуемой системы после изменения типа бифуркации её стойки.

Значение критической просадки вычислим, исходя из того условия, что в момент перехода от активной потери устойчивости к пассивной работа концевых моментов и поперечных сил элемента компенсируется работой продольной силы $A_i/(N)$.

Для решения указанной задачи найдем расчетную длину стоек, работу изгибающих моментов и поперечных сил для элементов приведенной рамы до возникновения аварийной ситуации, связанной с просадкой основания одной из опор. Работа каждой стойки равна:

$$A_i(M_i, Q_i) = 2 \cdot i \cdot \varphi_{2,i} \cdot Z_{i.} \quad (9)$$

Следовательно: $A_1(M_1, Q_1) = -0{,}293 \cdot i$, работа концевых моментов и поперечных сил второй стойки: $A_2(M_2, Q_2) = -0{,}723 \cdot i$, для третьей: $A_3(M_3, Q_3) = 1{,}526 \cdot i$. При этом до момента проявления негативных свойств грунта основания первый и второй элементы рамы теряют устойчивость активно, третий – пассивно.

Проанализируем поведение элементов рассматриваемой рамы в процессе по-

тери устойчивости до и после возникновения аварийной ситуации, связанной с просадкой основания опор первой и второй стойки. Значение просадки, при котором меняется характер бифуркации указанных элементов рамы, определим по формуле (6).

На рис. 2 для иллюстрации выражения (6) показан график зависимости критического значения просадки $S_{sl,кр.}$ для рассматриваемой рамно-стержневой конструктивной системы от коэффициента приложения нагрузки α.

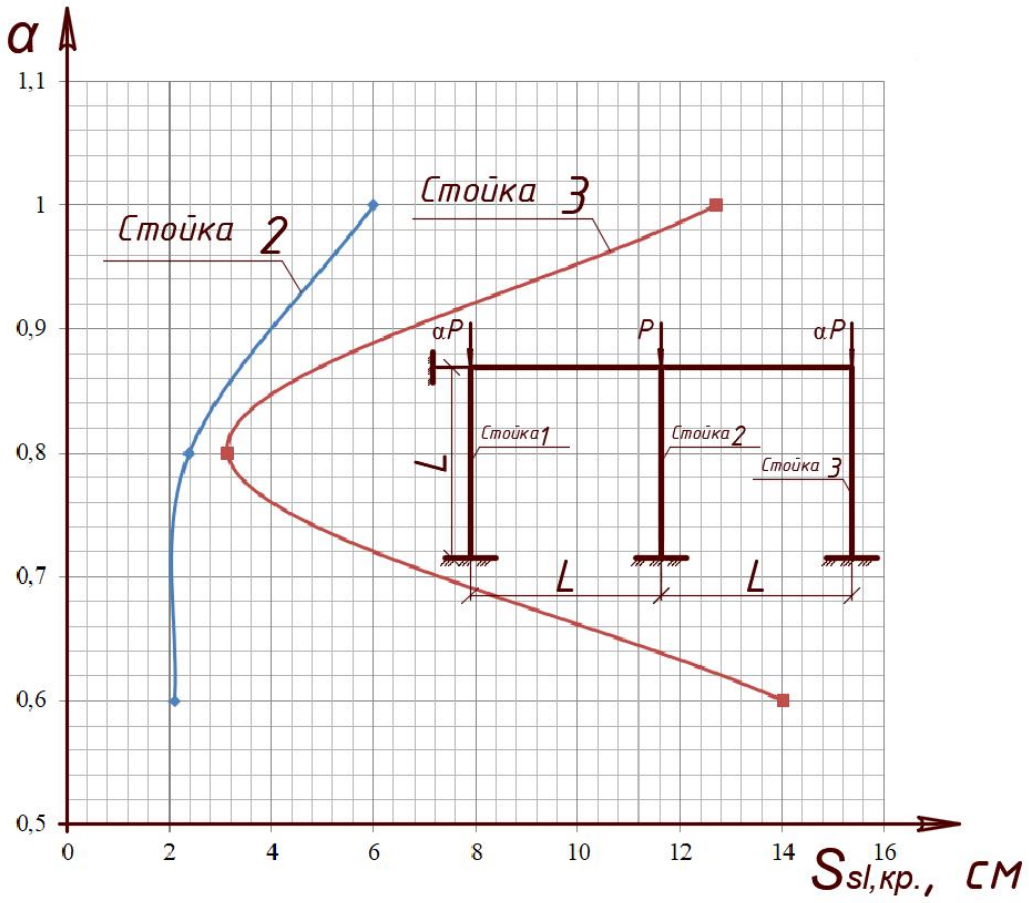


Рис. 2. Зависимость критического значения просадки $S_{sl,кр.}$ от коэффициента приложения нагрузки α

Fig. 2. Dependence of the critical value of the drawdown $S_{sl,кр.}$ on the load application coefficient α

Проанализируем характер бифуркации элементов рамы до и после возникновения аварийной ситуации, связанной с просадкой основания второй и третьей стоек при значении коэффициента приложения нагрузки α=0,6. На первом этапе, когда рассматриваемая система стабильна, первая стойка теряет устойчивость пассивно, остальные – активно. При просадке основания второй стойки на 21 мм и более происходит изменение типа ее бифуркации, при этом критические параметры устойчивости остальных элементов существенно не изменяются. В случае возникновения аналогичной аварийной ситуации с основа-

нием правой стойки рамы, значение критической просадки составляет 140 мм. При этом изменение типа бифуркации третьей стойки приводит к переходу первой стойки к активной бифуркации, вследствие чего существенно изменяются критические параметры всей системы в целом (рис. 3).

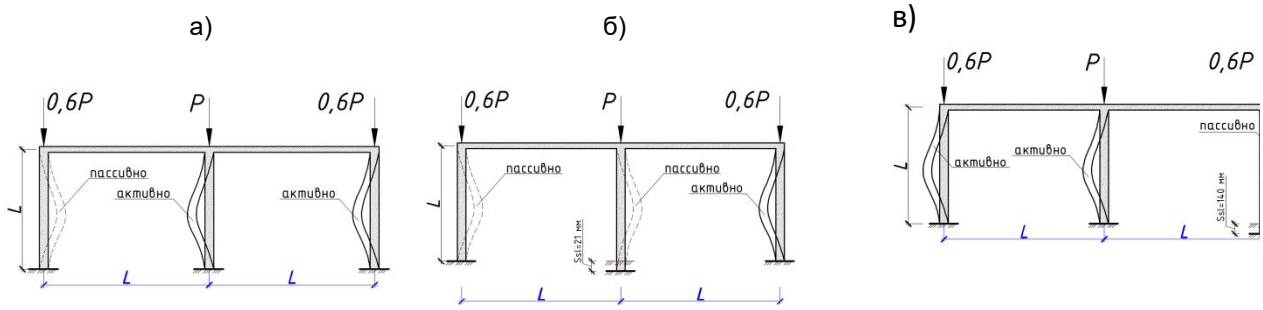


Рис. 3. Формы потери устойчивости рамы до (а) и после возникновения аварийной ситуации, связанной с просадкой основания второй (б) и третьей стоек (в)

Fig. 3. Forms of loss of stability of the frame before (a) and after an emergency situation associated with subsidence of the base of the second (б) and third pillars (в)

При значении коэффициента приложения нагрузки α=0,8 работа элементов рассматриваемой рамно-стержневой конструктивной системы аналогична. При этом значение критической просадки основания второй стойки составляет 22 мм, третьей – 25 мм.

Выводы

Анализ полученных результатов расчета показал, что при некотором значении просадки, рассматриваемая аварийная ситуация приведет к изменению характера бифуркации как отдельных элементов, так и всей конструктивной системы в целом.

Предложенный критерий дает возможность относительно просто выявлять элементы с низкой сопротивляемостью потери устойчивости рамно-стержневых конструктивных систем, основанием которых являются просадочные грунты.

Список литературы

1. Александров А. В., Травуш В. И., Матвеев А. В. Исследование устойчивости конструкций арочного покрытия зала с использованием критериев выявления наиболее опасных элементов // Вестник отделения строительных наук РААСН. 2004. Вып. 8. С. 14—21.

2. Александров А. В., Матвеев А. В. Критерии выявления наиболее опасных элементов и их использование в задачах устойчивости конструкций // Безопасность движения поездов: тр. 4-й науч.-практ. конф. М.: МИИТ, 2003. С. III—1 — III—2.

3. Александров А. В., Травуш В. И., Матвеев А. В. О расчете стержневых конструкций на устойчивость // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 3. С. 16—20.

4. Александров А. В. Роль отдельных элементов стержневой системы при потере устойчивости // Вестник МИИТа. 2001. Вып. 5. С. 46.

5. Дубракова К. О. Вопросы устойчивости статически неопределимых систем из древесины // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. №11. С. 54-55.

6. К алгоритмизации задач расчета живучести железобетонных рам при потере устойчивости / В.И. Колчунов, Н.О. Прасолов, Л.В. Кожаринова, О.А. Ветрова // Строительство и реконструкция. 2012. №6. С. 28-34.

7. Матвеев А. В. Некоторые вопросы создания специализированного программного комплекса для анализа мостовых конструкций // Вестник МИИТа. 2002. Вып. 7. С. 76-83.

8. Пахомова Е.Г., Дубракова К.О. Работоспособность железобетонных рамно-стержневых систем в сложных инженерно-геологических условиях // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 5. С. 46-48.

9. Пахомова Е.Г., Дубракова К. О., Дубраков С.В. Устойчивость рамно-стержневых коррозионно-повреждаемых железобетонных конструктивных систем // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 7. С. 54-56.

10. Пахомова Е.Г., Бредихина Н.В. Вероятностные закономерности возникновения отказов строительного потока // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. №6(69). С. 35-40.

11. Пахомова Е.Г., Переверзев Е.О., Конорев Д.Ф. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений при воздействии агрессивных сред // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и Технологии. 2014. №1. С. 72-74.

12. Пахомова Е.Г. Расчет несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций при коррозионных повреждениях // Промышленное и гражданское строительство. 2009. №5. С. 43-44.

13. Травуш В.И., Колчунов В.И., Дмитриева К.О. Устойчивость сжатых стержней из древесины при одновременном проявлении силового и средового воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. №2. С. 50-53.

14. Травуш В.И., Колчунов В.И., Дмитриева К.О. Экспериментально-теоретическое исследование прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом и средовом воздействии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. №3. С. 280-285.

15. Емельянов С.Г., Пахомова Е.Г. Reliability of RC frame-braced systems in dangerous geological conditions // Journal of Applied Engineering Science Paper number: 17(2019)2, 602, с. 245 – 250.

16. Багдасаров Ю.А. О достоверности оценки просадочности грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2000. №2. С. 21-26.

17. Буренин В.С., Езерский В.А., Монастырев П.В. Исследование современных тенденций проектирования жилых зданий в россии и за рубежом // Архитектура и время. 2017. №5. С. 2-6.

18. Григорян А.А. О количественной оценке просадочности // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2001. №2. С. 17-21.

19. Дубракова К.О., Куценко О.И., Карцев И.Н. Изменение физико-механических характеристик грунта эксплуатируемого основания // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. №3. С.54-64. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-54-64.

20. Межеровский В.А. Распространение влаги и развитие просадочных деформаций в лессовом основании здания // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. №1. С. 20-22.

21. Межеровский В.А. Расчетные модели системы «здание – лессовое просадочное основание» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2001. №5. С. 21-23.

22. Клюева Н.В., Дмитриева К.О. Анализ устойчивости стержневых конструкций // Научный Вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2016. №3(43). С. 17-24.

References

1. Aleksandrov A.V., Travush V.I., Matveev A.V. Issledovanie ustoichivosti konstruktsii arochnogo pokrytiya zala s ispol'zovaniem kriteriev vyyavleniya naibolee opasnykh elementov [Study of the stability of the structures of the arched covering of the hall using the criteria for identifying the most dangerous elements]. *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk RAASN = Bulletin of the Department of Construction Sciences of the RAAS,* 2004, vol. 8, pp. 14-21 (In Russ.).

2. Alexandrov A. V., Matveev A. V. [Criteria for identifying the most dangerous elements and their use in problems of structural stability]. *Bezopasnost' dvizheniya poezdov. Tr. 4-i nauch.-prakt. konf.* [Traffic safety. Tr. 4th scientific and practical conf.]. Moscow, MIIT, 2003, S. III — 1 — III — 2 (In Russ.).

3. Alexandrov A. V., Travush V. I., Matveev A. V. O raschete sterzhnevykh konstruktsii na ustoichivost' [On the calculation of bar structures for stability]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and civil construction,* 2002, no. 3, pp. 16-20 (In Russ.).

4. Aleksandrov A. V. Rol' otdel'nykh elementov sterzhnevoi sistemy pri potere ustoichivosti [The role of individual elements of the core system in case of loss of stability]. *Vestnik MIITa = Bulletin of MIIT*, 2001, vol. 5, pp. 46 (In Russ.).

5. Dubrakova K. O. Voprosy ustoichivosti staticheski neopredelimykh sistem iz drevesiny [Issues of stability of statically indeterminate systems of wood]. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of construction equipment*, 2018, no. 11, pp. 54-55 (In Russ.).

6. Kolchunov V.I., Prasolov N.O., Kozharinova L.V., Vetrova O.A. K algoritmizatsii zadach rascheta zhivuchesti zhelezobetonnykh ram pri potere ustoichivosti [To the algorithmization of problems of calculating the survivability of reinforced concrete frames with loss of stability]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Construction and reconstruction*, 2012, no. 6, pp. 28-34 (In Russ.).

7. Matveev A. V. Nekotorye voprosy sozdaniya spetsializirovannogo programmnogo kompleksa dlya analiza mostovykh konstruktsii [Some issues of creating a specialized software complex for the analysis of bridge structures]. *Vestnik MIITa = Bulletin of MIIT*, 2002, vol. 7, pp. 76—83 (In Russ.).

8. Pakhomova E.G., Dubrakova K.O. Rabotosposobnost' zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevykh sistem v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh [Efficiency of reinforced concrete frame-rod systems in complex engineering-geological conditions]. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of construction equipment*, 2019, no. 5, pp. 46-48 (In Russ.).

9. Pakhomova E.G., Dubrakova K.O., Dubrakov S.V. Ustoichivost' ramno-sterzhnevykh korrozionno-povrezhdaemykh zhelezobetonnykh konstruktivnykh sistem [Stability of frame-rod corrosion-damaged reinforced concrete structural systems]. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of construction equipment*, 2019. no. 7, pp. 54-56 (In Russ.).

10. Pakhomova E.G., Bredikhina N.V. Veroyatnostnye zakonomernosti vozniknoveniya otkazov stroitel'nogo potoka [Probability Regularities of Construction Flow Failure Occurrence]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 1, pp. 35-40 (In Russ.).

11. Pakhomova E.G., Pereverzev E.O., Konorev D.F. Dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstruktsii inzhenernykh sooruzhenii pri vozdeistvii agressivnykh sred [Durability of reinforced concrete structures of engineering structures when exposed to aggressive environments]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologie*, 2014, no.1, pp. 72-74 (In Russ.).

12. Pakhomova E.G. Raschet nesushchei sposobnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruktsii pri korrozionnykh povrezhdeniyakh [Calculation of the bearing capacity of bent

reinforced concrete structures with corrosion damag]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and civil engineering*, 2009, no. 5, pp. 43-44 (In Russ.).

13. Travush V.I., Kolchunov V.I., Dmitrieva K.O. Ustoichivost' szhatykh sterzhnei iz drevesiny pri odnovremennom proyavlenii silovogo i sredovogo vozdeistviya [Stability of compressed rods made of wood with the simultaneous manifestation of force and environmental impact]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii = Structural mechanics and calculation of structures*, 2016, no. 2, pp. 50-53 (In Russ.).

14. Travush V.I., Kolchunov V.I., Dmitrieva K.O. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie prochnosti i ustoichivosti szhatykh sterzhnei iz drevesiny pri silovom i sredovom vozdeistvii [Experimental and theoretical study of the strength and stability of compressed wood rods under force and environmental impact]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti = News of higher educational institutions. Technology of the textile industry,* 2016, no. 3, pp. 280-285 (In Russ.).

15. Emelyanov S.G., Pakhomova E.G. Reliability of RC frame-braced systems in dangerous geological conditions. *Journal of Applied Engineering Science Paper number*: 17 (2019) 2, 602, pp. 245 - 250.

16. Bagdasarov Yu. A. O dostovernosti otsenki prosadochnosti gruntov [On the reliability of estimates of subsidence of soils]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov = Foundations, foundations and soil mechanics*, 2000, no. 2, pp. 21-26 (In Russ.).

17. Burenin V.S., Yezersky V.A., Monastyrev P.V. Issledovanie sovremennykh tendentsii proektirovaniya zhilykh zdanii v rossii i za rubezhom [The study of modern trends in the design of residential buildings in Russia and abroad]. *Arkhitektura i vremya = Architecture and Time*, 2017, no. 5, pp. 2-6 (In Russ.).

18. Grigoryan A.A. O kolichestvennoi otsenki prosadochnosti [Changes in the Physic-Mechanical Characteristics of the Soil of the Operated Foundation]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov = Foundations, foundations and soil mechanics*, 2001, no. 2. pp. 17-21 (In Russ.).

19. Dubrakova K.O., Kutsenko O.I., Kartsev I.N. Izmenenie fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik grunta ekspluatiruemogo osnovaniya [Change of physical and mechanical characteristics of the soil of the operated base]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, no. 3, pp. 54-64 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-54-64.

20. Mezherovsky V.A. Rasprostranenie vlagi i razvitie prosadochnykh deformatsii v lessovom osnovanii zdaniya [Moisture distribution and the development of subsidence deformations in the loess base of the building]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov = Foundations, foundations and soil mechanics*, 1998, no. 1, pp. 20-22 (In Russ.).

21. Mezherovsky V.A. Raschetnye modeli sistemy «zdanie – lessovoe prosadochnoe osnovanie» [Settlement models of the system “building - loess subsidence base”]. *Osnovaniya,*

fundamenty i mekhanika gruntov = Foundations, foundations and soil mechanics, 2001, no. 5, pp.. 21-23 (In Russ.).

22. Klyueva N.V., Dmitrieva K.O. Analiz ustoichivosti sterzhnevykh konstruktsii [Analysis of stability of core structures]. *Nauchnyi Vestnik Voronezhskogo gosudarstvenngo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura = Scientific Bulletin of the Voronezh State Architectural and Construction University. Construction and architecture,* 2016, no.3(43), pp. 17-24 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Дубракова Ксения Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Ksenia O. Dubrakova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Industrial and Civil Construction Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: sirius080993@yandex.ru

Дубраков Сергей Валерьевич, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Sergey V. Dubrakov, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Construction, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Завалишин Илья Владимирович, инженер кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Ilya V. Zavalishin, Engineer, Department of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-129-144

CC BY 4.0

Оценка влияния эффекта системности на результативность антагонистических игр

А.Р. Гайдук [1] ✉, В.Х. Пшихопов [1], М.Ю. Медведев [1], В.С. Плаксиенко [1], Д.Н. Гонтарь [1]

[1] ФГАБУ «Южный федеральный университет»
пер. Некрасовский, д. 44, г. Таганрог, 347920, Российская Федерация

✉ e-mail: gaiuk_2003@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Данная работа посвящена оценке влияния свойства системности на результативность антагонистических игр нескольких участников, которые проводят игру, действуя совместно или несовместно.*

Методы. *При исследовании применяются уравнения Колмогорова для описания антагонистических игр, которые рассматриваются как динамические системы, в которых протекают случайные марковские процессы; аналитические и компьютерные методы решения дифференциальных уравнений и исследования их свойств.*

Результаты. *Итог игры при несовместных действиях игроков рассматривается как результат множества независимых событий, в то время как результат игры, обусловленный совместными действиями игроков, рассматривается как результат функционирования некоторой динамической системы. На основе такого подхода показано, что увеличение результативности совместных действий, по сравнению с несовместными, обусловлено системным эффектом и может быть охарактеризовано коэффициентом системности. Численные оценки коэффициента системности получены путем аналити-ческих решений «уравнений средних» и компьютерных решений уравнений Колмогорова. Полученные результаты могут применяться для практической оценки эффективности различных методов подготовки участников и проведения антагонистических игр, в том числе и в учебных заведениях.*

Заключение. *В статье предложен новый метод количественной оценки результативности антагонистических игр, спортивных состязаний с постоянной отдачей участников. Показано, что выигрывает антагонистическую игру та сторона, игроки которой проявляют большую отдачу. Продолжительность такой игры зависит от её параметров, т.е. от отдачи игроков. При этом, чем более ожесточённее, с большей отдачей игроков, протекает игра, тем короче её длительность. Коэффициент системности в основном определяется отношением отдач игроков противостоящих сторон. При равенстве отдач в игре одного игрока с двумя коэффициент системности близок к значению 1,30. С увеличением отдачи игрока первой стороны коэффициент системности увеличивается. Другими словами, чем сильнее сопротивление, тем выше коэффициент системности.*

© Гайдук А.Р., Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Плаксиенко В.С., Гонтарь Д.Н., 2019

Ключевые слова: *игра; игрок; спортсмен; потенциал; совместное действие; несовместное действие; множество; система; системный эффект; коэффициент системности.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Финансирование: *Публикация подготовлена в рамках реализации в НИИ робототехники и процессов управления ЮФУ гранта РНФ 16-19-00001.*

Для цитирования: Оценка влияния эффекта системности на результативность антагонистических игр / А.Р. Гайдук, В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.С. Плаксиенко, Д. Н. Гонтарь // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 129-144. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-129-144.

Статья поступила в редакцию 02.09.2019

Статья подписана в печать 30.09.2019

Статья опубликована 25.10.2019

Influence Estimation of the Systemic Effect on Performance Antagonistic Games

Anatoly R. Gaiduk [1] ✉, Vyacheslav Kh. Pshikhopov [1], Mikhail Yu. Medvedev [1], Vladimir S. Plaksienko [1], Dmitriy N. Gontar [1]

[1] Southern Federal University
44 Nekrasovsky str., Taganrog 347920, Russian Federation

✉ e-mail: gaiuk_2003@mail.ru

Abstract

Perpose of research. *The estimation problem of the influence of the systemic effect on the performance of the antagonistic games of several participants, who play the game, acting in various ways, is considered. It is assumed, that players play games, match through independent, incompatible actions, or through concerted, joint actions.*

Methods. *It is obvious that joint actions provide greater efficiency, but such a qualitative estimation is often not enough. For informed decision making, as a rule, quantitative estimations are required.*

Results. *The analytical and computer solutions of the well-known equations describing the state of dynamic systems in which random Markov processes occur are used to obtain quantitative estimates. The result of incompatible actions of the players is considered as the result of many independent events, while the process due to the combined actions of the players appears to be the result of the functioning of some dynamic system. The increase in the productivity of joint actions of players compared with incompatible actions is considered to be a consequence of the organization of several players as a dynamic system, and is called the system effect. Analytical solutions of the "dynamics of averages" equations obtained earlier by Russian and foreign mathematicians are used for a quantitative, approximate estimation of the influence of the systemic effect. The exact Kolmogorov equations describing changes in the probabilities of the state of dynamical systems with random processes were solved by computer methods using MATLAB. These decisions made it possible to obtain estimates of the numerical values of the coefficient of systemicity, which characterizes the effectiveness of joint actions compared to incompatible ones.*

Conclution. *The results obtained in the article can be used to estimate the performance of the various training methods of participants in antagonistic games, athletes, and in educational institutions.*

Keywords: *game; player; potential; joint action; incompatible action; set; system; systemic effect; coefficient of systemicity.*

Conflict of interest. *The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

Financing: *The publication was prepared in the framework of the implementation of the grant RPF 16-19-00001 in the research Institute of robotics and management processes of SFU.*

For citation: *Gaiduk A.R., Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Plaksienko V.S., Gontar D.N.* Influence Estimation of the Systemic Effect on Performance Antagonistic Games. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 129-144 (In Russ.). https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-5-129-144.

Received 02.09.2019

Accepted 30.09.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

В современном мире встречается множество различных задач, конфликтных ситуаций, которые решаются сторонами на основе различных подходов, но каждая из сторон стремится к выигрышу. Это могут быть экономические, социальные и, в частности, спортивные состязания или игровые задачи, состоящие в противоборстве двух сторон [1 – 9]. Среди этих задач выделим антагонистические игры, которые могут решаться несколькими игроками двух сторон, действующими различным образом. В одном случае, каждый игрок совершает свои действия независимо, не согласовывая их с действиями других игроков своей команды. В этом случае можно выделить множество пар взаимодействующих во времени игроков, причем каждую пару можно считать динамической системой, так как игра протекает во времени [2 – 5]. В другом случае, игроки каждой стороны решают задачу путем совершения (выполнения) согласованных действий (например, при коллективной игре в футбол) [6 – 9], т.е. в этом случае действия каждого игрока зависят от действий других игроков своей команды и также направлены на решение общей задачи. Такие действия игроков, очевидно, являются совместными, а игра в целом является динамической системой.

Известно, что эффективность согласованных совместных действий выше, по сравнению с аналогичными, но несогласованными, несовместными действиями [7, 9, 10]. Однако для принятия решений качественных оценок недостаточно. Так, при подготовке участников игр, в частности – спортсменов в учебных заведениях, возникает необходимость количественных оценок их подготовленности, в том числе и к коллективным действиям. С этой целью обычно используется аттестационный педагогический измерительный материал (АПИМ), важное место в котором занимают математическое моделирование и тестирование [1, 10 – 13].

При несовместных действиях игра, фактически, распадается на множество локальных динамических систем, в которых совершаются независимые случайные события. Следовательно, результат такой игры является результатом объединения результатов *случайных*, *независимых событий* [14 –16]. В то же время при совместных действиях игроков каждой стороны игра в целом представляется единой динамической системой, в которой протекает также случайный процесс. В играх рассматриваемого типа поведение игроков обычно представляет собой некоторую последовательность кратковременных взаимодействий друг с другом (футбол, бокс, теннис и т.п.), поэтому такие игры можно считать *марковскими процессами*. Как известно, эти процессы в динамических системах описываются уравнениями Колмогорова или следствиями из них [15, 17 – 19].

