

ISSN 2073-7408

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

3 (371) 2025

Редколлегия

Главный редактор

Радченко С.Ю. *д-р техн. наук, проф.*

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. *д-р техн. наук, доц. (Россия)*

Гордон В.А. *д-р техн. наук, проф.*

Подмастерьев К.В. *д-р техн. наук, проф.*

Поляков Р.Н. *д-р техн. наук, проф.*

Шоркин В.С. *д-р физ.-мат. наук, проф.*

Члены редколлегий:

Голенков В.А. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Дунаев А.В. *д-р техн. наук, доц. (Россия)*

Дьяконов А.А. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Емельянов С.Г. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Запонец Я. *д-р техн. наук, проф. (Чехия)*

Киричек А.В. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Кузичкин О.Р. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Кухарь В.Д. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Лавриненко В.Ю. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Ли Шэнбо. *канд. техн. наук, доц. (Китай)*

Мирсалимов В.М. *д-р физ.-мат. наук, проф. (Азербайджан)*

Пилипенко О.В. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Поляков Р.Н. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Распопов В.Я. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Савин Л.А. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Смоленцев В.П. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Солдаткин В.М. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Старовойтов Э.И. *д-р физ.-мат. наук, проф. (Беларусь)*

Степанов Ю.С. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Хейфец М.И. *д-р техн. наук, проф. (Беларусь)*

Ответственный редактор:

Тюхта А.В. *канд. техн. наук*

Адрес редакции

302030, Орловская обл., г. Орёл, ул.

Московская, 34

+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fipptt>

E-mail: radsu@rambler.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-67029 от 30 августа 2016 года

Подписной индекс **29504**

по объединённому каталогу

«Пресса России»

на сайтах www.ppressa-ru.ru и www.aks.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2025

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования РИНЦ, а также в международных системах Chemical Abstracts и Google Scholar.

В соответствии с письмом ВАК от 06.12.2022 №02-1198 «О Перечне рецензируемых научных изданий», журнал «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» как издание, входящее в международную базу данных Chemical Abstracts, приравнивается к изданиям категории K1.

Содержание

Теоретическая механика и ее приложения

Сухоруков А.Л. Оценка целесообразности выработки электроэнергии при движении подводного глайдера для увеличения его дальности и автономности.....	3
Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Ромашин С.Н., Кошечева А.И. Оценка поврежденности напряженного упругого материала.....	12

Машиностроительные технологии и оборудование

Федин А.В. Поверхностная лазерная ударная обработка латунных сплавов.....	22
Норин В.А. Математическая модель процесса электрогидроимпульсной обрезки тонкостенных заготовок.....	28
Ковалев В.Д., Панков В.П., Радченко С.Ю., Степанова М.В., Куликов М.В. Исследования направлений совершенствования композиционных материалов и прогнозирование их свойств.....	34
Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О. Исследование влияния содержания никеля и кобальта на глубину выдавливания по Эриксену для лент из бронзы марки БрБ2.....	46
Гавриш В.М., Роцупкин С.И., Шагова Ю.О., Чайка Т.В. К вопросу получения дисульфида вольфрама из смеси наноразмерного порошка карбида вольфрама.....	53
Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Петрухин А.В., Бондаренко М.Э., Клепова В.Н. Зависимости времени сквозного прокола обрабатываемого материала от основных режимов гидробразивного резания при наличии ПАВ.....	61
Мышецкий А.А., Зуев В.В., Преображенская Е.В., Боровик Т.Н., Скрипник С.В. Исследование цифровым моделированием технологического процесса горячей штамповки оправок прошивных станков из трубной заготовки.....	68
Колосовский А.М., Коичев В.С., Рожков А.С., Черкасов В.Е. Аддитивная технология изготовления запасных деталей сельскохозяйственных машин.....	80

Машиноведение и мехатроника

Сафина Г.Ф. Акустическое восстановление параметров жесткости ротора синхронного двигателя турбомашин.....	89
Ивановский В.С., Спирин М.С., Косарич М.Б. Робототехнические комплексы: термины и определения, сложности классификации.....	94
Злобин С.Н., Карпов А.Е. Методологические основы конструктивных решений тяговых приводов локомотива.....	102

Приборы, биотехнические системы и технологии

Сайфутдинова М.С., Леонов Д.В., Васильев Ю.А., Омелянская О.В., Костенко Е.А., Булгакова Ю.В., Насибуллина А.А., Власова О.В., Гребенникова В.В., Белякова Е.Д., Аюпова А.Ю. Формирование набора сигналов ультразвукового сканера, полученных из тракта предварительной обработки при in vivo исследовании кровотока.....	109
Поляков Е.В., Дмитриева В.В., Шувалова Е.В., Филатова Н.А., Колбацкая О.П., Климанов И.А. Исследование одноэтапной нейронной сети глубокого обучения для анализа биомедицинских изображений.....	119
Жидков А.В., Немов В.П., Подмастерьев К.В. Моделирование распространения лучей света в оптической схеме монохроматора матричного спектрофотометра для экспресс-анализа наружных тканей человека.....	126
Тагаев А.И., Коришнова Е.Д. Анализ структуры полустационарного программно-аппаратного комплекса (ППАК) мониторинга состояния производственных систем в индустрии 4.0.....	137
Ефремова Е.С., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М. Исследование погрешностей информационно-измерительной системы воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока.....	145

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Мартынец Е.Р., Корниенко А.В., Левенцов В.А. Математическая модель длительности процесса разработки в соответствии с процессной моделью технической подготовки производства с применением технологии цифровых двойников.....	153
Корниенко А.В. Обеспечение надежности оборудования с точки зрения процессного подхода и влияния на качество производственного процесса.....	160

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК по следующим группам научных специальностей:

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки), 2.2.5. Приборы навигации (технические науки), 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки), 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки), 2.5.2. Машиноведение (технические науки), 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки), 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки), 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки), 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки), 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением (технические науки), 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

Editorial Committee

Editor-in-chief

Radchenko S.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief Assistants:

Barsukov G.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

Shorkin V.S. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof.

Member of editorial board:

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Dunaev A.V. Doc. Sc. Tech., Assist. Prof. (Russia)

Dyakonov A.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Zapomel Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Czech Republic)

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kuzichkin O.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kukhar V.D. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Lavrynenko V.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Li Shengbo. Cand. Sc. Tech., Assist. Prof. (China)

Mirsalimov V.M. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Azerbaijan)

Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Savin L.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Smolenzov V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Soldatkin V.M. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Starovoitov A.L. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Belarus)

Stepanov Yu.S. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Heifets M.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

Responsible editor:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302030, Oryol region, Oryol, st.

Moskovskaya, 34

+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fipptt>

E-mail: radsu@rambler.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77–67029 from 30.08.2016

Index on the catalogue of the

«Pressa Rossi» 29504

on the websites www.pressa-ru.ru

and www.aks.ru

© Orel State University, 2025

The journal is indexed in the system of the Russian Science Citation Index (RSCI), and also in international systems Chemical Abstracts and Google Scholar.

In accordance with the letter of the Higher Attestation Commission dated December 6, 2022 No. 02-1198 “On the List of Peer-Reviewed Scientific Publications”, the journal Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, as a publication included in the international Chemical Abstracts database, is equated to publications of the K1 category.

Contents

Theoretical mechanics and its applications

- Sukhorukov A.L. Assessment of the feasibility of generating electric power during the movement of an underwater glider to increase its range and autonomy 3
- Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Romashin S.N., Konisheva A.I. Damage assessment of stressed elastic material..... 12

Machine-building technologies and equipment

- Fedin A.V. Surface laser impact treatment of brass alloys 22
- Norin V.A. Mathematical model of the process of electrohydroimpulse trimming of thin-walled workpieces..... 28
- Kovalev V.D., Pankov V.P., Radchenko S.Y., Stepanova M.V., Kulikov M.V. Research of directions of improvement of composite materials and forecasting their properties..... 34
- Golenkov V.A., Radchenko S.Y., Dorohov D.O. Study of the influence of nickel and cobalt content on the extrusion depth according to erixen for bronze strips of BrB2 grade..... 46
- Gavrish V.M., Roshchupkin S.I., Shagova Y.O., Chaika T.V. On the issue of obtaining tungsten disulfide from a mixture of nanoscale powders of tungsten carbides and titanium..... 53
- Kozhus O.G., Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Petrukhin A.V., Bondarenko M.E., Klepova V.N. Dependences of the time of through-punching of the workpiece from the main modes of waterjet cutting in the presence of surfactants..... 61
- Myshechkin A.A., Zuev V.V., Preobrazhenskaya E.V., Borovik T.N., Skripnik S.V. Development and research by digital modeling of the technological process of hot stamping mandrels of sewing mills from a pipe billet..... 68
- Kolosovsky A.M., Koychev V.S., Rozhkov A.S., Cherkasov V.E. Additive technology of the spare parts manufacture for agricultural machines..... 80

Machine Science and Mechatronics

- Safina G.F. Acoustic recovery of turbomachine synchronous motor rotor stiffness..... 89
- Ivanovskiy V.S., Spirin M.S., Kosarich M.B. Robotic complexes: terms and definitions, classification difficulties 94
- Zlobin S.N., Karpov A.E. Methodological basis of design solutions for locomotive traction drives..... 102

Devices, biotechnical systems and technologies

- Sayfutdinova M.S., Leonov D.V., Vasiliev Yu.A., Omelyanskaya O.V., Kostenko E.A., Bulgakova Yu.V., Nasibullina A.A., Vlasova O.V., Grebennikova V.V., Belyakova E.D., Akopova A.Yu. A set of ultrasound doppler rf signals obtained during in vivo blood flow studies..... 109
- Polyakov E.V., Dmitrieva V.V., Shuvalova E.V., Filatova N.A., Kolbatskaya O.P., Klimanov I.A. Study of one-stage deep learning neural network for biomedical image analysis..... 119
- Zhidkov A.V., Nemov V.P., Podmasterev K.V. Modelling of light ray propagation in the optical scheme of a spectrophotometer 126
- Tagaev A.I., Korshunova E.D. Analysis of the structure of a semi-stationary hardware and software complex (HSSC) for monitoring the state of production systems in industry 4.0. Efremova E.S., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. Investigation of errors in the information and measurement system of air signals with an integrated fuselage receiver of incoming airflow parameters..... 145

Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

- Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. Mathematical model of the duration of the development process in accordance with the process model of technical pre-production using digital twin technology..... 153
- Kornienko A.V. Ensuring the reliability of equipment in terms of the process approach and the impact on the quality of the manufacturing process..... 160

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

УДК 629.12

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-371-3-3-11

СУХОРУКОВ А.Л.

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОДВОДНОГО ГЛАЙДЕРА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕГО ДАЛЬНОСТИ И АВТОНОМНОСТИ

Аннотация. В данной работе проведена оценка целесообразности выработки электроэнергии на борту подводного глайдера за счет электрогенератора, вращение которого обеспечивается гребным винтом, работающим в турбинном режиме для увеличения его дальности и автономности. При движении подводного глайдера набегающий поток воды вращает гидротурбину (гребной винт, работающий в турбинном режиме), которая посредством общего вала вращает электрогенератор, работа которого, в свою очередь, обеспечивает зарядку аккумулятора для питания гидронасоса рабочей жидкостью. Таким образом, появляется возможность дополнительного сопротивления ухудшает гидродинамическое качество глайдера. Показано, что использование турбогенератора при реальных значениях турбинного коэффициента полезного действия (менее 75%) не позволяет повысить дальность глайдера, возможно лишь повышение его автономности на величину до 40%. Представленная методика позволяет повысить эффективность проектно-конструкторских работ за счет комплексного многопараметрического анализа влияния различных факторов на оптимальные параметры движения подводного глайдера, оснащенного турбогенератором.

Ключевые слова: подводный глайдер, гребной винт, движитель, дальность, автономность, гидродинамическое качество, турбогенератор, аккумулятор, избыточная плавучесть, угол атаки.

Введение

Подводные глайдеры представляют собой автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), движение которых происходит за счет изменения избыточной плавучести (при отрицательной плавучести глайдер погружается, при положительной – всплывает). Тем самым, реализуется принцип подводного планирования, а траектория глайдера имеет пилообразную форму в вертикальной плоскости.

Преимущество глайдеров по сравнению с АНПА других типов заключается в существенной экономии энергии, затрачиваемой на движение, так как электроэнергия расходуется гидронасосом лишь при реверсе тяги в вершинах пилообразной траектории.

В работе [1] К.В. Рождественским получены соотношения, позволяющие оценить максимальную дальность и автономность подводного глайдера на режимах оптимального планирования, то есть при планировании с оптимальным углом атаки, обеспечивающим максимальное гидродинамическое качество. В ряде работ [2-5] рассматривалось использование так называемых «гибридных глайдеров», имеющих возможность двигаться как за счет изменения избыточной плавучести, так и за счет собственного движительного комплекса (гребного винта) для преодоления течений, приливов, существенных неоднородностей морской среды (скачки плотности и т.д.), а также для выполнения специальных маневров вблизи свободной поверхности или дна. На рисунке 1 показан внешний вид гибридного глайдера «Slocum» с винтовой движительной установкой, которая позволяет повысить эффективность аппарата при маневрировании.

В целях уменьшения сопротивления движителя при движении глайдера в штатном режиме за счет изменения плавучести лопасти винта в ряде проектов сделаны складными (см. рисунок 2). Вместе с тем, наряду с конструктивными мероприятиями, направленными на уменьшение сопротивления движителя, для глайдеров гибридного типа можно рассмотреть возможность выработки электроэнергии гребным винтом, работающем в турбинном режиме.



Рисунок 1 – Гибридный вариант глайдера «Slocum»



Рисунок 2 – Двигательный модуль глайдера «Slocum»

В данной работе проведена оценка целесообразности выработки электроэнергии на борту подводного глайдера за счет электрогенератора, вращение которого обеспечивается гребным винтом, работающим в турбинном режиме для увеличения его дальности и автономности.

Следует отметить, что сегодня на целом ряде летательных аппаратов (Airbus A320, Boeing 767, 777, Sukhoi Super Jet – 100 и др.) установлены аварийные авиационные турбины, обеспечивающие бортовое резервное электропитание при отказе основного источника энергии [6]. Применение аварийных авиационных турбин повышает безопасность полета и гарантирует продолжительную работу жизненно важных систем воздушного судна вплоть до момента приземления. Применительно к морской технике существуют также проекты установки ветрогенераторов на надводные суда для обеспечения их дополнительным источником энергии [7].

В настоящей работе предполагается, что при движении подводного глайдера набегающий поток воды вращает гидротурбину (гребной винт, работающий в турбинном режиме), которая посредством общего вала вращает электрогенератор, работа которого, в свою очередь, обеспечивает зарядку аккумулятора для питания гидронасоса рабочей жидкости. Таким образом, появляется возможность зарядки аккумулятора при движении подводного глайдера. Вместе с тем, работающий турбогенератор за счет дополнительного сопротивления ухудшает гидродинамическое качество глайдера. В итоге, имеем два разнонаправленных фактора влияющих на параметры дальности и автономности глайдера: с одной стороны выработка дополнительной электроэнергии увеличивает дальность и автономность, с другой стороны дополнительное сопротивление уменьшает их. Таким образом, требуется проведение комплексной оценки параметров дальности и автономности подводного глайдера, оснащенного турбогенератором.

Методика оценки параметров дальности и автономности подводного глайдера, оснащенного турбогенератором

При оценке целесообразности выработки электроэнергии на борту подводного аппарата будем рассматривать глайдер типа «тело вращения с крыльями» со следующими базовыми параметрами, приведенными в [1]: корпус в виде эллипсоида вращения длиной

$l=2,0\text{ м}$ и диаметром $d=0,2\text{ м}$ с прямоугольным в плане крылом с размахом $l_w=1\text{ м}$, хордой $c_w=0,15\text{ м}$ и профилем 9% толщины, удлинение $\lambda_w=6,67$. Водоизмещение аппарата: $V_0=0,042\text{ м}^3$. Производные гидродинамических коэффициентов, связанных с несущими свойствами глайдера: $C_y^\alpha=4,393$, $C_x^{\alpha\alpha}=0,984$. Коэффициент C_{x0}^f вязкостного сопротивления при нулевом угле атаки определялся приближенно на основе сопротивления трения по методу эквивалентной пластины, сопротивление давления как доля сопротивления диска равного поперечного сечения [8]. Коэффициент сопротивления трения с учетом ламинарного характера обтекания вычислялся по формуле Блазиуса (1), числа Рейнольдса Re рассчитывались по характерным длинам (по длине корпуса и хорде крыла):

$$C_{xlam}^f = \frac{1,328}{\sqrt{Re}}. \quad (1)$$

В расчете учитывался также коэффициент индуктивного сопротивления крыла по Прандтлю [9]:

$$C_{xi} = k_i \frac{C_y^2}{\pi \lambda}. \quad (2)$$

Кроме того, предполагалось, что глайдер оснащен четырехлопастным гребным винтом серии Нордстрёма с шаговым отношением 0,8 и дисковым отношением 0,45. Кривые действия для данного винта при работе в турбинном режиме приведены в [10]. Эти кривые действия в первом приближении для турбинного участка могут быть аппроксимированы линейными функциями. Аппроксимация кривой действия для коэффициента упора: $K_1(\lambda)=0,66(\lambda-0,9)$; аппроксимация кривой действия для коэффициента момента: $K_2(\lambda)=0,104(\lambda-1)$, где относительная поступь винта $\lambda=\frac{v}{nD}$ изменяется в пределах от 1 до 1,5, здесь v —скорость

набегающего потока; n —число оборотов гребного винта; D —диаметр винта. Тогда можно ввести в рассмотрение турбинный коэффициент полезного действия, обратный по физическому смыслу пропульсивному коэффициенту гребного винта, работающему в штатном режиме. Турбинный коэффициент полезного действия винта равен отношению работы гидродинамических сил на создание вращающего момента M к работе гидродинамических сил на создание упора T . С учетом того, что

$$T=K_1(\lambda)\rho n^2 D^4, \quad (3)$$

$$M=K_2(\lambda)\rho n^2 D^5, \quad (4)$$

где ρ —плотность воды, турбинный коэффициент полезного действия равен:

$$\eta_k(\lambda)=\frac{2\pi n M}{v T}=\frac{2\pi n K_2(\lambda)\rho n^2 D^5}{v K_1(\lambda)\rho n^2 D^4}=\frac{2\pi K_2(\lambda)}{\lambda K_1(\lambda)}. \quad (5)$$

Для данного винта максимальное значение турбинного коэффициента полезного действия составляет 54%, кроме того для целей параметрического исследования задачи рассматривалась также кривая действия момента, аппроксимированная соотношением: $K_2(\lambda)=0,140(\lambda-1)$ с максимальным значением турбинного коэффициента полезного действия 75%.

Известно, что при установившемся движении подводного глайдера, его избыточная плавучесть (положительная или отрицательная) уравнивается равнодействующей подъемной силы и силы гидродинамического сопротивления. Введем в рассмотрение относительный объем замещения η , тогда сила избыточной плавучести, действующая на глайдер равна $\Delta R_B = \rho g \Delta V = \rho g V_0 \eta$.

Запишем выражение для силы гидродинамического сопротивления глайдера с учетом работы турбогенератора и соответствующих гидродинамических коэффициентов, в качестве характерной площади примем площадь крыла S_{wing} :

$$R_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} S_{wing} + K_1 \rho v^2 D^4 = \left[C_x + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{wing}} \right] \frac{\rho v^2}{2} S_{wing} = \left[\left(C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{wing}} \right) + C_x^{\alpha\alpha} \alpha^2 \right] \frac{\rho v^2}{2} S_{wing} =$$

$$= (C_{x0} + C_x^{\alpha\alpha} \alpha^2) \frac{\rho v^2}{2} S_{wing} = C_x \frac{\rho v^2}{2} S_{wing} \quad (6)$$

Выражение для подъемной силы имеет вид

$$R_y = C_y \frac{\rho v^2}{2} S_{wing} = C_y^{\alpha} \alpha \frac{\rho v^2}{2} S_{wing}, \quad (7)$$

здесь α – угол атаки глайдера; в первом приближении принимаем, что сопротивление турбогенератора не зависит от угла атаки.

Тогда установившееся значение скорости движения глайдера на траектории может быть определено по формуле:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2gV_0\eta}{S_{wing}\sqrt{C_x^2 + C_y^2}}}. \quad (8)$$

Представляет интерес рассмотрение «настройки» глайдера на такое значение угла атаки, при котором реализуется максимальное гидродинамическое качество. Следуя классической теории несущей поверхности, запишем формулу для гидродинамического качества в виде:

$$K = \frac{C_y^{\alpha} \alpha}{C_x^{\alpha\alpha} \alpha^2 + C_{x0}}. \quad (9)$$

Дифференцируя (9) по углу атаки и приравнявая эту производную нулю, нетрудно найти угол атаки максимального качества α_{opt} , соответствующее этому углу значение коэффициента подъемной силы C_{yopt} и, собственно значение максимального качества. Имеем

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{C_{x0}}{C_x^{\alpha\alpha}}} = \sqrt{\frac{C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{wing}}}{C_x^{\alpha\alpha}}}, \quad (10)$$

$$C_{yopt} = C_y^{\alpha} \sqrt{\frac{C_{x0}}{C_x^{\alpha\alpha}}} = C_y^{\alpha} \sqrt{\frac{C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{wing}}}{C_x^{\alpha\alpha}}}, \quad (11)$$

$$K_{max} = \frac{C_y^{\alpha}}{2\sqrt{C_x^{\alpha\alpha} C_{x0}}} = \frac{C_y^{\alpha}}{2\sqrt{C_x^{\alpha\alpha} \left(C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{wing}} \right)}}. \quad (12)$$

Если оптимальный режим планирования реализуется, то соответствующая скорость движения на траектории равна:

$$v_{0opt} = \sqrt{\frac{2gV_0\eta}{S_{wing}\sqrt{\frac{(C_y^{\alpha})^2}{C_x^{\alpha\alpha}} C_{x0} + 4C_{x0}^2}}} = \sqrt{\frac{2gV_0\eta}{S_{wing}\sqrt{\frac{(C_y^{\alpha})^2}{C_x^{\alpha\alpha}} \left(C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{wing}} \right) + 4 \left(C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{wing}} \right)^2}}}. \quad (13)$$

Заметим, что поскольку коэффициент C_{x0} сам зависит от скорости движения подводного глайдера через число Рейнольдса, вычисление значения скорости при оптимальном угле атаки на основе уравнения (13) осуществлялось численно.

Оценим дальность подводного глайдера, принимая для упрощения, что энергия аккумуляторных батарей затрачивается в основном на реверс тяги на расчетной глубине H [1]. Нетрудно видеть, что энергия, необходимая для однократного реверса тяги равна:

$$E_H = \frac{\rho g H V_0 \eta}{\eta_H}, \quad (14)$$

где η_H - коэффициент полезного действия насоса.

Если энергетическая емкость аккумуляторных батарей глайдера равна E_b , то плотность энергии (энергия в единице объема батареи) может быть записана как $e_b = E_b/V_b$, где V_b - объем батарейного отсека аппарата. При расчетной глубине H за период одного «галса» (однократное погружение - всплытие) глайдер пройдет по расстояние, равное $2HK$. Тогда с учетом (14) можно приближенно оценить дальность навигации подводного глайдера по формуле:

$$R = 2HK \frac{E_b}{E_H} = \frac{2}{\rho g} \frac{E_b}{V_b} \frac{V_b}{V_0} \frac{K}{\eta} \eta_H = \frac{2}{\rho g} e_b \bar{V}_b \eta_H f_R, \quad (15)$$

где безразмерная функция $f_R = K/\eta$ характеризует дальность подводного глайдера. Из выражения для функции дальности f_R следует, что дальность глайдера прямо пропорциональна его гидродинамическому качеству K и обратно пропорциональна относительному объему замещения η .

Время A прохождения дистанции R , ассоциируемое с автономностью глайдера, может быть определено следующим образом:

$$A = \frac{R}{v_0 \cos \gamma}. \quad (16)$$

С учетом того, что угол наклона траектории глайдера γ выражается через гидродинамическое качество [1] $\tan \gamma = 1/K$ и соотношений (8), (15), автономность глайдера равна

$$\begin{aligned} A &= \frac{R}{v_0 \cos \gamma} = \frac{2}{\rho g} e_b \bar{V}_b \eta_H \frac{K}{\eta} \frac{\sqrt{S_{wing} \sqrt{C_x^2 + C_y^2}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{K}\right)^2}}{\sqrt{2gV\eta}} = \\ &= \frac{\sqrt{2} e_b}{\rho g^{3/2}} \frac{\bar{V}_b \eta_H}{\eta^{3/2} \sqrt{V_0/S_{wing}}} K \sqrt{1 + \left(\frac{1}{K}\right)^2} \sqrt{\sqrt{C_y^2 + \frac{C_y^2}{K^2}}} = \frac{\sqrt{2} e_b \bar{V}_b \eta_H}{\rho g^{3/2} \sqrt{V_0/S_{wing}}} \frac{C_y^{1/2} (1 + K^2)^{3/4}}{\eta^{3/2} K^{1/2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Если оптимальный режим планирования реализуется, то соответствующие ему дальность и автономность равны:

$$R_{\max} = \frac{e_b \bar{V}_b \eta_H C_y^\alpha}{\rho g \eta \sqrt{C_x^{\alpha\alpha} C_{x0}^\alpha}} = \frac{e_b \bar{V}_b \eta_H C_y^\alpha}{\rho g \eta \sqrt{C_x^{\alpha\alpha} \left(C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{wing}} \right)}}; \quad (18)$$

$$\begin{aligned} A_{\max} &= \frac{2e_b \bar{V}_b \eta_H}{\rho g^{3/2} \sqrt{V_0/S_{wing}}} \frac{C_{x0}^{1/2} \left(1 + \frac{(C_y^\alpha)^2}{4C_x^{\alpha\alpha} C_{x0}^\alpha} \right)^{3/4}}{\eta^{3/2}} = \\ &= \frac{2e_b \bar{V}_b \eta_H}{\rho g^{3/2} \sqrt{V_0/S_{wing}}} \frac{\sqrt{C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{wing}}}}{\eta^{3/2}} \left(1 + \frac{(C_y^\alpha)^2}{4C_x^{\alpha\alpha} \left(C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{wing}} \right)} \right)^{3/4} \end{aligned} \quad (19)$$

Предположим теперь, что в процессе движения глайдера осуществляется заряд аккумуляторной батареи. В этом случае автономность глайдера увеличится за счет энергии поступающей от турбогенератора. Обозначая e'_b плотность энергии заряда аккумулятора за все время движения на автономном режиме, получим:

$$A_{\max} = \frac{2(e_b + e'_b)\bar{V}_b\eta_H}{\rho g^{3/2}\sqrt{V_0/S_{\text{wing}}}} \frac{C_{x0}^{1/2} \left(1 + \frac{(C_y^\alpha)^2}{4C_x^{\alpha\alpha}C_{x0}}\right)^{3/4}}{\eta^{3/2}} =$$

$$= \frac{2(e_b + e'_b)\bar{V}_b\eta_H}{\rho g^{3/2}\sqrt{V_0/S_{\text{wing}}}} \frac{\sqrt{C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{\text{wing}}}}}{\eta^{3/2}} \left(1 + \frac{(C_y^\alpha)^2}{4C_x^{\alpha\alpha} \left(C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{\text{wing}}}\right)}\right)^{3/4} \quad (20)$$

Теперь, обозначая $\tilde{\eta}$ коэффициент потерь в турбогенераторе, можем определить плотность энергии заряда аккумулятора за время определяемое автономностью на основе следующего уравнения:

$$e'_b = \frac{\tilde{\eta} M \cdot 2\pi n}{V_b} \frac{2(e_b + e'_b)\bar{V}_b\eta_H}{\rho g^{3/2}\sqrt{V_0/S_{\text{wing}}}} \frac{\sqrt{C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{\text{wing}}}}}{\eta^{3/2}} \left(1 + \frac{(C_y^\alpha)^2}{4C_x^{\alpha\alpha} \left(C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{\text{wing}}}\right)}\right)^{3/4}. \quad (21)$$

Тогда дальность на оптимальном режиме при зарядке аккумуляторных батарей равна:

$$R_{\max} = \frac{(e_b + e'_b)\bar{V}_b\eta_H C_y^\alpha}{\rho g \eta \sqrt{C_x^{\alpha\alpha} C_{x0}}} = \frac{(e_b + e'_b)\bar{V}_b\eta_H C_y^\alpha}{\rho g \eta \sqrt{C_x^{\alpha\alpha} \left(C_{x0} + \frac{2K_1 D^2}{\lambda^2 S_{\text{wing}}}\right)}}. \quad (22)$$

Таким образом, могут быть определены оптимальные параметры подводного глайдера (угол атаки, гидродинамическое качество, дальность и автономность) при варьировании величиной относительной поступи λ или турбинным коэффициентом полезного действия с учетом того, что $\eta_k = f(\lambda)$.

Результаты расчета параметров дальности и автономности подводного глайдера, оснащенного турбогенератором

В качестве примера были рассчитаны относительные параметры дальности и автономности подводного глайдера с рассмотренными выше характеристиками для двух значений относительного объема замещения $\eta = 0,02$ и $\eta = 0,03$. Как отмечалось выше, рассматривались кривые действия момента с максимальными значениями турбинного коэффициента полезного действия $\eta_k = 54\%$ и $\eta_k = 75\%$. Указанные параметры определялись по отношению к соответствующим параметрам дальности R_N и автономности A_N подводного глайдера не оснащенного турбогенератором. Для целей параметрического исследования варьировался диаметр винта D от 0,1м до 0,4м с шагом 0,1м.

Как показали результаты расчета, варьирование значением относительного объема замещения η в указанном диапазоне не значительно влияет на относительные параметры дальности и автономности. Поэтому основное внимание сосредоточим на анализе изменения этих параметров при варьировании значением турбинного коэффициента полезного действия.

На рисунках 3,4 приведены результаты расчета относительной дальности $R_{отн} = R_{\max}/R_N$ и автономности $A_{отн} = A_{\max}/A_N$ подводного глайдера для двух указанных значений турбинного коэффициента полезного действия при $\eta = 0,02$. Максимальное расчетное значение гидродинамического качества глайдера, не оснащенного турбогенератором для заданных характеристик глайдера составляет 13,7.

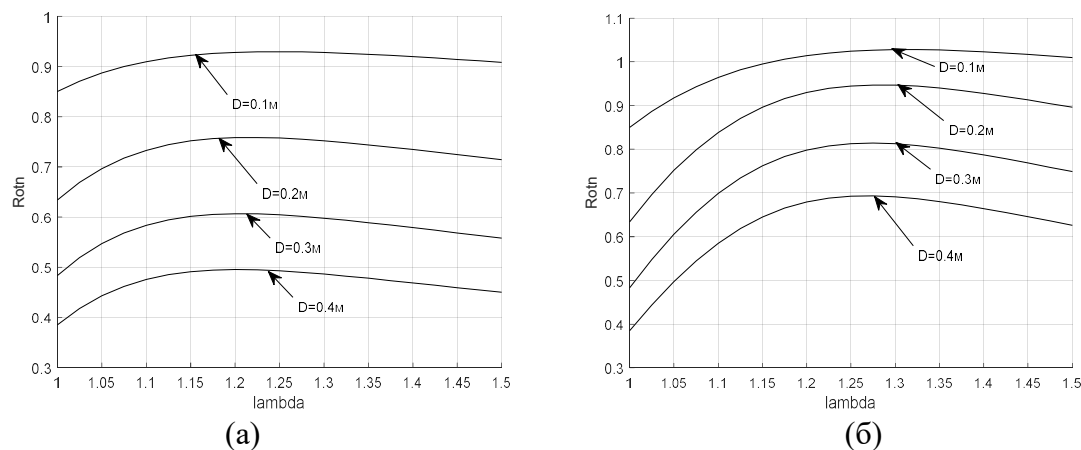


Рисунок 3 – Зависимость относительной дальности глайдера от относительной поступи при варьировании диаметром винта: (а) - $\eta_k = 54\%$; (б) - $\eta_k = 75\%$

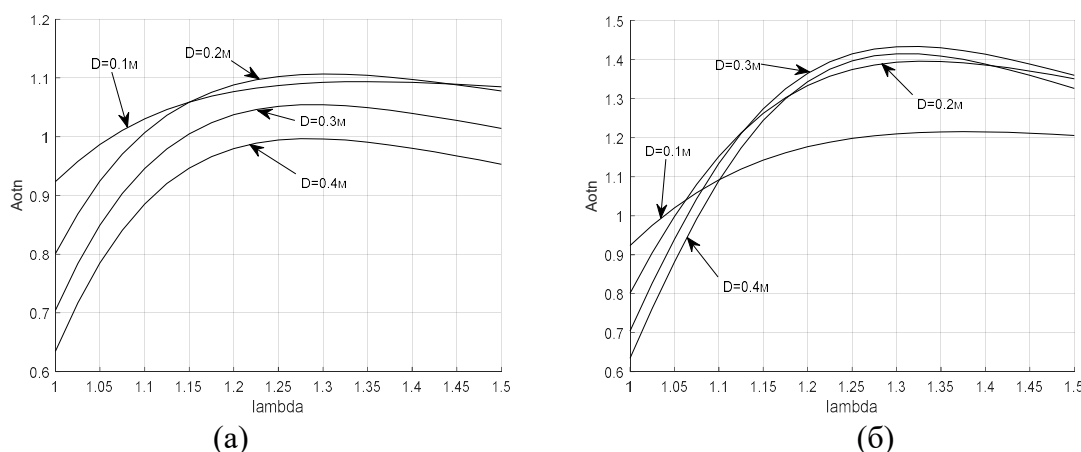


Рисунок 4 – Зависимость относительной автономности глайдера от относительной поступи при варьировании диаметром винта: (а) - $\eta_k = 54\%$; (б) - $\eta_k = 75\%$

Анализ представленных зависимостей показывает, что на параметры дальности и автономности глайдера определяющим образом влияет значение турбинного коэффициента полезного действия. Используемый турбогенератор при реальных значениях турбинного коэффициента полезного действия не позволяет повысить дальность подводного глайдера, возможно лишь повышение его автономности на величину до 40%, при этом отношение диаметра винта D к диаметру корпуса глайдера d составляет величину $D/d = 1 \div 2$.

Выше предполагалось, что вал турбогенератора расположен практически на оси корпуса подводного глайдера и не создает значительных дифферентующих моментов. Если же вал турбогенератора расположен на откидывающейся штанге (см. рисунок 5), то для исследования параметров движения глайдера удобно перейти в связанную с ним систему координат [11].

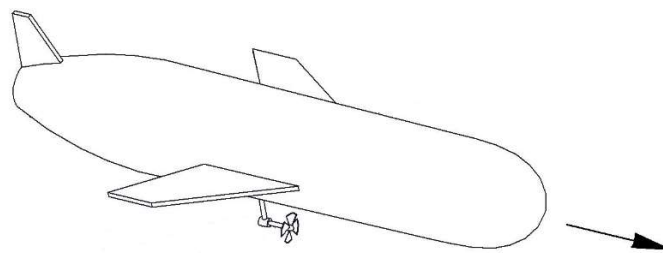


Рисунок 5 – Вариант размещения турбогенератора на откидывающейся штанге

Можно показать, что остаются справедливыми приведенные выше основные соотношения, но в этом случае необходимо прилагать силу избыточной плавучести, обусловленную относительным объемом замещения $\Delta R_b = \rho g \Delta V = \rho g V_0 \eta$, на плече \bar{x}_p по длине относительно центра тяжести глайдера для компенсации дифференцирующего момента, обусловленного работой турбогенератора.

Заключение

В данной работе разработана методика оценки максимальных параметров дальности и автономности подводного глайдера, оснащенного турбогенератором для возможности зарядки аккумуляторных батарей. Показано, что использование турбогенератора при реальных значениях турбинного коэффициента полезного действия (менее 75%) не позволяет повысить дальность глайдера, возможно лишь повышение его автономности на величину до 40%. Таким образом, движение глайдера с работающим турбогенератором следует рассматривать не как штатный, а лишь как дополнительный режим движения с возможностью частичного заряда аккумуляторной батареи и выработки электроэнергии в аварийных ситуациях. Представленная методика позволяет повысить эффективность проектно-конструкторских работ за счет комплексного многопараметрического анализа влияния различных факторов на оптимальные параметры движения подводного глайдера, оснащенного турбогенератором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рождественский К.В. Параметрический анализ установившегося движения подводного глайдера в вертикальной плоскости / К.В. Рождественский // Морские интеллектуальные технологии. 2016. №3 (33), Т.2, С.7 – 14.
2. Кожемякин И.В. Подводные глайдеры: вчера, сегодня, завтра / И.В. Кожемякин, К.В. Рождественский, В.А. Рыжов, Е.И. Татаренко // Морской вестник. 2013. №2 (46), С.98 – 101.
3. Маевский А.М. Разработка морских робототехнических комплексов с перспективой применения в качестве резидентной робототехники, на примере проектной работы по разработке линейки АНПА «глайдер – гибридный глайдер - IAUV» / А.М. Маевский, Б.А. Гайкович // В сборнике: «Комплексные исследования Мирового океана». Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. 2019. С.367- 369.
4. Dae-Hyeong J. Design and control of hybrid underwater glider / J. Dae-Hyeong, Ch. Haeung-Sik, K. Jin-Il, Ch. Hyun-Joon, J. Moon-Gap, L. Jae-Heon // Advances in Mechanical Engineering. 2019. Val. 11(5). pp.1 – 9.
5. Siregar S. Design and construction of hybrid autonomous underwater glider for underwater research / S.Siregar, B.R. Trilaksono, E.M.I. Hidayat, M. Kartidjo, N. Habibullah, M.F. Zulkarnain, H.N. Setiawan // Robotics. 2023. Val.12(8). pp. 1 – 31.
6. Кашин Я.М. Современное состояние аварийных авиационных турбин и их классификация / Я.М. Кашин, А.С. Князев, А.Я. Кашин, В.А. Бац // Вестник АГУ. 2017. №1 (196), С.112 – 122.
7. Сагдиев Р.Р. Применение альтернативных источников энергии на водном транспорте / Р.Р. Сагдиев, Е.А. Чабанов // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Транспорт: проблемы, цели, перспективы». 2020. С.229 – 233.
8. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под редакцией Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985, 768 с.
9. Фатеев Е.М. Ветродвиатели и ветроустановки / Е.М. Фатеев. – М.: ОГИЗ, 1948. – 544 с.
10. Басин А.М. Теория и расчет гребных винтов / А.М. Басин, И.Я. Миниович. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 760 с.
11. Сухоруков А.Л. Теория подводных тросовых систем и ее инженерные приложения / А.Л. Сухоруков. – М.: Физматлит, 2017. – 272 с.

Сухоруков Андрей Львович

АО «ЦКБ МТ «Рубин», г. Санкт-Петербург

Доктор технических наук, заместитель начальника отдела

191119, г. Санкт-Петербург, ул. Марата, 90

Тел. (812) 494-19-40

E-mail: su_andr@yahoo.com

SUKHORUKOV A.L.