Большую эффективность согласованных совместных действий по сравнению с несовместными принято считать проявлением системного эффекта. Для количественной оценки влияния системного эффекта применяется, так называемый, «коэффициент системности» [19, 20]. В общем случае он может определяться различными способами, но всегда отражает превышение результата совместных действий над результатом аналогичных, но не совместных действий.

Целью данного исследования является оценка возможных численных значений коэффициента системности с применением как приближенных, аналитических решений, так и более точных компьютерных решений дифференциальных уравнений, являющихся математическими моделями игр. Представляется существенным выявление связи системного эффекта с параметрами антагонистической игры как динамической системы.

Постановка задачи и методы исследования

Способы ведения и описания антагонистических игр

Спортивные и многие другие антагонистические игры характеризуются тем, что принимающие в них участие игроки в процессе игры истощают свои возможности, и чаще всего одна из сторон терпит поражение. Имея это в виду, предположим, что игрок-1 располагает некоторым потенциалом (физическим, финансовым, информационным и т.п.) и в процессе игры с игроком-2 тратит его с некоторой с интенсивностью (отдачей) a_1. Это может быть, например, сила определенной величины; ставки в виде некоторой суммы и т.п. Аналогично, игрок-2 тратит свой потенциал с отдачей a_2 так, что потенциалы, выделяемые игроками, взаимно поглощаются [1, 2, 14, 20]. С целью формализации описания игры примем, что способность каждого i-го игрока продолжать игру в момент времени t определяется *вероятностью* $p_i(t)$ *наличия* у него неравного нулю потенциала. Если в момент начала иг-

ры i-ым игроком эта вероятность $p_i(0) = 1$, то в процессе игры его потенциал снижается; снижается и его способность продолжать игру, то есть снижается вероятность $p_i(t)$. Соответственно, вероятность проигрыша i-ым игроком $q_i(t) = 1 - p_i(t)$ с течением времени повышается. Другими словами, если вероятность $p_i(t)$ не равна нулю или если $q_i(t)$ меньше 1, то у i-го игрока в момент времени t имеется некоторый потенциал, т.е. он способен продолжать игру.

Так как непосредственные взаимодействия игроков осуществляются достаточно редко и кратковременно, то игру можно рассматривать как пуассоновский поток событий, что позволяет найти дифференциальные уравнения для вероятностей возможности вести игру с обеих сторон [1, 17, 16]. Антагонистическую игру можно также рассматривать как марковский процесс изменения состояний игры [14, 19]. Подобные антагонистические игры можно описать дифференциальными уравнениями Колмогорова, которые связывают динамику вероятностей состояния игроков [15, 18, 19].

Далее дифференциальные уравнения Колмогорова используются для описания антагонистической игры одного игрока против двух игроков, а также вытекающие из них линейные «уравнения средних» [19, 20]. Эти уравнения могут описывать как совместные, так и несовместные действия игроков, что позволяет получить количественную оценку коэффициента системности.

Рассмотрим антагонистическую игру (1:2), в которой один игрок первой стороны противостоит двум игрокам второй стороны, равным друг другу по отдаче. Причем, в первом случае, эти два игрока ведут игру несогласованно, несовместно, т.е. каждый из них действует так, как будто его компаньона не существует. Во втором случае, два игрока, противостоящие одному, действуют совместно. Рассмотрим сначала первый случай.

Исследование игры при несовместных действиях игроков

Поскольку действия игроков второй стороны несовместны, то будем считать, что рассматриваемая игра представляет две независимые игры 1:1, в каждой из которых принимают участие по два игрока. Как показано выше каждая из этих игр представляет собой пуассоновский поток событий, поэтому каждая из них описывается системой дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\dot{p}_1(t) = -a_2(t)p_1(t)p_2(t), \quad (1)$$

$$\dot{p}_2(t) = -a_1(t)p_1(t)p_2(t), \quad (2)$$

где $p_i(t)$ – вероятность возможности i-го игрока вести игру 1:1; $a_i(t)$ – отдача i-го игрока. Начальные значения $p_i(0) = 1$, $i = 1, 2$. Игра заканчивается, когда одна из вероятностей $p_1(t)$ или $p_2(t)$ обратится в нуль или примет некоторое малое значение [17, 19, 20].

В рассматриваемой ситуации, когда каждый игрок второй стороны действу-

ет независимо от компаньона, результаты игр (1), (2), которые ведутся каждым игроком второй стороны, являются независимыми случайными событиями. Поэтому, согласно [14], вероятность того, что игрок первой стороны в момент времени способен продолжать игру 1:2 против двух игроков, имеющих равные возможности, т.е. $a_{21} = a_{22} = a_2$, но действующих несовместно, определяется выражением

$$p_{1H}(t) = p_1^2(t). \qquad (3)$$

При переменных $a_i(t)$ аналитическое решение системы нелинейных дифференциальных уравнений (1), (2) найти достаточно сложно, поэтому в данной работе рассматривается случай постоянных значений $a_i(t)$, т.е. при $a_1(t) = a_1 = const$ и $a_2(t) = a_2 = const$.

Переходя к решению системы (1), (2) при постоянных значениях a_i, выполним замену переменных, полагая $q_1(t) = \ln p_1(t)$, $q_2(t) = \ln p_2(t)$. Тогда система (1), (2) перейдёт в систему

$$\dot{q}_1(t) = -a_2 e^{q_2(t)}, \quad \dot{q}_2(t) = -a_1 e^{q_1(t)}. \quad (4)$$

Из первого уравнения (4) имеем $\ddot{q}_1(t) = -a_2 e^{q_2(t)} \dot{q}_2(t)$. Заменяя в этом равенстве функцию $e^{q_2(t)}$ её выражением из первого уравнения (4), получим с учетом второго уравнения (4):

$$\ddot{q}_1(t) = -a_1 d e^{q_1(t)} / dt. \qquad (5)$$

Отсюда следует $\dot{q}_1(t) = -a_1 e^{q_1(t)} + C_1$ или в исходных обозначениях $\dot{p}_1(t) = [-a_1 p_1(t) + C_1] p_1(t)$. С учетом начальных условий $p_i(0) = 1$, $i = 1, 2$, из первого уравнения (1) выводим $\dot{p}_1(0) = -a_2$, что даёт: $C_1 = a_1 - a_2$. Таким образом, $\dot{p}_1(t) = [-a_1 p_1(t) + a_1 - a_2] p_1(t)$. Интегрируя это дифференциальное уравнение, будем иметь $p_1(t) = (a_1 - a_2) / (a_1 + C_2 e^{(a_2 - a_1)t})$. Здесь C_1, C_2 – постоянные интегрирования, поэтому с учетом условия $p_1(0) = 1$, получим $C_2 = -\lambda_2$. Таким образом решение системы (1), (2) имеет вид

$$p_1(t) = \frac{a_1 - a_2}{a_1 - a_2 e^{(a_2 - a_1)t}},$$

$$p_2(t) = \frac{a_2 - a_1}{a_2 - a_1 e^{(a_1 - a_2)t}}. \qquad (6)$$

Второе выражение (6) получается аналогично первому, если в начале описанных преобразований найти $\ddot{q}_2(t)$. В частном случае, когда $a_1 = a_2 = a$ оба выражения (6) принимают вид

$$p_2(t) = p_1(t) = \frac{1}{1 + at}. \qquad (7)$$

Таким образом, вероятность способности игроков продолжать игру 1:1 в момент времени t определяется либо выражениями (6) при $a_1 \neq a_2$, либо выражением (7) при $a_1 = a_2 = a$. Подставляя значение $p_1(t)$ из (6) и (7) в равенство (3), получим

$$p_{1H}(t) = \left(\frac{a_1 - a_2}{a_1 - a_2 e^{(a_2 - a_1)t}} \right)^2,$$

$$a_1 \neq a_2,$$

$$a_1 = a_2 = a, \qquad (8)$$

и

$$p_{1\text{Н}}(t)=\frac{1}{(at+1)^2},$$

$$a_1=a_{21}=a_{22}=a. \qquad (9)$$

Из выражений (8), (9) следует, что вероятность способности игрока первой стороны продолжать игру 1:2 при *несовместных* действиях, противостоящих ему двух игроков, с течением времени уменьшается, что соответствует действительности [20].

Замечание 1. Пусть $a_2=a_1+\alpha$, где малое число $\alpha>0$, тогда из выражений (6) – (9) следует, что $\lim\limits_{t\to\infty}p_1(t)=0$, а $\lim\limits_{t\to\infty}p_2(t)=\alpha/a_1+\alpha>0$. Так как значение $p_1(t)=0$ достигается лишь при $t=\infty$, то примем, что $\alpha>0{,}053a_1$, а игры 1:1 и 1:2 заканчиваются, когда вероятность p_1 становится равной 5% от начальной. При этом продолжительность $t_{\text{и}1}$ игры 1:1 определится из уравнения $p_1(t_{\text{и}1})=0{,}05$. Отсюда с учетом выражений (6) выводим:

$$t_{\text{и}1}=\frac{1}{\alpha}\ln\frac{0{,}05a_1+\alpha}{0{,}05(a_1+\alpha)},$$

$$p_2(t_{\text{и}1})>0{,}05. \qquad (10)$$

Следовательно, в одиночной игре 1:1 терпит поражение более слабый игрок, что, очевидно, соответствуют естественному ходу антагонистических игр.

В случае игры одного игрока с двумя одинаковыми по отдаче и более сильными игроками, но действующими *несовместно*, т.е. при $a_{21}=a_{22}=a_1+\alpha$, из выражения (8) и условия $p_{1\text{Н}}(t_{\text{и}2\text{Н}})=0{,}05$ следует выражение

$$t_{\text{и}2\text{Н}}=\frac{1}{\alpha}\ln\frac{\sqrt{0{,}05}a_1+\alpha}{\sqrt{0{,}05}(a_1+\alpha)}<t_{\text{и}1}. \qquad (11)$$

При этом $p_2(t_{\text{и}2\text{Н}})>p_2(t_{\text{и}1})$. Отсюда следует, что два более сильных игрока, даже в том случае, когда они действуют несовместно, быстрее выигрывают в игре 1:2, чем один игрок в игре 1:1 при равных условиях, естественно.

Продолжительность игры 1:2 одного игрока с двумя равными ему по отдаче игроками, но действующими *несовместно*, т.е. при $a_1=a_{21}=a_{22}=a$ и $p_{1\text{Н}}(t_{\text{и}2\text{Н}})=0{,}05$, определяется выражением

$$t_{\text{и}2\text{Н}}=(\sqrt{20}-1)/\text{a}=3{,}472/a. \qquad (12)$$

Отсюда следует также естественный вывод: чем больше отдача игроков, тем быстрее заканчивается игра выигрышем двух игроков, даже действующих несовместно.

Исследование игры при совместных действиях игроков

Игру 1:2 – одного игрока с двумя равными по отдаче игроками, действующими *совместно*, можно описать дифференциальными уравнениями Колмогорова [19, с. 80] следующего вида:

$$\begin{aligned}
\dot p_{11}(t)&=-[a_1(t)+a_2(t)]p_{11}(t)+a_1(t)p_{12}(t),\\
\dot p_{12}(t)&=-[a_1(t)+2a_2(t)]p_{12}(t),\\
\dot p_{01}(t)&=-a_2(t)p_{11}(t), \qquad (13)\\
\dot p_{02}(t)&=-2a_2(t)p_{12}(t),
\end{aligned}$$

$\dot{p}_{10}(t) = -a_1(t)p_{11}(t)$,

с начальными условиями: $p_{11}(0) = 0$, $p_{12}(0) = 1$, $p_{01}(0) = 0$, $p_{02}(0) = 0$, $p_{10}(0) = 0$. Решение системы (13) должно удовлетворять условиям нормировки

$$p_{10}(t) + p_{11}(t) + p_{12}(t) + p_{00}(t) + p_{01}(t) + p_{02}(t) = 1.$$

Здесь $p_{00}(t) = 0$ – вероятность проигрыша всеми игроками. Вероятности способностей игроков вести игру 1:2 определяются выражениями:

$$p_1^1(t) = p_{10}(t) + p_{11}(t) + p_{12}(t),$$
$$p_1^2(t) = p_{12}(t) + p_{01}(t), \quad (14)$$
$$p_2^2(t) = p_{12}(t) + p_{02}(t),$$

где $p_1^1(t)$ – вероятность способности игрока первой стороны; $p_1^2(t)$, $p_2^2(t)$– вероятности способности первого и второго игроков второй стороны вести игру.

Приведенные нелинейные уравнения Колмогорова (13), (14) справедливы как при постоянных a_i, так и при переменных $a_i = a_i(t)$. Игра 1:2 заканчивается при $p_1^1(t)=0$, так как вторая сторона чаще всего (если $2a_2 > a_1$) оказывается сильнее. Однако найти аналитическое решение уравнений (13), (14) не удалось. Поэтому их исследование проводилось при постоянных a_i с применением численных (компьютерных) методов решения нелинейных дифференциальных уравнений, результаты которого будут приведены ниже.

Оценка значений коэффициента системности

Аналитическая оценка на основе линейной модели

Для получения предварительных, приближенных оценок коэффициента системности воспользуемся вытекающими из (13), (14) линейными уравнениями для «средних численностей игроков» второй стороны [19]. Эти уравнения в случае игры 1:2, когда игроки второй стороны обладают равной отдачей, т.е. $a_{21} = a_{22} = a_2$, и действуют *совместно*, имеют следующий вид:

$$\dot{p}_{1C}(t) = -a_2 m_2(t), \quad \dot{m}_2(t) = -a_1 p_{1C}(t). \quad (15)$$

Здесь $p_{1C}(t)$ – вероятность способности игрока первой стороны вести игру 1:2 при *совместных* действиях игроков второй стороны; $m_2(t)$ – «среднее число игроков» второй стороны, способных вести игру на момент времени t. Начальные условия $p_{1C}(0) = 1$, $m_2(0) = 2$.

Отметим, что поскольку $m_2(t)$ – это средняя численность, то, как решение системы уравнений (15), составленных в предположении некоторого числа (большего единицы) игроков, второй стороны, величина $m_2(t)$ может принимать дробные значения.

Фактически, уравнения (15) являются приближенной, линейной математической моделью игры 1:2 – одного игрока против двух равных по отдаче друг другу игроков и действующих *совместно*. Вероятность $p_{1C}(t)$, как решение системы (15), скорее всего, будет уменьшаться быстрее, чем $p_{1H}(t)$ (8) или (9); чтобы этот

факт оценить количественно, необходимо найти функцию $p_{1C}(t)$ как решение системы уравнений (15).

Для удобства решения системы (15), запишем её в векторно-матричной форме, полагая $x=[x_1 \quad x_2]^T$, где $x_1 = p_{1C}$, $x_2 = m_2$. В этих обозначениях система (15) принимает вид

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -a_2 \\ -a_1 & 0 \end{bmatrix} x .$$

Записывая решение этой системы с помощью выражений из [21, с. 77 и с. 236] и переходя к исходным обозначениям, найдём с учетом начальных условий системы (15):

$$p_{1C}(t) = (0,5+b)e^{-\sigma t} + (0,5-b)e^{\sigma t}, \qquad (16)$$

$$m_2(t) = (1+0,5/b)e^{-\sigma t} + (1-0,5/b)e^{\sigma t}, \qquad (17)$$

где $\sigma = \sqrt{a_1 a_2}$ $b = \sqrt{a_2 / a_1}$.

Из выражения (16) следует, что в данном случае игра закончится при $t = t_{и2C}$, когда $p_{1C}(t_{и2C}) = 0$. Отсюда и из (16) следует выражение, определяющее продолжительность игры 1:2 при *совместных* действиях игроков второй стороны:

$$t_{и2C} = \frac{-1}{2\omega} \ln \frac{b-0,5}{b+0,5} . \qquad (18)$$

Полученные выражения (8) – (12) и (16) – (18) позволяют приближенно оценить эффект системности как по степени проигрыша игроков, так и по продолжительности игры 1:2.

Замечание 2. Если в игре 1:2 отдачи всех игроков равны, т.е. $a_1 = a_2 = a$, причем игроки второй стороны действуют *совместно*, то $\sigma = a$, $b = 1$, и из выражений (16) – (18) следуют равенства:

$$t_{и2C} = \frac{-1}{2a} \ln \frac{0,5}{1,5} = 0,5493 / a , \qquad (19)$$

$$p_{1C}(t) = 1,5e^{-at} - 0,5e^{at} , \qquad (20)$$

$$m_2(t) = 1,5e^{-at} + 0,5e^{at} .$$

Из выражения (18) следует, что если $a_2 = 0,25a_1$, то время $t_{и2C}$ будет равно бесконечности. В этом случае интенсивность воздействия на игру второй стороны (несмотря на наличие двух игроков) будет в два раза меньше, чем первой, поэтому вторая сторона в игре 1:2 победить не может, даже при совместных действиях своих игроков. По-видимому, такого соотношения отдач достаточно для принятия решения: – начинать антагонистическую игру 1:2 против игрока, в четыре раза более сильного, нет смысла. Поэтому можно заключить, что в уравнениях Колмогорова предполагается, что антагонистические игры начинаются по инициативе второй стороны, что также естественно, так как при $a_2 \approx a_1$ она имеет явное преимущество.

С другой стороны, из выражений (12) и (19) следует, что при совместных действиях игроков второй стороны в игре 1:2 с равным по отдаче игроком, вторая сторона одерживает победу, практически, в шесть раз быстрее, чем при несовместных действиях.

Целью антагонистической игры, в первую очередь, очевидно, является нанесение поражения противной стороне. Поэтому, коэффициент системности определяется [20] как отношение

вероятности $q_{1C}(t_{ок,и})=1-p_{1C}(t)$ поражения первого игрока при *совместных* действиях игроков второй стороны к вероятности $q_{1H}(t)=1-p_{1H}(t)$ его поражения при *несовместных* действиях игроков второй стороны, т.е.

$$K_{сис,П}(t)=\frac{1-p_{1C}(t)}{1-p_{1H}(t)},$$

$$t\le\min\{t_{и2C},t_{и2H}\}. \qquad (21)$$

Ввиду сложности выражений (13) и (16), будем искать значения $K_{сис,П}(t)$ (21) при условии $a_1=a_2=a$, когда $t_{и2C}=0,5493/a$, $p_{1C}(t)=1,5e^{-at}-0,5e^{at}$, $\sigma=a$. В этом случае из выражений (9), (20) и (21) выводим

$$K_{сис,П}(t)=\frac{1-1,5e^{-at}+0,5e^{at}}{1-(at+1)^{-2}}. \qquad (22)$$

По (22) легко установить, что $K_{сис,П}(0)=1$, а $K_{сис,П}(t_{и2C})=1,714$, причем эти значения коэффициента системности не зависят от значения отдачи, что кажется довольно странным! Тем не менее, полученные приближенные результаты свидетельствуют, что действительно, эффективность совместных действий значительно выше, чем несовместных, вследствие эффекта системности.

Найдем также значения коэффициента системности (21) при некоторых значениях *t*:

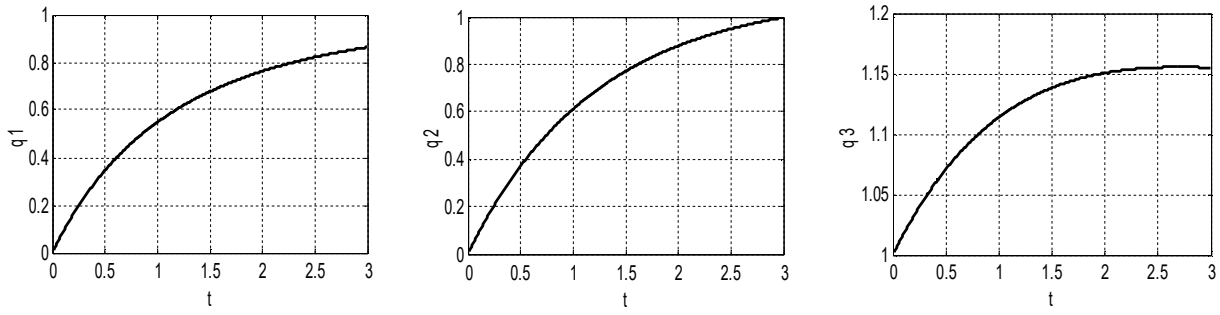
$$K_{сис,П}(0,5t_{и2C})=\frac{1-0,4817}{1-0,6155}\approx 1,35,$$

$$K_{сис,П}(0,75t_{и2C})=\frac{1-0,2386}{1-0,5016}\approx 1,53.$$

Из полученных данных следует, что при равной и постоянной отдаче всех игроков в течение игры 1:2 коэффициент системности $K_{сис,П}$ увеличивается по мере протекания игры.

Оценка коэффициента системности по нелинейной модели

Как отмечалось выше, уравнения (15) являются линейным приближением уравнений нелинейной модели антагонистической игры (13), (14). Ввиду отсутствия аналитического решения последних, в данной работе исследование игры 1:2 проводилось путем численного решения системы уравнений (13), (14) совместно с уравнениями (1), (2) с применением пакета MATLAB. Для этой цели использовалась функция ODE-45 с шагом по времени 0,002 с при постоянных значениях параметров a_1 и a_2. Так как в соответствии решениями уравнений (1), (2) игру выигрывает игрок или сторона с большим значением ia_i, i = 1, 2, то моделирование производилось при условии $2a_2\ge a_1$. При этом наряду с определением значений коэффициента системности, фиксировалась и длительность игры $t_{игр}$, которая определялась по условию $q2(t_{игр})=1$, где $q2(t)=1-p_{10}(t)-p_{11}(t)-p_{12}(t)$ – вероятность поражения игрока первой стороны при *совместных* действиях двух игроков второй стороны. На рисунке 1 приведены графики изменения величин: $q1(t)=q_{1H}(t)=1-[p_1(t)]^2$, $q2(t)$ и $q3(t)=K_{сис,П}(t)=q2(t)/q1(t)$, определяемых решениями в MATLAB системы уравнений (1), (2), (13), (14) при $a_1=0,3$; $a_2=0,45$ и указанных выше начальных условиях.



а) б) в)

Рис. Изменения вероятности проигрыша игроком первой стороны: а – при несовместных, б – при совместных действиях игроков второй стороны; в – изменение коэффициента системности в течение игры

Fig. Changes in the losing probability of player of the first side: a – in case of incompatible action, б – in case of the joint actions of the second side players; в – change in the coefficient of systemicity during the game

Результаты и их обсуждение

Некоторые результаты моделирования рассматриваемой антагонистической игры одного игрока против двух игроков по уравнениям (13), (14) при различных значениях параметров a_1 и a_2 представлены в табл. 1 и 2. Табл. 1 отражает зависимость длительности игры 1:2, а табл. 2 зависимость значения коэффициента системности от интенсивности отдач игроков.

На основе результатов компьютерного исследования антагонистической игры 1:2 по нелинейной модели можно сделать следующие выводы:

– значение коэффициента системности $K_{\text{сис,П}}$ является постоянным при постоянном отношении a_2/a_1; при увеличении этого отношения значение коэффициента системности $K_{\text{сис,П}}$ уменьшается, а при уменьшении – увеличивается;

– длительность игры зависит от значений как a_1, так и a_2. При этом длительность игры 1:2 уменьшается с увеличением как отношения a_2/a_1, так и значения a_1, т.е. чем ожесточённее протекает игра, тем короче её длительность;

– при постоянном значении a_2 с увеличением a_1, т.е. с увеличением сопротивления, продолжительность игры 1:2 уменьшается, а коэффициент системности увеличивается;

– при постоянном значении a_1 с увеличением a_2 и продолжительность игры 1:2, и коэффициент системности уменьшаются;

– при $a_2 = a_1$ продолжительность игры 1:2, определяемая решением линейных уравнений (15), примерно в два раза меньше, а значение коэффициента системности примерно в 1,31 раза больше значений, определяемых решением системы нелинейных уравнений (1), (2), (13), (14).

Таблица 1

Длительность игры 1:2

Table 1

Duration of the game 1:2

a_2 \ a_1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	7,97	5,24	3,22	-	-	-
0,4	5,25	4,00	2,63	1,97	1,60	-
0,6	3,56	3.13	2,25	1,74	1,44	1,23
0,8	2,60	2,63	1,97	1,25	1.31	1,13
1,0	2,23	2,25	1,74	1,42	1,21	1,05

Таблица 2

Коэффициент системности

Table 2

Systemicity coefficient

a_2 \ a_1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	1,09	1,31	1,86	-	-	-
0,4	1,02	1,09	1,31	1,57	1,85	-
0,6	1,08	1,04	1,16	1,31	1,44	1,67
0,8	1,004	1,02	1,09	1,25	1,31	1,44
1,0	1,002	1,013	1,06	1,13	1,21	1,31

В частности, приведенные выводы, позволяют указать причину, по которой значения коэффициента системности, определяемые выражением (22), при $t = t_{и2С}$ не зависят от значения отдачи a. Это объясняется тем, что приближенное выражение (22) получено при условии $a_2 = a_1$, т.е. тем, что в соответствии с первым приведенным здесь выводом, отношение a_2/a_1 в этом случае является постоянным и равным единице. Таким образом, несмотря на значительную приближенность линейной модели игры 1:2 в количественном отношении, эта модель в качественном отношении отражает свойства рассматриваемой игры достаточно корректно.