ASSESSMENT OF THE FEASIBILITY OF GENERATING ELECTRIC POWER DURING THE MOVEMENT OF AN UNDERWATER GLIDER TO INCREASE ITS RANGE AND AUTONOMY

Abstract. *This paper assesses the feasibility of generating electric power on board an underwater glider using an electric generator, the rotation of which is provided by a propeller operating in turbine mode to increase its range and autonomy. When the underwater glider moves, the oncoming water flow rotates a hydraulic turbine (a propeller operating in turbine mode), which, by means of a common shaft, rotates an electric generator, the operation of which, in turn, charges the battery to power the hydraulic pump of the working fluid. Thus, it becomes possible to charge the battery while the underwater glider is moving. At the same time, the operating turbogenerator worsens the hydrodynamic quality of the glider due to additional resistance. It is shown that the use of a turbogenerator with real values of the turbine efficiency (less than 75%) does not allow increasing the range of the glider, it is only possible to increase its autonomy by up to 40%. The presented method allows increasing the efficiency of design and engineering works due to a comprehensive multi-parameter analysis of the influence of various factors on the optimal parameters of the movement of an underwater glider equipped with a turbogenerator.*

Keywords: *underwater glider, propeller, propulsion device, range, autonomy, hydrodynamic quality, turbogenerator, battery, excess buoyancy, angle of attack.*

BIBLIOGRAPHY

1. Rozhdestvenskiy K.V. Parametricheskii analiz ustanovivshegosya dvizheniya podvodnogo glaydera v vertikalnoy ploskosti / K.V. Rozhdestvenskiy // Morskiye intellektualnyye tekhnologii. 2016. №3 (33), T.2, S.7 – 14.
2. Kozhemyakin I.V. Podvodnyye planery: vchera, segodnya, zavtra / I.V. Kozhemyakin, K.V. Rozhdestvenskiy, V.A. Ryzhov, Ye.I. Tatarenko // Morskoy vestnik. 2013. №2 (46), S.98 – 101.
3. Mayevskiy A.M. Razrabotka morskikh robototekhnicheskikh kompleksov s perspektivoy primeneniya v kachestve rezidentnoy robototekhniki, na primere proyektnoy raboty po razrabotke sektsii ANPA «glayder – gibridnyy planer – IAUV» / A.M. Mayevskiy, B.A. Gaykovich // V sbornike: «Kompleksnyye issledovaniya Mirovogo okeana». Materialy IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh. 2019. S.367- 369.
4. Dae-Hyeong J. Design and control of hybrid underwater glider / J. Dae-Hyeong, Ch. Haeung-Sik, K. Jin-Il, Ch. Hyun-Joon, J. Moon-Gap, L. Jae-Heon // Advances in Mechanical Engineering. 2019. Val. 11(5). pp.1 – 9.
5. Siregar S. Design and construction of hybrid autonomous underwater glider for underwater research / S.Siregar, B.R. Trilaksono, E.M.I. Hidayat, M. Kartidjo, N. Habibullah, M.F. Zulkarnain, H.N. Setiawan // Robotics. 2023. Val.12(8). pp. 1 – 31.
6. Kashin YA.M. Sovremennoye sostoyaniye aviatsionnykh turbin i ikh klassifikatsiya / YA.M. Kashin, A.S. Knyazev, A.YA. Kashin, V.A. Bats // Vestnik AGU. 2017. №1 (196), S.112 – 122.
7. Sagdiyev R.R. Primeneniye alternativnykh istochnikov energii na vodnom transporte / R.R. Sagdiyev, Ye.A. Chabanov // Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Transport: problemy, tseli, perspektivy». 2020. S.229 – 233.
8. Spravochnik po teorii korablestroyeniya: V trekh tomakh. Tom 1. Gidromekhanika. Soprotivleniye dvizheniyu sudov. Sudovyye dvizhiteli / Pod redaktsiyey YA.I. Voytkunskogo. L.: Sudostroyeniye, 1985, 768 s.
9. Fateyev Ye.M. Vetrodvigateli i vetroustanovki / Ye.M. Fateyev. – M.: OGIZ, 1948. – 544 s.
10. Basin A.M. Teoriya i raschet grebnykh vintov / A.M. Basin, I.YA. Miniovich. – L.: Sudpromgiz, 1963. – 760 s.
11. Sukhorukov A.L. Teoriya podvodnykh trosovykh sistem i yeye inzhenernyye prilozheniya / A.L. Sukhorukov. – M.: Fizmatlit, 2017. – 272 s.

Sukhorukov Andrei Lvovich

Central Design Bureau for Marine Engineering “Rubin”, St. Petersburg

Doctor of Engineering Sciences, Deputy Head of

Department

191119, St. Petersburg, 90 Marata str.

Ph.: (812) 494-19-40

E-mail: su_andr@yahoo.com

© Сухоруков А.Л., 2025

ШОРКИН В.С., ФРОЛЕНКОВА Л.Ю., РОМАШИН С.Н., КОНИЩЕВА А.И.

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ НАПРЯЖЕННОГО УПРУГОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация. В работе предложен метод оценки и критерий наличия относительной дефектности упругого материала. Дефекты предполагаются плоскими, на которых сохраняется непрерывность поля перемещений и классических напряжений, но нарушается непрерывность поля градиентов перемещений. Предполагается, что такие дефекты возникают в металлах на межзеренных границах их структуры как при упрочнении, так и при изменении напряженно-деформированного состояния. В основе метода лежит предположение о том, что в этих условиях наличие дефектов снижает потенциальную энергию по сравнению с состоянием в их отсутствии.

Ключевые слова. Упрочнение, дефект, поврежденность, нелокальная и локальная теории упругости, межчастичные потенциальные взаимодействия.

Введение

Нагружение упругого материала, в результате которого он испытывает малые деформации, изменение его механических свойств, например, в результате упрочнения пластическим деформированием [1], может быть причиной зарождения в нем дефектов структуры материала. Из них могут развиваться микротрещины [2 – 4]. Для них характерно наличие несоответствия атомных решеток и напряжений несоответствия [5 – 6]. Общей чертой дефектов до их развития в микротрещины, является сохранение сплошности материала. На этом основании рассматриваемые дефекты считаются плоскими. Прогнозирование вероятности возникновения и распространения таких дефектов, которые могут перерасти в микротрещины при больших нагрузках, является актуальной задачей. Ее решению посвящена данная работа. Метод, изложенный в работе построен на использовании градиентной теории линейно упругих материалов, использующей в качестве кинематических характеристик не только первый, но и второй градиенты перемещений. В рамках метода предполагается также, что среда обладает начальным напряженным состоянием.

Модель сплошной среды

Модель сплошной среды представлена в работах [7, 8]. Ее основные черты состоят в следующем. Рассматривается однородное изотропное упругое тело B , ограниченное поверхностью A . Его отсчетной конфигурацией является область Λ , а текущей – область Λ_t . Первая ограничена поверхностью A , а вторая – поверхностью A_t . Переход из отсчетной конфигурации в текущую конфигурацию характеризуется вектором \vec{u} перемещений центров инерции его частиц $dB \subset B$.

$$\vec{u} = \vec{u}(\vec{r}, t) = \vec{R}(\vec{r}, t) - \vec{r}, \quad (\vec{r} \in \Lambda, \quad \vec{R}(\vec{r}, t) \in \Lambda_t, \quad t - \text{время}). \quad (1)$$

Так что перемещение частицы dB относительно частицы dB' характеризуется вектором $\Delta \vec{u} = \vec{u} - \vec{u}'$, а ее положение относительно dB характеризуется вектором $\vec{L} = \vec{M}_t \vec{M}_i = \vec{R} - \vec{R}' = \vec{l} + \Delta \vec{u}$. Если $L = |\vec{L}| = |\vec{l} + \Delta \vec{u}| \neq |\vec{l}| = l$, то тело B деформируемо.

Рассматриваемые деформации так малы, что

$$|\Delta \vec{u} / D| \ll 1, \quad D^{n-1} \|\nabla^n \vec{u}\| \ll 1. \quad (2)$$

Здесь $\|\nabla^n \vec{u}\|$ – норма тензора $\nabla^n \vec{u}$ – градиента порядка n вектора перемещений; D – характерный размер области, для которой строится модель.

Допущения (2) дают возможность считать относительные изменения объемов частиц при деформации тела B пренебрежимо малыми и проводить описание напряженно-деформированного состояния материала тела B относительно его отсчетной конфигурации Λ .

В рамках нелокальной модели считается, что все частицы dB любого тела B , а также разных тел взаимодействуют между собой на конечных расстояниях посредством потенциальных сил. Потенциальная энергия тела B является суммой не только парных, но и

тройных взаимодействий между ними. Причиной учета тройных взаимодействий является необходимость учета разнообразия коэффициента Пуассона для различных материалов.

Потенциалы парных и тройных взаимодействий d^2W и d^3W пропорциональны объемам $dV \equiv d^3\vec{r}$, $dV' \equiv d^3\vec{r}'$, $dV'' \equiv d^3\vec{r}''$ взаимодействующих частиц dB , dB' , dB''

$$d^2W = \Phi^{(2)} dV dV', \quad d^3W = \Phi^{(3)} dV dV' dV''. \quad (3)$$

Коэффициенты пропорциональности зависят только от расстояний между ними.

$$\Phi^{(2)} = \Phi_0^{(2)} \varphi(\xi), \quad \Phi^{(3)} = \Phi_0^{(3)} \varphi(\xi) \varphi(\xi'') \quad (\xi = \beta l). \quad (4)$$

Здесь $\beta > 0$, $\Phi_0^{(2)} = |\min \Phi^{(2)}| > 0$ и $\Phi_0^{(3)}$ – параметры, а функция $\varphi(\xi)$ имеет вид:

$$\varphi(\xi) = \begin{cases} \varphi_1(\xi), & 0 \leq \xi \leq \xi_0 \\ \varphi_2(\xi - \xi_0), & \xi_0 < \xi < +\infty \end{cases}, \quad \xi_0 = \beta l_0 \rightarrow 0. \quad (5)$$

Система частиц dB , dB' , dB'' , образующих тело B , должна быть устойчивой. Поэтому приняты условия, которые обеспечивают выполнение этого требования

$$\varphi_1(\xi_0) = \varphi_2(\xi_0), \quad \varphi_2(\xi - \xi_0) = e^{-2(\xi - \xi_0)} - 2e^{-(\xi - \xi_0)}, \quad (6)$$

$$\int_{\Lambda_0} \varphi_1 dV_2 = 2 \left| \int_{\Lambda \setminus \Lambda_0} \varphi_2 dV_2 \right|. \quad (7)$$

Здесь Λ_0 – сферическая область радиуса l_0 с центром частицы dB ; монотонная функция $\varphi_1(\xi)$ выбирается так, чтобы удовлетворить равенствам (6) и (7).

Выражение для энергии взаимодействия $dW = w dV$ частицы dB со всеми другими частицами тела B в текущей конфигурации в нелокальной модели имеет вид:

$$dW = w dV = \left\{ \int_{\Lambda} \Phi^{(2)}(L') dV_2 + \int_{\Lambda} dV_2 \int_{\Lambda} \Phi^{(3)}(L', L'') dV_3 \right\} dV. \quad (8)$$

Неравенства (2) дают возможность представить вектор $\Delta \vec{u}$ полиномом

$$\Delta \vec{u} \cong (\nabla \vec{u}) \cdot \vec{l} + (1/2) (\nabla^2 \vec{u}) \cdot \vec{l}^2 + \dots + (1/N!) (\nabla^N \vec{u}) \cdot \dots \cdot \vec{l}^N. \quad (9)$$

Здесь принято, что $d\vec{l} = d\vec{r}$, тогда $d/d\vec{l} = \nabla$. Кроме того $\vec{l}^N = \overbrace{\vec{l} \dots \vec{l}}^N$ есть внешние произведения n векторов \vec{l} , а число членов N полинома (9) определяется при решении конкретной задачи. Это помогает получить характерное для локальной модели материалов второго порядка полином второй степени, который определяет вызванный деформацией прирост плотности энергии.

$$\Delta w = \sum_{n=1}^N P^{(n)} \cdot \overbrace{\dots}^N (\nabla^n \vec{u})^T + \frac{1}{2} \sum_{m,n=1}^N (\nabla^m \vec{u}) \cdot \overbrace{\dots}^m C^{(n,m)} \cdot \overbrace{\dots}^N (\nabla^n \vec{u})^T. \quad (10)$$

Тензоры напряжений $P^{(n)}$, начальных напряжений $P^{(0)}$ и тензоры механических свойств материала $C^{(m,n)}$ определяются следующими равенствами.

$$P^{(n)} = \frac{\partial \Delta w}{\partial (\nabla^n \vec{u})} = P^{(0)} + \sum_{m=1}^N (\nabla^m \vec{u}) \cdot \overbrace{\dots}^{m \text{ раз}} C^{(m,n)}, \quad (11)$$

$$P^{(0)} = \int_{\Lambda} (\nabla' \Phi^{(2)}) \vec{l}^n dV' + \int_{\Lambda} \left[\int_{\Lambda} (\nabla' \Phi^{(3)}) \vec{l}^n dV' \right] dV'' + \int_{\Lambda} \left[\int_{\Lambda} (\nabla'' \Phi^{(3)}) \vec{l}^n dV' \right] dV'', \quad (12)$$

$$C^{(n,m)} = \int_{\Lambda} \vec{l}^n (\nabla'^2 \Phi^{(2)}) \vec{l}^m dV' + 2 \int_{\Lambda} \left[\int_{\Lambda} \vec{l}^n (\nabla' \nabla'' \Phi^{(3)}) \vec{l}^m dV' \right] dV''. \quad (13)$$

Здесь $\nabla' \equiv d\dots/d\vec{l}'$, $\nabla'' \equiv d\dots/d\vec{l}''$.

В любой момент времени тензоры $P^{(n)}$ подчинены уравнению движения

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \left(P^{(1)} - \nabla \cdot \left(P^{(2)} - \dots - \nabla \cdot \left(P^{(N-1)} - \nabla \cdot P^{(N)} \right) \right) \right). \quad (14)$$

В начальный момент времени $t = 0$ задаются начальные условия распределения перемещений и скоростей:

$$\vec{u}(\vec{r}, t = 0) = \vec{u}_0(\vec{r}), \left[\frac{\partial}{\partial t} \vec{u}(\vec{r}, t) \right]_{t=0} = \vec{v}_0(\vec{r}). \quad (15)$$

В любой момент времени на поверхности A каждой рассматриваемой части или всего тела B задаются краевые условия:

$$\vec{n} \cdot \left[P^{(1)} - \nabla \cdot (P^{(2)} - \dots) \right] - \nabla_A \cdot \left[\vec{n} \cdot (P^{(2)} - \dots) \right] = \Pi^{(0)} \text{ или } \vec{u} = \vec{u}_A, \quad (16)$$

$$(\vec{n} \vec{n}) \cdot \left[P^{(2)} - \nabla \cdot (P^{(3)} - \dots) \right] - \nabla_A \cdot \left[\vec{n} \cdot (P^{(3)} - \dots) \right] = \Pi^{(1)} \text{ или } \nabla_n \vec{u} = \Gamma_A, \quad (17)$$

и так далее.

Здесь \vec{n} – внешняя единичная нормаль к поверхности A ; $\Pi^{(0)}$ – классические поверхностные силы; $\Pi^{(m)}$, $m = 1, 2, \dots$ – тензоры, характеризующие неклассические поверхностные воздействия, способные совершать работу на тензорных характеристиках неравномерности распределения: $\nabla_n \vec{u} = \Gamma_A = \vec{n} \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{n}} = \frac{\partial}{\partial n}$ и т.д. – производная вдоль нормали к A ; $\frac{\partial}{\partial \vec{n}} = \nabla_{\vec{n}}$ – градиент в направлении нормали \vec{n} ; ∇_A – поверхностный градиент, $\nabla_A + \nabla_{\vec{n}} = \nabla$.

Показано [8], что с помощью (11) – (13) параметры β , $\Phi_0^{(2)}$, $\Phi_0^{(3)}$ можно выразить через параметры Ламе λ , μ и характеристику нелинейности дисперсионного закона высокочастотных акустических волн – например, кривизну κ зависимости $\omega^2 = f(K^2)$ при $K = 0$, где K – волновое число плоской акустической волны частоты ω .

Постановка задачи

В рамках изложенной модели задача об определении распределения дефектности формулируется следующим образом. Предполагается, что исследуемое тело B находится в равновесии. Внешние воздействия на него отсутствуют. Значения параметров β , $\Phi_0^{(2)}$ и $\Phi_0^{(3)}$, а также плотности материала ρ и температуры T известны и распределены по его объему равномерно. Далее тело B подверглось упрочнению, в результате которого параметры межчастичных потенциалов приобрели значения β^* , $\Phi_0^{*(2)}$, $\Phi_0^{*(3)}$, $\rho^* = \rho$, $T^* = T$. Эти изменения привели к изменению механических свойств материала и изменению его напряженно-деформированного состояния (НДС). Возможна и другая ситуация, когда НДС меняется из-за действия внешних нагрузок без изменения механических свойств материала. В обоих случаях возможно возникновение дефектов структуры материала. О таких дефектах в данной работе используется следующее представление.

Рассматриваемые дефекты (учитывая их природу – несоответствия атомных решеток и напряжений несоответствия) являются плоскими. Их сеть образует ячеистую структуру. Так что тело B можно представить в виде объединения ячеек – частиц ΔB , в каждой из которых находится по одному дефекту. При этом под дефектом на атомарном уровне понимается участок ΔA^z плоского сечения ΔA частицы ΔB , вдоль которого нарушена когерентность атомной структуры. На континуальном уровне, в рамках изложенной выше модели упругой среды, это тот же участок ΔA^z плоского сечения ΔA , при пересечении которого сохраняется непрерывность вектора перемещений и классических напряжений. В то же время здесь терпит разрыв поле градиентов перемещений, а совершающие работу на их вариациях неклассические напряжения обращаются в ноль. Площадь дефекта равна ΔS^z . Площадь сечения ΔA равна ΔS . Предполагается, что возникновение такой ситуации характерно для межзеренных границ при изменении зернистой структуры материала при его упрочнении.

Частицы ΔB репрезентативны. Ее размеры не могут быть меньше определенной величины, при которой репрезентативность обеспечена с заданной точностью. Поэтому в рамках континуальной механики она считается бесконечно малой: $\Delta B \approx dB$. То же самое

относится и к величинам ΔS , ΔS^x и $\Delta S^\alpha = \Delta S - \Delta S^x$ – площадь бездефектной части сечения ΔA . С учетом сказанного, дефектностью частицы ΔB предлагается считать величину

$$\chi = \frac{\Delta S^x}{\Delta S}. \quad (18)$$

Задача состоит в расчете этой величины и пространственной ориентации участка ΔA^x , которая характеризуется единичным вектором нормали \vec{n}^x к плоскости дефекта.

Решение задачи

В основе решения лежит утверждение о том, что появление дефекта в ячейке из-за развития НДС является энергетически более выгодным, чем его отсутствие при тех же условиях. Для решения задачи вводятся дополнительные к ранее введенным допущения. Дефекты распределены так редко, что интерференции вызванных соседними дефектами изменений полей перемещений, их градиентов, тензоров напряжений не происходит. Возникновение дефекта вызывает изменение НДС только во внутренней части частицы $\Delta B \approx dB$. Характеристики возмущенного каждым дефектом НДС по мере удаления от него стремятся совпасть с характеристиками невозмущенного НДС, которым считается состояние бездефектного материала в тех же условиях. Предполагается, что бездефектное НДС в любой частице $\Delta B \approx dB$, является однородным. Предполагается, что нормаль к дефекту \vec{n}^x направлена вдоль главного направления тензора напряжений $P^{(1)} \equiv P^{\alpha(1)}$, соответствующего наибольшему из нормальных напряжений [9], развивающихся до появления дефектов. Таким образом, после расчета НДС бездефектного состояния для определения тензорного параметра поврежденности остается необходимым определение его скалярной характеристики χ .