Выводы

Проведенное исследование моделей антагонистической игры двух сторон подтверждает известное положение, что коллективные, совместные действия игроков являются более результативными, по сравнению с несовместными действиями. Продолжительность антагонистической игры зависит от её параметров, а выигрывает игру та сторона, игроки которой обладают большей отдачей. При этом, чем более ожесточённее, с большей отдачей игроков, протe-

кает игра, тем короче её длительность. Коэффициент системности в основном определяется отношением отдач игроков противостоящих сторон. При равенстве отдач игроков в игре 1:2 коэффициент системности близок к значению 1,31. С увеличением отдачи игрока первой стороны при постоянной отдаче игроков второй стороны коэффициент системности увеличивается. Другими словами, чем сильнее сопротивление, тем выше коэффициент системности.

Подчеркнем, что приведенные выводы относятся к играм с постоянной отдачей игроков, хотя в реальных играх она, естественно, уменьшается по мере протекания игры. Исследование этого случая предполагается в дальнейшем. Предложенный в работе подход может применяться для практической оценки эффективности различных методов подготовки участников антагонистических игр, спортсменов, тестируемых, в том числе и в учебных заведениях.

Список литературы

1. Прядеин Р.Б., Степанцов М.Е. Об одном подходе к имитационному моделированию спортивной игры с непрерывным временем // Computer research and simulation. 2014. Т. 6. № 3. С. 455-460.

2. Дубина И.А. Основы теории экономических игр. М.: КноРус, 2010.

3. Осколков В.А., Сулейманов Н.Л., Соловьев П.Ю. Анализ многолетней системы технико-тактической подготовки боксеров // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. СПб.: НГУФКСиЗ им. П.Ф. Лесгафта, 2017. № 9(151). С. 206-211.

4. Dunfield D.L., Read J.F. Determination of reaction rates by using cubic spline interpolation // The Journal of Chemical Physics. 1972. Vol. 57. № 5. P. 2178-2183.

5. Park Y. et al. A comparison of accuracy and stroke characteristics between two putting grip techniques // Proc. ISBS Conference. 2009. P. 70-73.

6. Veloso M. Autonomous robot soccer times // National Academy of Engineering. 2003. Vol. 33(1). P. 8-12.

7. Каляев И.А., Гайдук А.Р. Стайные принципы управления в группе объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 12. С. 29-33.

8. Stilmanl B., Aldossary M. Discovering the algorithm of discovery by investigating no-search approach // Processing of Asian Conference on Defence Technology (ACDT). Thailand, 2015, 23 – 25, April. P. 87-94.

9. Cao Y.U., Fukunaga A.S., Kahng A.B., Meng F. Cooperative mobile robotics: antecedents and directions // Autonomous Robots. 1997. Vol. 4. P. 1-23.

10. Использование современных технологий математического моделирования при подготовке спортсменов высшего класса / В. Жаркова, Ю. Фишер, Д. Нуштаев, С. Рыжов, А. Щеляев, П Музыкин., М. Шестаков // САПР и графика. 2014. № 2. С. 86-96.

11. Михайлов С.Н., Демьяненко В.Ю. Инфологические технологии в задачах автоматизированного тестирования знаний студентов // Известия Юго-Западного государ-

ственного университета. 2017. Т. 21. № 3(72). С. 75-83. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-3-75-83.

12. Дроздов В. И., Маслак А. А., Новиков Ю. М. Использование современной теории тестологии при оценке качества АПИМ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2008. № 4(25). С. 87-95.

13. Балашов В.Ф. Формирование аттестационного педагогического измерительного материала по дисциплине "Теория и организация адаптивной физической культуры". М.: Физическая культура, 2008.

14. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 2001.

15. Калинкин А.В. Уравнения марковского процесса гибели в математической теории надежности // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 14. С. 1-7.

16. Саати Т. Принятие решений: Метод анализа иерархий. М.: Советское Радио, 1993.

17. Tipkiller. URL: http://www.tipkiller.com/ru/betting-guide/analiz-teorii-kolmogorova-chepmena-dlya-stavok-na-sport.php.

18. Кондратьев Б.П. Теория потенциала. Новые методы и задачи с решениями. М.: Мир, 2007.

19. Буравлев А.И., Буренок В.М., Брезгин В.С. Методы оценки эффективности вооружения и военной техники / под ред. проф. В.М. Буренка. СПб.: ВАТТ, 2011.

20. Гайдук А.Р., Каркищенко А.Н., Пшихопов В.Х. О влиянии РТК ВН на эффективность использования ВВТ // Известия ЮФУ. Серия Технические науки. 2019. № 1. С61-74.

21. Гайдук А.Р. Непрерывные и дискретные динамические системы. М.: Учебная литература, 2004.

References

1. Pryadein R.B., Stepantsov M.E. Ob odnom podkhode k imitatsionnomu modelirovaniyu sportivnoi igry s nepreryvnym vremenem [On a possible approach to a sport game with continuous time simulation]. *Computer research and simulation,* 2014, vol. 6, no. 3, pp. 455-460 (In Russ.).

2. Dubina I.A. *Osnovy teorii ekonomicheskikh igr* [Bases of the theory of economic games]. Moscow, KnoRus Publ., 2010 (In Russ.).

3. Oskolkov V.A., Suleymanov N.L., Solovev P.Yu. Analiz mnogoletnei sistemy tekhniko-takticheskoi podgotovki bokserov [Analysis of perennial system of technical-tactical preparation of boxers]. *Uchenye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta = Scientific notes of university nm. P.F. Lesgaft*, 2017, no. 9(151), pp. 206-211 (In Russ.).

4. Dunfield D.L., Read J.F. Determination of reaction rates by using cubic spline interpolation. *The Journal of Chemical Physics*, 1972, vol. 57, no. 5, pp. 2178-2183.

5. Park Y. et al. A comparison of accuracy and stroke characteristics between two putting grip techniques. Proc. ISBS Conference, 2009, pp. 70-73.

6. Veloso M. Autonomous robot soccer tims. *National Academy of Engineering*, 2003, vol. 33(1), pp. 8-12.

7. Kaliaev I.A., Gaiduk A.R. Stainye printsipy upravleniya v gruppe ob"ektov [Gregarious principles of control in bunch of objects]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronic, automation, control*, 2004, no. 12, pp. 29-33 (In Russ.).

8. Stilmanl B., Aldossary M. Discovering the algorithm of discovery by investigating no-search approach. Proceedings of Asian Conference on Defence Technology (ACDT). Thailand, 2015, 23 – 25, April., pp. 87-94.

9. Cao Y.U., Fukunaga A.S., Kahng A.B., Meng F. Cooperative mobile robotics: antecedents and directions. *Autonomous Robots*, 1997, vol. 4, pp. 1-23.

10. Zharkova V., Fisher Yu., Nushtaev D., Ryzhov S., Schelyaev A., Muzykin P., Shestakov M. Ispol'zovanie sovremennykh tekhnologii matematicheskogo modelirovaniya pri podgotovke sportsmenov vysshego klassa [Use of modern technologies of mathematical modelling by preparation of sportsmen of the highest class]. *SAPR i grafika = SAPR and drawing*, 2014, no. 2, pp. 86-96 (In Russ.).

11. Mikhailov S.N., Demyanenko V.Yu. Infologicheskie tekhnologii v zadachakh avtomatizirovannogo testirovaniya znanii studentov [Info logical technologies in problems of the computerized testing of students' knowledge]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2017, vol. 21, no. 3(72), pp. 75-83 (In Russ.). https:///doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-3-75-83.

12. Drozdov V.I., Maslak A.A., Novikov Yu.M. Ispol'zovanie sovremennoi teorii testologii pri otsenke kachestva APIM [Use of the modern theory test logical at evaluation test CPMS]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2008, no. 4(25), pp. 87-95 (In Russ.).

13. Balashov V.F. *Formirovanie attestatsionnogo pedagogicheskogo izmeritel'nogo materiala po distsipline "Teoriya i organizatsiya adaptivnoi fizicheskoi kul'tury"* [Formation of a certificate pedagogical measuring stuff on discipline "Theory and the organization of adaptable physical training"]. Moscow, 2008 (In Russ.).

14. Ventsel E.S. *Issledovanie operatsii: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operational research: problems, principles, methodology]. Moscow, Nauka Publ., 2001 (In Russ.).

15. Kalinkin A.V. Uravneniya markovskogo protsessa gibeli v matematicheskoi teorii nadezhnosti [Equations of markov destruction process in the mathematical theory of reliability]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering magazine: a science and innovations*, 2013, is. 14, pp. 1-7 (In Russ.).

16. Saati T. *Prinyatie reshenii: Metod analiza ierarkhii* [Decision-making: Method of the analysis of hierarchies]. Moscow, 1993 (In Russ.).

17. Tipkiller. Available at: http://www.tipkiller.com/ru/betting-guide/analiz-teorii-kolmogorova-chepmena-dlya-stavok-na-sport.php.

18. Kondrat'ev B.P. *Teoriya potentsiala. Novye metody i zadachi s resheniyami* [Potential theory. New methods and problems with decisions]. Moscow, Mir Publ., 2007 (In Russ.).

19. Buravlev A.I., Burenok V.M., Brezgin V.S. *Metody otsenki effektivnosti vooruzheniya i voennoi tekhniki* [Methods of the efficacy estimation of arms and military technology]. St. Petersburg, VATT Publ., 2011 (In Russ.).

20. Gaiduk A.R., Karkischenko A.N., Pshikhopov V.Kh. O vliyanii RTK VN na effektivnost' ispol'zovaniya VVT [About influence of RTK MP on efficiency of use BBT]. *Izvestiya YuFU. Seriya Tekhnicheskie nauki, = News SFedU. Series Technical Sciences*, 2019, no. 1, pp. 61-74 (In Russ.).

21. Gaiduk A.R. *Nepreryvnye i diskretnye dinamicheskie sistemy* [Continuous and discrete dynamic systems]. Moscow, 2004 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Гайдук Анатолий Романович, доктор технических наук, профессор, ФГАБЮ «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: gaiuk_2003@mail.ru

Anatoly R. Gaiduk, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Пшихопов Вячеслав Хасанович, доктор технических наук, профессор, ФГАБЮ «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: pshichop@rambler.ru

Vyacheslav Kh. Pshikhopov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: pshichop@rambler.ru

Медведев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, ФГАБЮ «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: medvedevmihal@sfedu.ru

Mikhail Yu. Medvedev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: medvedevmihal@sfedu.ru

Плаксиенко Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор, ФГАБЮ «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: vsp46@mail.ru

Vladimir S.Plaksienko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: vsp46@mail.ru

Гонтарь Дмитрий Николаевич, младший научный сотрудник, преподаватель ВС, ФГАБЮ «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: dgontar@sfedu.ru

Dmitriy N. Gontar, Researcher, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: dgontar@sfedu.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-145-160

CC BY 4.0

Нечеткое параллельно-конвейерное устройство и способ управления термоэлементом

М.В. Бобырь [1] ✉, Н.А. Милостная [1], Д.О. Алтухов [1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. *Увеличение быстродействия работы нечеткого параллельно-конвейерного устройства, основанного на новом способе управления термоэлементом.*

Методы*. В процессе обработки изделия на оборудовании с ЧПУ возникает нагрев режущего инструмента и поверхности обрабатываемых деталей. Термические деформации снижают качество обработки поверхности заготовки. Для компенсации температурных деформаций используются различные методы: распыление смазочно-охлаждающей жидкости, охлаждение сжатым воздухом. Авторы предлагают использовать устройство для управления охлаждением, реализованное на термоэлементе Пельтье и ПЛИС семейства Spartan 3E. Для управления термическими погрешностями необходим постоянный контроль, при этом системы управления строятся на моделях искусственного интеллекта. Вследствие того, что входные переменные носят неопределенный характер, в работе используется нечеткая логика, которая позволяет описывать взаимосвязь между входными и выходными параметрами.*

Результаты. *Для вычисления значения силы тока, которое зависит от изменения входных параметров, разработана нечеткая математическая модель. Временные тесты, проведенные на частоте 50 МГц, показали, что для вычисления силы тока по разработанной математической модели требуется 380 нс. Для повышения быстродействия нечеткая математическая модель реализована на базе ПЛИС Spartan 3E. В работе была предложена универсальная формула для преобразования ток-напряжение. Результаты тестов показали, что расчет напряжения осуществляется за 190 нс. Было установлено, что устройство для управления термоэлементом выдает управляющий сигнал в течение 570 нс.*

Заключение. *В статье представлено устройство для управления температурным режимом в зоне обработки изделия. В данном устройстве управление термоэлементом осуществляется с помощью генератора тока, реализованного на операционном усилителе и биполярном транзисторе. Для того, чтобы на исполнительные механизмы станка с ЧПУ поступал сигнал напряжения, авторами разработано устройство для преобразования ток-напряжение, реализованное на ПЛИС. Для вычисления значения силы тока, которое зависит от изменения температуры в зоне резания, была разработана нечеткая MISO-модель. Проведенные временные тесты позволили установить, что быстродействие разработанного устройства в несколько раз выше имеющихся аналогов.*

Ключевые слова: *термоэлемент Пельтье; нечеткая логика; ПЛИС; мягкие вычисления, генератор тока.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Финансирование: *Работа выполнена при поддержке Госзадания: Соглашение №2.3440.2017/4.6 и гранта РНФ №16-19-00186.*

© Бобырь М.В., Милостная Н.А., Алтухов Д.О., 2019

Для цитирования: Бобырь М.В., Милостная Н.А., Алтухов Д.О. Нечеткое параллельно-конвейерное устройство и способ управления термоэлементом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 145-160. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-145-160.

Статья поступила в редакцию 03.06.2019

Статья подписана в печать 17.07.2019

Статья опубликована 25.10.2019

Fuzzy Parallel-Conveyor Device and Thermal Element Control Method

Maksim V. Bobyr [1] ✉, Natalia A. Milostnaya [1], Dmitrii O. Altukhov [1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Резюме

Purpose of research. *Operation speed increase of fuzzy parallel-conveyor device based on a new method of thermal element controlling.*

Methods. *Cutting tool and part's surface are heated in the process of device handling using NC-machining technique. Thermal deformations reduce the surface of workpiece treatment quality. Various methods are used to compensate temperature deformations: spraying of lubricating-cooling liquid, cooling by compressed air. The device is proposed to be used for cooling control which is implemented on Peltier thermo element and FPLD Spartan 3E. Constant control is necessary to control thermal errors and control systems are built on artificial intellect models. As input parameters are indeterminate, fuzzy logic is used to describe the connection between input and output parameters.*

Results. *A fuzzy mathematical model has been developed to calculate current intensity. The intensity depends on the change of input parameters. Tests conducted at 50 MHz showed that 380 ns are necessary to calculate current intensity according to the developed mathematical model. Fuzzy mathematical model is implemented on the basis of FPLD Spartan 3E for faster operation. A universal formula for current-voltage transformation was developed. Test results showed that the voltage calculation is carried out in 190 ns. It was stated that thermo element control device produces a control signal within 570 ns.*

Conclusion. *The article describes a device for temperature controlling conditions in the product processing area. In this device thermal element controlling is done by a current generator implemented on an operational amplifier and on a bipolar transit generator. A device for current-voltage transformation is implemented on FPLD. It was developed to receive a pressure signal for NC-machining technique actuators to receive a pressure signal. A fuzzy MISO model has been developed to calculate current magnitude that depends on temperature change in the cutting zone. Conducted tests showed that the speed of this device is several times higher than present analogues.*

Keywords: *Peltier thermo element; fuzzy logic; FPLD; soft computing, current generator.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

Financing: *The research is done in RFFR №16-19-00186 and state task №2.3440.2017/4.6.*

For citation: Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Altukhov D. O. Fuzzy parallel-conveyor device and thermal element control method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 145-160 (In Russ.). https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-5-145-160.

Received 03.06.2019

Accepted 17.07.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

Одной из причин возникновения термических деформаций является трение между режущим инструментом и поверхностью заготовки. В статье [1] показано, что термические деформации приводят к неправильному позиционированию режущего инструмента относительно заготовки и снижению его точности. Они устраняются путем охлаждения поверхности заготовки, режущего инструмента и элементов станка [2]. Отсутствие системы охлаждения приводит к тому, что режущая кромка инструмента затупляется, вследствие чего производственные дефекты деталей увеличиваются. В исследованиях [3, 4] отмечается, что изменение параметров режима резания приводит к появлению термических деформаций, и вероятность скола на резце увеличивается. В станках с ЧПУ для охлаждения зоны резания и режущего инструмента используются следующие методы: распыление смазочно-охлаждающей жидкости [5], охлаждение сжатым воздухом [6]. Эти методы не подходят для обработки мягких материалов (дерево, пластик). Во время распыления смазочно-охлаждающей жидкости изменяется внешний вид и структура материала. При охлаждении сжатым воздухом необходимо использовать систему пылеудаления. Это вызывает увеличение энергопотребления станка с ЧПУ.

Для управления температурными погрешностями требуется постоянный контроль и корректировка температуры в зоне резания, при этом системы управления строятся на моделях искусственного интеллекта [7, 8, 9]. Одним из эффективных направлений интеллектуальных систем является нечеткая логика. Положительная особенность нечетких систем это возможность применения их в условиях неопределенности и формирование управляющих решений [10]. Как правило, выходным сигналом нечетких моделей являются сигналы различной физической природы. Для управления приводами станка с ЧПУ нечеткие модели должны генерировать сигнал напряжения на своем выходе. В результате возникает несколько задач. Первая разработка устройства для преобразования физических параметров, полученных на выходе нечетких моделей, в сигнал напряжения, необходимого для передачи на исполнительные механизмы станка с ЧПУ. Вторая — это увеличение быстродействия работы устройства.

Следует отметить, что увеличение производительности возможно за счет программируемых логических контроллеров [11, 12]. При использовании устройств с параллельно-конвейерной обработкой, таких как ПЛИС, достигается повышение быстродействия обработки информации. Например, операция сложения a + b + c + d + e + f при последовательной обработке занимает 5 тактов, а в ПЛИС за счет параллельной

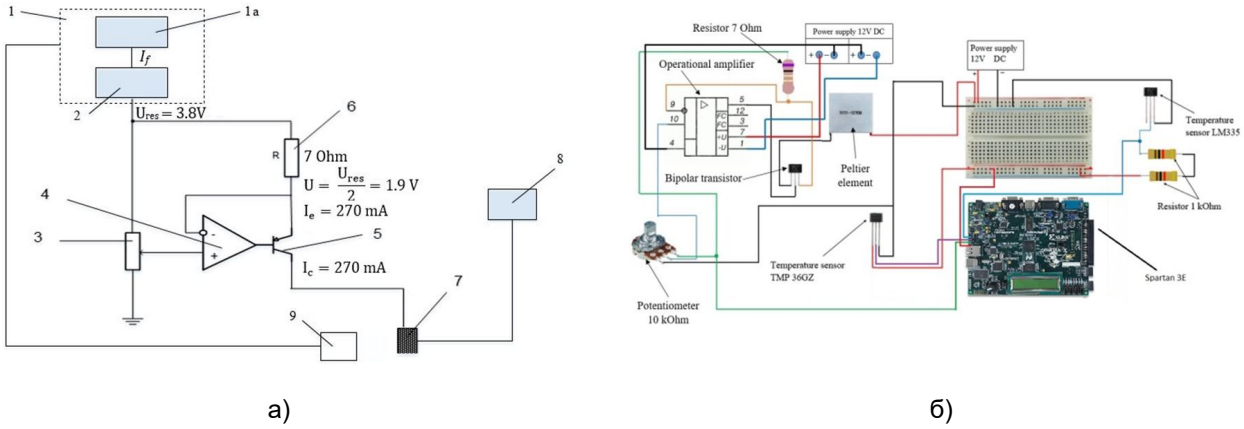
обработки данных – 2 такта. В статье рассмотрено решение этих двух задач.

2. Материалы и методы

2.1. Параллельно-конвейерное устройство управления термоэлементом

Особенностью элемента Пельтье является то, что при прохождении постоянного тока через термоэлемент тепло выделяется с его одной стороны, а холод – с другой стороны. Холодную сторону термоэлемента авторы предлагают использовать для охлаждения зоны резания при обработке деталей на оборудовании с ЧПУ.

Структурно-функциональная схема устройства на основе ПЛИС для управления охлаждением деталей при их обработке на станке с ЧПУ представлена на рис. 1. Особенностью схемы является использование устройства для вычисления тока на основе нечеткой математической модели преобразования ток-напряжение.



а) б)

Рис. 1. Устройство управления термоэлементом на основе генератора тока: а – структурная схема, где 1 – ПЛИС, 1а – нечеткое устройство для вычисления силы электрические тока, 2 – устройство преобразования напряжения, 3 – цифровой потенциометр, 4 – операционный усилитель, 5 – биполярный транзистор, 6 – резистор, 7 – термоэлемент Пельтье, 8 – источник питания, 9 – датчик температуры, 10 – блок электроники для управления системой охлаждения; t, s, v – температура режущего инструмента, подача на оборот, скорость резания; б – электрическая схема

Fig. 1. Thermal element control device on the basis of current generator: (a) block diagram, Where 1 – FPLD, 1a - fuzzy device for electric current strength calculation, 2 – voltage transformation device, 3 – digital potentiometer, 4 – operational amplifier, 5 – bipolar transistor, 6 – resistor, 7 – Peltier thermal element, 8 – power supply, 9 – temperature sensor, 10 – electronic unit for cooling system control; t, s, v – cutting tool temperature, feed per revolution, cutting speed; б – electrical diagram

Устройство для управления термоэлементом на основе генератора тока работает следующим образом: сила тока, передаваемая термоэлементу 7, рассчитывается в ПЛИС (рис. 1а) по формуле (7). После этого ток преобразуется в сигнал напряжения Ures (1) (рис. 1а) и передается на потенциометр 3. Потенциометр 3 установлен на 50% и делит напряжение пополам. Таким образом, напряжение на неинвертирующем входе операционного усилителя 4 будет равно

U=Ures/2. Операционный усилитель выполнен по схеме повторителя напряжения (усилитель с единым коэффициентом усиления). Поэтому напряжение в точке подключения резистора 6 и инвертирующего входа операционного усилителя будет равно Ures / 2. Ток эмиттера равен Iэ =U/R= Ures / 2R.

Таким образом, на термоэлемент 7 подается ток коллектора, примерно равный току эмиттера Iк=Ures/2R, поскольку в биполярном транзисторе 5 токи эмиттера и коллектора Iэ=Iк примерно равны друг другу.

2.2. Устройство для преобразования ток-напряжение

Как было сказано выше, выходные сигналы в нечетких системах управления имеют разную физическую природу. Например, в нашем устройстве управления термоэлементом на основе управляемого генератора тока на выходе формируется сигнал силы тока. Данный сигнал невозможно передать на исполнительные механизмы станка с ЧПУ. Следовательно, возникает задача преобразования значения силы тока в сигнал напряжения. Авторами разработано устройство для преобразования ток-напряжение, реализованное на ПЛИС. Устройство преобразует ток в напряжение по универсальной формуле

$$U_{\text{res}} = U_{\min} + \frac{(I_f - I_{\min})\cdot(U_{\max} - U_{\min})}{I_{\max} - I_{\min}}, \quad (1)$$

где $I_{\min}$ и $I_{\max}$ – минимальная и максимальная допустимая сила тока; I_f – действующее значение силы тока; $U_{\min}$ и $U_{\max}$ – минимальное и максимальное напряжение в пределах которого происходит регулирование напряжения, подаваемого на исполнительные механизмы.

Расчетная схема устройства для преобразования ток-напряжение показана на рис. 2.

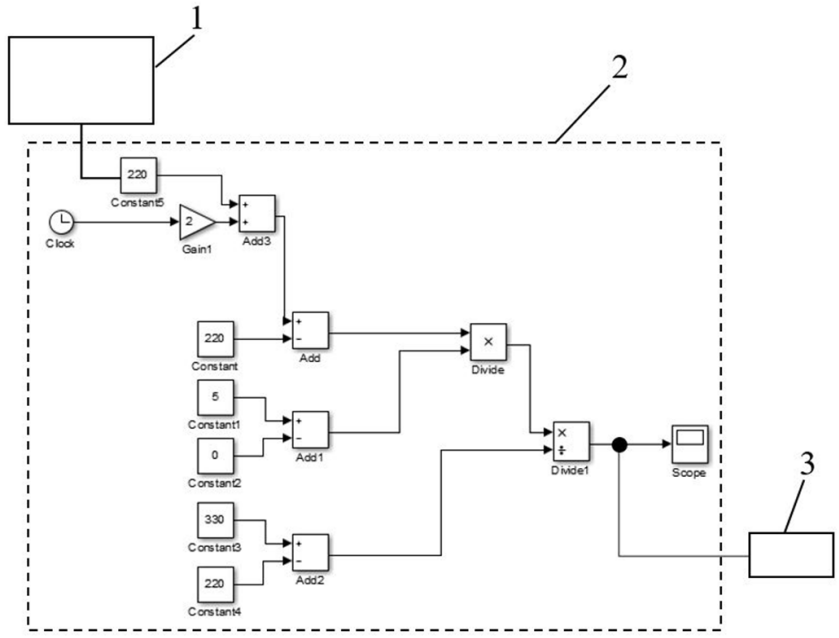


Рис. 2. Устройство для преобразования ток-напряжение: 1 - ПЛИС; 2 - преобразователь напряжения; 3-цифровой потенциометр

Fig. 2. Current-to-voltage converter: 1 - FPLD; 2 - voltage converter; 3-digital potentiometer

2.3. Нечеткая модель управления термоэлементом

Нечеткая математическая модель вычисляет значение силы тока, которое зависит от изменения температуры в зоне резания для устройства управления термоэлементом. Нечеткая MISO-модель состоит из трех входных и одной выходной переменной. Методы построения нечетких систем рассмотрены в статьях [13-15]. Входами нечеткой модели являются значения температуры в зоне резания t, ^{O}C (от датчика температуры TMP36GZ, рис. 1), текущие параметры режима резания: подача S (мм/об) и скорость резания V (мм/с). Каждая из входных переменных имеет три функции принадлежности: t = [t_1; t_2; t_3]; S = [S_1; S_2; S_3]; V = [V_1;V_2; V_3] (рис. 3, а, б, в). Выходной переменной является значение силы тока I, (мА), передаваемого на термоэлемент Пельтье. Выходная переменная задается одиннадцатью синглотонами: I = [I_1; I_2; I_3; I_4; I_5; I_6; I_7; I_8; I_9; I_{10}; I_{11}].