В рассмотрение вводится сплошная эффективная среда, моделирующая дефектную среду. Считается, что ее репрезентативные частицы совпадают с репрезентативными частицами исходной среды – континуума (допускается, что рассматриваемые дефекты сплошности малы по сравнению с частицей ΔB и поэтому их наличие не влияет на размер репрезентативной частицы). Данное допущение означает, что в континууме, который моделирует реальную среду (независимо от наличия дефекта) частица ΔB считается бесконечно малой: $\Delta B \approx dB$. Ее кинематические характеристики – вектор ее перемещения и его градиенты разных порядков, внутри нее считаются постоянными, равными их значениям в центре инерции частицы $\Delta B \approx dB$.

Кроме сказанного внимание обращается на то, что сечение ΔA делит частицу ΔB на две взаимодействующие между собой части $\Delta B_{(1)}$ и $\Delta B_{(2)}$. Так что сечение ΔA становится поверхностью $\Delta A_{(12)}$, вдоль которой эти части взаимодействуют: $\Delta A \equiv \Delta A_{(12)}$. Из-за наличия дефекта описанного выше типа (сохраняется сплошность поля перемещений и классических напряжений) взаимодействие на разных участках поверхности $\Delta A \equiv \Delta A_{(12)}$ происходит по-разному. Вдоль части $\Delta A^x \subset \Delta A_{(12)}$ сопрягаются поля перемещений и классических напряжений. Вдоль части $\Delta A^\alpha \subset \Delta A_{(12)}$ сопрягаются поля не только перемещений и их градиентов, используемых моделью среды, но и работающие на их вариациях напряжения.

Учитывая, что нормаль к дефекту \vec{n}^x направлена вдоль главного направления тензора напряжений $P^{(1)} \equiv P^{\alpha(1)}$, соответствующего наибольшему из нормальных напряжений, а сечение ΔA расположено в плоскости пары других главных напряжений, а также изотропию материала тела B , можно утверждать, что деформации материала, при образовании дефекта будут происходить симметрично относительно плоскости $\Delta A \equiv \Delta A_{(12)}$ в направлении главных осей тензора $P^{(1)} \equiv P^{\alpha(1)}$. Допускается также, что скачкообразный переход от условий сопряжения полей напряжений и деформаций в области $\Delta A^\alpha \subset \Delta A_{(12)}$ к условиям в области $\Delta A^x \subset \Delta A_{(12)}$ (в силу взглядов модели трещины Баренблатта [10]) происходит без

возбуждения добавки $\vec{u}^\times(\vec{r})$, вызванной дефектом, к полю перемещений $\vec{u}^\alpha = \vec{u}^\alpha(\vec{r})$ в бездефектной среде вне области $\Delta A^\chi \subset \Delta A_{(12)}$.

На основании сказанного, предполагается, что в каждой из частиц $\Delta B_{(1)}$ и $\Delta B_{(2)}$ существует перпендикулярная дефекту цилиндрическая область (соответственно $\Delta B_{(1)}^\chi$ и $\Delta B_{(2)}^\chi$), направляющей линией которой является его граница. Одной из ее границ является дефект, а другой – граница частицы ΔB . В областях $\Delta B_{(1)}^\chi$ и $\Delta B_{(2)}^\chi$ поле перемещений $\vec{u}^\alpha = \vec{u}^\alpha(\vec{r})$ возмущено добавкой $\vec{u}^\times(\vec{r})$, вызванной появлением дефекта. Здесь

$$\vec{u}^\chi(\vec{r}) = \vec{u}^\alpha(\vec{r}) + \vec{u}^\times(\vec{r}). \quad (19)$$

Выражения, аналогичные (19), можно записать и для $\nabla^n \vec{u}$, $P^{(n)}$. В областях $\Delta B_{(1)}^\alpha$ и $\Delta B_{(2)}^\alpha$ этого возмущения нет. В результате оказывается, что перемещения, их градиенты и напряжения распределены по частицам $\Delta B_{(1)}$ и $\Delta B_{(2)}$ следующим образом.

$$(\vec{u}^\alpha, \nabla^n \vec{u}^\alpha, P^{\alpha(n)}) \begin{cases} \neq 0, \vec{r} \in \Delta A^\alpha \\ = 0, \vec{r} \notin \Delta A^\alpha \end{cases}, (\vec{u}^\chi, \nabla^n \vec{u}^\chi, P^{\chi(n)}) \begin{cases} \neq 0, \vec{r} \in \Delta A^\chi \\ = 0, \vec{r} \notin \Delta A^\chi \end{cases}. \quad (20)$$

Далее предлагается считать, что поля перемещений в каждой из репрезентативных частиц $\Delta B_{(1)}$ и $\Delta B_{(2)}$ эффективной среды определяются равенством

$$\vec{u}(\vec{r}) = \alpha \vec{u}^\alpha(\vec{r}) + \chi \vec{u}^\chi(\vec{r}) = (1 - \chi) \vec{u}^\alpha(\vec{r}) + \chi \vec{u}^\chi(\vec{r}), \quad (\vec{r} \in \Delta \Lambda_{(1)}) \vee (\vec{r} \in \Delta \Lambda_{(2)}). \quad (21)$$

С учетом (20) аналогичные выражения можно записать для $\nabla^n \vec{u}$, $P^{(n)}$.

$$\nabla^n \vec{u} = \alpha \nabla^n \vec{u}^\alpha + \chi \nabla^n \vec{u}^\chi, \quad P^{(n)} = \alpha P^{\alpha(n)} + \chi P^{\chi(n)}. \quad (22)$$

Эффективная среда считается сплошной. Поэтому для нее справедливы представленные выше уравнения равновесия, краевые условия, а также условия сопряжения на границе контакта $\Delta A_{(12)}$ частиц $\Delta B_{(1)}$ и $\Delta B_{(2)}$. Использование выражений (20) – (22) с учетом определения (11) и сделанных выше допущений о разграничении областей $\Delta \Lambda_{(j)}^\chi$ и $\Delta \Lambda_{(j)}^\alpha$, занимаемых частями частиц $\Delta B_{(j)}$ ($j = 1, 2$), приводит задачу о поиске поля $\vec{u}(\vec{r})$ к расщеплению на две задачи – о поиске поля $\vec{u}^\chi(\vec{r})$ и поиске поля $\vec{u}^\alpha(\vec{r})$.

Решив эти задачи, можно построить выражение, которое определяет объемную плотность W потенциальной энергии частицы ΔB (она равна удвоенной энергии частицы $\Delta B_{(1)}$).

$$W = (1 - \chi) W_{p\alpha} + \chi W_{p\chi} + (1 - \chi)^2 W_{\alpha\alpha} + 2\chi(1 - \beta) W_{\alpha\chi} + \beta^2 W_{\chi\chi} = \\ = \chi^2 (W_{\chi\chi} + W_{\alpha\alpha} - 2W_{\alpha\chi}) + \chi[2(W_{\alpha\chi} - W_{\alpha\alpha}) + (W_{p\chi} - W_{p\alpha})] + (W_{\alpha\alpha} + W_{p\alpha}). \quad (23)$$

Коэффициенты W_{NM} ($N = p, \alpha, \chi; M = \alpha, \chi$) являются работами обобщенных сил – тензоров напряжений, развившихся в состоянии, соответствующем первому индексу, на обобщенных перемещениях, развившихся в состоянии, соответствующем второму индексу. При $N = p$ напряжения являются начальными.

Значение параметра χ определяется на основании необходимого условия экстремума функции $W(\chi)$: $dW/d\chi = 0$. На его основании этого можно получить:

$$\chi = \frac{(W_{p\alpha} - W_{p\chi}) + 2(W_{\alpha\alpha} - W_{\alpha\chi})}{2(W_{\alpha\alpha} - 2W_{\alpha\chi} + W_{\chi\chi})}. \quad (24)$$

Таким образом, допущение о наличии дефекта в репрезентативной частице дало возможность построить выражение, определяющее его величину. Если дефект есть, то его скалярная мера удовлетворяет равенству (24). Это необходимое условие существования дефекта. В зависимости от развивающегося в окрестности точки определения параметра χ может получиться: $\chi > 1$, $\chi \leq 0$, $0 < \chi < 1$, $\chi = 1$. Первые два случая являются свидетельством отсутствия дефектов. Четвертый случай соответствует дефектности всего сечения $\Delta A_{(12)}$.

Физически обоснованным, соответствующим допущениям данной работы значением параметра дефектности χ является то, которое удовлетворяет неравенству $0 < \chi < 1$. С учетом определения (18), параметр χ ($0 < \chi < 1$) можно считать также вероятностью обнаружения дефекта на малом сечении $\Delta A_{(12)}$ частицы ΔB .

В соответствии с работой [11] проблема существования новой фазы – дефектной среды, и определения ее параметров (параметр χ) решается путем выбора минимума потенциальной энергии. Он определяется путем сравнения локальных минимумов энергий фаз с измененной и неизменной структурами (структуры (χ) и (α) соответственно). Будем полагать, что найденное с помощью выражения (24) значение χ удовлетворяет неравенству $0 < \chi < 1$. Достаточным условием локального минимума функции (23) является неравенство

$$W_{\chi\chi} + W_{\alpha\alpha} - 2W_{\alpha\chi} > 0. \quad (25)$$

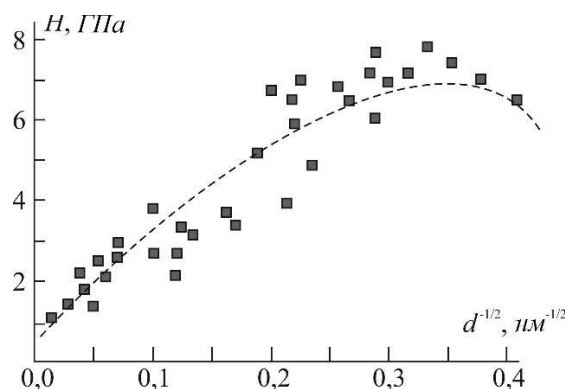
Для того, чтобы локальный минимум энергии при найденном с помощью (24) допустимого значения параметра χ действительно существовал, должно выполняться неравенство $\Psi(\chi) < \Psi(0)$, сравнивающее значения энергии репрезентативной частицы с дефектом и при его отсутствии. Его следствием является выражение

$$\chi < \frac{(W_{p\alpha} - W_{p\chi}) + 2(W_{\alpha\alpha} - W_{\alpha\chi})}{W_{\alpha\alpha} + W_{\chi\chi} - 2W_{\alpha\chi}}. \quad (26)$$

Очевидно, что это неравенство выполнится, если выполнится равенство (24). Таким образом, дефект со скалярной мерой $\chi \in (0; 1)$, вычисленной с помощью равенства (24), будет существовать в рассматриваемой репрезентативной частице, если выполняется неравенство (25). Найденное с помощью (24) значение параметра χ дает возможность определить распределение вызванной дефектом добавки $\vec{u}^*(\vec{r})$ и далее – характеристики эффективной среды.

Подтверждение адекватности результатов

Адекватность полученной в работе оценки дефектности показана на примере никеля, имеющего полидисперсную структуру. Подтверждением является качественное совпадение построенных на основе результатов данной работы выводов о характере зависимости поврежденности материала от зернистости, сформировавшейся при его упрочнении, характере связи его твердости после упрочнения с возникшей при этом поврежденностью. Рассмотренные в работе поверхностные (двухмерные) дефекты формируются на границах зерен, образующих упрочненный материал. [12, 13]. Значит, при уменьшении среднего значения d диаметра зерна, когда суммарная площадь межзеренной поверхности в фиксированном объеме материала растет, можно ожидать рост дефектности χ . Вместе с тем показано [14], что при уменьшении значения d сначала растет, а затем, достигнув максимума, начинает уменьшаться твердость материала H . Ввиду сказанного можно ожидать корреляцию обеих зависимостей. Далее предлагается качественное подтверждение этого на примере никеля (рисунки 1 и 2).



прямоугольники – данные [14], пунктирная линия – их аппроксимация

Рисунок 1 – Изменение твердости в зависимости от размера зерна с обратным квадратным корнем для поликристаллического Ni с размером зерна в нано-, ультрадисперсных и микрокристаллических режимах

Данные рисунка 1 свидетельствуют о возрастающей зависимости $H = H(d^{-(1/2)})$ на ее начальном участке. При этом, для размеров зерна d , при которых $d^{-(1/2)} < 0,1 \text{ нм}^{-1/2}$, можно говорить о ее линейности, которая описывается соотношением Холла – Петча [15]

$$H = H_0 + K(d^{-(1/2)}). \quad (27)$$

Здесь H_0 и K – экспериментально определяемые коэффициенты.

Рост дефектности для $d^{-(1/2)} < 0,1 \text{ нм}^{-1/2}$ можно обосновать, показав, что

$$\frac{d\chi}{dH} > 0. \quad (28)$$

Действительно,

$$\frac{d\chi}{dH} = \left(\frac{d\chi}{dE} \right) / \left(\frac{dH}{dE} \right). \quad (29)$$

Положительность производной dH/dE следует из представленной в работе [16] зависимости

$$H \approx k E / (1 - \nu^2) \approx k E. \quad (30)$$

Здесь k – коэффициент, определяемый экспериментально.

Неравенство $d\chi/dE > 0$ устанавливается на основании анализа зависимости $\chi = \chi(E)$ (график представлен на рисунке 2).

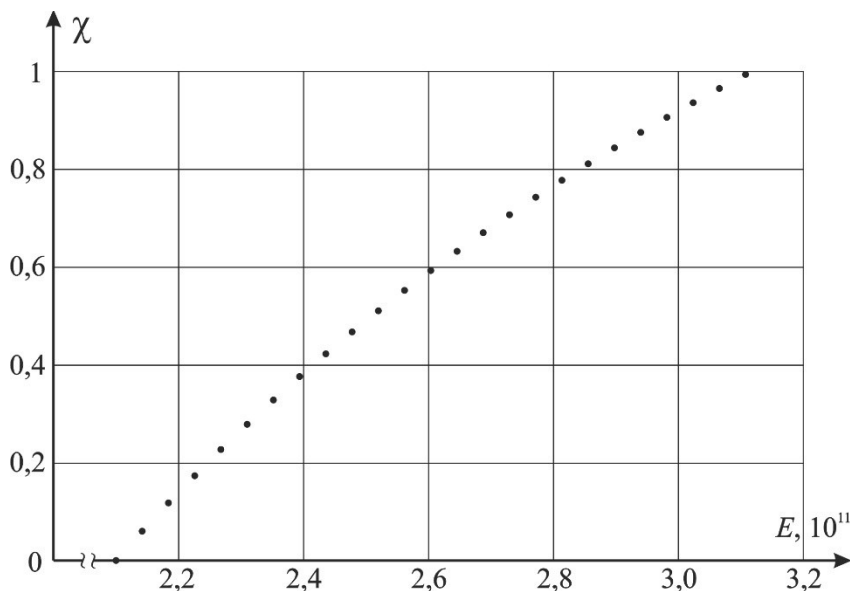


Рисунок 2 – Расчетная зависимость $\chi = \chi(E)$ дефектности от модуля Юнга для никеля

Сама зависимость определяется на основании формулы (24) с учетом зависимостей (12) – (13), в которых значения параметров потенциалов межчастичных взаимодействий вычисляются по формулам [7]

$$\left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) = \frac{E}{294\pi} \frac{2 + 41\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad (31)$$

$$\left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right) = \frac{27E}{1764\pi^2} \frac{4\nu - 1}{2(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad (32)$$

$$\beta = \frac{3\sqrt{\pi}}{l_{at}} \sqrt{\frac{15 \left(\frac{\Phi_0^{(2)}}{\beta^3} \right) + \left(\frac{1563\pi}{4} \right) \left(\frac{\Phi_0^{(3)}}{\beta^6} \right)}{2\mu + \lambda}}, \quad 2\mu + \lambda = E \frac{1 - \nu}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}. \quad (33)$$

Здесь $l_{at} = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}$, n – число атомов в единице объема, λ и μ – параметры Ламе.

Вычисления проведены для представленных в таблице 1 параметров Ni . В качестве начального значения модуля Юнга принято $E_0 \approx 210 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu \approx 0,28$.

Таблица 1 – Материальные параметры никеля

Материал	$l_{at} \cdot 10^{10} \text{ м}$	$\beta \cdot 10^{-10} \text{ 1/м}$	$\Phi_0^{(2)} \cdot 10^{-40} \text{ Дж/м}^6$	$\Phi_0^{(3)} \cdot 10^{-60} \text{ Дж/м}^9$
Ni	4,5	0,53	0,77	0,0007

Таким образом, для $d^{-(1/2)} < 0,1 \text{ нм}^{-1/2}$ рост твердости материала его зерен сопровождается ростом его дефектности. А так как

$$\frac{d\chi}{d(d^{-(1/2)})} = \left(\frac{d\chi}{dH} \right) \left(\frac{dH}{d(d^{-(1/2)})} \right), \quad (34)$$

то, ввиду роста межзеренной поверхности с уменьшением размера зерна, получается подтверждение того, при уменьшении размера зерна дефектность χ должна расти. Утверждение соответствует результатам работы [6, 15].

Для $d^{-(1/2)} > 0,1 \text{ нм}^{-1/2}$ (как следует из рисунка 1) аппроксимировать зависимость $H = H(d^{-(1/2)})$ линейной функцией нельзя. Здесь аппроксимация является выпуклой вверх функцией, имеющей максимум $H_{\max} \approx 7,5 \text{ ГПа}$, после преодоления которого твердость материала падает. Учитывая зависимость (34), свидетельствующую о росте модуля Юнга с ростом твердости материала, о функциях $\chi = \chi(E)$ и $\chi = \chi(d^{-(1/2)})$ можно предполагать такой же выпуклый вид, какой констатирован для $H = H(d^{-(1/2)})$.

Это подтверждается, во-первых, характером кривой на рисунке 2, построенной для производной $d\chi/dE$, во-вторых, следующими рассуждениями. Для предела прочности σ_u известна связь с модулем упругости [17]

$$\sigma_u \approx \frac{E}{500}. \quad (35)$$

Вместе с тем, известно также, что предел прочности, как и твердость, зависит от размера зерна d , эта зависимость в виде $\sigma_u = \sigma_u(d^{-(1/2)})$ имеет такой же вид, как и зависимость $H = H(d^{-(1/2)})$ [15]. Значит, при преодолении пределом прочности своего максимума модуль Юнга также его преодолит. В силу монотонности зависимости $\chi = \chi(E)$ свой максимум преодолит и дефектность. При этом ее максимальное значение окажется равным $\chi_{\max} = \chi(E_{\max}) \approx 0,7$. Очевидно, что при этом график зависимости $\chi = \chi(d^{-(1/2)})$ будет иметь не только возрастающий, но и выпуклый вид.

Таким образом, проведенные рассуждения, связывая рассмотренный в работе характер дефектности сплошного материала с зернограницной дефектностью, качественно подтверждают адекватность полученных оценок.

Заключение

Данная работа свидетельствует о том, что представленная модель может отразить наблюдаемый в реальных условиях факт того, что изменение свойств материала может привести к возникновению дефектов структуры.

Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075–01466–23–07 на 2023 – 2025 гг. от 24.11.2023 г., проект № FSGN–2023–002 (1023082800024–8–1.3.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gryadunov I.M. Hardening Treatment by Plastic Deformation under Conditions of the Integrated Local Loading of a Deformation Zone / I.M. Gryadunov, V.A. Golenkov, O.V. Pilipenko, S.J. Radchenko // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – V. 12. – № 21. – P. 11094 – 11100.
2. Колупаева С.Н. Качественное исследование эволюции дефектной подсистемы гетерогенных сплавов с неогерентной упрочняющей фазой при интенсивных воздействиях / С.Н. Колупаева, Е.В. Ерыгина, Т.А. Ковалевская, Л.Е. Попов // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3. – № 7. – С. 63 – 79.

3. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications / T.L. Anderson. – Boca Raton: CRC Press. – 1991. – 793 с.
4. Козлов Э.В. Эволюция фазового состава, дефектной структуры, внутренних напряжений и перераспределение углерода при отпуске литой конструкционной стали / Э.В. Козлов, Н.А. Попова, О.В. Кабалина, С.И. Климашин, В.Е. Громов; СибГИУ. – Новокузнецк, 2007. – 177 с.
5. Гринфельд М.А. Методы механики сплошных сред в теории фазовых превращений / М.А. Гринфельд. – М.: Наука, 1990. – 312 с.
6. Gutkin M.Yu. Defect structures on inner interfaces in nanocrystalline and polycrystalline films / M.Yu. Gutkin, I.A. Ovidko // Mater. Phys. Mech. – 2009. – Vol. 8. – № 2. – P. 108 – 148.
7. Presnetsova V.Yu. A variant of describing adhesion interaction in the probe sample system of an atomic-force microscope / V.Yu. Presnetsova, S.N. Romashin, L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // Nanoscience and Technology: An International Journal. – 2018. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 299 – 323. DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018026714.
8. Ромашин С.Н. Вариант связи механических и адгезионных свойств твердых материалов / С.Н. Ромашин, В.С. Шоркин // ПММ. – 2020. – Т. 84. – В. 3. – С. 387 – 404. DOI: 10.31857/S0032823520030078.
9. Локотощенко А.М. Применение кинетической теории при анализе длительного высокотемпературного разрушения металлов в условиях сложного напряженного состояния (обзор) / А.М. Локотощенко // Прикладная механика и техническая физика. – 2012. – Т. 53. – № 4. – С. 149 – 164.
10. Barenblatt G.I. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture / G.I. Barenblatt // Advances in Applied Mechanics, 1962. – Vol. 7 (7). – P. 55 – 129. Doi:10.1016/S0065-2156(08)70121-2.
11. Vilchevskaya E. On phase transformations of an inclusion in an external strain field / E. Vilchevskaya, A. Freidin // Proceedings Advanced Problems in Mechanics APM 2004, Russian Academy of Sciences, IPME RAS, 2004. – P. 447 – 454.
12. Золоторевский Н.Ю. Фрагментация и текстуробразование при деформации металлических материалов / Н.Ю. Золоторевский, В.В. Рыбин. – СПб.: Изд-во Поли-техн. ун-та, 2014. – 208 с.
13. Perevezentsev V.N. The theory of evolution of the microstructure of superplastic alloys and ceramics / V.N. Perevezentsev // Superplasticity. 60 years after Pearson. Ed. N.Ridley. – Bourne Press, London, U.K., 1995. – P. 51 – 59.
14. Asaro R.J. Mechanistic models for the activation volume and rate sensitivity in metals with nanocrystalline grains and nano-scale twins / R.J. Asaro, S. Suresh // Acta Materialia, 2005. – Vol. 53. – P. 3369 – 3382. Doi: 10.1016/j.actamat.2005.03.047.
15. Малыгин Г.А. Пластичность и прочность микро – и нанокристаллических материалов / Г.А. Малыгин // Физика твердого тела, 2007. – Т. 49. – В. 6. – С. 961 – 982.
16. Фирстов С.А. Теоретическая (предельная) твердость / С.А. Фирстов, Т.Г. Рогуль // Reports of National Academy of Sciences of Ukraine, 2007. – № 4. – С. 110 – 114.
17. Petch N. Metallograficheskie aspekty razrusheniia [metallographic aspects of damage] / N. Petch. Redaktsiia G Libovits Razrushenie. – Moskva: Mir, 1973. 1:376 – 42.

Шоркин Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры технической физики и математики
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел. +7 (960) 655-00-77
E-mail: v.s.shorkin@yandex.ru

Фроленкова Лариса Юрьевна

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой машиностроения,
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: + 7 (906) 568-11-18,
E-mail: Larafrolenkova@yandex.ru

Ромашин Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры технической физики и математики
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: +7 (919) 267-71-26,
E-mail: sromashin@yandex.ru

Конищева Алёна Игоревна

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орел
студент
г. Орёл ул. Московская д. 34
Тел.: + 7(920) 725-03-77
E-mail: konishevaalena123@gmail.com

SHORKIN V.S., FROLENKOVA L.Yu., ROMASHIN S.N., KONISHEVA A.I.

DAMAGE ASSESSMENT OF STRESSED ELASTIC MATERIAL

Abstract. *The paper proposes a method of estimation and a criterion for the presence of relative defectivity of an elastic material. Defects are assumed to be planar, on which the continuity of the displacement field and classical stresses is preserved, but the continuity of the displacement gradient field is broken. It is assumed that such defects arise in metals at the intergrain boundaries of their structure both during hardening and during changes in the stress-strain state. The method is based on the assumption that under these conditions the presence of defects reduces the potential energy compared to the state in their absence.*

Keywords: *Strengthening, defect, damage, nonlocal and local theories of elasticity, interparticle potential interactions.*

BIBLIOGRAPHY

1. Gryadunov I.M. Hardening Treatment by Plastic Deformation under Conditions of the Integrated Local Loading of a Deformation Zone / I.M. Gryadunov, V.A. Golenkov, O.V. Pilipenko, S.J. Radchenko // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – V. 12. – № 21. – R. 11094 – 11100.
2. Kolupaeva S.N. Kachestvennoe issledovanie e`volyucii defektnoj podsystemy` geterogenny`x splavov snekogerentnoj uprochnyayushhej fazoj pri intensivny`x vozdejstviyax / S.N. Kolupaeva, E.V. Ery`gina, T.A. Kovalevskaya, L.E. Popov // *Fizicheskaya mezomexanika*. – 2000. – T. 3. – № 7. – S. 63 – 79.
3. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications / T.L. Anderson. – Boca Raton: CRC Press. – 1991. – 793 c.
4. Kozlov E`.V. E`volyuciya fazovogo sostava, defektnoj struktury`, vnutrennix napryazhenij i pereraspredelenie ugleroda pri otpuske litoj konstrukcionnoj stali / E`.V. Kozlov, N.A. Popova, O.V. Kabalina, S.I. Klimashin, V.E. Gromov; SibGIU. – Novokuzneczk, 2007. – 177 s.
5. Grinfel`d MA. Metody` mexaniki sploshny`x sred v teorii fazovy`x prevrashhenij / MA. Grinfel`d. – M.: Nauka, 1990. – 312 s.
6. Gutkin M.Yu. Defect structures on inner interfaces in nanocrystalline and polycrystalline films / M.Yu. Gutkin, I.A. Ovidko // *Mater. Phys. Mech.* – 2009. – Vol. 8. – № 2. – R. 108 – 148.
7. Presnetsova V.Yu. A variant of describing adhesion interaction in the probe sample system of an atomic-force microscope / V.Yu. Presnetsova, S.N. Romashin, L.Yu. Frolenkova, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // *Nanoscience and Technology: An International Journal*. – 2018. – Vol. 9. – Iss. 4. – R. 299 – 323. DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018026714
8. Romashin S.N. Variant svyazi mexanicheskix i adgezionny`x svojstv tverdy`x materialov / S.N. Romashin, V.S. Shorkin // *PMM*. – 2020. – T. 84. – V. 3. – S. 387 – 404. DOI: 10.31857/S0032823520030078
9. Lokotoshhenko A.M. Primenenie kineticheskoy teorii pri analize dlitel'nogo vy`sokotemperaturnogo razrusheniya metallov v usloviyax slozhnogo napryazhennogo sostoyaniya (obzor) / A.M. Lokotoshhenko // *Prikladnaya mexanika i texnicheskaya fizika*. – 2012. – T. 53. – № 4. – S. 149 – 164.
10. Barenblatt G.I. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture / G.I. Barenblatt // *Advances in Applied Mechanics*, 1962. – Vol. 7 (7). – P. 55 – 129. Doi:10.1016/S0065-2156(08)70121-2.
11. Vilchevskaya E. On phase transformations of an inclusion in an external strain field / E. Vilchevskaya, A. Freidin // *Proceedings Advanced Problems in Mechanics APM 2004, Russian Academy of Sciences, IPME RAS*, 2004. – P. 447 – 454.
12. Zolotorevskij N.Yu. Fragmentaciya i teksturoobrazovanie pri deformacii metallicheskih materialov / N.Yu. Zolotorevskij, V.V. Ry`bin. – SPb.: Izd-vo Poli-texn. un-ta, 2014. – 208 s.
13. Perevezentsev V.N. The theory of evolution of the microstructure of superplastic alloys and ceramics / V.N. Perevezentsev // *Superplasticity. 60 years after Pearson*. Ed. N.Ridley. – Bourne Press, London, U.K., 1995. – P. 51 – 59.
14. Asaro R.J. Mechanistic models for the activation volume and rate sensitivity in metals with nanocrystalline grains and nano-scale twins / R.J. Asaro, S. Suresh // *Acta Materialia*, 2005. – Vol. 53. – P. 3369 – 3382. Doi: 10.1016/j.actamat.2005.03.047.
15. Maly`gin G.A. Plastichnost` i prochnost` mikro – i nanokristallicheskih materialov / G.A. Maly`gin // *Fizika tverdogo tela*, 2007. – T. 49. – V. 6. – S. 961 – 982.
16. Firstov S.A. Teoreticheskaya (predel'naya) tverdost` / S.A. Firstov, T.G. Rogul` // *Reports of National Academy of Sciennces of Ukraine*, 2007. – № 4. – S. 110 – 114.
17. Petch N. Metallograficheskie aspekty razrusheniia [metallographic aspects of damage] / N. Petch. Redaktsiia G Libovits Razrushenie. – Moskva: Mir, 1973. 1:376 – 42.

Shorkin Vladimir Sergeevich

Orel State University, Orel
 Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
 Professor of the Department of Technical Physics and
 Mathematics
 302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
 Ph.: +7 (960) 655-00-77
 E-mail: v.s.shorkin@yandex.ru

Frolenkova Larisa Yuryevna

Orel State University, Orel
 Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
 Head of the Department of Mechanical Engineering,
 302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
 Ph.: + 7 (906) 568-11-18
 E-mail: Larafrolenkova@yandex.ru

Romashin Sergey Nikolaevich

Orel State University, Orel,
 Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
 Associate professor of the Department of Technical Physics
 and Mathematics
 302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
 Ph.: +7 (919) 267-71-26,
 E-mail: sromashin@yandex.ru

Konisheva Alena Igorevna

Orel State University, Orel,
 student
 302026, Orel, Komsomolskaya st, 95
 Ph.: + 7(920) 725-03-77
 E-mail: konishevaalena123@gmail.com

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.373.826

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-371-3-22-27

ФЕДИН А.В.

ПОВЕРХНОСТНАЯ ЛАЗЕРНАЯ УДАРНАЯ ОБРАБОТКА ЛАТУННЫХ СПЛАВОВ

Аннотация. *Определены рациональные параметры лазерного излучения для поверхностной ударной обработки латунных сплавов марки ЛМцСКА и ЛКС для изготовления деталей гидронасосов и антифрикционных деталей, работающих в наиболее нагруженном режиме, что позволяет создавать максимальное поверхностное давление на обрабатываемый материал, остаточное напряжение и пластическую деформацию в поверхностном слое.*

Ключевые слова: *лазерная ударная обработка, сжимающие остаточные напряжения, пластическая деформация.*

Введение

Лазерная ударная обработка (ЛУО) является современным эффективным методом поверхностной обработки изделий из металлов и сплавов, предназначенным для улучшения усталостных характеристик и повышения износостойкости. Многочисленные экспериментальные исследования по изучению влияния параметров лазерной обработки, проведенные за последние 30 лет [1–7], показали перспективность применения метода ЛУО для увеличения ресурса деталей из различных марок стали. В последнее время активно исследуется возможность применения ЛУО для изделий из цветных металлов, которые широко используются в машиностроении благодаря своей высокой пластичности, теплопроводности и обрабатываемости [8–13]. Он оказался эффективен не только для задержки распространения усталостных трещин, но и предотвращения их образования [14–16], что увеличило усталостную прочность [17]. При этом ЛУО повышает фрикционные свойства, снижая коэффициент трения на 20–40 % по сравнению с необработанными образцами, а также скорость износа до 68 % при режиме обработки порядка 10^3 лазерных импульсов на квадратный сантиметр площади [18].

Однако основное внимание уделяется алюминиевым сплавам, поскольку эти сплавы, обладая низкой плотностью, начали заменять чугуны и бронзы для производства износостойких деталей, например, в аэрокосмической и автомобильной промышленности [19]. В то же время недостаточно изученным является ЛУО латунных материалов [20], которые используются для изготовления подшипников, втулок и других деталей подвижных и статичных систем. При этом известно, что ЛУО латуни вызывает трансформации в микроструктуре поверхностного слоя, которые существенно влияют на трение и износ контактирующих поверхностей [21,22], снижая до значений ниже по сравнению с бронзой [23]. Вероятно, это связано с тем, что необработанные латунные материалы часто демонстрируют относительно низкую прочность и микротвердость, что делает их восприимчивыми к поверхностному износу, особенно в тяжелых условиях работы [24,25]. Важно отметить, что износ является существенным фактором отказа до 80 % механических деталей [26]. Такие сбои могут привести к снижению эффективности работы оборудования и даже к выходу их из строя. Поэтому становится важным выполнять обработку поверхности латуни для уменьшения износа и продления срока службы компонентов.

Исследования параметров лазерного излучения для ударной обработки сплавов латуни, предназначенных для работы в наиболее нагруженном режиме, по нашим сведениям, ранее не проводились. В настоящей статье определяются рациональные режимы лазерной обработки сплавов латуни ЛМцСКА и ЛКС, которые являются типичными марками материалов для изготовления деталей гидронасосов (ЛМцСКА) и антифрикционных деталей (ЛКС) в промышленности.

Основная часть

Основы методологии моделирования ЛУО с рассмотрением процедуры анализа для оценки необходимых параметров лазерной системы и режимов ее генерации нами приведены

в [7], согласно которой импульсом лазерного излучения интенсивностью I_0 создается плазменно-индуцированное импульсное давление P на поверхности материала:

$$P = 0,01 \sqrt{\frac{\alpha Z}{2\alpha + 3}} I_0, \quad (1)$$

где P – пиковое давление в ГПа;

I_0 – интенсивность лазерного излучения в ГВт/см²;

α – эффективность взаимодействия (для латуни $\alpha = 0,15$ [20]);

Z – комбинированное ударное сопротивление обрабатываемого материала и удерживающего ударную волну его покрытия, прозрачного для лазерного излучения.

Поверхностное импульсное давление P возбуждает мощную ударную волну, распространяющуюся вглубь материала, создавая в нем поле остаточных отрицательных $\sigma(h)$ напряжений. Эпюра поля остаточных напряжений во всем полупространстве материала, достаточно хорошо согласующаяся с экспериментальными результатами, описывается аппроксимацией [27]:

$$\sigma(h) = \frac{\sigma_{surf} \cdot b}{b-1} \exp(-h^2) - \frac{\sigma_{surf}}{b-1} \exp(-h^2/b^2), \quad (2)$$

где σ_{surf} – поверхностное остаточное напряжение, определяемое глубиной пластического воздействия L_p и величиной поверхностной пластической ε_p деформации, а также размером лазерного пучка a :

$$\sigma_{surf} = \sigma_0 - \left[\mu \varepsilon_p (1 + \nu) / (1 - \nu) + \sigma_0 \right] \left[1 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi} (1 + \nu) \frac{L_p}{a} \right]. \quad (3)$$

Механические свойства сплавов латуни ЛМцСКА и ЛКС для оценки остаточных $\sigma(h)$ напряжений, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические свойства латуни

№ п/п	Параметры	Значение	
		ЛМцСКА	ЛКС
1	Плотность ρ , кг/м ³	8500	8600
2	Коэффициент Пуассона ν	0,35	0,35
3	Постоянная Ламе λ , ГПа	86,42	90,74
4	Постоянная Ламе μ , ГПа	37,04	38,89
5	Модуль Юнга E , ГПа	100	105
6	Предел упругости Гюгонио σ_H , ГПа	0,531	0,30
7	Акустический импеданс Z , г/см ² ·с	$3,30 \cdot 10^5$	$3,30 \cdot 10^5$
8	Глубина пластического воздействия L_p , мм	0,42	0,42
9	Величина поверхностной пластической деформации ε_p	–0,0123	–0,0066
10	Поверхностное остаточное напряжение σ_{surf} , ГПа	–0,6285	–0,3481
11	Максимальное импульсное давление P_{av} , ГПа	2,59	1,45

В [7] установлено, что для получения максимальных сжимающих остаточных напряжений в материале величина пикового давления P должна находиться в интервале $2(1 + \lambda/2\mu)\sigma_H < P < 2,5(1 + \lambda/2\mu)\sigma_H$ (λ и μ – постоянные Ламе, σ_H – предел упругости Гюгонио), соответствующем неизменному значению $\varepsilon_p = const$ пластической деформации. На рисунке 1 этот интервал показан областью между двумя горизонтальными ограничивающими линиями $P_2 = 2(1 + \lambda/2\mu)\sigma_H = 1,29$ ГПа (прямая 1 на рисунке 1), $P_{2,5} = 2,5(1 + \lambda/2\mu)\sigma_H = 1,61$ ГПа (прямая 2 на рисунке 1) и усредненное по интервалу значение $P_{av} = 1,45$ ГПа (прямая 3 на рисунке 1) для латуни ЛКС. Аналогичный интервал $P_2 = 2,30$ ГПа (прямая 4 на рисунке 1), $P_{2,5} = 2,88$ ГПа (прямая 5 на рисунке 1) и $P_{av} = 2,59$ ГПа (прямая 6 на рисунке 1) показан для латуни ЛМцСКА. Это соответствует усредненному

значению интенсивности $I_0 = 1,41 \text{ ГВт/см}^2$ лазерного излучения для латуни ЛКС и $I_0 = 4,52 \text{ ГВт/см}^2$ для латуни ЛМцСКА.

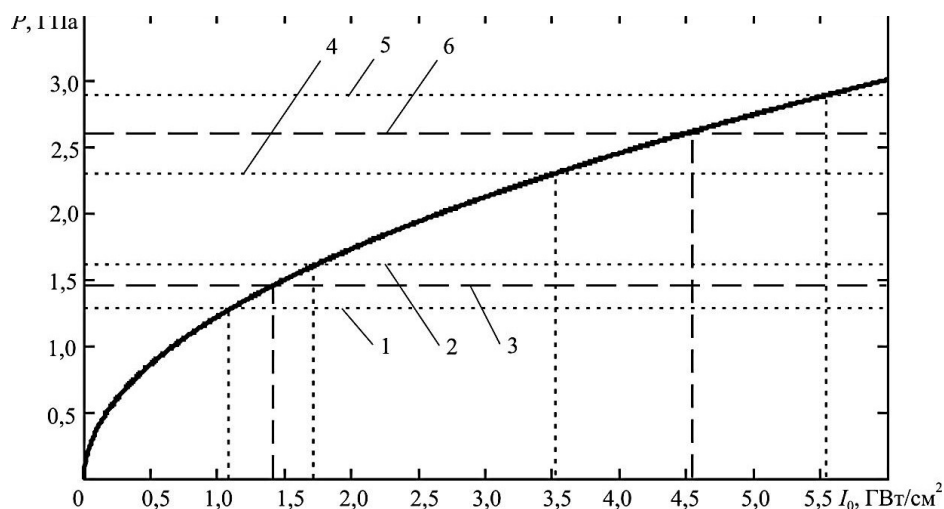


Рисунок 1 – Зависимость пикового давления P от интенсивности I_0 импульсов лазерного излучения:

1 – пиковое давление P_2 для латуни ЛКС; 2 – пиковое давление $P_{2,5}$ для латуни ЛКС; 3 – пиковое давление P_{av} для латуни ЛКС; 4 – пиковое давление P_2 для латуни ЛМцСКА; 5 – пиковое давление $P_{2,5}$ для латуни ЛМцСКА; 6 – пиковое давление P_{av} для латуни ЛМцСКА;

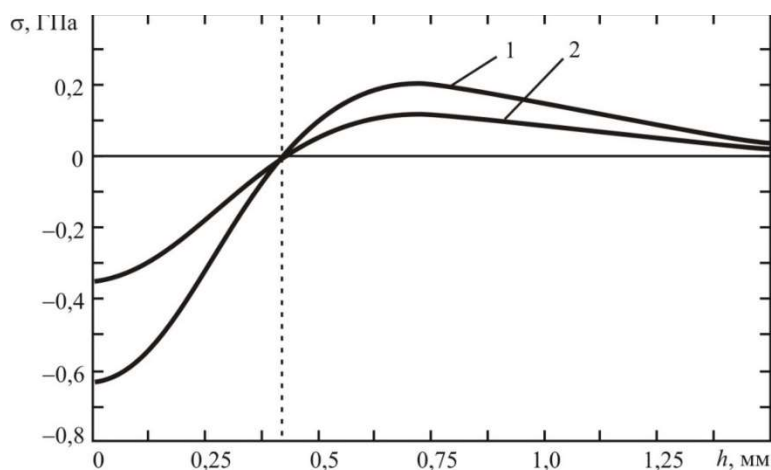


Рисунок 2 – Распределение остаточных напряжений σ по глубине h материала при пиковом давлении P_{av} и интенсивности I_0 импульсов лазерного излучения:

1 – латунь ЛМцСКА ($P_{av} = 2,59 \text{ ГПа}$, $I_0 = 4,52 \text{ ГВт/см}^2$); 2 – латунь ЛКС ($P_{av} = 1,45 \text{ ГПа}$, $I_0 = 1,41 \text{ ГВт/см}^2$)

Поскольку для формирования поля ЛУО наиболее рациональным является лазерный пучок размером $a = 3 \text{ мм}$ [20], то усредненная пиковая мощность импульсов составит $P_i = 0,13 \text{ ГВт}$ для латуни ЛКС и $P_i = 0,41 \text{ ГВт}$ для латуни ЛМцСКА, которую могут обеспечить импульсы с характерной длительностью $\tau_i = 10 \text{ нс}$ для обработки латуни [20,28]. При этом энергия импульса должна составлять порядка $W_i = 1,27 \text{ Дж}$ для латуни ЛКС и $W_i = 4,07 \text{ Дж}$ для латуни ЛМцСКА.

Полученные режимы лазерного излучения позволяют оценить поле остаточных напряжений в полупространстве материала в результате ЛУО. На рисунке 2 приведено распределение остаточных напряжений по глубине материала при пиковом давлении P_{av} для латунных сплавов ЛКС и ЛМцСКА.

Из рисунка 2 следует, что для сплава ЛМцСКА, обладающего наибольшим значением $\sigma_{surf} = -0,6285 \text{ ГПа}$, создается поле с более высокими значениями сжимающих остаточных напряжений по сравнению со сплавом ЛКС, для которого поверхностное остаточное

напряжение $\sigma_{surf} = -0,3481$ ГПа в 1,8 раза меньше. Однако при этом глубина создаваемых сжимающих остаточных напряжений одинакова для обоих материалов и превышает 0,4 мм.

Заключение

Таким образом, в результате выполненной работы определены рациональные параметры выходного излучения лазерной системы. Для латунных сплавов ЛКС и ЛМЦСКА пиковая мощность импульсов составила P_i порядка 0,1–0,4 ГВт, их энергия W_i порядка 1–4 Дж. При длительности импульсов $\tau_i = 10$ нс достигается интенсивность I_0 порядка 1,4–4,5 ГВт/см². Это позволяет создавать поля сжимающих остаточных напряжений от –0,35 до –0,63 ГПа на глубину до 0,5 мм. При этом, по сравнению с режимами ЛУО для стальных сплавов [7] режимы ЛУО для латунных сплавов оказались меньше практически на порядок, что позволяет создавать более компактные и менее энергоемкие лазерные системы. Следует отметить, что поскольку в большинстве случаев зависимость между ресурсом T_r и величиной износа h_w имеет линейный характер $T_r = h_w / kV_w$ ($k=1,2-1,5$ – коэффициент запаса долговечности; V_w – средняя скорость изнашивания упрочненного материала) [29] и во многом обусловлена толщиной упрочненного слоя $h = h_w$, то по сравнению с другими методами обработки поверхностного слоя, где обычно $h \leq 0,1$ мм, и равных скоростях изнашивания ЛУО позволяет увеличить ресурс до 3–5 раз.

Хотя ЛУО уже успешно использовался в важных приложениях для обработки конструкционных материалов, его полный потенциал и его использование во многих других приложениях еще не достигнуты. Поэтому применение этого метода поверхностной обработки изделий из латунных сплавов способно расширить его возможности практического использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fabbro, R. Physical Study of Laser preceded Plasma in Confined Geometry / R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, J. Virmont // Journal of Applied Phys. – 1990. – V. 68. – No 2. – P. 775–784.
2. Ballard, P. Residual stresses induced by laser shocks / P. Ballard, J. Fournier, R. Fabbro, J. Frelat // Journal of Physics. – 1991. – V. IV 1. – No 7. – P. 487–494.
3. Clauer A.H. Laser shock processing as a surface enhancement process / A.H. Clauer, D.F. Lahrman // Key Engineering Materials. – 2001. – V. 197. – P. 121–144.
4. Wang C. Effects of laser shock processing on microstructure and mechanical properties of K403 nickel-alloy / C. Wang, X.J. Shen, Z.B. An, L.C. Zhou, Y. Chai // Materials & Design. – 2016. – V. 89. – P. 582–588.
5. Ye Y.X. Investigation of the crater-like microdefects induced by laser shock processing with aluminum foil as absorbent layer / Y.X. Ye, T. Xuan, Z.C. Lian, Y.Y. Feng, X.J. Hua // Applied Surface Science. – 2015. – V. 339 – No 1. – P. 75–84.
6. Cao, X. Laser Shock Peening: Fundamentals and Mechanisms of Metallic Material Wear Resistance Improvement / X. Cao, J. Wu, G. Zhong, J. Wu, X. Chen // Materials. – 2024. – V. 17. – P. 909–930.
7. Федин, А.В. Лазерная ударная обработка сплавов на никелевой основе / А.В. Федин, А.В. Хабибулин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – Вып. 12. – С. 213–217.
8. Ye, C. Microstructure and mechanical properties of copper subjected to cryogenic laser shock peening / C. Ye, S. Suslov, D. Lin, Y. Liao, X. Fei, G.J. Cheng // Journal of Applied Physics. – 2011. – 110. – Article No 083504.
9. Zhu J.X. On the anisotropic scratching behavior of single crystalline copper at nanoscale / Zhu J.X., Li X., Zhou Q.H., Aghababaei R. // Tribology International. – 2022. – V. 175. – Article No 107794.
10. Zhang, D.W. Effect of forming conditions on frictional characteristic in cold bulk forming process of copper alloy / D.W. Zhang, G.C. Yang, Z.B. Zheng, S.D. Zhao // Tribology International. – 2021. – V. 155. – Article No106786.
11. Anand, D. Size effect on surface roughness of very thin brass sheets in biaxial stretching / D. Anand, A. Shrivastava, D. Ravi Kumar // Materials Today: Proceedings. – 2019. – V. 18. – P. 2448–2453.
12. Mousavi, S.E. Effect of lead on the crack propagation and the mechanical properties of Brass processed by ECAP at different temperatures / S.E. Mousavi, N. Naghshekish, F. Ahmadi, B. Sadeghi, P. Cavaliere // Materials Science and Engineering: A – 2018. – V. 728. – P. 231–238.
13. Liu, L. Effect of microstructure evolution on high cycle fatigue behavior of brass / L. Liu, R. Chi, J. Wang // Materials Science and Engineering: A – 2018. – V. 732. – Article No 326–332.
14. Sanchez, A.G. Effects of laser shock peening on the mechanisms of fatigue short crack initiation and propagation of AA7075-T651 / A.G Sanchez., C. You, M. Leering, D. Glaser, D. Furfari, M.E. Fitzpatrick, J. Wharton, P.A.S. Reed // International Journal of Fatigue – 2021. – V. 143. – Article No 106025.
15. Rubio-González, C. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061–T6 aluminum alloy / C. Rubio-González, J.L. Ocaña, G. Gomez-Rosas, C. Molpeceres, M. Paredes, A. Banderas, J. Porro, M. Morales // Materials Science and Engineering: A – 2004. – V. 386. – No 1–2. – P. 291–295.
16. Hatamleh, O. Laser and shot peening effects on fatigue crack growth in friction stir welded 7075–T7351 aluminum alloy joints / O. Hatamleh, J. Lyons, R. Forman // International Journal of Fatigue. – 2007. – V. 29. – No 3. – P. 421–434.

17. Montross, C.S. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review / C.S. Montross, T. Wei, L. Ye, G. Clark, Y.-W. Mai // International Journal of Fatigue. – 2002. – V. 24. – No 10. – P. 1021–1036.
18. Sanchez-Santana, U. Wear and friction of 6061-T6 aluminum alloy treated by laser shock processing / U. Sanchez-Santana, C. Rubio-González, G. Gomez-Rosas, J.L. Ocana, C. Molpeceres, J. Porro, M. Morales // Wear. – 2006. – V. 260. – No 7-8. – P. 847–854.
19. Попова, М.В. Перспективные алюминиевые сплавы для авиационной и космической техники / М.В. Попова, А.Н. Прудников, С.В. Долгова, М.А. Малюх // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2017. – № 3 (21). – С. 18–23.
20. Chen, Y. Enhancing Wear Resistance and Microstructural Evolution of Brass Through Laser Shock Peening / Y. Chen, Y. Sheng, Y. Wang, M.Ji, H. Pan, F. Zhang, L. Liu // Tribology Letters. – 2023. – V. 71. – № 4. – Article No 107.
21. Rigney, D.A. The evolution of tribomaterial during sliding: a brief introduction / D.A. Rigney, S. Karthikeyan // Tribology Letters. – 2010. – V. 39. – No 1. – P. 3–7.
22. Argibay, N. Stress-dependent grain size evolution of nanocrystalline Ni-W and its impact on friction behavior / N. Argibay, T.A. Furnish, B.L. Boyce, B.G. Clark, M. Chandross // Scripta Materialia. – 2016. – V. 123. – P. 26–29.
23. Малышев, В.Н. Исследование изменений трущихся поверхностей в условиях эффекта безызносности / В.Н. Малышев, С.Д. Пичугин // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – No 10, Ч. 2. – С. 273–279.
24. Bushlya, V. Wear mechanisms of uncoated and coated cemented carbide tools in machining lead-free silicon brass / V. Bushlya, D. Johansson, F. Lenrick, J.-E. Stah, F. Schultheiss // Wear. – 2017. – V. 376–377. – P. 143–151.
25. Zhu, H. Recurrence evolution of brass surface profile in lubricated wear process / H. Zhu, X. Zuo, Y. Zhou // Wear. – 2016. – V. 352–353. – P. 9–17.
26. Zheng, Z. Low friction of superslippy and superlubricity: a review / Z. Zheng, Z. Guo, W. Liu, J. Luo // Friction. – 2022. – V. 11. – No 7. – P. 1121–1137.
27. Радченко, В.П. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочненном полупространстве в условиях ползучести / В.П. Радченко, Т.И. Бочкова, В.В. Цветков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия физ.-мат. науки. – 2015. – Т. 19. – № 3. – С. 504–522.
28. Wang, F. Experimental study on laser shock processing of brass / F. Wang, Zh. Yao, Q. Deng // Journal of University of Science and Technology Beijing. – 2007. – V. 14. – No 6. – P. 529–532.
29. Мураткин, Г.В. Основы восстановления деталей и ремонт автомобилей. В 2 ч. Ч. 1. Технологические методы восстановления деталей и ремонта автомобилей / Г.В. Мураткин, В.С. Малкин, В.Г. Доронкин; под ред. Г.В. Мураткина. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012, С. 62. – 247 с.

Федин Александр Викторович

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», г. Солнечногорск
Доктор технических наук, профессор, ведущий инженер
141570, Московская область, г. Солнечногорск, раб. пос. Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Профессор кафедры «Электроника, приборостроение и биотехнические системы»
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87
Тел.: +79190005350
E-mail: a_fedin@list.ru

FEDIN A.V.

SURFACE LASER IMPACT TREATMENT OF BRASS ALLOYS

Abstract. Rational parameters of laser radiation for surface impact treatment of brass alloys of the LMtSKA and LKS brands for the manufacture of hydraulic pump parts and antifriction parts operating in the most loaded mode are determined, which allows creating maximum surface pressure on the processed material, residual stress and plastic deformation in the surface layer.

Keywords: laser impact treatment, compressive residual stresses, plastic deformation.

BIBLIOGRAPHY

1. Fabbro, R. Physical Study of Laser preceded Plasma in Confined Geometry / R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, J. Virmont // Journal of Applied Phys. – 1990. – V. 68. – No 2. – P. 775–784.
2. Ballard, P. Residual stresses induced by laser shocks / P. Ballard, J. Fournier, R. Fabbro, J. Frelat // Journal of Physics. – 1991. – V. IV 1. – No 7. – P. 487–494.
3. Clauer A.H. Laser shock processing as a surface enhancement process / A.H. Clauer, D.F. Lahrman // Key Engineering Materials. – 2001. – V. 197. – P. 121–144.
4. Wang C. Effects of laser shock processing on microstructure and mechanical properties of K403 nickel-alloy / C. Wang, X.J. Shen, Z.B. An, L.C. Zhou, Y. Chai // Materials & Design. – 2016. – V. 89. – P. 582–588.
5. Ye Y.X. Investigation of the crater-like microdefects induced by laser shock processing with aluminum foil as absorbent layer / Y.X. Ye, T. Xuan, Z.C. Lian, Y.Y. Feng, X.J. Hua // Applied Surface Science. – 2015. – V. 339 – No 1. – P. 75–84.

6. Cao, X. Laser Shock Peening: Fundamentals and Mechanisms of Metallic Material Wear Resistance Improvement / X. Cao, J. Wu, G. Zhong, J. Wu, X. Chen // *Materials*. – 2024. – V. 17. – P. 909-930.
7. Fedin, A.V. Lasernaya udarnaya obrabotka splavov na nikelevoi osnove / A.V. Fedin, A.V. Habibulin // *Isvestia TulGU. Tehnicheskie nauki*. – 2023. – Vip. 12. – S. 213-217.
8. Ye, C. Microstructure and mechanical properties of copper subjected to cryogenic laser shock peening / C. Ye, S. Suslov, D. Lin, Y. Liao, X. Fei, G.J. Cheng // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – 110. – Article No 083504.
9. Zhu J.X. On the anisotropic scratching behavior of single crystalline copper at nanoscale / Zhu J.X., Li X., Zhou Q.H., Aghababaei R. // *Tribology International*. – 2022. – V. 175. – Article No 107794.
10. Zhang, D.W. Effect of forming conditions on frictional characteristic in cold bulk forming process of copper alloy / D.W. Zhang, G.C. Yang, Z.B. Zheng, S.D. Zhao // *Tribology International*. – 2021. – V. 155. – Article No 106786.
11. Anand, D. Size effect on surface roughness of very thin brass sheets in biaxial stretching / D. Anand, A. Shrivastava, D. Ravi Kumar // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – V. 18. – P. 2448–2453.
12. Mousavi, S.E. Effect of lead on the crack propagation and the mechanical properties of Brass processed by ECAP at different temperatures / S.E. Mousavi, N. Naghshekish, F. Ahmadi, B. Sadeghi, P. Cavaliere // *Materials Science and Engineering: A* – 2018. – V. 728. – P. 231–238.
13. Liu, L. Effect of microstructure evolution on high cycle fatigue behavior of brass / L. Liu, R. Chi, J. Wang // *Materials Science and Engineering: A* – 2018. – V. 732. – Article No 326–332.
14. Sanchez, A.G. Effects of laser shock peening on the mechanisms of fatigue short crack initiation and propagation of AA7075-T651 / A.G Sanchez., C. You, M. Leering, D. Glaser, D. Furfari, M.E. Fitzpatrick, J. Wharton, P.A.S. Reed // *International Journal of Fatigue* – 2021. – V. 143. – Article No 106025.
15. Rubio-González, C. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy / C. Rubio-González, J.L. Ocaña, G. Gomez-Rosas, C. Molpeceres, M. Paredes, A. Banderas, J. Porro, M. Morales // *Materials Science and Engineering: A* – 2004. – V. 386. – No 1–2. – P. 291–295.
16. Hatamleh, O. Laser and shot peening effects on fatigue crack growth in friction stir welded 7075-T7351 aluminum alloy joints / O. Hatamleh, J. Lyons, R. Forman // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – V. 29. – No 3. – P. 421–434.
17. Montross, C.S. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review / C.S. Montross, T. Wei, L. Ye, G. Clark, Y.-W. Mai // *International Journal of Fatigue*. – 2002. – V. 24. – No 10. – P. 1021–1036.
18. Sanchez-Santana, U. Wear and friction of 6061-T6 aluminum alloy treated by laser shock processing / U. Sanchez-Santana, C. Rubio-González, G. Gomez-Rosas, J.L. Ocana, C. Molpeceres, J. Porro, M. Morales // *Wear*. – 2006. – V. 260. – No 7-8. – P. 847–854.
19. Popova, M.V. Perspektivnye aluminievie splavi dlya aviatsionnoi i kosmicheskoi tekhniki / M.V. Popova, A.N. Prudnikov, S.V. Dolgova, M.A. Maluh // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta*. – 2017. – № 3 (21). – S. 18–23.
20. Chen, Y. Enhancing Wear Resistance and Microstructural Evolution of Brass Through Laser Shock Peening / Y. Chen, Y. Sheng, Y. Wang, M.Ji, H. Pan, F. Zhang, L. Liu // *Tribology Letters*. – 2023. – V. 71. – № 4. – Article No 107.
21. Rigney, D.A. The evolution of tribomaterial during sliding: a brief introduction / D.A. Rigney, S. Karthikeyan // *Tribology Letters*. – 2010. – V. 39. – No 1. – P. 3–7.
22. Argibay, N. Stress-dependent grain size evolution of nanocrystalline Ni-W and its impact on friction behavior / N. Argibay, T.A. Furnish, B.L. Boyce, B.G. Clark, M. Chandross // *Scripta Materialia*. – 2016. – V. 123. – P. 26–29.
23. Malishev, V.N. Issledovanie ismeneniy truchihy poverhnosti v usloviyah efekta besisnosnosti / V.N. Malishev, S.D. Pichugin // *Sovremennye naukoemkie trchnologii*. – 2019. – No 10, Ч. 2. – S. 273–279.
24. Bushlya, V. Wear mechanisms of uncoated and coated cemented carbide tools in machining lead-free silicon brass / V. Bushlya, D. Johansson, F. Lenrick, J.-E. Stah, F. Schultheiss // *Wear*. – 2017. – V. 376–377. – P. 143–151.
25. Zhu, H. Recurrence evolvement of brass surface profile in lubricated wear process / H. Zhu, X. Zuo, Y. Zhou // *Wear*. – 2016. – V. 352–353. – P. 9–17.
26. Zheng, Z. Low friction of superslippery and superlubricity: a review / Z. Zheng, Z. Guo, W. Liu, J. Luo // *Friction*. – 2022. – V. 11. – No 7. – P. 1121–1137.
27. Radchenko, V.P. Relaksatsia ostatochnih napriageniy v poverhnostno uprochnennom poluprostranstve v usloviyah polsuchesti / V.P. Radchenko, T.I. Bochkova, V.V. Tsvetkov // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya fis.-mat. nauki*. – 2015. – T. 19. – № 3. – S. 504–522.
28. Wang, F. Experimental study on laser shock processing of brass / F. Wang, Zh. Yao, Q. Deng // *Journal of University of Science and Technology Beijing*. – 2007. – V. 14. – No 6. – P. 529–532.
29. Muratkin, G.V. Fundamentals of restoration of parts and repair of cars. In 2 parts. Part 1. Technological methods of restoration of parts and repair of cars / G.V. Muratkin, V.S. Malkin, V.G. Doronkin; edited by G.V. Muratkin. – Tolyatti: Publishing house of TSU, 2012, pp. 62. – 247 p.