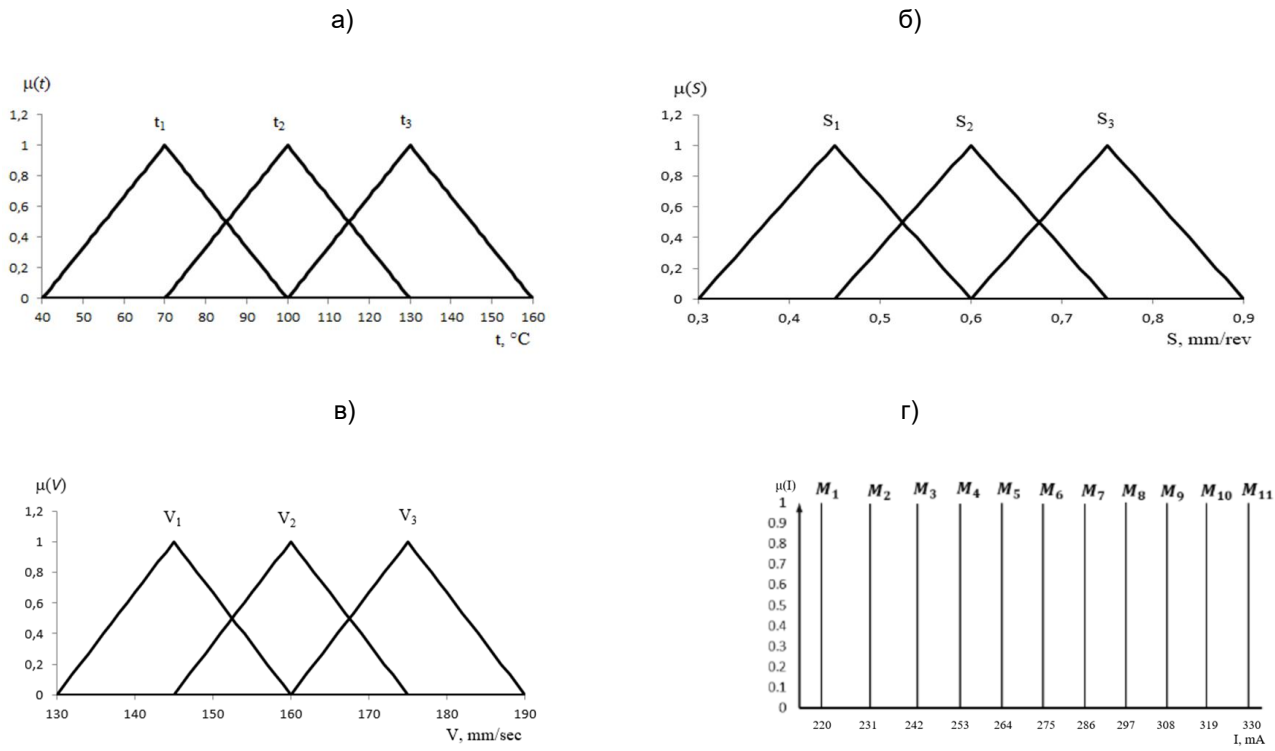


Рис. 3. Входные и выходные функции: (а) температура, (б) подача, (в) скорость резания, (г) сила тока

Fig. 3. Input and output functions: (a) temperature, (б) feed, (в) cutting speed, (г) amperage

Нечеткая математическая модель состоит из четырех шагов.

Шаг 1. Вычисление степеней функции принадлежности для входных переменных с использованием формулы:

$$f(x;a,b,c)=\begin{cases}0,\text{if}x\le a\vee c\le x;\\ \frac{x-a}{b-a},\text{if}a\le x\le b;\\ \frac{c-x}{c-b},\text{if}b\le x\le c,\end{cases} \quad (2)$$

где a, b, c – параметры функции принадлежности (вершины треугольника);

x – четкое значение входного параметра t, s или v на оси x (рис. 3 а, б, в).

Шаг 2. Расчет степеней истинности нечетких правил по формуле

$$N_i = \min(t_j, S_j, V_j), \quad (3)$$

где i=1..27, j=1..3.

Степень истинности определяется следующим образом (табл. 1).

Таблица 1

Формулы для вычисления степеней истинности нечетких правил

Table 1

Formulas for the truth degrees calculating of fuzzy rules

$N_1 = \min(t_1, S_1, V_1)$	$N_{10} = \min(t_2, S_1, V_1)$	$N_{19} = \min(t_3, S_1, V_1)$
$N_2 = \min(t_1, S_1, V_2)$	$N_{11} = \min(t_2, S_1, V_2)$	$N_{20} = \min(t_3, S_1, V_2)$
$N_3 = \min(t_1, S_1, V_3)$	$N_{12} = \min(t_2, S_1, V_3)$	$N_{21} = \min(t_3, S_1, V_3)$
$N_4 = \min(t_1, S_2, V_1)$	$N_{13} = \min(t_2, S_2, V_1)$	$N_{22} = \min(t_3, S_2, V_1)$
$N_5 = \min(t_1, S_2, V_2)$	$N_{14} = \min(t_2, S_2, V_2)$	$N_{23} = \min(t_3, S_2, V_2)$
$N_6 = \min(t_1, S_2, V_3)$	$N_{15} = \min(t_2, S_2, V_3)$	$N_{24} = \min(t_3, S_2, V_3)$
$N_7 = \min(t_1, S_3, V_1)$	$N_{16} = \min(t_2, S_3, V_1)$	$N_{25} = \min(t_3, S_3, V_1)$
$N_8 = \min(t_1, S_3, V_2)$	$N_{17} = \min(t_2, S_3, V_2)$	$N_{26} = \min(t_3, S_3, V_2)$
$N_9 = \min(t_1, S_3, V_3)$	$N_{18} = \min(t_2, S_3, V_3)$	$N_{27} = \min(t_3, S_3, V_3)$

Для того чтобы нечеткая модель имела аддитивность, необходимо использовать мягкие формулы для нахождения минимума (soft-min) по формуле

$$\text{soft} - \min(x_1, x_2) = \frac{x_1 + x_2 + \delta^2 - \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + \delta^2}}{2}, \text{где } \delta = 0{,}05. \quad (4)$$

При использовании жестких операций для нахождения минимума в нечеткой системе, когда одна из переменных в формуле (3) равна нулю, выход нечеткой модели будет равен нулю. В случае использования формулы soft-min (4) выходная нечеткая модель не будет равна нулю. Это обеспечивает свойство аддитивности любой нечеткой системы.

Схема расчета мягкого минимума показана на рис. 4а.

Шаг 3. Расчет уровней заключений каждого выходного значения по формуле

$$I_k = \max(N_{i1}, N_{i2}, N_{i3}), \quad (5)$$

где $k = 1 \ldots 11, i = 1 \ldots 27$.

В нашем случае степени возможности каждого выходного значения будут определяться по формулам, представленным в табл. 2.

Кроме того, для того, чтобы нечеткая модель имела аддитивность, необходимо использовать мягкие формулы для нахождения максимума (soft-max) по формуле

$$\text{soft} - \max(x_1, x_2) = \frac{x_1 + x_2 + \delta^2 + \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + \delta^2}}{2}, \quad (6)$$

где δ=0,05.

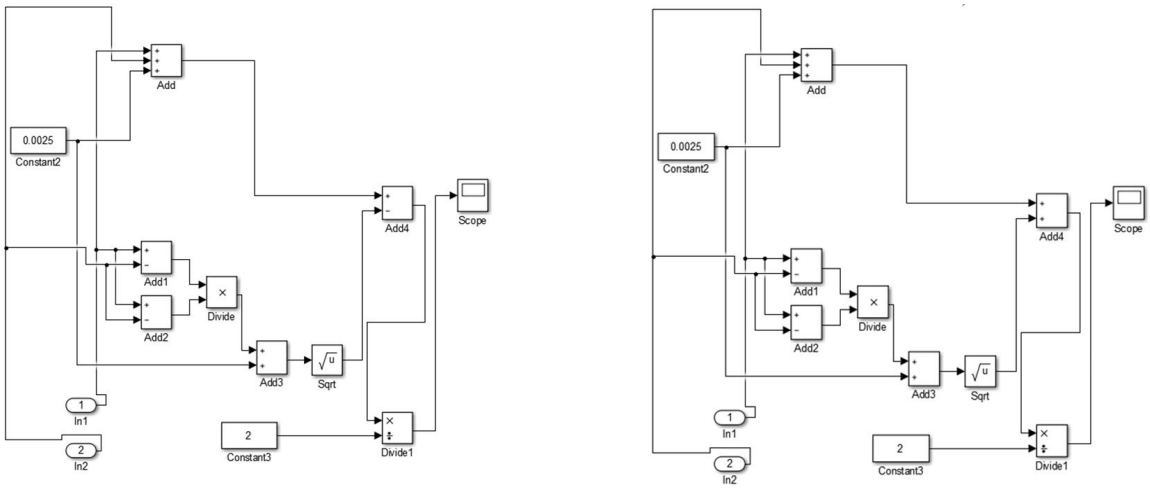


Рис. 4. Схемы мягких операторов: (а) мягкий минимум; (б) мягкий максимум

Fig. 4. Soft operator schemes: (а) soft minimum; (б) soft high

Таблица 2

Формулы для вычисления уровней заключений каждого выходного значения

Table 2

Formulas for calculating the conclusion levels of each output value

$I_1 = N_{27}$	$I_6 = \max(N_{12}; N_{14}; N_{16})$
$I_2 = \max(N_{24}; N_{26})$	$I_7 = \max(N_9; N_{11}; N_{13})$
$I_3 = \max(N_{21}; N_{23}; N_{25})$	$I_8 = \max(N_6; N_8; N_{10})$
$I_4 = \max(N_{18}; N_{20}; N_{22})$	$I_9 = \max(N_3; N_5; N_7)$
$I_5 = \max(N_{15}; N_{17}; N_{19})$	$I_{10} = \max(N_2; N_4)$
$I_{11} = N_1$	

Схема расчета мягкого максимума показана на рис. 4б.

Шаг 4. Расчет четкого значения тока, передаваемого на устройство преобразования ток-напряжение по формуле (1), производится следующим образом

$$I_f = \frac{\sum_{k=1}^{11} I_i M_i}{\sum_{k=1}^{11} I_i} = \frac{I_1 M_1 + I_2 M_2 + \ldots + I_{11} M_{11}}{I_1 + I_2 + \ldots + I_{11}}, \quad (7)$$

где M_i - метки одноэлементной функции принадлежности выходной переменной.

3. Результаты и их обсуждение

Экспериментальное параллельно-конвейерное устройство управления термоэлементом

Экспериментальное параллельно-конвейерное устройство управления термоэлементом показано на рис. 5. Нечеткая математическая модель управления термоэлементом, рассмотренная в разделе 2.3, и универсальная формула (1) для преобразования ток-напряжение, реализованы в ПЛИС Spartan 3E семейства Xilinx.

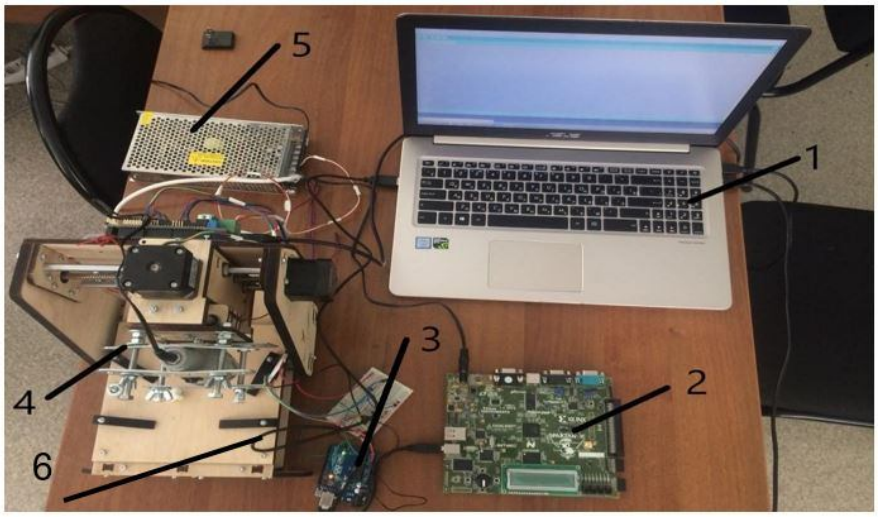
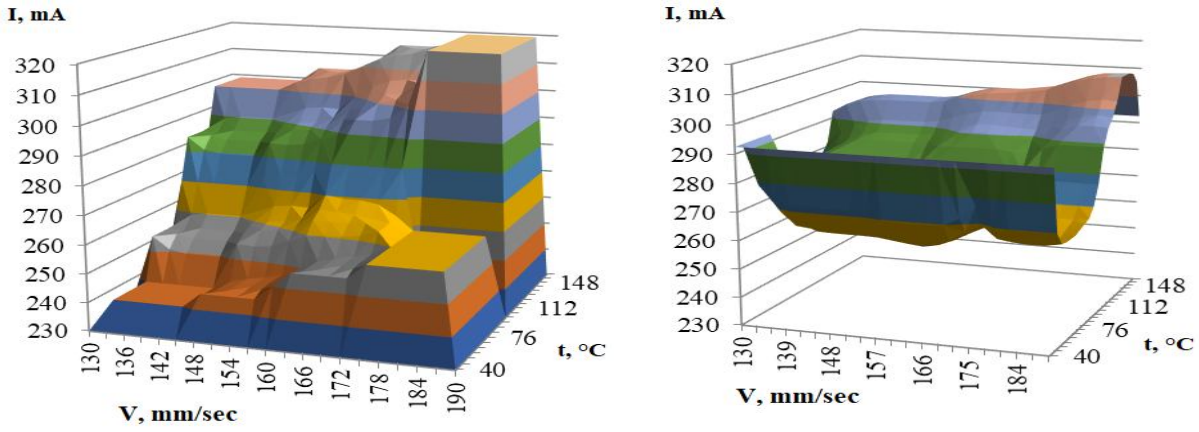


Рис. 5. Экспериментальное параллельно-конвейерное устройство управления термоэлементом в нечеткой системе управления охлаждением изделий: 1– ПК; 2 – ПЛИС; 3 – микроконтроллер; 4 – фрезерный станок, 5 – источник питания, 6 – термоэлемент

Fig. 5. Experimental parallel-conveyor thermoelement control device in fuzzy cooling control system of products: 1-PC; 2-FPGA; 3-microcontroller; 4-milling machine; 5-power supply; 6-thermoelement

Использование мягких операторов является отличительной особенностью нечеткой математической модели. В нашем случае, мягкие операторы используются для реализации 2 и 3 шагов в нечеткой модели в устройстве управления термоэлементом на основе генератора тока. На основе разработанной нечеткой математической модели был получен поверхностный отклик нечеткой выходной переменной с жесткими и мягкими операторами. Характеристики получены на выходе нечеткого устройства для вычисления тока, передаваемого на термоэлемент. Графическая интерпретация полученных характеристик показана на рис. 6.

Следует отметить, что при использовании жестких операторов (рис. 6а) в нечеткой модели управляющего термоэлементом имеются зоны нечувствительности. Когда переменная скорость резания V, имеющая значение 170..190, находится в зоне нечувствительности, нечеткая выходная переменная практически не реагирует на изменение входной переменной. Таким образом, нечеткая модель не является аддитивной. Такой проблемы нет, когда используются мягкие операторы. После этого была смоделирована работа устройства, рассмотренного в разделе 3.1. Первоначально была смоделирована работа устройства, показанного на рис. 2. На вход этого устройства поступает сигнал тока I_f. Этот сигнал в устройстве для контроля термоэлемента на основе генератора тока (рис. 1а) передается из блока 1а с блоком 2.



а) б)

Рис. 6. Графики моделирования поверхностного отклика нечеткой выходной переменной: а – с использованием жестких операторов; б – с использованием мягких операторов

Fig. 6. Graphs of modeling the surface response of a fuzzy output variable: (а) using hard operators; (б) using soft operators

Затем, для того чтобы передать управляющий сигнал на операционный усилитель (рис.1), сигнал тока I_f должен быть преобразован в сигнал напряжения Ures. Операция преобразования тока в напряжение выполняется в устройстве, описанном в разделе 2.1. Работа устройства преобразования тока в напряжение моделировалась в программе Matlab Simulink. Результат преобразования тока при значениях 230..330 мА в напряжение Ures 0..5 В показан на рис. 7. Таким образом, преобразованный сигнал тока I_f в сигнал напряжения Ures в блоке 2 (см. рис. 1) передается на вход операционного усилителя.

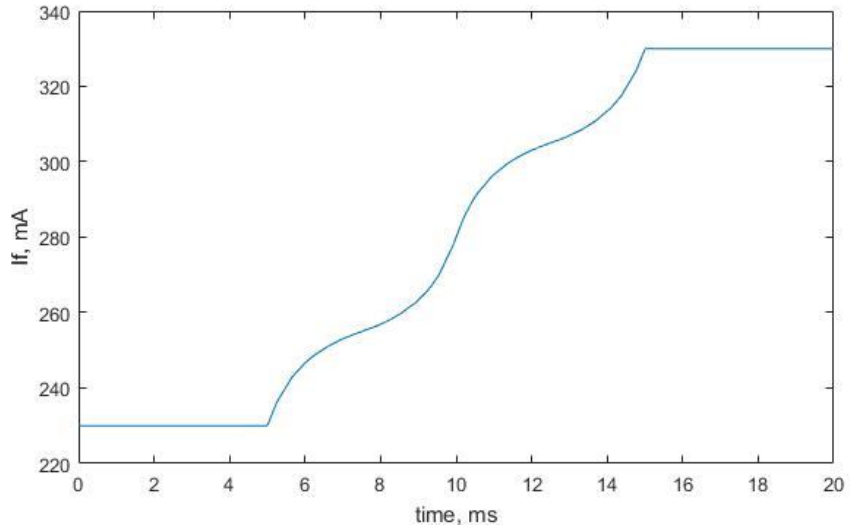


Рис. 7. Имитационное устройство для управления термоэлементом на основе генератора тока

Fig. 7. Simulation device for thermo element control based on a current generator

Временные тесты при частоте 50 МГц, выполненные в программной среде Modelsim, показали, что для вычисления величины силы тока I_f по формуле (7), подаваемого на устройство преобразования напряжения, составляет порядка 380 нс (рис. 8).

При использовании устройства преобразования напряжения временные тесты показали, что расчет напряжения $U_{\text{res}} U_{Res}$ осуществляется за 190 нс (рис.9).

Сравнение с известными моделями предложенного устройства представлено в табл. 3.

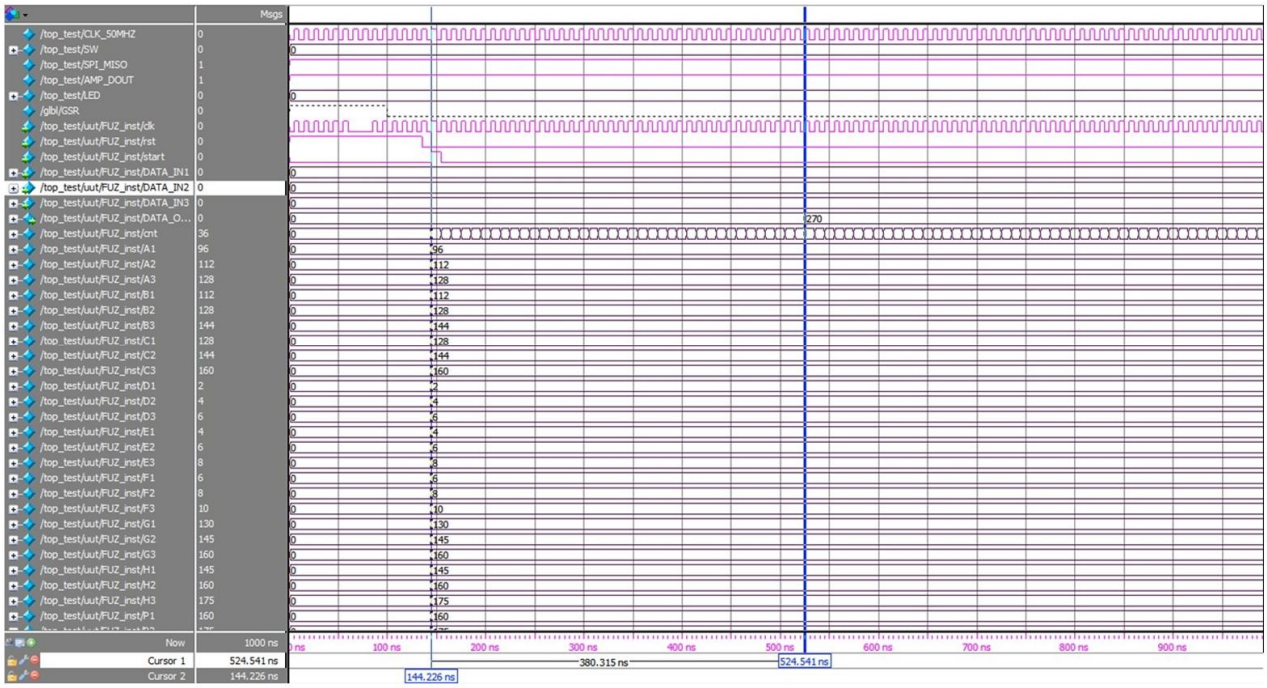


Рис.8. Диаграмма времени расчета величины I_f в устройстве преобразования напряжения

Fig.8. Time diagram of If value calculation in voltage conversion device

Таблица 3

Вычислительные характеристики устройств

Table 3

Computing characteristics of devices

Модель	Вычислитель, нс	Преобразователь, нс	Суммарное время, нс
[16]	–	–	5 390 070
[17]	–	–	20 000 000
[18]	–	–	10 000 000
Быстродействующий преобразователь	380	190	570

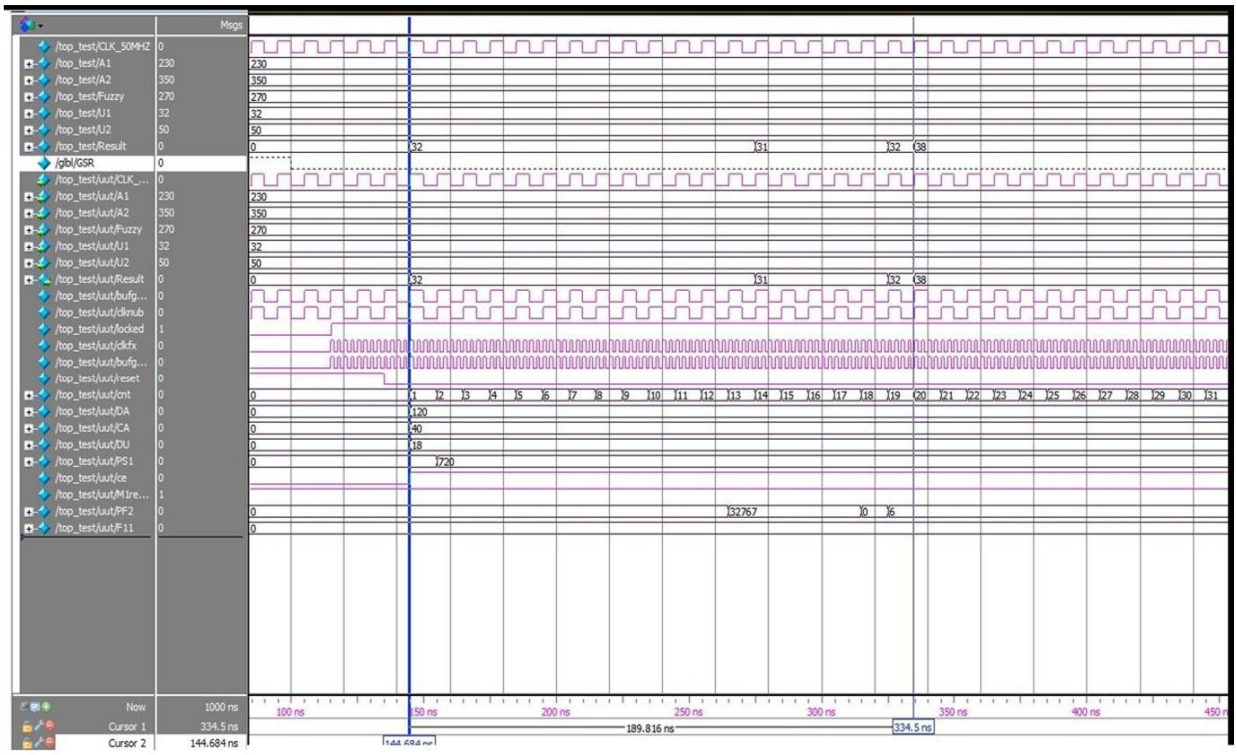


Рис.9. Диаграмма времени расчета величины Ures для устройства преобразования напряжения

Fig.9. Ures value calculation time diagram for voltage conversion device

Таким образом, в случае возникновения внешних воздействий, действующих при охлаждении изделий при обработке деталей на оборудовании с числовым программным управлением в режиме реального времени, за 570 нс будет принято решение о назначении новой величины силы тока.

Выводы

В статье представлено параллельно-конвейерное устройство управления термоэлементом. В ходе экспериментов было установлено, что данное устройство выдает управляющий сигнал в течение 570 нс.

В статье также представлена нечеткая математическая модель управления термоэлементом, которая вычисляет значение силы тока. Нечеткая MISO-модель состоит из трех входных и одной выходной переменной. В ходе моделирования установлено, что мягкие операторы, используемые в нечетком выводе, обеспечивают аддитивность нечеткой системы.