Fedin Aleksandr Viktorovich

FSUE «All-Russian Research Institute of Physical-Engineering and Radiotechnical Measurements»,
Solnechnogorsk

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Engineer

141570, Moscow Region, Solnechnogorsk, Mendeleev work settlement (VNIIFTRI industrial zone)

FSBEI VO «Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolay Grigorievich Stoletov»

Professor of the Department of «Electronics, Instrumentation and Biotechnical Systems»

600000, Vladimir, Gorky St., 87

Tel.: +79190005350

E-mail: a_fedin@list.ru

НОРИН В.А.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРЕЗКИ ТОНКОСТЕННЫХ ЗАГОТОВОК

Аннотация. *Описаны особенности разделительных операций при импульсном нагружении на пространственных заготовках по сравнению с плоскими заготовками. В работе представлена математическая модель процесса электрогидроимпульсной обрезки тонкостенных заготовок со свободным торцом с учетом гидродеформационных процессов, возникающих в системе канал разряда-жидкость-заготовка. Предложенная модель позволяет определить скорость соударения заготовки с матрицей и величину давления, которые необходимы для разделения материала тонкостенной заготовки на режущей кромке матрицы. Приведен пример расчета деформирования заготовки, как системы с распределенными параметрами со свободным торцом, при различных энергосиловых параметрах процесса.*

Ключевые слова: *электрогидроимпульсная обрезка, тонкостенные заготовки, математическая модель, разделительные операции.*

Введение

Разделительные операции при импульсном нагружении на пространственных тонкостенных заготовках наряду с общими свойствами имеют особенности, отличающие их от соответствующих операций на плоских заготовках. Существенным отличием, например, является наличие начального напряженно-деформированного состояния и начальной скорости деформирования, которые заготовка приобретает при выборе технологического зазора между матрицей и заготовкой под действием импульсного давления. Процесс свободного деформирования цилиндрической заготовки под действием электрогидроимпульсного (ЭГИ) давления является первым этапом импульсной обрезки. Полученные на этом этапе скорости заготовки, компоненты ее напряженно-деформированного состояния и давление, действующее на заготовку при ее соударении с матрицей, являются исходными параметрами для определения величины энергии, необходимой для обрезки.

Для определения энергосиловых параметров процесса ЭГИ подрезки торца тонкостенной заготовки целесообразно использовать теоретический подход, основанный на разработке математической модели процесса. При разработке данной модели необходимо учитывать волновой характер деформирования заготовки [1-6]. Особенно необходимо на это обратить внимание при торцовке тонкостенных заготовок с незащемленным торцом (без использования подпора), когда происходит локализация пластической деформации в области режущей кромки матрицы. Данная схема обрезки позволит сэкономить материал, идущий в отходы при обрезке полых тонкостенных заготовок, что чрезвычайно важно при обработке деталей из цветных металлов и сплавов. При этом процесс обрезки по такой схеме должен быть осуществлен при одноразовом нагружении, в противном случае будет происходить отбортовка припуска без его отделения от заготовки. Имеющаяся в открытых источниках информация показывает, что исследование процесса обрезки тонкостенных заготовок с незащемленным торцом носит, в основном, экспериментальный характер [7, 8], а описанные математические модели относятся к магнитно-импульсной обработке [3, 9]. В связи с этим, целью данной работы являлась разработка математической модели процесса обрезки тонкостенных заготовок со свободным торцом при их электрогидроимпульсном нагружении.

Постановка задачи и принимаемые допущения

Вследствие симметричности заготовки и представлении ее тонкой безмоментной оболочкой, задачу целесообразно решать с использованием теории одномерных оболочек, при этом рассматривать заготовку как систему с распределенными параметрами. Ширина деформируемой части составляет $(5-7)h_0$. Давление, действующее на деформируемую часть заготовки, будем считать равномерным, вследствие незначительности ширины отхода. Расчетная схема процесса представлена на рисунок 1.

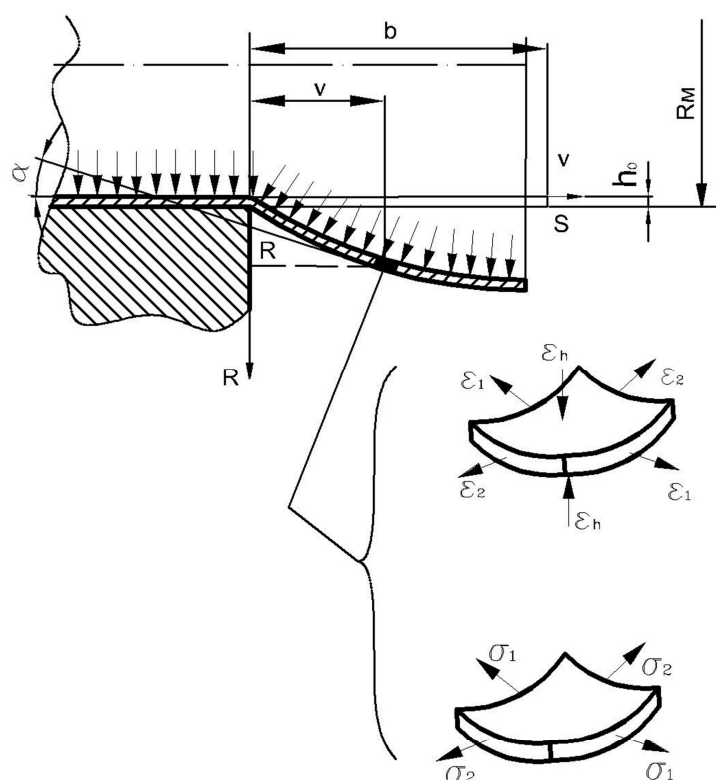


Рисунок 1 – Расчетная схема

Принимаем следующие допущения:

1. Заготовку считаем тонкой безмоментной оболочкой, полагая, что растягивающие напряжения в материале заготовки существенно превышают напряжения изгиба.
2. Напряжения, действующие в меридиональном и тангенциальном направлениях (σ_1 и σ_2), постоянны по толщине и являются главными. Третьим главным напряжением пренебрегаем и считаем напряженное состояние плоским.
3. Заготовка выполнена из изотропного и несжимаемого материала.
4. Вследствие достижения материалом заготовки пластических деформаций на первом этапе деформирования упругими деформациями пренебрегаем.
5. Материал заготовки в процессе деформирования упрочняется по закону:

$$\sigma_i = \sigma_s = K_{\text{дин}} \cdot B \cdot \epsilon_i^m \quad (1)$$

где $K_{\text{дин}}$ – коэффициент динамичности;

B и m – параметры аппроксимации кривой деформационного упрочнения.

6. В качестве определяющих соотношений принимаем соотношения деформационной теории пластичности (тензор напряжений пропорционален тензору деформаций).
7. Матрицу считаем абсолютно жесткой.
8. Разделение материала заготовки на режущей кромке матрицы происходит при достижении толщинной деформации ϵ_h критического значения, определяемого экспериментально.

Математическая модель процесса импульсной обрезки тонкостенных заготовок.

С учетом принятых допущений для тонкостенной осесимметричной безмоментной оболочки уравнения движения [10] можно привести к удобному виду для последующей аппроксимации разностной схемой:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} &= \frac{1}{R_0 \cdot \rho_3} \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{\sigma_1 R_0 \sin \alpha}{1+e} \right) + \frac{P(t) \cdot \cos \alpha \cdot R \cdot (1+e)}{R_0 \cdot \rho_3 \cdot h_3} - \frac{\sigma_2}{R \cdot \rho_3} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{1}{R_0 \cdot \rho_3} \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{\sigma_1 R_0 \cos \alpha}{1+e} \right) - \frac{P(t) \cdot \sin \alpha \cdot R \cdot (1+e)}{R_0 \cdot \rho_3 \cdot h_3} \end{aligned} \quad (2)$$

где S – лагранжева координата;

R и v – эйлеровы координаты;

ρ_3 – плотность материала заготовки;

σ_1 и σ_2 – меридиональное и тангенциальное напряжения;

$P(t)$ – давление, действующее на заготовку;

α – угол между касательной к профилю заготовки и осью v ;

h_3 – текущая толщина заготовки;

e – относительное удлинение заготовки в меридиональном направлении.

$$\sin \alpha = \frac{\partial R}{\partial S} / (1 + e) \quad (3)$$

$$\cos \alpha = \frac{\partial v}{\partial S} / (1 + e) \quad (4)$$

Меридиональная деформация:

$$\varepsilon_1 = \ln(1 + e), \quad (5)$$

где

$$1 + e = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial S}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial S}\right)^2} \quad (6)$$

Тангенциальная деформация:

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + \varepsilon_2^I, \quad (7)$$

где ε_2^I – тангенциальная деформация, приобретенная заготовкой на первом этапе до соударения с матрицей.

Интенсивность деформаций:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2} \quad (8)$$

Меридиональное и тангенциальное напряжения определяются по соотношениям

$$\sigma_1 = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (2\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (9)$$

$$\sigma_2 = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2) \quad (10)$$

Условие пластичности Губера-Мизеса

$$\sigma_i = \sigma_s \quad (11)$$

Для решения системы уравнений (1 – 9) необходимо задать начальные и граничные условия. Начальный прогиб и скорость заготовки в момент времени t_1 :

$$t = t_1; R(0, S) = R_0 = R_m; \dot{R}(0, S) = \dot{R}_3 \quad (12)$$

где t_1 – время, при котором происходит соударение заготовки с матрицей,

R_m – радиус матрицы;

\dot{R}_3 – скорость, приобретаемая заготовкой на этапе разгона, в момент ее соударения с матрицей.

В момент времени $t = t_1$ лагранжева координата совпадает с эйлеровой:

$$v(0, S) = S; \quad S = b; \quad \dot{v}(0, S) = 0 \quad (13)$$

При задании граничных условий полагаем, что у режущей кромки матрицы заготовка жестко закреплена, а на торцевом участке имеет возможность свободного перемещения.

Граничные условия у режущей кромки:

$$R = R_0; v = 0; S = 0 \quad (14)$$

Граничные условия на торце:

$$\sigma_1 = 0; \quad \dot{R} = \dot{R}_3 \quad (15)$$

где b – ширина деформируемого участка.

Величина давления $P(t)$ (1) и скорости соударения заготовки с матрицей \dot{R}_3 (11), приобретенные на этапе разгона заготовки в пределах зазора между ею и матрицей, определялись на основе теоретического анализа процесса ЭГИ деформирования полый цилиндрической заготовки с учетом гидродеформационных процессов, возникающих в системе канал разряда-жидкость-заготовка [11]:

$$E(t) = W + A \quad (16)$$

где $E(t)$ – закон выделения энергии в канале разряда в жидкости при его расширении;

W – внутренняя энергия плазмы канала;

A – работа, совершаемая каналом над окружающей средой.

Эта работа расходуется на разгон жидкости и заготовки, в результате чего они приобретают кинетическую энергию, и на работу пластической деформации заготовки:

$$A = K_3 + K_{ж} + A_{пл}, \quad (17)$$

где K_3 – кинетическая энергия заготовки;

$K_{ж}$ – кинетическая энергия жидкости;

$A_{пл}$ – работа пластической деформации заготовки.

Уравнения движения заготовки в проекциях на оси R и v представляют собой систему уравнений (1-11) в частных производных гиперболического типа. Точное решение данной системы получить невозможно, поэтому решение строится конечно-разностным методом по схеме второго порядка точности.

Результаты численного расчета показали, как и следовало ожидать, что напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе ее деформирования значительно зависит от скорости соударения заготовки с матрицей \dot{R}_3 и давления, действующего на заготовку в момент ее соударения с матрицей. Так, например, заготовка из алюминиевого сплава Д16АМ диаметром 50мм, толщиной стенки 1мм при $b = 5$ мм, при скорости соударения 30м/с и давлении $50 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ деформируется по схеме отбортовки. Деформация материала заготовки в области режущей кромки значительно меньше критической, поэтому разделения не происходит (рисунок 2).

При увеличении скорости соударения до 60 м/с, а давления до $400 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ происходит локализация деформации материала заготовки в области режущей кромки, вследствие возникновения в заготовке ярко выраженного волнового процесса. Деформация ε_h здесь достигает критического значения, в результате чего происходит отделение отхода от заготовки. Разделение происходит в самом начале деформирования заготовки при ее незначительном прогибе.

Установлено, что определяющим параметром процесса обрезки является скорость соударения заготовки с матрицей, при этом величина давления, действующего на заготовку, важна в момент соударения, в дальнейшем, в случае разгерметизации полости заготовки, резкое падение давления незначительно скажется на результатах расчета. Расхождения не превышают 15%.

Экспериментальная проверка расчетной модели по энергосиловым параметрам, по конечной форме деформированной заготовки и распределению деформации в ней показала удовлетворительное совпадение результатов. Расхождения не превысили 15-20%, что позволяет сделать вывод о корректности расчетной модели.

Заключение

В работе представлена математическая модель процесса ЭГИ обрезки цилиндрических тонкостенных заготовок со свободным торцом. Математическое моделирование процесса электрогидроимпульсной обрезки тонкостенных заготовок позволяет выбрать оптимальные параметры технологического процесса и обосновать новые технические решения по дальнейшему расширению возможностей метода.

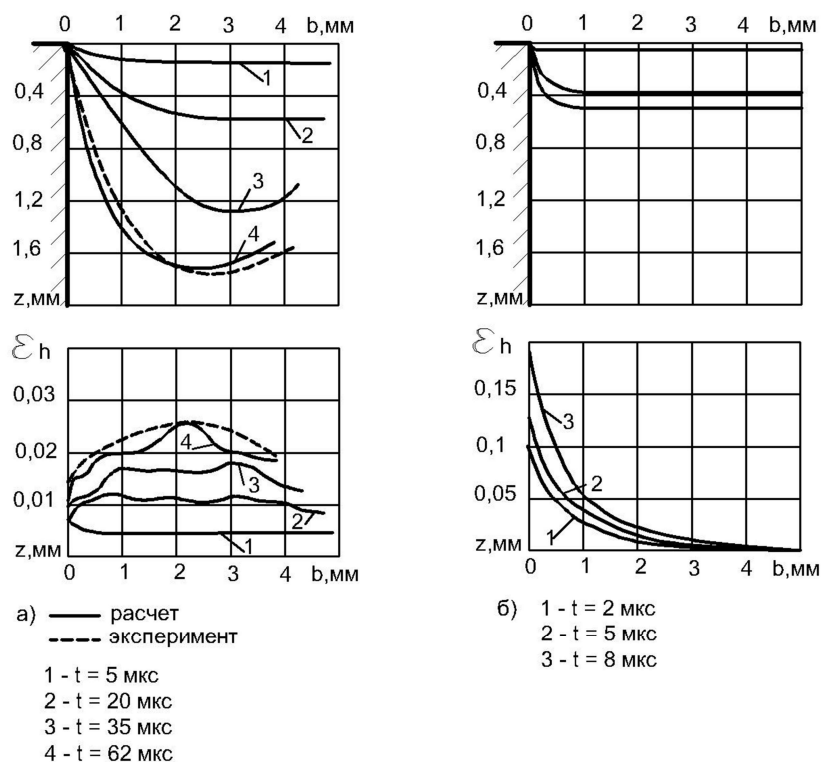


Рисунок 2 – Расчетные и экспериментальные значения величины прогиба заготовки z и распределение деформации в материале заготовки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушников В.А., Полушин А.Г. Оценка предельной скорости при динамической резки полосы. // Сопротивление материалов и теория сооружений. «Будивельник», 1983, №43
2. Петров М.В., Аврелькин В.А. Магнитно-импульсная обработка заготовок типа оболочки вращения // Вестник Чувашского университета. 2016. №3. С.109-116
3. Пасько А.Н., Киреева А.Е., Геча Н.С. Математическая модель, описывающая магнитно-импульсную обработку упругопластических заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 10. С 30-44
4. Беляева И.А., Глушников В.А. Раздача труб импульсным магнитным полем. Результаты компьютерного моделирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 6(3). С. 657-665
5. Глушников В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитноимпульсной обработки материалов: монография. Самара: Издательский дом «Фёдоров», 2014. 208 с.
6. Прокофьев А. Б. Магнитно-импульсная обработка материалов: монография / А.Б. Прокофьев [и др.] – Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. – 140 с.
7. Барвинок В.А., Самохвалов В.П., Стрельников Е.А. Повышение качества разделительных технологических процессов с помощью давления импульсного магнитного. – Проблемы машиностроения и автоматизации, 2006. – №1
8. Барвинок В.А., Кирилин А.Н., Самохвалов В.П. и др. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов. – М.: Наука и технологии, 2002. – 394с
9. Глушников В. А., Бурмистров А. Е. Магнитно-импульсная резка труб. Механизм. Качество // Известия Самарского научного центра РАН. 2000. №1
10. Щеглов Б.А. Динамика осесимметричного формообразования тонкостенных оболочек // Расчеты процессов пластического течения металлов. М., Наука, 1970
11. Норин В. А. К вопросу точности изготовления машиностроительных изделий из полых цилиндрических заготовок на основе оптимизации математического моделирования гидродеформационных процессов / В. А. Норин [и др.] // Вестник гражданских инженеров. – 2013.– № 2. – С. 176–181

Норин Вениамин Александрович

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург
 к.т.н., доцент, доцент кафедры технологии строительных материалов и метрологии
 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул. д.4
 E-mail: norinveniamin@yandex.ru

NORIN V.A.

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF ELECTROHYDROIMPULSE TRIMMING OF THIN-WALLED WORKPIECES

Abstract. *The features of separation operations under pulsed loading on spatial workpieces in comparison with flat workpieces are described. The paper presents a mathematical model of the process of electrohydroimpulse trimming of thin-walled workpieces with a free end, taking into account the hydrodeformation processes occurring in the discharge channel-liquid-billet system. The proposed model makes it possible to determine the collision rate of the workpiece with the die and the amount of pressure required to separate the material of the thin-walled workpiece at the cutting edge of the die. An example of calculating the deformation of a workpiece as a system with distributed parameters with a free end is given for various energy-strength process parameters.*

Keywords: *electrohydroimpulsive trimming, thin-walled workpieces, mathematical model, separation operations*

BIBLIOGRAPHY

1. Glushchenkov V.A., Polushin A.G. Ocenka predelnoj skorosti pri dinamicheskoj rezki polosy. // Soprotivlenie materialov i teoriya sooruzhenij. «Budivelnik», 1983, №43
2. Petrov M.V., Avrelkin V.A. Magnitno-impulsnaya obrabotka zagotovok tipa obolochki vrashcheniya // Vestnik Chuvashskogo universiteta. 2016. No3. S.109-116
3. Pasko A.N., Kireeva A.E., Gecha N.S. Matematicheskaya model, opisyvayushchaya magnitno-impulsnuyu obrabotku uprugoplasticheskikh zagotovok // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2015. Vyp. 10. S 30-44
4. Belyaeva I.A., Glushchenkov V.A. Razdacha trub impulsnym magnitnym polem. Rezultaty kompyuternogo modelirovaniya // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2015. T. 17. № 6(3). S. 657-665
5. Glushchenkov V.A., Karpuhin V.F. Tekhnologiya magnitnoimpulsnoj obrabotki materialov: monografiya. Samara: Izdatelskij dom «Fyodorov», 2014. 208 s.
6. Prokofev A. B. Magnitno-impulsnaya obrabotka materialov: monografiya /A.B. Prokofev [i dr.] – Samara: ANO «Izdatelstvo SNC», 2019. – 140 s.
7. Barvinok V.A., Samohvalov V.P., Strelnikov E.A. Povyshenie kachestva razdelitelnyh tekhnologicheskikh processov s pomoshchyu davleniya impulsnogo magnitnogo. – Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii, 2006. – №1
8. Barvinok V.A., Kirilin A.N., Samohvalov V.P. i dr. Vysokoeffektivnye tekhnologicheskie processy izgotovleniya elementov truboprovodnyh i toplivnyh sistem letatelnyh apparatov. – M.: Nauka i tekhnologii, 2002. – 394s
9. Glushchenkov V. A., Burmistrov A. E. Magnitno-impulsnaya rezka trub. Mekhanizm. Kachestvo // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2000. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/magnitno-impulsnaya-rezka-trub-mekhanizm-kachestvo> (data obrashcheniya: 12.03.2025).
10. Shcheglov B.A. Dinamika osesimmetrichnogo formoobrazovaniya tonkostennyh obolochek // Raschety processov plasticheskogo techeniya metallov. M., Nauka, 1970
11. Norin V. A. K voprosu tochnosti izgotovleniya mashinostroitelnyh izdelij iz polyh cilindricheskikh zagotovok na osnove optimizacii matematicheskogo modelirovaniya gidrodeformacionnyh processov / V. A. Norin [i dr.] // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2013.– № 2. – S. 176–181

Norin Veniamin Aleksandrovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Associate Professor of the Department of Technology of building materials and metrology
190005, Saint Petersburg, Vtoraja Krasnoarmejskaja ul. 4
E-mail: norinveniamin@yandex.ru

© Норин В.А., 2025

КОВАЛЕВ В.Д., ПАНКОВ В.П., РАДЧЕНКО С.Ю., СТЕПАНОВА М.В., КУЛИКОВ М.В.

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

Аннотация. Исследованы составы и свойства ряда композитов, методы прогнозирования их свойств, используя упрощенные модели и граничные условия, позволяющие пренебречь сдвиговой деформацией. Выполнена оценка влияния пористости на упругие модули композиционных материалов.

Ключевые слова: углеродное волокно, композиционный материал, матрица, наполнитель, катализатор, структура, свойства, композит.

Введение

Комбинирование различных веществ является одним из основных способов создания новых материалов, свойства которых и количественно, и качественно отличаются от свойств каждого из составляющих его веществ [1,2].

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) состоят из высокопрочных волокон (частиц, слоев) различной природы и полимерного связующего – матрицы, склеивающей волокна в монолитный материал.

При разработке углерод - углеродных композитов целесообразно использование фенолформальдегидных смол (ЛБС-1, ФН) полиимидной (СП97), кремнийорганической (К2104) (таблица 1).

Таблица 1 - Прочность углерод - углеродных материалов при высоких температурах.

Связующее	Содержание, %		Прочность при изгибе, Мпа, углерод-углеродного материала при температуре, °С		
	связующего	пироуглерода	20	900*	1500*
ФН	43,2	12,4	117	48	0
БСЛ	40,1	13,2	104	42	0
СП-97	40,2	11,7	108	43	0
К-101	38,4	15,2	84	41	3
ТКС	39,4	17,3	118	56	2
К-2104	44,0	14,2	93	50	15
ФКФ	41,2	12,3	110	74	28

*Выдержка при высокой температуре в окислительной среде в течение 30 мин.

Широкое применение в качестве наполнителей композиционных материалов находят функционализированные углеродные нанотрубки (ФУНТ) [3,4,5,6].

Для придания углеродным волокнам особых свойств проводят их модификацию различными способами: путём окисления в газовой или жидкой фазах, электрохимическим окислением, обработкой плазмой, и т.д. (рисунок 1-3) [7,8,9].

Наиболее перспективными методами для синтеза нанотрубок на данный момент являются термическое разложение углеводородов и термическое разложение углеводородов в присутствии плазмы [10,11].

При добавлении ФУНТ прочность композита увеличивается на 30-60%.

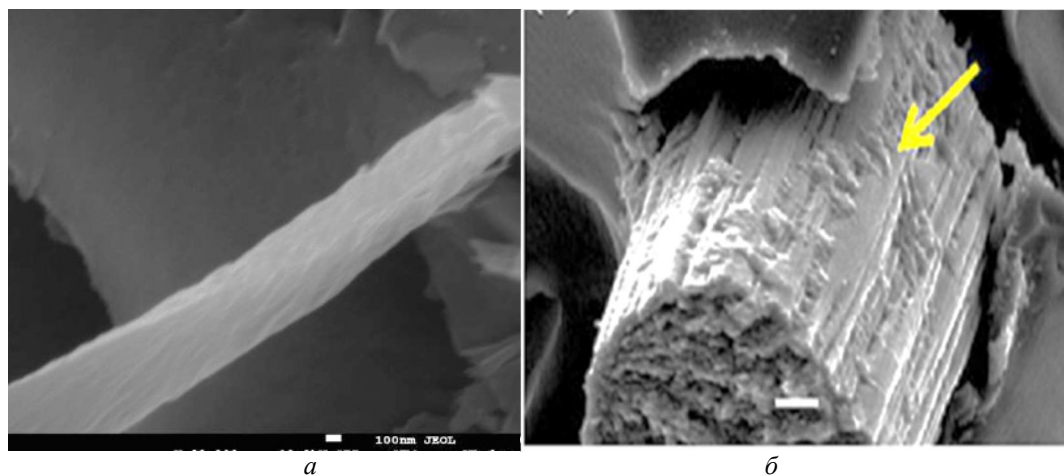
Для дальнейших исследований выбран метод модификации углеродного волокна углеродными нанотрубками с применением двух способов нанесения катализатора: методом пропитки с предварительным нанесением буферного слоя и методом магнетронного напыления (рисунок 4).

Композиционные материалы на основе модифицированного углеродного волокна (МУВ).

Проведены исследования образцов углепластиков на основе МУВ после проведения физико-механических испытаний (рисунок 5). Видно, что связь матрицы и наполнителя очень

слабая, в области разрушения видны длинные изломы филаментов, на которых практически не присутствуют остатки матрицы.

Предельная прочность на разрыв для полученных КМ составляла до 75 % прочности исходной нити.



*Рисунок 1 – а - функционализированная углеродная нанотрубка;
б - модифицированная углеродная нанотрубка*

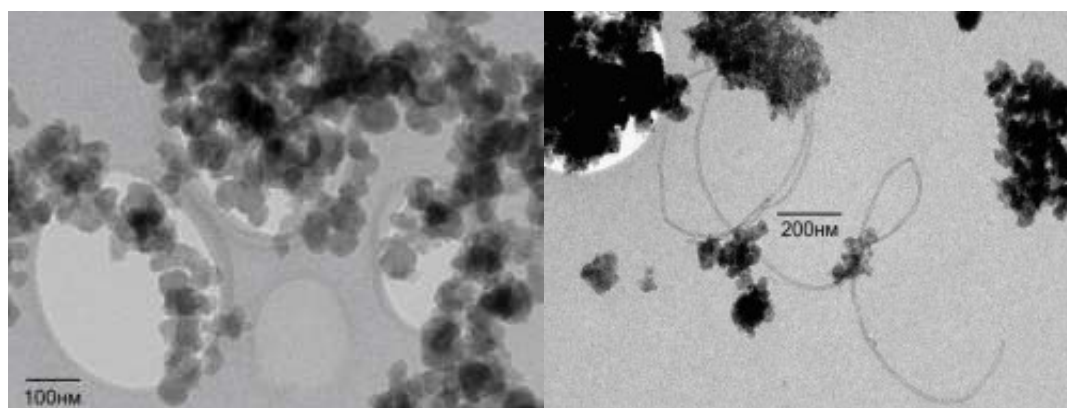
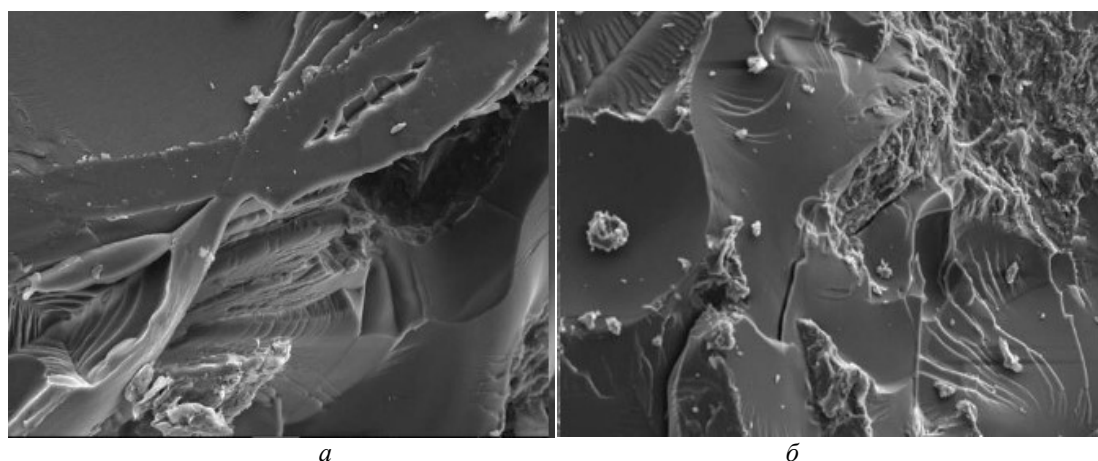


Рисунок 2 - Синтез углеродных нанотрубок плазменным методом



*Рисунок 3 – а - образцы полимерного композиционного материала без ФУНТ;
б - образцы полимерного композиционного материала с добавлением ФУНТ*

Композиционные материалы с использованием эластомерных матриц.

По изображениям срезов композиционных материалов (КМ) на основе УВ и каучука (рисунок 6 а, б) видно, что происходит с каучуком после процесса вулканизации: в связи с высокой усадкой — полимер стягивается, образуя пустоты в композиционном материале.

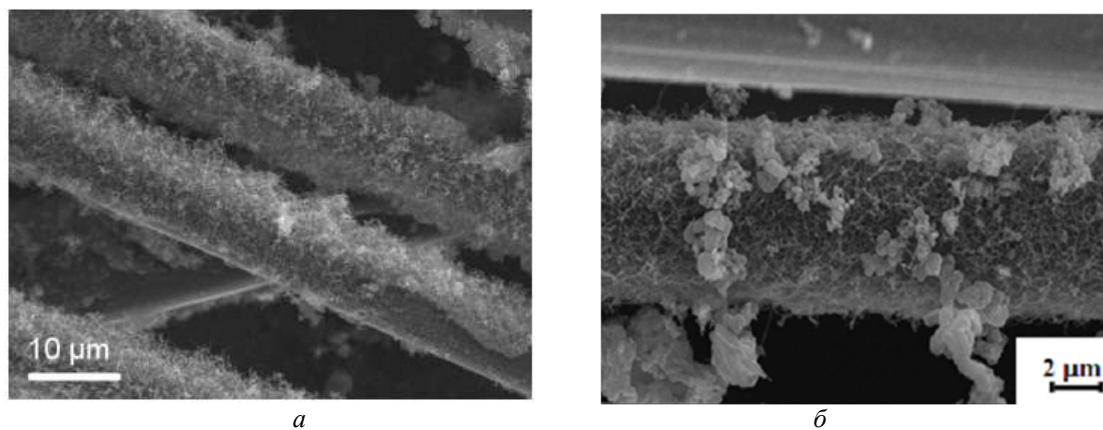


Рисунок 4 - Изображение УВ, модифицированного углеродными нанотрубками:
а - нанесенного магнетронным напылением; б - изображения филамента УВ с УНТ, полученными на катализаторе, осажденном из газовой фазы

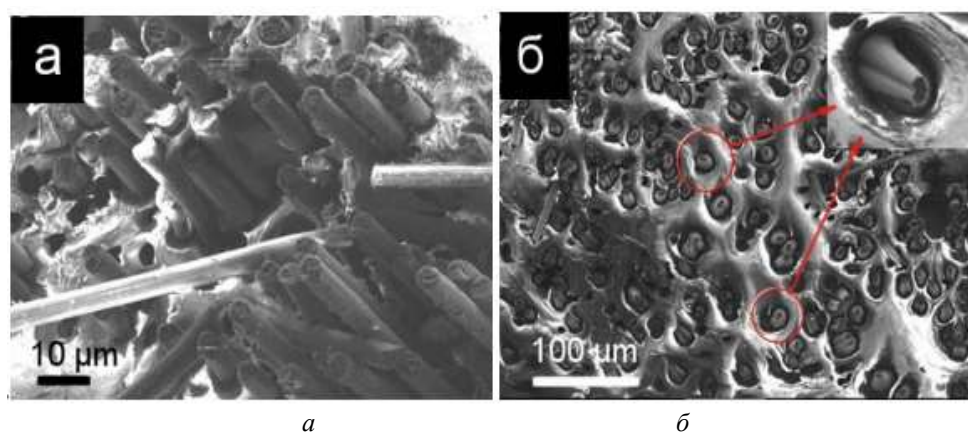


Рисунок 5 - Микроструктура поверхности углепластика на основе:
а – исходных углеродных нитей; б – модифицированных углеродных нитей

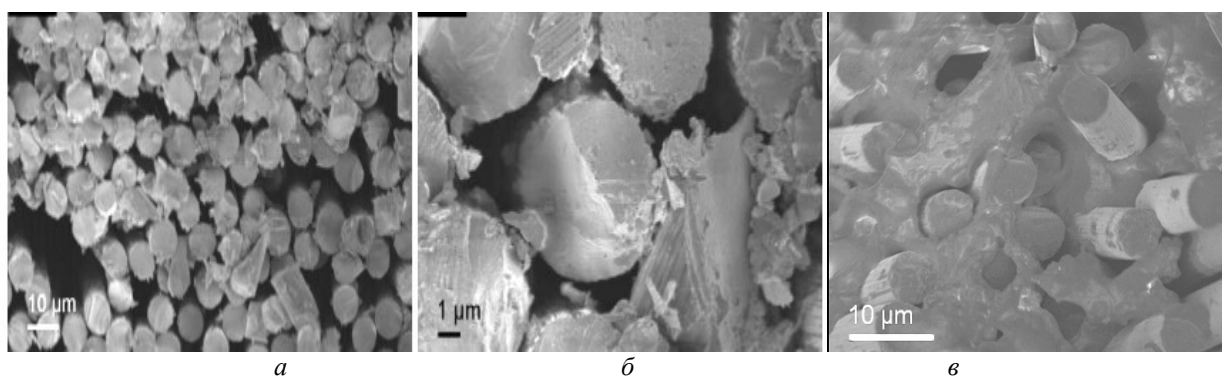


Рисунок 6 - Срез углеродного образца, пропитанного каучуком после вулканизации
(а, б); в - фрактограмма КМ на основе полиуретана

Применение полиуретана для создания композитов на основе углеродного волокна

Композиционные материалы на основе исходных волокон с использованием полиуретана оказались жестче, чем образцы с силиконом, но гораздо более ломкими (рисунок 6 в).

Механические характеристики композиционных материалов на основе полиуретана и силиконового каучука с УВ и модифицированным УВ в качестве наполнителей были исследованы при механических испытаниях (таблице 2).

Таблица 2 - Механические свойства композиционных материалов

Полимер	Наполнитель композита	σ , МПа	Е, ГПа	Относительное изменение после модификации УНТ	
				$\varepsilon(\sigma)$, %	$\varepsilon(E)$, %
Полиуретан	Исходное УВ	315±24	2.44±29	3.8 ↓	17.2 ↑
	УВ+УНТ	303±21	2.86±33		
Силикон	Исходное УВ	285±17	2.38±22	14 ↓	23.1 ↑
	УВ+УНТ	245±12	2.93±25		

Основные уравнения

Известные модели Рейсса и Фойгта неоднородного материала определяют как последовательное и параллельное соединение его компонентов соответственно.

Однонаправленный непрерывно армированный композит – это изотропный материал с модулем сдвига $G_{13} = G_{23} = G(x_1, x_2)$. Неоднородность – с периодами $2a_1$ и $2a_2$ по координатам x_1 и x_2 с двумя системами плоскостей симметрии неоднородности, ортогональных осям x_1 и x_2 (рисунок 7б, в).

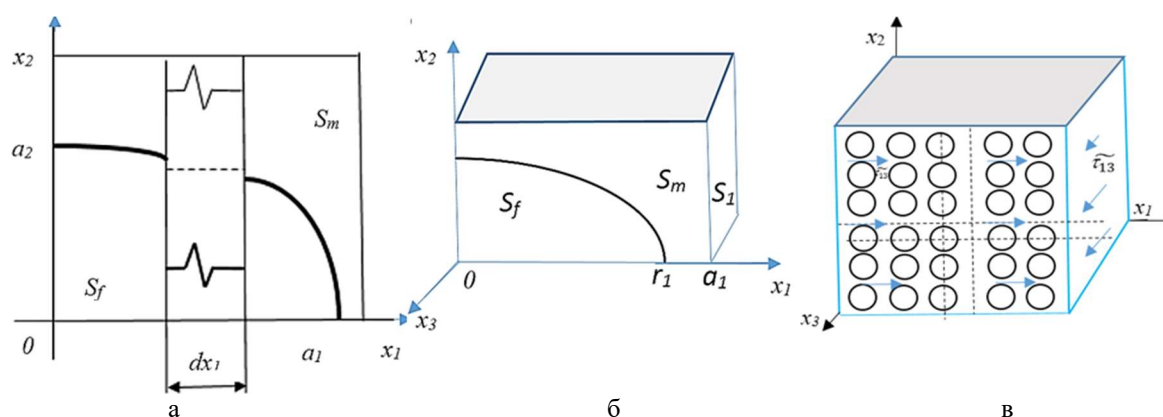


Рисунок 7 – Армированный композит

а - симметричного строения, б - минимальная ячейка, в - структурная модель

В соответствии с принципом Неймана–Кюри главные плоскости композита параллельны трем плоскостям симметрии строения, продольная сдвиговая жесткость характеризуется модулями сдвига \tilde{G}_{13} и \tilde{G}_{23} .

Следовательно

$$\tilde{G}_{i3} = \tilde{\tau}_{i3} / \tilde{\gamma}_{i3} \quad (i = 1, 2), \quad (1)$$

где $\tilde{\tau}_{i3}$ и $\tilde{\gamma}_{i3}$ – сдвиговые макронапряжения и макродеформации композита.

Нагрузением композита сдвиговой нагрузкой $\tilde{\tau}_{13}$ реализуется задача деформации: отличны от