Список литературы

1. Liang M., Yeap T., Hermansyah A., Rahmati S. Fuzzy control of spindle torque for industrial CNC machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003. P. 1497–1508. doi:10.1016/s0890-6955(03)00166-4.

2. Mayr J. Thermal issues in machine tools // CIRP Annals Manufacturing Technology, 2012. P. 771–791. doi: 10.1016/j.cirp.2012.05.008.

3. Choudhury I. A., El-Baradie M. A. Machinability of nickel-base super alloys: a general review // Journal of Materials Processing Technology. 1998. P. 278-284. doi: 10.1016/S0924-0136(97)00429-9.

4. Rahman M., Seah W. K. H., Teo T. T. The machinability of inconel 718 // Journal of Materials Processing Technology, 1997. P. 199-204. doi: 10.1016/S0924-0136(96)02624-6.

5. Баева Л.Б. Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей на процесс обработки металлов резанием // Инновации в технологиях и образовании: сборник статей участников IX Международной научно-практической конференции. Курск, 2017. С. 32-34.

6. Лебединский К.В., Юнкин И.Я., Никишин А.В. Система подачи охлажденного ионизированного воздуха «INAIR» для охлаждения режущего инструмента // Разработка и внедрение ресурсосберегающих и импортозамещающих технологий и устройств: сборник статей VII Международной научно-практической конференции. Пермь, 2016. С. 80-84.

7. Кабак И.С., Суханова Н.В., Гаделев А.М. Применение нейронных сетей при диагностике состояния режущего инструмента // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2012. Т. 2, №4. С. 77-79.

8. Shrivastava Y., Singh B. Stable cutting zone prediction in CNC turning using adaptive signal processing technique merged with artificial neural network and multi-objective genetic algorithm // European Journal of Mechanics – A/Solids. 2018. P. 238–248. doi:10.1016/j.euromechsol.2018.03.009.

9. Титов В.С., Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Нечетко-логическая система управления стабилизацией процесса резания деталей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. №3. С. 54-58.

10. Бобырь М.В. Методы построения функций принадлежностей для нечетких баз знаний // Промышленные АСУ и контроллеры, 2011. №2. С. 27-32.

11. Титенко Е.А. Высокопроизводительные вычислительные системы на основе ПЛИС // Известия Юго-Западного государственного университета, 2012. № 4-2 (43). С. 73-77.

12. Мишин А.Б. Использование параллельно-конвейерной схемы вычислений при разработке аппаратно-ориентированного алгоритма фильтрации изображений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. Т. 20. №2 (65). С. 15-18.

13. Бобырь М.В., Кулабухов С.А., Милостная Н.А. Обучение нейро-нечеткой системы на основе метода разности площадей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 4. С. 15-26.

14. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A. A Method Of Defuzzification Based On The Approach Of Areas' Ratio // Applied Soft Computing. 2017. Vol. 59. P. 19-32.

15. Бобырь М.В., Милостная Н.А. Анализ использования мягких арифметических операций в структуре нечетко-логического вывода // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 7 (133). С. 7-15.

16. Karakuzu C., Karakaya F., Зavuşlu M. A. FPGA implementation of neuro-fuzzy system with improved PSO learning // Neural Networks. 2016. С. 128–140. doi:10.1016/j.neunet.2016.02.004.

17. Prathap J. A., Anandhi T.S., Sivakumaran T.S. Xilinx Spartan 3A DSP FPGA based DC Voltage Regulators for PV Systems // Materials Today: Proceedings. 2018. P. 1348–1358. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.221.

18. Karthigeyan P., Raja M. S., Kumar T. S., Ganesh S. S., Lavanya J. Simulation of Bidirectional DC-DC Converter Using FPGA // Procedia Computer Science, 2016. P. 708–714. doi:10.1016/j.procs.2016.03.093.

References

1. Liang M., Yeap T., Hermansyah A., Rahmati S. Fuzzy control of spindle torque for industrial CNC machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, pp. 1497–1508. doi:10.1016/s0890-6955(03)00166-4.

2. Mayr J. Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2012, pp. 771–791. doi: 10.1016/j.cirp.2012.05.008.

3. Choudhury I.A., El-Baradie M.A. Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, pp. 278-284. doi: 10.1016/S0924-0136(97)00429-9.

4. Rahman M., Seah W. K.H., Teo T.T. The machinability of inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, pp. 199-204. doi: 10.1016/S0924-0136(96)02624-6.

5. Baeva L.B. [The Influence of cooling fluids on the process of metal cutting]. *Sbornik statei uchastnikov IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: "Innovatsii v tekhnologiyakh i obrazovanii"* [Collection of articles of the IX International scientific and practical conference "Innovations in technology and education"]. Kursk, 2017, pp. 32-34 (In Russ.).

6. Lebedinsky K.V. Yunkin, I.Ya., Nikishin A.V. [The system of supply of cooled ionized air "suspended" for cooling of the cutting tool]. *Sbornik statei VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Razrabotka i vnedrenie resursosberegayushchikh i importozameshchayushchikh tekhnologii i ustroistv"* [Collection of articles in the VII International scientific and practical conference "Development and implementation of resource-saving and import-substituting technologies and devices"]. Perm, 2016, pp. 80-84 (In Russ.)

7. Cabak I.S., Sukhanova N.V., Gadelev A. M. Primenenie neironnykh setei pri iagnostike sostoyaniya rezhushchego instrumenta [The use of neural networks in the diagnosis of

the state of the cutting tool]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya Kabardino-Balkar State University,* 2012, vol. 2, no. 4, pp. 77-79 (In Russ.)

8. Shrivastava Y., Singh B. Stable cutting zone prediction in CNC turning using adaptive signal processing technique merged with artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 2018, pp. 238–248. doi:10.1016/j.euromechsol.2018.03.009.

9. Titov V.S., Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. Nechetko-logicheskaya sistema upravleniya stabilizatsiei protsessa rezaniya detalei [Fuzzy logical control system for stabilization of the cutting process of parts]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 3, pp. 54-58 (In Russ.)

10. Bobyr M.V. Metody postroeniya funktsii prinadlezhnostei dlya nechetkikh baz znanii [Methods of constructing accessory functions for fuzzy knowledge bases]. *Promyshlennye ASU i kontrollery = Industrial ACS and controllers*, 2011, no. 2, pp. 27-32 (In Russ.).

11. Titenko E.A. Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy na osnove PLIS [High-Performance computing systems based on FPGA]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2(43), pp. 73-77 (In Russ.)

12. Mishin A.B. Ispol'zovanie parallel'no-konveiernoi skhemy vychislenii pri razrabotke apparatno-orientirovannogo algoritma fil'tratsii izobrazhenii [The use of parallel-pipeline scheme of calculations in the development of hardware-oriented algorithm of image filtering]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, vol. 20, no. 2(65), pp. 15-18 (In Russ.).

13. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A., Milostnaya N.A. Obuchenie neiro-nechetkoi sistemy na osnove metoda raznosti ploshchadei [Training of neuro-fuzzy system based on the area difference method]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii = Artificial intelligence and decision-making,* 2016, no. 4, pp. 15-26 (In Russ.).

14. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio. *Applied soft computing*, 2017, vol. 59, pp. 19-32.

15. Bobyr M.V., Milostnaya N.A. Analiz ispol'zovaniya myagkikh arifmeticheskikh operatsii v strukture nechetko-logicheskogo vyvoda [Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy-logical inference]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of computer and information technologies,* 2015, no. 7 (133), pp. 7-15 (In Russ.).

16. Karakuzu C., Karakaya F., Зavuşlu M.A. FPGA implementation of neuro-fuzzy system with improved PSO learning. *Neural Networks*, 2016, pp. 128–140. doi: 10.1016/ j.neunet.2016.02.004.

17. Prathap J. A., Anandhi T.S., Sivakumaran T.S. Xilinx Spartan 3A DSP FPGA based DC Voltage Regulators for PV Systems. *Materials Today: Proceedings*, 2018, pp. 1348–1358. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.221.

18. Karthigeyan P., Raja M. S., Kumar T. S., Ganesh S. S., Lavanya J. Simulation of Bi-directional DC-DC Converter Using FPGA. *Procedia Computer Science*, 2016, pp. 708–714. doi:10.1016/j.procs.2016.03.093.

Информация об авторах / Information about the Authors

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Maksim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Милостная Наталья Анатольевна, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nat_mil@mail.ru

Natalia A. Milostnaya, Cand. of Sci. (Engineering), Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nat_mil@mail.ru

Алтухов Дмитрий Олегович, аспирант кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dimonalt93@mail.ru

Dmitrii O. Altukhov, Post-Graduate Student, Department of Computer Engineering, Southwest State University, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dimonalt93@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-161-174

CC BY 4.0

Алгоритм и устройство планирования расписания загрузки процессоров в мультипроцессорных системах

Д.Б. Борзов [1] ✉, В.С. Титов [1], Р.Г. Басов [1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: borzovdb@kursknet.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в разработке алгоритма и соответствующего устройства планирования расписания загрузки процессоров, обеспечивающего повышение производительности мультипроцессорных систем и снижение общей величины коммуникационной задержки.*

Методы. *Статья посвящена мультипроцессорным системам. Затрагивается вопрос составления плана загрузки процессоров в них. Предполагается применение так называемых систем реального времени, когда реакция на внештатную ситуацию должна быть «мгновенной». Например, это может быть отказ системы слежения в кабине пилота самолета, либо сбой датчика прицеливания, либо неполадки какого-либо характера на финансовых рыках страны (мира, континента) и т.п. Существующие методы реализации данной задачи используют, как правило, программные подходы, приводящие к длительному времени решения, вследствие чего снижается коэффициент готовности системы и ее производительность. Они не позволяют получить необходимую производительность и быстродействие. Поэтому в статье предложен алгоритм планирования расписания загрузки процессоров в мультипроцессорных системах. Отличительной особенностью работы является направленность на аппаратную реализацию. При этом применяются специально введенные в предложенном алгоритме матрицы времени, порядка и очередности.*

В работе предлагается структурная и функциональная схема специализированного устройства планирования загрузки процессоров мультипроцессорной системы. Данное устройство возможно применять как специализированный дополнительный акселератор, который подключается к параллельному порту вычислительной машины специализированной мультипроцессорной системы. В данном случае разработанный акселератор выполняет все функции вычислений разработанного алгоритма. Это позволит снизить нагрузку на всю вычислительную систему и уменьшить этим суммарную нагрузку, повышая производительность. Так же предложена структурная и функциональная схемема устройства планирования расписания загрузки. С его помощью возможно построить зависимости изменения соответствующей временной и аппаратной сложности.

Результаты. *Анализируя зависимости изменения аппаратной сложности устройства от количества процессоров, можно сделать следующие выводы. Время работы устройства имеет экспоненциальную зависимость при росте количества процессоров. Так как имееет место экспоненциальный рост времени числа вариантов загрузки процессоров, то можно сделать вывод о преимуществе аппаратной реализации алгоритма планирования.*

Заключение. *Представленный алгоритм и устройство планирования загрузки процессоров позволяет сделать вывод о потенциальной возможности повышения скорости составления плана загрузки. Это помогает уменьшить суммарное значение коммуникационной задержки и одновременного увеличения производительности мультипроцессорных систем.*

© Борзов Д.Б., Титов В.С., Басов Р.Г., 2019

Ключевые слова: *алгоритм; план; загрузка; процессор; мультипроцессорная система; расписание.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Борзов Д.Б., Титов В.С., Басов Р.Г. Алгоритм и устройство планирования расписания загрузки процессоров в мультипроцессорных системах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 161-174. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-161-174.

Статья поступила в редакцию 03.06.2019

Статья подписана в печать 17.07.2019

Статья опубликована 25.10.2019

Algorithm and Planning Device for CPU Loading in Multiprocessor Systems

Dmitriy B. Borzov [1] ✉, Vitaliy S. Titov [1], Rodion G. Basov [1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: borzovdb@kursknet.ru

Резюме

Perpose of research. *The task of compiling a plan for loading processors in multiprocessor systems of citical purpose (tracking, observation, aiming, atomic and financial systems) is discussed. Modern algorithms implement the problem mainly programmatically and are unacceptable for the considered class of systems because of the long solution time, which leads to a decrease in its availability and a corresponding decrease in performance. Existing approches, as a rule, short-term planning are often focused on the rapid response of ongoing processes, which also does not allaw to achieve the required performance. As a result, the article proposes an algorithm for scheduling the loading of processors in multiprocessor systems, focused on hardware implementation, using the additionally introduced matrices of time, order and order.*

Methods. *The article proposes e block diagram and a functional diagram of a specialized devicy for planning the loading of processors of o multiprocessor system. A distinctive feature is the use of the developod dovice as an additional acceleretor connected to the parallel port of the computer. The proposod device in this case performs all the calculated functions of the proposed algarithm, thereby reducing the main load on the computing system, thereby reducing the total load. A structural and functional diagram of the device for scheduling a loading schedule is given, which allows the construction of corresponding time diagrams of temporary and hardware complexity.*

Results*. From the analysis of the graphs of the dependence of the increase in the hardware complexity of the device on the number of processors, an exponential increase in the operating time of the device, dypynding on the number of procyssors, follows. Due to the exponential growth in the number of processor loading options, the hardware implementation of the scheduling algorithm shows an advantage.*

Conclusion. *With thy hylp of the proposyd algorithm and dyvice for planning processor loading, it is possible to increase the speed of load compilation, decrease the total amount of communication dolaay and increase the total performance of multiprocessor systems.*

Keywords: *algorithm; plan; load; processor; multiprocessing system; schedule.*

Conflict of interest. *The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Borzov D. B., Titov V. S., Basov R.G. Algorithm and Planning Device for CPU Loading in Multiprocessor Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 161-174 (In Russ.). https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2019-23-5-161-174.

Received 03.06.2019

Accepted 17.07.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

Быстродействие и трудоемкость (программ, подпрограмм, алгоритмов) потенциально могут увеличиваться [1]. Особенно это относится к «сложным» системам, к которым можно отнести системы, за которыми закреплены функции оперативной реакции на исполнительное устройство со стороны ведущей ЭВМ (хост-процессора). Например, это может быть кабина пилота самолета и датчик прицеливания (слежения) за целью. В них требуется постоянный контроль, а также наблюдение за уровнем быстродействия и производительности всей мультипроцессорной системы [2-4]. Данный вопрос решается в основном программным путем. Такой подход не позволяет достигать требуемого для критических систем уровня производительности [5–8]. Также требуется постоянный контроль за присутствием задач и их очередей на процессорах мультипроцессорных систем.

Важным вопросом для систем реального времени и критических систем является нахождение задач и их очередей на отдельных процессорах мультипроцессорных систем. Дополнительным требованием является отсутствие взаимодействия назначаемых задач по данным и управлению [8-10].

Эти вопросы могут быть решены на основе методов теорий расписаний, очередей и планирования загрузки процессоров [9-11].

Материалы и методы

Пусть требуется выполнить множество $N = \{1, 2, \ldots, n\}$ заданий (данных, алгоритмов, подпрограмм) $i \in N$ и $j \in N\,(\mathrm{i} \neq \mathrm{j})$. Параметру j поставим в соответствие значения *p, r* и *D*. Значение *p* означает время $\left(p_j > 0\right)$ исполнения операции *j* и ее длительность. При этом *j* задает время $\left(r_j \geq 0\right)$ поступления на процессор p_j и максимальную длительность выполнения $\left(D_j > 0\right)$. В данном случае ограничением является отсутствие внутреннего или внешнего прерывания.

Тогда, для любого требования $j \in N$ необходимо определить как время S_j начала выполнения задания, так и время C_j окончания его выполнения. Тогда $C_j = S_j + p_j$. Предположим, S_i – это время начала другого задания ($i \in N$,

$i \neq j$). Получаем, что если $S_j < S_i$, то, следовательно, $S_j + p_j \leq S_i$. В задачах планирования, как и в задачах теории расписаний время будем определять в условных единицах, таких, как секунды, минуты и т.д.

Очевидно, что в системах критического характера, как и в реальных мультипроцессорных системах расписание обязано быть оптимальным. Следовательно, $D_j = +\infty$ при $j = 1.2....,n$. Предположим, что t_j – это время исполнения некоторого задания *j*.

Тогда, требуется построить расписание такое, что:

$$\sum_{j=1}^{n} t_j \to \min. \quad (1)$$

Допустим $c_{ij} = |\tau_i - \tau_j|$, где $c_{ij} \geq 0$ является фактической разницей во времени исполнения операции n_i и n_j. Назовем эту разницу расстоянием. Тогда матрица расстояний будет выглядеть как $C = (\mathrm{c}_{ij})_{n \times n}$.

Непересекающиеся подмножества множества N отвечают условию:

$$\bigcup_{i=1}^{k} S_i = N,$$

где k – это требование, предъявляемое к заданию *N*.

Разобьем множество *N* на непересекающиеся подмножества S_1, S^2, ... S_k $k \geq 2$ так, что

$$S_i \bigcap S_j = \varnothing, i \neq j,\ i = j = 1,2,...,k,$$

где $0 < n_{\min} \leq |\mathrm{S}_i| \leq \mathrm{n}_{\max},\ i = 1,2,....,k.$

Число подмножеств k ограничено условиями:

$$k \times n_{\min} \leq n \leq k \times n_{\max}.$$

Для всех разбиений $\mathrm{S}=(\mathrm{S}_1, \mathrm{S}^2, ... \mathrm{S}_\mathrm{k})$ и для оценки качества разбиения справедливо значение функции $\varphi(\mathrm{S}) = \varphi(\mathrm{S}_1, \mathrm{S}_2, ..., \mathrm{S}_k)$. Необходимо найти разбиение $S^0 = S_1^0, S_2^0, ..., S_k^0$ так, что

$$\varphi(\mathrm{S}^0) = \min_s \varphi(\mathrm{s}). \quad (2)$$

Функция $g_P(\mathrm{S}_i) \in \mathrm{S}_i$ описывает различие между данными для распределения, а $\varphi_P(S)$ при фиксированном значении p будет равна $\varphi_P(\mathrm{S}_1, \mathrm{S}_2, ..., \mathrm{S}_k) = \max_{l \leq j \leq k} g_P(\mathrm{S}_i)$.

Дополнительно введем матрицу времени Time:

$$\mathrm{Time} = \left\| \mathrm{Time}_{ij} \right\|, \quad (3)$$

где $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$, $m = n$. В Time, в столбцах располагают процессоры P_{ij} мультипроцессорной критической системы, а строкам соответствуют номера задач, расположенные по возрастанию соответствующих номеров $(1,2,\ldots,m)$. Тогда, на пересечении строк и столбцов представляются предполагаемые времена выполнения каждой задачи *n*.

Ситуацию выполнения (невыполнения) заданий на множестве задач $\{\mathrm{N}_{nm}\}$ предлагается сохранять в матрице порядка exec:

$$\mathrm{Exec} = \left\| \mathrm{Exec}_{ij} \right\|, \quad (4)$$

где $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$, $m = n$.

В матрице порядка Exec вершины столбцов обозначают процессоры P_{ij} мультипроцессорной системы, а в строках отложены задачи, подлежащие выполнению в порядке возрастания номеров. Значение «Единица» ставится в том случае, если задача выполнена.

Отслеживание очереди выполнения задач предлагается хранить в соответствующей матрице очередности Q_i ($i=\overline{1,m}$):

$$Q=\|Q_{ij}\|, \quad (5)$$

где $i=\overline{1,m}$, $j=\overline{1,n}$, $m=n$. В Q показана очередь выполнения задач N_i. В соответствующих столбцах хранятся процессоры P_{ij} мультипроцессорной системы, а в строках – задачи, назначенные для выполнения. Порядок расположения номеров процессоров предлагается по неубыванию.

В статье представляется метод конвейерного планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах. Идея метода основана на использовании (1), (2) с дополнительным применением (3)-(5). Задачи (подзадачи, программы, алгоритмы, файлы и т.д.) предполагается планировать для выполнения на процессоры мультипроцессорной системы конвейерно. Предполагается отсутствие учета связей с другими операторами, ожидающими выполнения.

Метод планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах определяется этапами [12,13]:

1. Постановка задачи в очередь загрузки процессора.

2. Анализ выполнения задач в процессорах мультипроцессорной системы или отсутствие очереди их загрузки.

3. Если $\|Exec\|=1$, то план загрузки процессоров составлен, иначе п. 1.

На время и порядок выполнения операций процессорами накладываются следующие ограничения:

– введено антирефлексивное, антисимметричное и транзитивное отношение следования операций $v \subseteq Z \times Z$, определяющее допустимый порядок реализации операций;

– потребуем, чтобы выполнялось следующее условие: $\forall z_a \in Z(p_i)$, $z_b \in Z(p_i)$, $a \neq b : z_a \vee z_b \vee z_b \vee z_a$ (любая пара операций, назначенных на процессор p_i, выполняется в заданном порядке v).

Общая длительность всех операций вычисляется по формуле $t_{ij}=\sum_{j=1}^{C_j} t_{ij}$.

Первоначально, независимые по данным и управлению операторы, подлежащие выполнению в мультипроцессорной системе, передаются на процессоры для дальнейшего составления плана загрузки.

На следующих шагах проверяется наличие единиц в матрице Exec, матрице Q. При этом, анализируется матрица Exec: если ее элементы равны единице, то процесс составления плана завершается. Если нет, то выполняется возврат к первому шагу для повторного планирования.

Результаты и их обсуждение

На основе предложенного подхода разработан алгоритм планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах.

ProcNum, ProcNumQ = 1.

Если $\mathrm{Time}\left(\mathrm{ProcNum},\mathrm{P_j}\right)=1$, то п.3, иначе п. 5.

Если $\mathrm{Exec}\left(\mathrm{ProcNum},\mathrm{P_j}\right)=0$, то п. 4, иначе п. 13

Temp = 1.

Если $\mathrm{Q}\left(\mathrm{ProcNumQ},\mathrm{Temp}\right)=1$, то п. 6, иначе п. 7.

Temp = Temp + 1 и п. 5.

$\mathrm{Q}\left(\mathrm{ProcNumQ},\mathrm{Temp}\right)=Z_i$.

$\mathrm{Time}\left(\mathrm{ProcNumQ},\mathrm{P_j}\right)=Z_i$.

Temp =1.

ProcNumQ = 1.

j = j + 1.

Если $\mathrm{P_j}>\mathrm{nm}$, то конец алгоритма, иначе п. 2.

ProcNum=ProcNum+1.

Если $\mathrm{ProcNum_j}>\mathrm{n_{nm}}$, то конец алгоритма, иначе п. 3.

Первоначально анализируется наличие в матрице Time заданий. В случае их присутствия, на следующем шаге проверяется матрица Exec и если $\mathrm{Exec}\neq\varnothing$, то присутствует задача для постановки в очередь. Для этого в Q выполняется поиск свободной ячейки. Задача ставится в очередь загрузки процессоров. Одновременно выполняется фиксация этого факта в Time. Таким образом, циклически анализируются все строки матрицы задач Time.

На основе предложенного метода и алгоритма планирования загрузки процессоров предложена структурная схема соответствующего устройства (рис. 1) [19,20].

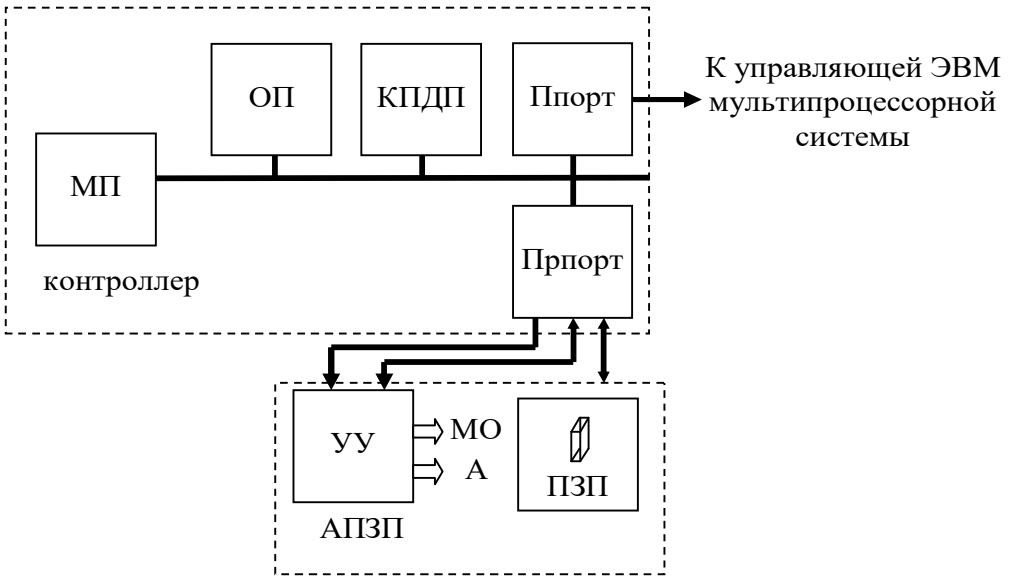


Рис. 1. Структурная схема устройства планирования загрузки процессоров

Fig. 1. Block diagram of CPU planner loading device

Для элементов, представленных на рис. 1, приняты сокращения: блок акселератора планирования загрузки процессоров (АПЗП), блок планирования загрузки процессоров (ПЗП), блок устройства управления (УУ), микропроцессор (МП), основная память (ОП), блок контроллера прямого доступа в память (КПДП), последовательный порт (Ппорт), параллельный порт (Прпорт), микрооперация (МО), адрес ячейки памяти (А).

Согласно предложенному методу и алгоритму планирования загрузки процессоров устройство выполняет составление плана загрузки по предложенному алгоритму. Соответственно блок ПЗП включает в себя устройство, подключенное к параллельному порту ЭВМ.

КПДП процессора извлекает МО предложенного алгоритма из ОП процессора и передает их для исполнения в АПЗП. АПЗП состоит из следующих функциональных блоков: блок планирования загрузки процессов (ПЗП) и устройство управления (УУ). Данные с Прпорт поступают в блок специализированного мультиплексора АПЗП.

После окончания составления плана загрузки через параллельный порт происходит передача результата работы блока АПЗП в контроллер. Далее, по необходимости, результат запоминается в памяти ОП либо через последовательный порт Ппорт передается к управляющей ЭВМ мультипроцессорной системы. После этого, управляющая ЭВМ принимает решение о дальнейших действиях мультипроцессорной системы.

Структурная схема устройства планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах представлена на рис. 2 [19,20].

На рис. 2 основные блоки устройства означают: УВП – устройство выявления параллелизма; П – процессор; ОП – оперативная память; TIME – матрица времени; Exec – матрица порядка; Q – матрица очередности.

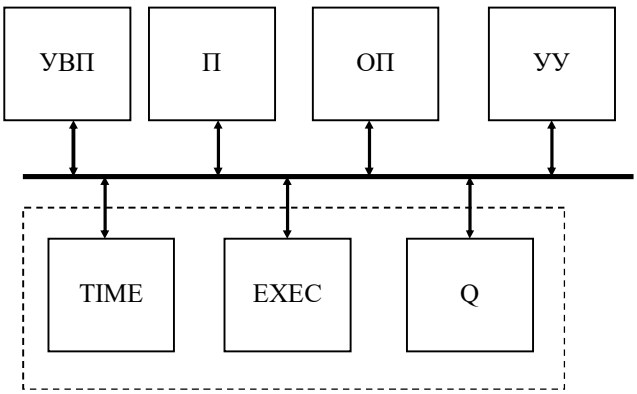


Рис. 2. Структурная схема устройства планирования загрузки процессоров

Fig. 2. Block diagram of CPU planner loading device

Предложенное устройство функционирует следующим образом: по команде процессора П через устройство управления УУ выдается команда устройству планирования выполнить процедуру составления плана загрузки с помощью предложенного в статье алгоритма. Для этого используются матрицы TIME, Exec и Q.

В соответствии со структурной организацией устройства составления плана загрузки процессоров (см. рис. 1,2) разработана его функциональная организация (рис. 3) [19,20].

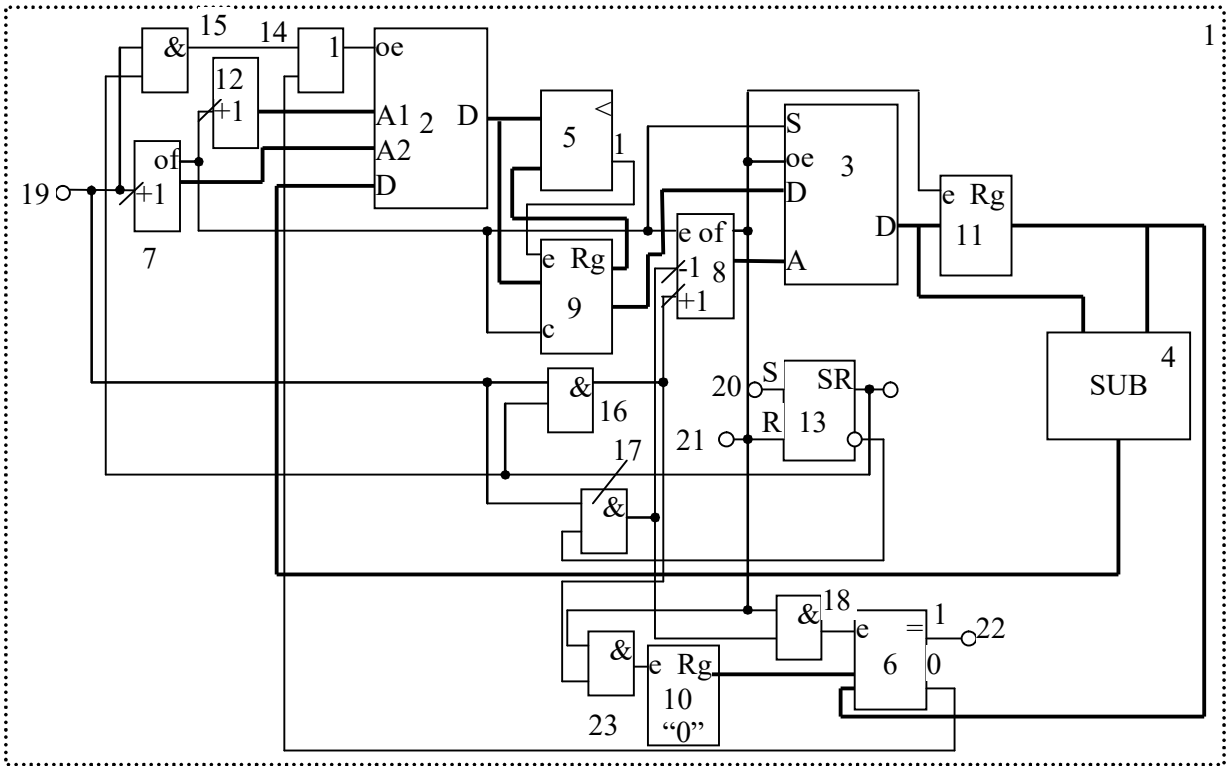


Рис. 3. Устройство планирования загрузки процессоров

Fig. 3. CPU planner loading device

На рис. 3 блок 2 моделирует ОЗУ, необходимое для моделирования очередей, каждая из которых содержит наборы заданий, предназначенных для выполнения на процессорах мультипроцессорной системы. К примеру, ситуация $\begin{matrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \\ A_1 & A_1 & A_1 & A_4 \end{matrix}$, где p_1 означает процессор, а A_1 – означает, что на процессор p_1 назначено задание A_1; промежуточное ОЗУ (блок 3 на рис. 3) моделирует временное содержание очередей заданий; вычитатель 4 и элемент сравнения 5 необходимы для накопления суммарного минимума; элемент 6 сравнения поиска минимального значения загрузки необходим для поиска минимального кода, а соответствующий счетчик 7 адреса – для накопления адресов памяти ОЗУ 2; реверсивный счетчик 8 содержит в себе адреса ячеек ОЗУ 3; первый 9 регистр минимума предна-

значен для хранения текущего минимального значения кода загрузки; регистр 10 хранит в себе код нуля; второй регистр минимума 11 накапливает минимальный код загрузки; счетчик 12 накапливает коды очередей загрузки. Например, распределение заданий

$$\begin{matrix} p_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ A_1 & A_2 & A_3 & A_4 \\ A_5 & A_6 & A_7 & A_8 \end{matrix}$$

означает, что на первом этапе будут выполняться параллельно задания A_1 A_2 A_3 A_4, а на втором этапе – A_5 A_6 A_7 A_8; триггер 13 выбирает режим работы предложенного устройства.

При подсчете временных характеристик предложенного устройства было учтено быстродействие его внутренних модулей согласно схемотехнической серии 1533. Проводился анализ времени поступления сигнала с входа на выход каждого схемотехнического элемента схемы. Выполнено суммирование всех полученных временных параметров устройства и сопоставлено с ростом возможного количества процессоров мультипроцессорной системы. В результате, получена зависимость изменения скорости его работы от увеличения внутренних процессорных модулей (рис. 4) [19,20].

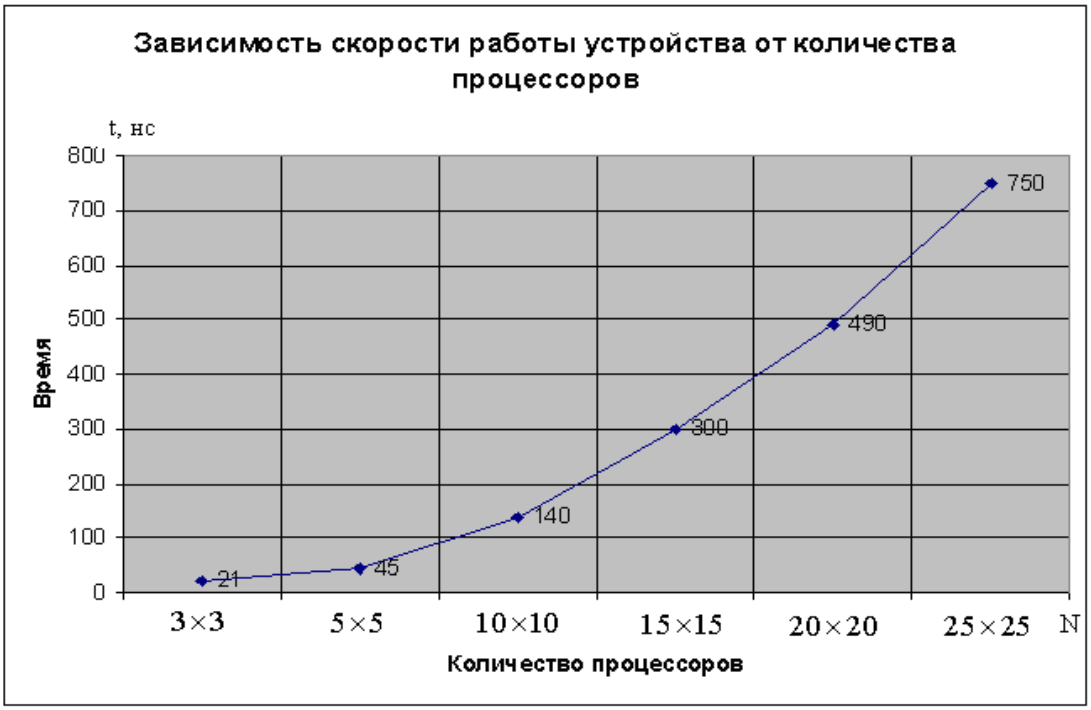


Рис. 4. Зависимость изменения времени работы устройства от количества процессоров

Fig. 4. Device's working time dependence on CPU quantity

Из анализа графика (рис. 4) следует, что скорость работы устройства планирования загрузки процессоров увеличивается экспоненциально с ростом количества процессоров мультипроцессорной системы, т.е. с ростом размера очереди загрузки.

При оценке аппаратной сложности устройства планирования загрузки процессоров использовалось представление его элементов (см. рис. 3) в виде эквивалентных вентилей (элемент И) [20].

Зависимость роста аппаратной сложности в зависимости от объема решаемой задачи.

В результате можно построить зависимость роста аппаратной сложности устройства с учетом увеличения внутреннего количества процессоров мультипроцессорной системы (рис. 5).

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 5, можно сделать вывод, что для работы устройства в случае тридцати процессоров требуется 960 эквивалентных вентилей. В случае роста количества обрабатываемых операторов (размера задачи) прогнозируется приемлемый рост скорости работы устройства и аппаратных затрат.

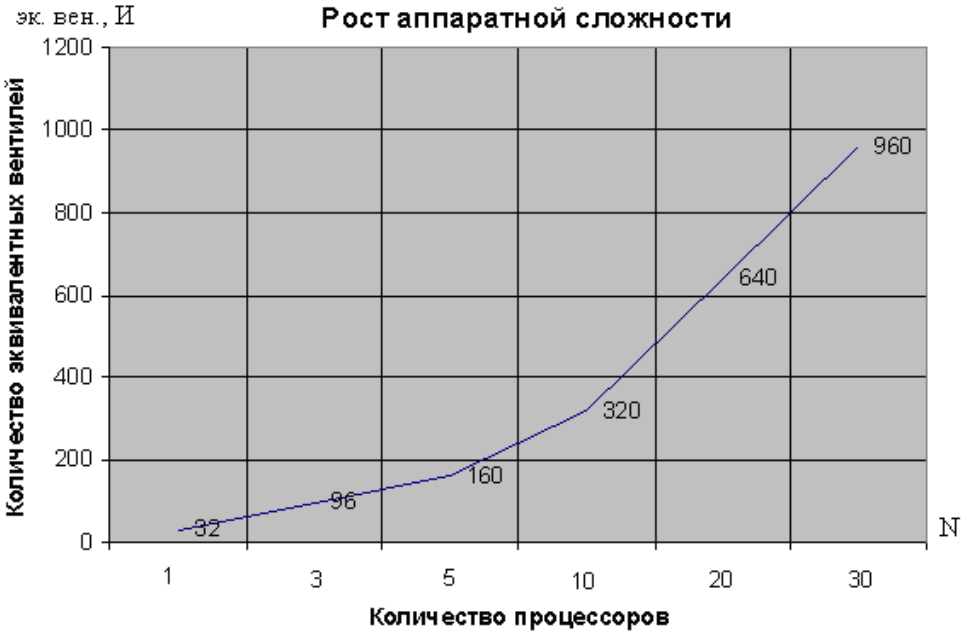


Рис. 5. График зависимости роста аппаратной сложности устройств от количества процессоров

Fig. 5. Graph of hardware complexity growth of devices on CPU quantity

Анализ графиков (см. рис. 4,5) показывает, что при составлении плана топологии для операторов программ малого порядка (менее 500) предложенный метод при сравнении с аналогичной программной реализацией не демонстрирует выигрыша.

При прогнозировании предложенных зависимостей (см. рис. 4, 5) можно сделать вывод о преимуществе аппаратной реализации в связи с увеличением количества вариантов назначения очередного оператора на процессорные модули мультипроцессорной системы.

Выводы

В результате сделан вывод о возможности увеличения скорости реше-

ния задачи составления плана загрузки, уменьшения общей величины коммуникационной задержки и повышения суммарной производительности вычислительных систем с помощью предложенного алгоритма и устройства планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах критического назначения.

Список литературы

1. Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений. М.: Бином, 2007.

2. Воеводин В.В. Вычислительная математика и структура алгоритмов. М.: МГУ, 2006.

3. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ– Петербург, 2002. 608 с.

4. Богданов А.В., Станкова Е.Н., Мареев В.В., Корхов В.В. Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем. 2-е изд., М., 2016. 135 с.

5. Новиков Ю.В., Скоробогатов П.К. Основы микропроцессорной техники. М.: Бином, 2009. 357 с.

6. Yu-Kwong Kwok and Lap-Sun Cheung. A new fuzzy-decision based load balancing system for distributed object computing // Journal of Parallel and Distributed Computing. 2004. № 64. P. 238-253.

7. Zhang L., Wong T.N. Solving integrated process planning and scheduling problem with constructive meta-heuristics. Inf. Sci. 2016, 340–341, 1–16.

8. Zhang S., Wong T.N. Integrated process planning and scheduling: An enhanced ant colony optimization heuristic with parameter tuning // J. Intell. Manuf. 2014. № 29. С. 1–17.

9. Борзов Д.Б., Ткачев П.Ю. Метод распараллеливания циклов со счетчиком // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. №2. С. 104–108.

10. Математическая модель выявления независимых параллельных участков последовательных программ / Д.Б. Борзов, С.А. Дюбрюкс, В.С. Титов, С.В. Прилуцкий // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2009. №12. С. 37-41.

11. Борзов Д.Б., Борисенко Ю.В., Сизов А.С. Метод и аппаратно-ориентированный алгоритм переразмещения подпрограмм в мультикомпьютерах при отказе процессоров и связей между ними // Телекоммуникации. 2013. №11. С. 45-48.

12. Таненбаум Э. Архитектура компьютеров. СПб.: Питер, 2007. 848 с.

13. Цилькер Б.Я., Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем. СПб.: Питер, 2006. 668 с.

14. Гусева А.И. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. М.: Academia, 2016. 640 с.

15. Андон Ф. И., Кукса А. И., Поляченко Б. Е. Об оптимальном планировании процесса обработки на ЭВМ взаимосвязанных задач // Кибернетика. 1980. Я. 3. С. 51–53.

16. Blazewicz J., Ecker K., Pesch E., Schm idt G., Weglarz J. Handbook on Scheduling: From Theory to Applications. Series: International Handbooks on Information Systems, Springer. Berlin, Germany, 2007, 647 p.

17. Борзов Д.Б., Масюков И.И. Планирование загрузки процессоров в мультипроцессорных системах критического назначения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. №6 (81). С. 168-175. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-6-168-175.

18. Борзов Д.Б., Басов Р.Г. Алгоритм планирования загрузки процессоров в мультипроцессорных системах // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции. Донецк, 2018. Т.1. С. 37-39.

19. Кулачев А.П. Методы и средства анализа данных в среде Windows. STADIA 6.0. М.: Информатика и компьютеры, 2006. 270 с.

20. Лобанов В.И. Азбука разработчика цифровых устройств. М.: Горячая линия - Телеком, 2001. 192 с.

References

1. Gergel V.P. *Teoriya i praktika parllel'nykh vychislenii* [Theory and practice of parallel computing]. Moscow, 2007 (In Russ.).

2. Voevodin V.V. *Vychislitl'naya matematika i struktura algoritmov* [Computationol Mathemetics and Algorithm Structure]. Moscow, MGU Publ., 2006 (In Russ.).

3. Voevodin V.V., Voevodin Vl.V. *Parallel'nye vychisleniya* [Parallel computations]. S.-Petersburg, BHV– Petersburg Publ., 2002, 608 p. (In Russ.).

4. Bogdanov A.V., Stenkova E.N., Mareev V.V., Korkhov V.V. *Arkhitektury i topologii mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh sistem* [Architecture and topology of multiprocessor computing systems]. Moscow, 2016, 135 p. (In Russ.).

5. Novikov Yu.V., Skorobogatov P.K. *Osnovy mikroprotsessornoi tekhniki* [Basics of microprocessor technology]. Moscow, 2008, 357 p. (In Russ.).

6. Yu-Kwong Kwok and Lap-Sun Cheung. A new fuzzy-decision-based balencing system for distributed object computing. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2004, no. 64, pp. 238-253.

7. Zhang L., Wong T.N. Solving integrated process planning and scheduling problem with constructive meta-heuristics. *Inf. Sci*. 2016, 340–341, pp. 1–16.

8. Zhang S., Wong T.N. Integrated process planning and scheduling: An enhanced ant colony optimization heuristic with parameter tuning. J. Intell. Manuf. 2014, no. 29, pp. 1–17.

9. Borzov D. B., Tkachev P. Yu. Metod rasparallelivaniya tsiklov so schetchikom [Method of parallelization of cycles with a counter]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering,* 2015, vol. 58, no. 2, pp. 104-108 (In Russ.).

10. Borzov D. B., Dubrux S. A., Titov V. S., Prilutsky S. V. Matematicheskaya model' vyyavleniya nezavisimykh parallel'nykh uchastkov po-sledovatel'nykh programm [Mathematical model of identification of independent parallel sections of investigative programs]. *Neirokomp'yutery: razrabotka, primenenie = Neurocomputers: development, application*, 2009, no. 12, pp. 37-41 (In Russ.).

11. Borzov D. B., Borisenko Yu. V., Sizov A. S. Metod i apparaatno-orientirovannyi algoritm pererazmeshcheniya podprogramm v mul'tikomp'yuterakh pri otkaze protsessorov i svyazei mezhdu nimi [Method and apparatus-oriented algorithm of subroutines re-placement in multicomputers at failure of processors and connections between them]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2013, no. 11, pp. 45-48 (In Russ.).

12. Tanenbaum E. *Arkhitetura komp'yuterov* [Computer architecture] . S.-Petersburg, Peter Publ., 2007, 848 p. (In Russ.).

13. Tsilker B.Ya., Orlov S.A. *Organizatsiya EVM i sistem* [Organization of computers and systems]. S.-Petersburg, Peter Publ., 2006. 668 p. (In Russ.).

14. Guseva A.I. *Vychislitel'nye sistemy, seti i telekommunikatsii* [Computing Systems, Networks and Telecommunications]. Moscow, Academia Publ., 2016, 640 p. (In Russ.).

15. Andon F. I., Kuksa A. I., Polyachenko B.E. Ob optimal'nom planirovanii protsessa obrabotki na EVM vzaimosvyaannykh zadach [On optimal planning of the process of processing on a computer of interreleted tasks]. *Kibernetika = Cybernetics*, 1980, Ya. 3, pp. 51–53 (In Russ.).

16. Blazewicz J., Ecker K., Pesch E., Schm idt G., Weglarz J. Handbook on Scheduling: From Theory to Applications. Series: International Handbooks on Information Systems. Springer. Berlin, Germany, 2007, 647 p.

17. Borzov D.B., Masyukov I.I. Planirovanie zagruzki protsessorov v mul'tiprotsessornykh sistemakh kritichekogo naznacheniya [Scheduling CPU utilization in critical multiprocessor systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 6 (81), pp. 168-175 (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-6-168-175.

18. Borzov D.B., Basov R.G. [Algorithm for scheduling processor loads in multiprocessor systems]. "*Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka*". *Sbornik trudov XXV*

Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii ["Engineering and technosphere of tho XXI century." Collection of works of the XXV International Scientific and Technical Conference]. Donetsk, 2018, vol. 1, pp. 37-39 (In Russ.).

19. Kulachev A.P. *Metody i sredstva analiza dannykh v srede Windows. STADIA 6.0* [Methods and tools for data analysis in the environment Windows. STATE 6.0]. Moscow, 2006, 270 p. (In Russ.).

20. Lobanov V.I. *Azbuka razrabotchika tsifrovykh ustroistv* [Azbuka of the developer of digital devices]. Moscow, 2001, 192 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Борзов Дмитрий Борисович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: borzovdb@kursknet.ru

Dmitriy B. Borzov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: borzovdb@kursknot.ru

Титов Виталий Семёнович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: titov-kstu@rambler.ru

Vitaliy S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: titov-kstu@rambler.ru

Басов Родион Григорьевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: r_basov@eureca.ru

Rodion G. Basov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: r_basov@eureca.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-175-184

CC BY 4.0

Совершенствование метода обработки геологических данных с помощью применения программы Surfer на примере моделирования геохимической карты

В. П. Добрица [1] ✉, Е. И. Горюшкин [1], Т. В. Иванова [2]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

[2] Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе
ул. Ленина, д.14/13, г.Старый Оскол, Белгородская область, 309514, Российская Федерация

✉ e-mail: dobritsa@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Процесс управления и принятия решения в любой области напрямую зависит от возможности быстро обработать большой объем данных и точности полученной информации. Ввиду высокого уровня развития современных компьютерных технологий моделирование различных объектов или процессов в результате обработки данных становится менее трудным для пользователя. А возможность визуализации полученных результатов позволяет получать более наглядную информацию для лица, принимающего решения. В статье рассматривается вопрос о применении программы Surfer для обработки геологических данных. Данное приложение подходит для обработки большого массива данных, анализа поверхности, визуализации ландшафта, построения карт. Рассмотрены примеры решения конкретных задач с помощью программы Surfer.*

Методы. *Теоретическая основа исследования базируется на комплексе научных положений отечественных ученых в области геологического моделирования. Практические методы исследования основаны на эксперименте по созданию контурной геологической карты распределения никеля, эмпирическом (обработка геохимических данных), статистическом (накоплении полученных данных и их обработка с помощью программы Surfer) анализе.*

Результаты. *В статье рассмотрен процесс обработки геологических данных с помощью программы Surfer. Была построена контурная геологическая карта распределения никеля.*

Заключение. *В статье предложена возможность использования программы Surfer для обработки геологических данных. Применение данного приложения для решения задач на учебных занятиях будет способствовать будущим геологам в приобретении необходимых практических умений для обработки геологических данных, сокращении времени решения задач, приобретении способности оценивать результаты разработок в проектах и повышению уровня информационно-технологической и профессиональной компетентности.*

Ключевые слова: *обработка геологических данных; построение карт; обучение студентов; моделирование; Surfer.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Добрица В. П., Горюшкин Е. И., Иванова Т. В., 2019

Для цитирования: Добрица В. П., Горюшкин Е. И., Иванова Т. В. Совершенствование метода обработки геологических данных с помощью применения программы Surfer на примере моделирования геохимической карты // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 175-184. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-175-184.

Статья поступила в редакцию 18.09.2019

Статья подписана в печать 09.10.2019

Статья опубликована 25.10.2019

Improving of Geological Data Processing with the Use of Surfer Program on the Example of Geochemical Simulation Map

Vyacheslav P. Dobritsa [1] ✉, Evgeny I. Goryushkin [1], Tatyana V. Ivanova [2]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

[2] Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze
14/13, Lenina str., Stary Oskol, Belgorod Region, 309514, Russian Federation

✉ e-mail: dobritsa@mail.ru

Резюме

Perpose of research. *The process of controlling and decision making in any area is directly connected with the ability to process a large amount of data quickly and accuracy of the obtained formation.*
Modeling of different objects or processes as a result of data processing becomes more difficult for users with the high level of modern computer technologies development. And the ability to visualize the results can give more visible information to the decision-maker. The use of Surfer program for geological data processing is described in the article. This application is suitable for processing a large amount of data, surface analysis, landscape visualization, and mapping. Examples of specific tasks solution with the help of Surfer program are described.
Methods*. Theoretical basis of the study is a set of scientific provisions of native scientists in the field of geological modeling. Practical methods of analysis are based on an experiment of contour geological map creation of nickel distribution, empirical (geochemical data processing), statistical (accumulation of obtained data and their processing with Surfer program) analysis.*
Results. *The process of geological data processing using Surfer program are discussed in the article. A contour geological map of nickel distribution was developed.*
Conclusion. *The paper proposed the possibility of using Surfer program for geological data. The use of this task-solving application in student training will help future geologists in necessary practical skills acquiring for geological data processing, reducing task-solving time, acquiring the ability to evaluate the results of development in projects and improving the level of information technology and professional competence.*

Keywords: *geological data processing; mapping; student training; modeling; Surfer program.*

Conflict of interest. *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: *Dobritsa V. P., Goryushkin E. I., Ivanova T. V.* Improving of geological data processing with the use of Surfer program on the example of geochemical simulation map. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 175-184 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-175-184.

Received 19.09.2019

Accepted 09.10.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

Уровень развития современных компьютеров и программного обеспечения позволяет существенно улучшить знания в большинстве областей наук. Для принятия рациональных решений используются технические средства автоматизированной обработки информации.

Управление и принятие решений осуществляется наиболее корректно при обладании точной информацией и соответствующей информационной технологией, позволяющей ее обработать и применить. Интегрированный способ обработки данных предусматривает создание информационной модели управляемого объекта.

Одними из перспективных направлений управления в геологической области являются: применение информационных технологий для повышения качества получаемой информации, необходимой для принятия решения, за счет использования компьютерных технологий; вопросы компьютерного моделирования различных объектов или систем, позволяющих осуществлять эффективное использование полученной информации с целью управления процессом с учетом отрасли.

Компьютерное моделирование применяется в различных областях науки, и геология – не исключение. Большая часть исследовательских проектов строится на изучении или построении компьютерной модели. Благодаря современным компьютерным технологиям у исследователей появилась возможность перейти от обычных двумерных карт к объемным (3D картам).

Вопросам геологического моделирования посвящены работы Гладкова Е.А. [1], Закревского К.Е.[2, 3], Исаева В.Ю. [4], Кудайбергенова М.К. [5], Никифорова И.А. [6], Мартынова А.В. [7]. Вопросы трехмерного моделирования освящены в работе Путилова И.С. [8], информационные технологии в геологии – Коротаев М.В. [9].

Материалы и методы

В геологии часто приходится решать задачи по обработке данных геохимических отчетов. Эти отчеты представляют собой информацию о распределенных по координатам местности значениях химических элементов.

Для того, чтобы найти, например, место скопления полезного металла в земной коре, надо построить геохимическую карту. Карту можно построить вручную, и данная работа займет много времени, терпения и усердия специалиста. Существуют различные программы, которые позволяют построить пространственные модели численных переменных (в любом внешнем выполнении: точками, изолиниями, градациями цвета, как 3D-поверхность, как векторное поле).

Среди таких программ выделим программный пакет Surfer. В его инструментарии две части:

1) математическая часть, необходимая для создания и анализа карты поверхности. Аналогом такой программной части является, например, Oasis;

2) оформительская часть, аналогичная любой программе для создания векторной графики. Она позволяет создавать линии и другие объекты, а затем индивидуально изменять их (аналоги Corel Draw, Adobe Illustrator).

Данная программа осуществляет анализ данных, моделирование поверхности планеты, 3D визуализацию. Данная программа предоставляется как на платной основе, так и на бесплатной. Скачать ее можно с официального сайта [10].

Остановимся на решении задач в программе Golden Software Surfer, так как она является лидирующей в мире для построения пространственных моделей численных переменных (значений геофизического, геохимического поля).

Целью исследования является совершенствование метода обработки геологических данных с помощью программы Surfer.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке методики построения контурной геологической карты распределения никеля на основе применения программы Surfer.

Теоретическая основа исследования базируется на комплексе научных положений отечественных ученых в области геологического моделирования. Практические методы исследования основаны на эксперименте по созданию контурной геологической карты распределения никеля, эмпирическом (обработка геохимических данных), статистическом (накопление полученных данных и их обработка с помощью программы Surfer) анализе.

Результаты и их обсуждение

Для построения карты были использованы отчет по геохимическим данным западного склона Приполярного Урала, участка Радейта. Опробование рыхлых отложений по сети 100м х 20м включает 697 проб на 21 элемент. Покажем построение карты только для одного химического элемента Ni.

Исходные данные – это электронная таблица, сформированная в программе MS Excel, содержащая три столбца: географические координаты точек опробования X, Y. Третий столбец содержит значения Ni для построения карты.

Нами были использованы в программе прямоугольные координаты (в метрах). Единицы измерения расстояний и размеров задаются перед выполнением любых действий по нажатию кнопки Tools и по действию Options – Drawing устанавливаются единицы измерения (т.е. масштаб 1:10000).

Приведем пример построения точечной и контурной карты. В основе любой работы с геохимическими данными лежит корректная подготовка данных и планирование работы. Первый этап планирования геохимической карты – это создание карты фактического материала, отображающей место

сбора геохимической пробы (т.е. точечной карты).

В режиме Рабочего листа в Surfer получаем файл с исходными данными распределения никеля (рис. 1).

Исходные данные 05.08.19.dat

A1 X

	A	B	C	D
1	X	Y	NI	
2	2	0	10	
3	2	0,4	5	
4	2	0,8	10	
5	2	1,2	10	
6	2	1,6	7	
7	2	2	7	
8	2	2,4	5	
9	2	2,8	5	
10	2	3,2	3	
11	2	3,6	5	
12	2	4	4	
13	2	4,4	4	
14	2	4,8	3	
15	2	5,2	3	
16	2	6	4	

Рис. 1. Файл с исходными данными

Fig 1. File with feed data

Для построения карты фактов выбираем на панели инструментов соответствующую кнопку и выполняем команду создания точечной карты. После выполненных действий в рабочем поле увидим карту (рис. 2).

На карте все точки, координаты которых указаны в таблице исходных данных, обозначены синим цветом [11].

Теперь покажем результаты построения контурной карты по исходным данным (рис.3).

Моноэлементная карта показывает распределение никеля на участке исследования. Области сгущения изолиний отображают аномальные содержания никеля.

После построения контурной карты в Менеджере объектов (находится в левой части окна плот-документа) появляется объект Map с иерархической структурой, содержащей информацию о четырех осях построения. Выборочные или все изолинии объекта Map можно подписывать, добавлять цветную заливку между линиями контуров и т.д.

Следующий пример – это решение задач статистической обработки геоданных в программе Surfer. Покажем два способа.

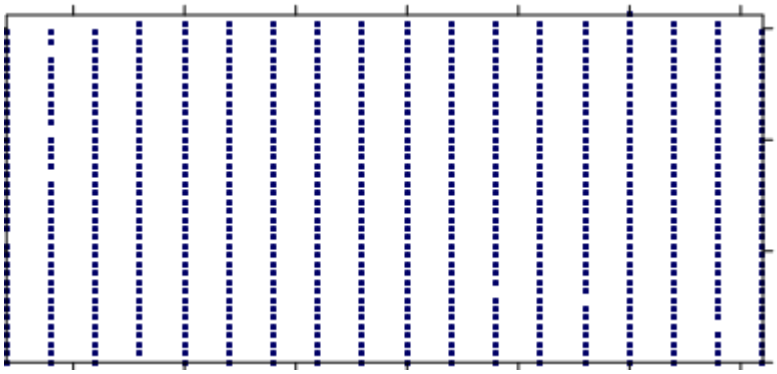


Рис. 2. Точечная карта (карта фактов)

Fig. 2. Dot map (physical and geological map)

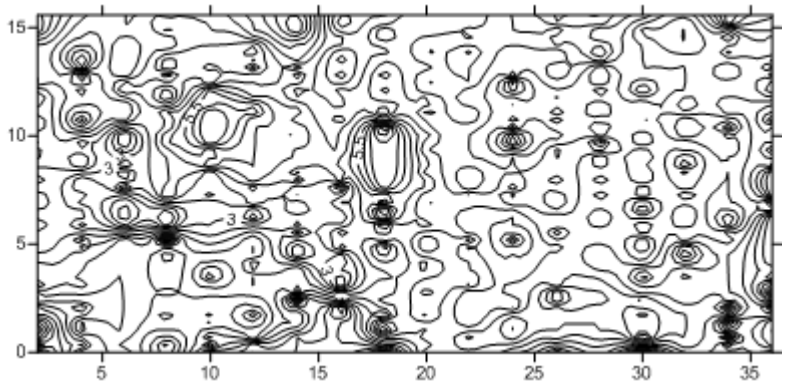


Рис.3. Контурная карта по исходным данным о распределении никеля

Fig. 3. Nickel Distribution Baseline Map

Первый способ. Когда на основе файла с исходными данными (*.dat) создается сеточный файл с расширением *.grd (без него в программе нельзя построить ни одну сеточную карту), в рабочей области появляется окно с данными сетки. Это окно диалога позволяет управлять параметрами создания сетки и включает для этого большое количество кнопок.

После нажатия кнопки Statistics на экран выдается в текстовом файле информация о параметрах сетки. Для изучаемого химического элемента по полученным данным можно увидеть значения среднего, медианы, размаха, дисперсии, стандартного отклонения, коэффициента вариации.

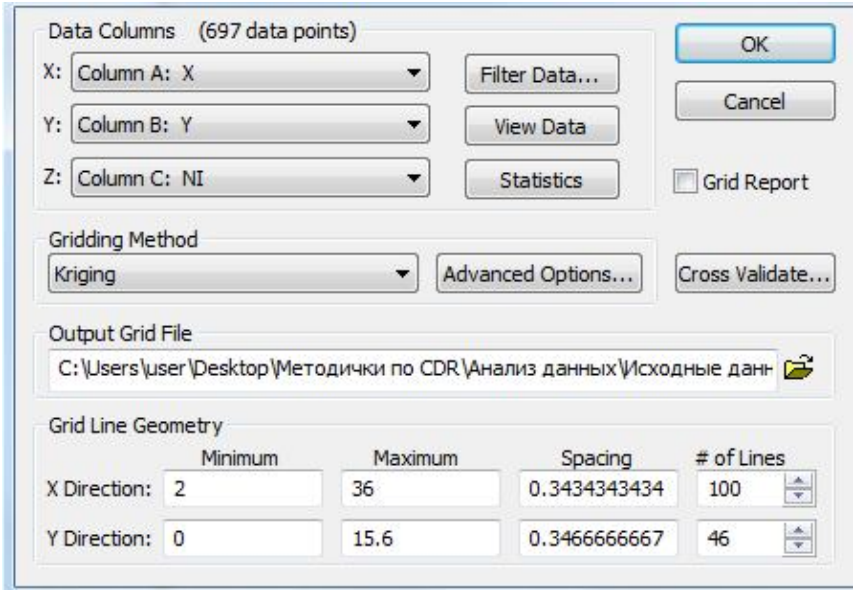


Рис.4. Окно с данными сетки

Fig. 4. Grid Data Window

Второй способ. Когда контурная карта уже построена, в Менеджере объектов можно нажать кнопку Contours и получить окно свойств карты. Нажатие по кнопке i в синем круге( ) позволит получить Grid Info (информацию о гриде). В сформированном отчете приводятся статистические данные по построенному гриду.

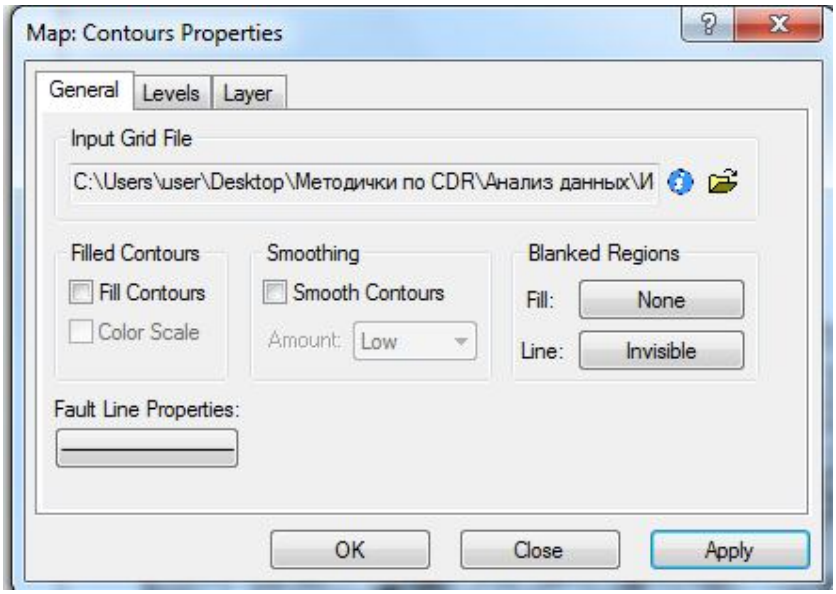


Рис.5. Окно свойств контурной карты

Fig. 5. Contour Map Properties Window

Выводы

В геологии скапливаются большие объемы структурированных или разрозненных данных. Возможность их обработки предоставляет новые возможности по визуализации данных и принятию соответствующего решения.

На сегодняшний день изучение сложных систем не представляется возможным без компьютерного моделирования. Как показал анализ литературы, решать задачи статистической обработки геологической информации можно и в других программах. Например, MS Excel содержит программную надстройку «Анализ данных», функции для вычисления статистических характеристик случайной величины [7]. Используя их, можно также получить статистические данные по любому химическому элементу отчета, в том числе по никелю, сравнить с данными программы Surfer и сделать вывод. Тем не менее, это будут только данные без соответствующей визуализации.

Представленный в статье подход по применению программы Surfer позволяет создать визуальную модель (контурную карту распределения никеля), облегчая обработку входных данных и расширяя возможности по принятию решения.

Наблюдающаяся тенденция повсеместного использования технологии интеллектуального анализа данных Data Mining [4], позволяющая находить скрытые взаимосвязи большого объема данных, осуществляющая прогнозирование, классификацию и визуализацию – в совместном использовании с программой Surfer позволит поднять геологическое моделирование и принятие решений на его основе на новый уровень.

Таким образом, применение программы Surfer для решения задач на учебных занятиях поможет будущим геологам приобрести необходимые практические умения для обработки геологических данных, сократить время решения задач, научиться оценивать результаты разработок в курсовых, дипломных работах, проектах и повысить уровень информационно-технологиче-ской и профессиональной компетентности.

Список литературы

1. Гладков Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 99 с.

2. Геологическое моделирование горизонта $Ю_1$ Томской области / под ред. К.Е. Закревского. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. 154 с.

3. Геологическое моделирование прибрежно-морских отложений (на примере пласта $АВ_1$ ($АВ_1^{1+2}$+$АВ_1^{3}$) Самотлорского месторождения) / под ред. К. Е. Закревского. Тюмень: Вектор Бук, 2017. 314 с.

4. Исаев В.Ю. Моделирование в геологии. URL: http://www.drtisygeology.ru/ materials/Book2/ch_09_model/_model423/index

5. Кудайбергенова Б.С., Кудайбергенов М.К. Применение компьютерного моделирования в геологии 2018. URL: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/ Conference/RM/2018/RM18/pages/Articles/10206-.pdf

6. Никифоров И.А. Геологическое моделирование в среде комплекса Rockworks. Оренбург, 2013. 111 с

7. Мартынов А.В. Геологические модели строения залежей нефти и газа. Ухта: УГТУ, 2013. 23 с.

8. Путилов И.С. Трехмерное геологическое моделирование при разработке нефтяных и газовых месторождений. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. 72 с.

9. Коротаев М.В., Правикова Н.В., Аплеталин А.В. Информационные технологии в геологии. М.: КДУ, 2012. 298 с.

10. Официальный сайт программы Surfer. URL: https:// surfer.software.informer.com

11. Силкин К. Ю. Геоинформационная система Golden Software Surfer 8. Воронеж, 2008. 66 с. URL:http://www.geokniga.org/books/7444.

12. Добрица В.П., Горюшкин Е.И. Применение интеллектуальной адаптивной платформы в образовании // Auditorium: электронный научный журнал Курского государственного университета. 2019. № 1 (21).

References

1. Gladkov E.A. *Geologicheskoe i gidrodinamicheskoe modelirovanie mestorozhdenii nefti i gaza* [Geological and hydrodynamic modeling of oil and gas fields]. Tomsk, 2012, 99 p. (In Russ.).

2. *Geologicheskoe modelirovanie gorizonta Yu1 Tomskoi oblasti* [Geological modeling of the horizon Ю1]; ed. by Zakrevsky K.E. Tomsk, 2016, 154 p. (In Russ.).

3. *Geologicheskoe modelirovanie pribrezhno-morskikh otlozhenii (na primere plasta AV1 (AV11+2+AV13) Samotlorskogo mestorozhdeniya*) [Geological modeling of coastal-marine deposits (on the example of the formation AB_1 (AB_1^{1+2}+AB_1^3) of the Samotlor field)]; ed. by Zakrevsky K.E. Tyumen', Vektor Buk Publ., 2017, 314 p. (In Russ.).

4. Isaev V.Yu. Modelirovanie v geologii [Modeling in geology]. Available at: http://www.drtisygeology.ru/materials/ Book2/ch_09_model/_model423/index

5. Kudaibergenova B.S., Kudaibergenov M.K. Primenenie komp'yuternogo modelirovaniya v geologii 2018[The use of computer modeling in geology 2018]. Available at: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/ RM/2018 /RM18/pages/Articles/ 10206-.pdf (In Russ.).

6. Nikiforov I.A. *Geologicheskoe modelirovanie v srede kompleksa Rockworks* [Geological modeling in the environment of the Rockworks complex]. Orenburg, 2013, 111 p. (In Russ.).

7. Martynov A.V. *Geologicheskie modeli stroeniya zalezhei nefti i gaza* [Geological models of the structure of oil and gas deposits]. Ukhta, USTU Publ., 2013, 23 p. (In Russ.).

8. Putilov I.S. *Trekhmernoe geologicheskoe modelirovanie pri razrabotke neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii* [Three-dimensional geological modeling in the development of oil and gas fields. Perm', 2011, 72 p. (In Russ.).

9. Korotaev M.V., Pravikova N.V., Apletalin A.V. *Informatsionnye tekhnologii v geologii* [Information technology in geology]. Moscow, KDU Publ., 2012, 298 p. (In Russ.).

10. Ofitsial'nyi sait programmy Surfer [The official website of the Surfer program]. Available at: https://surfer.software.informer.com

11. Silkin K. Yu. Geoinformatsionnaya sistema Golden Software Surfer 8 [Geoinformation system Golden Software Surfer 8]. Voronezh, 2008, 66 p. Available at: http: //www.geokniga.org/books/7444 (In Russ.).

12. Dobritsa V.P., Goryushkin E.I. Primenenie intellektual'noi adaptivnoi platformy v obrazovanii [The use of intellectual adaptive platform in education]. *Auditorium. El-*

ektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta = Auditorium. Electronic scientific journal of Kursk State University, 2019, no. 1 (21) (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Добрица Вячеслав Порфирьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: dobritsa@mail.ru

Vyacheslav P. Dobritsa, Dr. of Sci. (Phisico-Mathematical), Professor, Professor of the Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dobritsa@mail.ru

Горюшкин Евгений Игоревич, кандидат педагогических наук, доцент кафедры физики, информатики и математики, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: goryushkin@list.ru

Evgeny I. Goryushkin, Cand. of Sci. (Pedagogic), Associate Professor of the Department of Physics, Informatics and Mathematics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: goryushkin@list.ru

Иванова Татьяна Витальевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры прикладной геологии, технологии поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
Белгородская область, г.Старый Оскол,
Российская Федерация,
e-mail: tanya.031@mail.ru

Tatyana V. Ivanova, Cand. of Sci. (Pedagogic), Associate Professor of the Applied Geology, Technology of Prospecting And Exploration of Mineral Deposits Department, Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze, Stary Oskol, Belgorod Region, Russian Federation, e-mail: tanya.031@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-185-196

CC BY 4.0

Управляемое движение малогабаритного подводного комплекса (МБПК)

Яцун С.Ф.[1], Князев С.И.[1], Яцун А.С.[1] ✉

[2] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. *В статье проведено математическое моделирование и исследование движения малогабаритного подводного робота, предназначенного для мониторинга загрязнения объектов гидросферы. Современные методы мониторинга окружающей среды предполагают наличие стационарных постов наблюдения. Задача подвижного управляемого мониторинга в настоящее время остается нерешенной. Одним из путей решения данной проблемы является переход к системам управления, обеспечивающим заданное движение водного комплекса как по поверхности, так и под водой. Поэтому целью данной статьи является изучение и задание основных закономерностей и алгоритмов на основе математических моделей, описывающих управляемое движение малогабаритных подводных комплексов.*

Методы. *При разработке алгоритма управления движением МБПК использована математическая модель, позволяющая определять пространственно- временное расположение МБПК с переменным вектором тяги. Получены основные математические выражения, определяющие движение МБПК по заданной траектории. Особое внимание уделено той части алгоритма, которая обеспечивает движение МБПК по заданной траектории в подводном режиме при отсутствии связи с глобальной навигационной системой с учетом подводной GPS и расстояния до дна и препятствий. В качестве основного критерия качества управления использована величина отклонения реального положения МБПК от заданного.*

Результаты. *Для выбора направления движения при мониторинге водоема разработан метод планирования траектории, построенный на кусочно - линейных отрезках, позволяющий зондировать пространство водоема таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность процесса мониторинга при минимальном количестве точек отбора проб. Для этого каждый новый отрезок траектории и точки забора проб планируются с учетом информации о концентрации загрязняющих веществ на предыдущем этапе, а также береговой линии и глубины водоема.*

Заключение. *В статье рассмотрен метод мониторинга водоемов с применением малогабаритного беспилотного подводного комплекса. Разработана кинематическая и динамическая модели движения МБПК. Предложен метод планирования траектории движения на основе кусочно-линейных отрезков. Разработан алгоритм управления автономным движением подводного аппарата.*

Ключевые слова: *гидромониторинг; водоем; мобильный подводный комплекс; система управления.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Яцун С.Ф., Князев С.И., Яцун А.С., 2019

Для цитирования: Яцун С.Ф., Князев С.И., Яцун А.С. Управляемое движение малогабаритного подводного комплекса (МБПК) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 185-196. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-185-196.

Статья поступила в редакцию 13.06.2019

Статья подписана в печать 22.07.2019

Статья опубликована 25.10.2019

Controlled movement of portable underwater system (PUS)

Sergei F. Yatsun [1], Sergey I. Knyazev [1], Andrey S. Yatsun [1] ✉

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of reseach. *The article contains mathematic simulation and research of movement of a portable underwater robot designed to monitor pollution of hydrosphere objects. Modern methods of environmental monitoring suggest the presence of stationary sites. The task of mobile controlled monitoring remains unresolved currently. One of the ways to solve this problem is the transition to control systems that provide a given movement of the water system both on the surface and under water. Therefore, the purpose of this article is to study and set the basic laws and algorithms based on mathematical models that describe the controlled movement of portable underwater systems.*

Methods*. When developing the motion control algorithm for PUS, a mathematical model was used to determine the spati-temporal location of PUS with a variable thrust vector. The basic mathematical expressions that determine the movement of PUS in a predetermined path are obtained. Particular attention is paid to that part of the algorithm that ensures the movement of PUS in a predetermined path in underwater mode if there is no contact with the global navigation system, taking into accounts the underwater GPS and the distance to the bottom and obstacles. As the main criterion of quality of control system we have used the deviation of the actual position of PUS from the position datum.*

Results. *To select the direction of movement when monitoring water, a method of planning the trajectory, built on piecewise linear sections, has been developed that allows probing the space of water in such a way as to ensure maximum efficiency of the monitoring process with a minimum number of sampling points. For this, each new segment of the trajectory and sampling points are planned taking into account information on the concentration of pollutants at the previous stage, as well as the coastline and the depth of water.*

Conclusion *The article discusses the method for monitoring water bodies using a portable unmanned underwater system. The kinematic and dynamic models of the PUS movement are developed. It is proposed a method of planning a trajectory of motion based on piecewise linear segments. We have developed an algorithm of controlling the autonomous movement of the underwater vehicle.*

Key words: *hydromonitoring; water; mobile underwater complex; control system.*

Conflict of interest. *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Yatsun S. F., Knyazev S. I., Yatsun A. S. Controlled movement of portable underwater system (PUS). *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 185-196 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-185-196.

Received 13.06.2019

Accepted 22.07.2019

Published 25.10.2019

***

Введение

Промышленные предприятия, в ходе ведения хозяйственной деятельности, часто оказывают негативное воздействие на качество воды в водоемах, осуществляя сбросы загрязненных сточных вод в водные объекты суши. Основным механизмом, позволяющим отследить состояние природных и природно-антропогенных объектов, а также предотвратить их загрязнение, служит система мониторинга, позволяющая выявить превышение концентрации химических, бактериологических и механических загрязнений в воде, что становится основанием для проверки всех источников загрязнений водного объекта, в том числе и промышленных предприятий [1, 2, 3, 4]. Сегодня для гидромониторинга применяются стационарные посты наблюдения. Очевидно, что точечный контроль за состоянием водных ресурсов не обеспечивает полную картину загрязнений водоемов как по площади, так и по глубине [1,2]. Поэтому последние годы все большее распространение получают мобильные беспилотные подводные комплексы, позволяющие автономно перемещаться в воде по заданному маршруту и производить забор проб воды в заданных точках акватории [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Однако в большинстве случаев управление таким объектом производится оператором по определенным каналам связи, что приводит к значительному отклонению аппарата от желаемой траектории, а иногда и к потере аппарата. Одним из путей решения этой проблемы является переход к системам управления, которые должны обеспечить автономное движение как по поверхности водоема, так и под водой, исключая столкновения с препятствиями. При этом планирование заданной траектории необходимо производить с учетом карты водоема и обеспечивать приемлемую для задач гидромониторинга точность движения. Поэтому разработка алгоритмов управления автономным движением подводного аппарата является актуальной задачей.

Материалы и методы

Описание малогабаритного беспилотного подводного комплекса

Для решения проблемы по повышению эффективности гидромониторинга [10, 5, 1] необходимо разработать малогабаритный беспилотный подводный комплекс (МБПК) для автономного мониторинга водоемов. МБПК представляют собой небольшие, но очень маневренные аппараты, позволяющие длительное время находиться в воде. Наиболее подходящим техническим решением для этого являются МБПК с винтовым приводом и переменным вектором тяги, так как это позволяет осуществлять вертикальное погружение на заданную глубину, зависание, движение по заданной как горизонтальной, так и наклонной траекториям [6,1,9,11].

Одним из основных элементов МБПК является система управления, ко-

торая обеспечивает заданное автономное движение и взаимодействие МБПК с окружающей средой, за счет наличия сенсоров концентрации вредных веществ, сенсоров локальной и глобальной навигации, а также бортового вычислителя, на котором реализованы блок обработки информации, блок принятия решений, блок передачи информации.

Блоки системы управления базируются на силовом каркасе, на котором также расположены винтовые электроприводы с переменным вектором тяги, бортовой источник питания, система технического зрения. МБПК периодически при всплытии передает информацию о своем местоположении на центральный и стационарные посты наблюдения и получает корректирующие сигналы со стороны центрального поста. В подводном положении аппарат ориентируется с помощью датчиков. Структура исследуемого объекта в пространстве и времени представлена совокупностью измерительных и вычислительных устройств, приведена на рис.1. Бортовой вычислитель системы управления МБПК обрабатывает информацию, поступающую с датчиков, анализирующих экологическую ситуацию в водоеме, определяет местоположение МБПК относительно заданной траектории, формирует управляющие воздействия [12,13,14,4].

При разработке алгоритма управления движением МБПК использована математическая модель, позволяющая определять пространственно- временное расположение МБПК с переменным вектором тяги. Получены основные математические выражения, определяющие движение МБПК по заданной траектории.

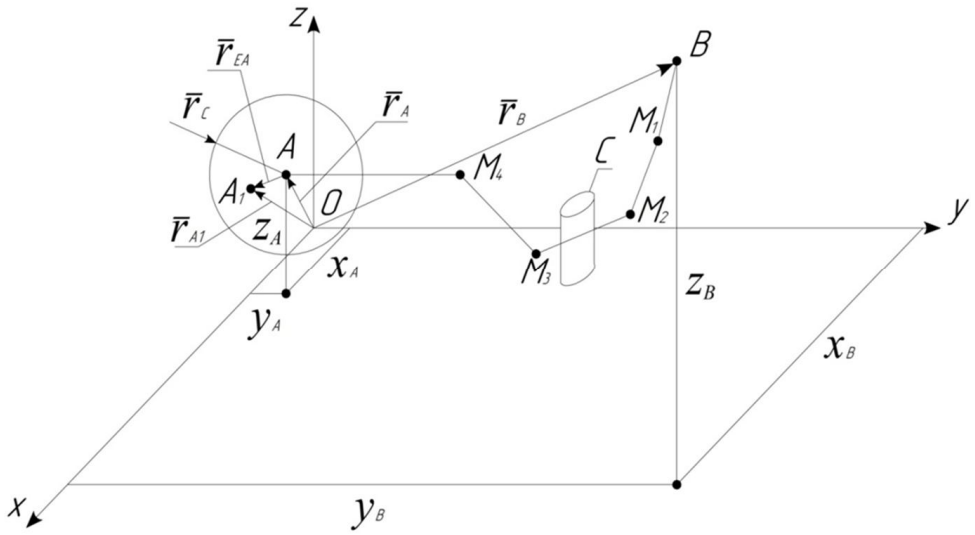


Рис. 1. Схема движения МБПК при мониторинге водоемов:
A – конечное положение МБПК; *B* – начальное положение МБПК

Fig. 1. The motion scheme of PUS during monitoring of water bodies:
A — final position of PUS; *B* - the initial position of PUS

Особое внимание уделено той части алгоритма, которая обеспечивает движение МБПК по заданной траектории в подводном режиме при отсутствии связи с глобальной навигационной системой с учетом подводной GPS и расстояния до дна и препятствий. В качестве основного критерия качества управления использована величина отклонения реального положения МБПК от заданного.

Для выбора направления движения при мониторинге водоема разработан метод планирования траектории, построенный на кусочно - линейных отрезках, позволяющий зондировать пространство водоема таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность процесса мониторинга при минимальном количестве точек отбора проб. Для этого каждый новый отрезок траектории и точки забора проб планируются с учетом информации о концентрации загрязняющих веществ на предыдущем этапе, а также береговой линии и глубины водоема.

На рис. 2 приведена схема движения МБПК в водоеме. Пусть положение МБПК в начальный момент времени определяется точкой B, которая определена радиус- вектором $\bar{r}_B$, а точка конечного положения МБПК A задается радиус-вектором $\bar{r}_A$. Задача управления состоит в том, чтобы переместиться из точки B в точку A, не столкнувшись с препятствием С и при этом, отклониться от заданного положения точки A на расстояние, не превышающее величину, определяемую вектором $\bar{r}_C$.

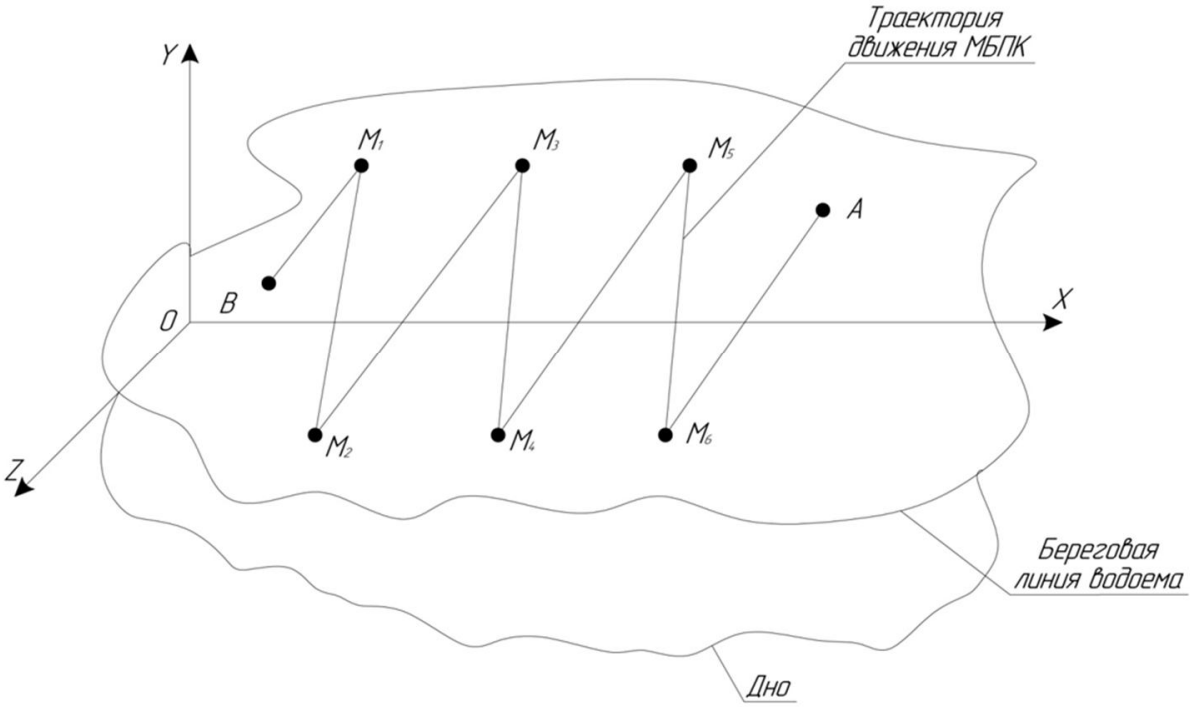


Рис. 2. Схема кусочно-линейной траектории движения МБПК в водоеме

Fig. 2. The layout of coordinate systems of unmanned underwater system PUS

Движение МБПК начинается из точки *B*. Далее происходит автономное движение по отрезку траектории BM_1, спланированному на основе информации о глубине и положении МБПК в пространстве, измеряемого навигационной системой при идентификации препятствий происходит корректировка положения МБПК. Система управления должна обеспечивать отклонение от заданной траектории, не превышающее заданные параметры. По мере приближения к конечной точке отрезка траектории M_1 осуществляется планирование нового отрезка прямой $M_1 M_2$, уравнение которого строится по координатам точек M_1 и M_2, выбранным по результатам замера положения МБПК относительно береговой линии, дна и препятствий.

Процесс мониторинга завершается, если МБПК оказывается в точке A^1, определяемой радиус-вектором $\bar{r}_{A1} = \bar{r}_A + \bar{r}_{EA}$. Модуль радиус -вектора $\bar{r}_{EA} < \bar{r}_C$ определяет допустимую погрешность, возникающую при определении положения точки *A* в пространстве.

Математическая модель МБПК

Рассмотрим модель движения беспилотного подводного комплекса МБПК (рис. 3). Для проведения кинематического анализа будем считать, что рассматриваемый объект представляет собой систему трех твердых тел: корпус и электроприводы винтов, которые связаны с корпусом цилиндрическими шарнирами, положение и ориентация корпуса в пространстве определяется шестью обобщенными координатами.

Относительное положение электроприводов винтов определяется соответствующими углами поворота α_1, α_3. Соответствующие матрицы поворотов имеют вид:

$$T_{12} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & -\sin\alpha_1 & 0 \\ \sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{32} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_3 & -\sin\alpha_3 & 0 \\ \sin\alpha_3 & \cos\alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Тело движется относительно неподвижной системы координат *OXYZ* . Центр масс тела обозначим *C* . С телом связана подвижная система координат $CX_2Y_2Z_2$. С приводами связаны подвижные системы координат $C_1X_1Y_1Z_1$ и $C_3X_3Y_3Z_3$. Координаты *X,Y,Z* задают положение точки *C* в пространстве. Ориентацию тела задают корабельные углы Крылова. Переход от осей неподвижной системы координат *CXYZ* к системе $CX_2Y_2Z_2$, неизменно связанной с корпусом МБПК , выполняется с помощью трех поворотов.

Выбранным углам соответствуют следующие матрицы поворотов: Поворот на угол ψ относительно оси *OZ* (поворот определяется матрицей *R* (*Z*,ψ). Поворот на угол θ вокруг оси OX^1 (поворот определяется матрицей *R* (X^1,θ). Поворот на угол φ относительно OY_2 (поворот определяется матрицей *R* (Y_2,φ). Результирующая матрица поворота системы координат $C_2X_2Y_2Z_2$ относительно *OXYZ* получается путем перемножения трёх основных матриц вращения.

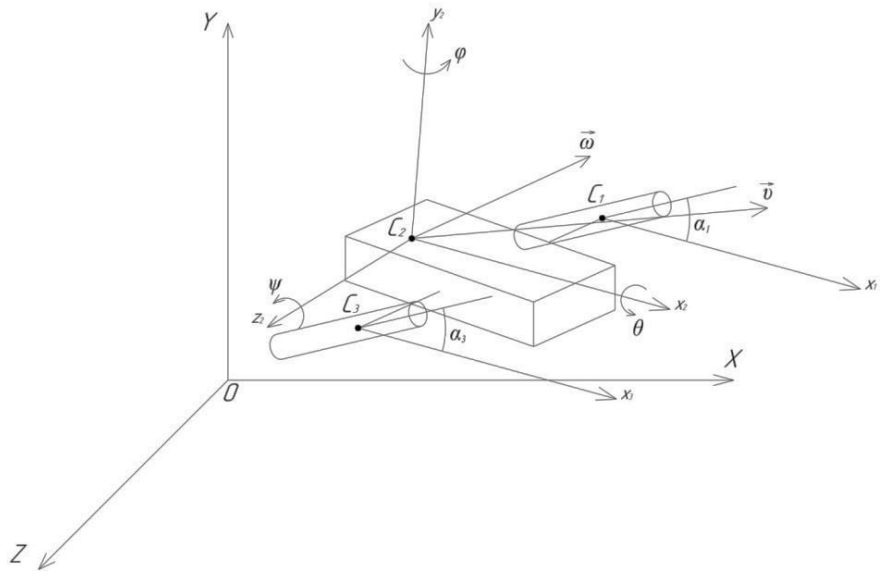


Рис. 3. Схема расположения систем координат беспилотного подводного комплекса МБПК

Fig. 3. The scheme of the piecewise linear trajectory of PUS in water

В данной системе координат О принадлежит точке с максимальной для этого водоема глубиной, поэтому $Y>0$. Величина Y определяется глубиномером, расстояние до дна и препятствий, соответственно, эхолотом. Координаты X и Z определяются в надводном положении с помощью GPS навигатора, в подводном использованием подводной GPS, реализованной с помощью USBL навигационной системы. Вектор скорости центра масс корпуса в неподвижной системе координат определим следующим образом:

$$\overline{\upsilon} = (\upsilon_X \upsilon_Y \upsilon_Z)^T. \quad (2)$$

Соответственно, вектор угловой скорости:

$$\overline{\omega} = (\omega_X \omega_Y \omega_Z)^T. \quad (3)$$

Проекции угловой скорости $\overline{\omega}$ в неподвижной системе координат определяются по формулам:

$$\overline{\omega} = \begin{cases} \omega_x = \dot{\theta}\, cos\psi - \dot{\varphi}\, cos\theta\, sin\psi \\ \omega_y = \dot{\varphi}\, cos\theta\, cos\,\psi + \dot{\theta}\, sin\psi \\ \omega_z = \dot{\psi} + \dot{\varphi}\, sin\theta. \end{cases} \quad (4)$$

Для описания управляемого движения робота, дополнительно к системе кинематических уравнений получены дифференциальные уравнения, описывающие движение МБПК.

Планирование траектории движения

При планировании движения МБПК в водоеме принята кусочно-линейная форма траектории (см. рис.2).

На карте водоема выбираются отрезки прямой вдоль которых МБПК должен пройти и произвести забор воды в заданных точках с учетом глубины погружения робота. Для планирования отрезков прямой важно контролировать исходную и конечную точки отрезка траектории.

Планирование отрезков траектории осуществляется в форме параметриче-

ских уравнений на основе приоритетов задачи мониторинга и заданных координат точек *A, B* и M_j. Начальная и конечная точки траектории соответствуют M_0=*B* и M_n=*A*. На основании этих данных происходит формирование уравнений отрезков прямой M_jM_{j-1}. Ориентация прямой в пространстве определяется вектором $\overline{\alpha}$, образованным направляющими косинусами. Далее происходит движение МБПК по заданным отрезкам прямых M_jM_{j-1}.

Результаты и их обсуждение

Система управления МБПК

Желаемое положение МБПК на прямой M_jM_{j-1} обозначается точкой D, определяемой радиус-вектором $\bar{r}$, а реальное – точкой D/ задается вектором $\bar{r}^{|}$ (рис.4).

В результате действия ряда факторов возникает отклонение реального положения от заданного на величину $DD^{|} = \Delta\bar{r}$. На компенсацию этого отклонения направлены действия системы управления МБПК. Структурная схема системы управления МБПК показана на рис.5.

Информация о желаемом положении и ориентации $\bar{r},\overline{\alpha}$ поступает в блок сравнения, сюда же приходит информация о реальном положении МБПК. Многоканальный блок сравнения определяет отклонение от траектории $\Delta\bar{r}$ и ориентации $\Delta\overline{\alpha}$. Эта информация поступает в многоканальный логический регулятор, который вырабатывает вектор управляющих напряжений $\overline{U}$, которые поступают на соответствующие электроприводы ЭП, в результате чего формируются корректирующие значения угловых скоростей винтов $\overline{\omega}_1$ и углов отклонения рулей $\overline{\beta}$.

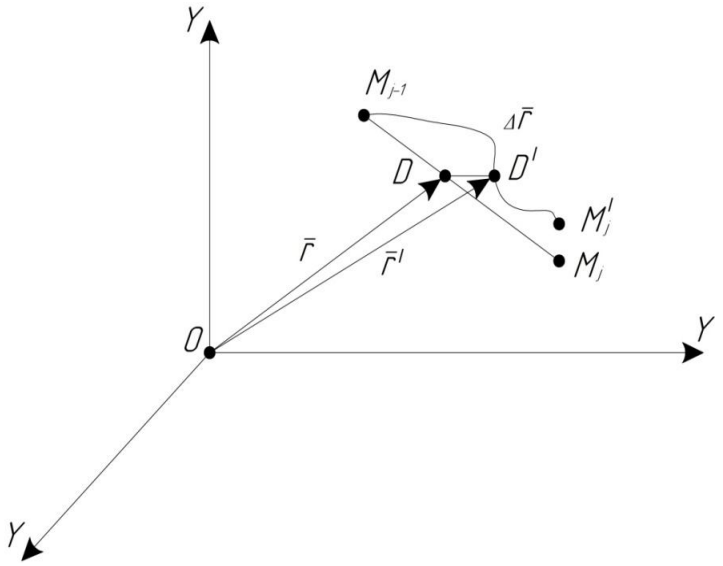


Рис. 4. Схема движения МБПК по прямолинейному отрезку траектории в водоеме

Fig. 4. The motion scheme of PUS along a rectilinear segment of the trajectory in water

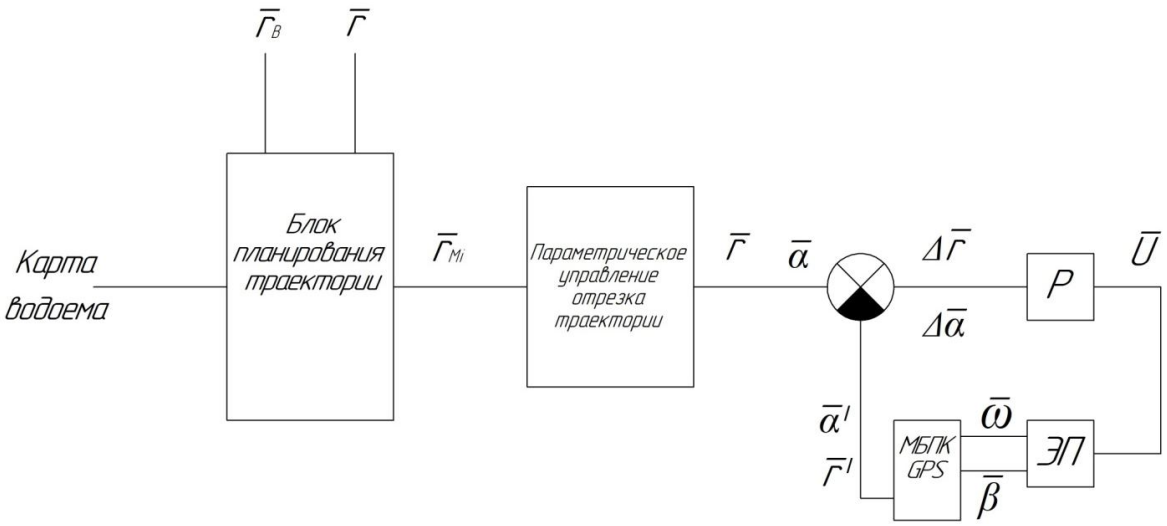


Рис. 5. Структурная схема системы управления МБПК

Fig. 5. The structural diagram of control system of PUS

Реальные координаты МБПК в надводном положении $\bar{r}^{\backslash},\bar{\alpha}^{\backslash}$ задает глобальная навигационная система, включающая GPS навигатор, а для подводного положения - подводный GPS, глубиномер, магнитометр. Для работы подводной GPS создают координатную систему из GIB-буев с длиной базы 1-3 километра, принимающую сигналы пингеров подводных объектов, синхронизированных с часами GPS и распределенных во времени. GIB-буи с помощью корреляционного приема определяют времена запаздывания от каждого объекта и ретранслируют эти данные на станцию контроля [2].

Станция контроля на основе времен запаздывания и данных о гидростатическом давлении на подводном объекте осуществляет расчет координат и визуализацию положения каждого объекта.

Выводы

В статье рассмотрен метод мониторинга водоемов с применением малогабаритного беспилотного подводного комплекса.

Разработана кинематическая и динамическая модели движения МБПК. Предложен метод планирования траектории движения на основе кусочно-линейных отрезков.

Разработан алгоритм управления автономным движением подводного аппарата.

Список литературы

1. Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Б.В. Лушников, С.И. Савин, К.Г. Казарян, А.С. Яцун, А.В. Мальчиков // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. / редкол.: С.Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.]. Курск: ЮЗГУ, 2012. Ч. 2. С. 107-111.

2. Ляхов Д. Г. Современные задачи подводной робототехники //Подводные исследования и робототехника. 2012. №. 1. С. 15-23.

3. Робот для диагностики загрязнения воды [электронный ресурс]. URL: http://aquavitro.org/2010/12/24/ryba-robot-dlya-diagnostiki-zagryazneniya-vody/.

4. Цариченко С. Г., Николаев В. С. Применение приборных поисковых комплексов для обследования подводных объектов // Пожарная безопасность. 2017. №. 1. С. 67-68.

5. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко [и др.]; под общ. ред. М.Д. Агеева; Институт проблем морских технологий. М.: Наука, 2005. 398 с.

6. Самоходные необитаемые подводные аппараты / Ю.А. Боженов, В.М. Гаврилов, Ю.И. Жуков, И.Б. Иконников [и др.]. Л.: Судостроение, 1986. 185 с.

7. Гафуров С.А., Салмина В.А. Классификация автономных необитаемых подводных аппаратов // Перспективные системы и задачи управления: матер. 11 Всеросс. науч.-практ. конф.: в 2 т. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 1. С. 110-128.

8. Необитаемые подводные аппараты военного назначения / под ред. М.Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука,2005. 164 с.

9. Яцун С. Ф. [и др.] Развитие малых и средних автономных необитаемых подводных аппаратов на основе бионических (рыбоподобных) принципов движения для решения задач подразделений специального назначения ВМФ РФ // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. №. 1. С. 98-109.

10. Jatsun S.F., Lushnikov B.V., Politov E.N., Knyazev S.Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modelling and full-scale tests of the prototype // MATEC Web of Conferences, ed.: A. Ronzhin and V. Shishlakov. 2017. С. 02014.

11. Яцун С.Ф., Лушников Б.В., Политов Е.Н. Управление рыбоподобным робототехническим устройством для мониторинга объектов в гидросфере // Перспективные системы и задачи управления: матер. одиннадцатой Всеросс. науч.-практ. конф.: в 2 т. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 1. С. 208-222.

12. Подводный GPS на телеуправляемом необитаемом подводном аппарате: опыт использования. URL: unavlab.com

13. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Системы числового программного управления. М.: Логос, 2005. 296 с.

14. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005. С. 272.

References

1. Lushnikov B.V., Savin S.I., Kazaryan K.G., Yatsun A.S., Mal'chikov A.V. [Bionic floating robot for monitoring natural and technogenic objects in the hydrosphere]. *Uprav-*

lyayemyye vibratsionnyye tekhnologii i mashiny. *Sb. nauch. st.* [Controlled vibration technologies and machines. Sat. scientific Art.], Kursk, 2012, pt. 2, pp. 107-111 (In Russ.).

2. Lyakhov D. G. Sovremennyye zadachi podvodnoy robototekhniki [Modern tasks of underwater robotics.]. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika = Underwater research and robotics*, 2012, no. 1, pp. 15-23 (In Russ.).

3. Robot dlya diagnostiki zagryazneniya vody [Robot for the diagnosis of water pollution]. Available at: http://aquavitro.org/2010/12/24/ryba-robot-dlya-diagnostiki-zagryazneniya-vody/.

4. Tsarichenko S. G., Nikolayev V. S. Primenenie pribornykh poiskovykh kompleksov dlya obsledovaniya podvodnykh ob"ektov [Application of instrument search systems for underwater objects survey]. *Pozharnaya bezopasnost' = Fire safety*, 2017, no. 1, pp. 67-68 (In Russ.).

5. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. at all. *Avtonomnyye podvodnyye roboty: sistemy i tekhnologii; Institut problem morskikh tekhnologiy* [Autonomous underwater robots: systems and technologies]. Moscow, Nauka Publ., 2005 (In Russ.).

6. Bozhenov YU.A., Gavrilov V.M., Zhukov YU.I., Ikonnikov I.B. i dr. *Samokhodnyye neobitayemyye podvodnyye apparaty* [Self-propelled uninhabited underwater vehicles]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1986, 185 p. (In Russ.).

7. Gafurov S.A., Salmina V.A. [Classification of autonomous uninhabited underwater vehicles]. *Perspektivnyye sistemy i zadachi upravleniya. Mater. 11 Vseross. nauch.-prakt. konf.* ["Promising systems and control task". Mater. Eleventh All-Russian. scientific-practical conf.]. Rostov-na-Donu, 2016, vol. 1, pp. 110-128 (In Russ.).

8. *Neobitayemyye podvodnyye apparaty voyennogo naznacheniya* [Uninhabited underwater vehicles for military purposes]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2005, 164 p. (In Russ.).

9. Yatsun S. F. i dr. Razvitiye malykh i srednikh avtonomnykh neobitayemykh podvodnykh apparatov na osnove bionicheskikh (rybopodobnykh) printsipov dvizheniya dlya resheniya zadach podrazdeleniy spetsial'nogo naznacheniya VMF RF [Development of small and medium autonomous uninhabited underwater vehicles based on bionic (fish-like) principles of movement for solving the tasks of special forces of the Russian Navy]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = News of SFU. Technical science,* 2019, no. 1, pp. 98-109 (In Russ.).

10. Jatsun S.F., Lushnikov B.V., Politov E.N., Knyazev S. Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modeling and full-scale tests of the prototype. MATEC Web of Conferences, ed.: A. Ronzhin and V. Shishlakov. 2017, pp. 02014.

11. Yatsun S.F., Lushnikov B.V., Politov Ye.N. [Control of a fish-like robotic device for monitoring objects in the hydrosphere]. *Perspektivnyye sistemy i zadachi upravleniya. Mater. 11 Vseross. nauch.-prakt. konf.* ["Promising systems and control tasks". Mater. Eleventh All-Russian. scientific-practical Conf.]. Rostov-na-Donu, 2016, vol. 1, pp. 208-222 (In Russ.).

12. Podvodnyy GPS na teleupravlyayemom neobitayemom podvodnom apparate: opyt ispol'zovaniya. [Underwater GPS on a remote-controlled unmanned underwater vehicle]. Available at: unavlab.com.

13. Sosonkin V.L., Martinov G.M. *Sistemy chislovogo programmnogo upravleniya* [Systems of numerical program control]. Moscow, Logos Publ., 2005, 296 p. (In Russ.).

14. Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A. *Ustroystva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov* [Devices and control systems for underwater robots]. Moscow, Nauka Publ., 2005, 272 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Князев Сергей Иванович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail teormeh@inbox.ru

Sergei F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Sergey I. Knyazev, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Andrey S. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru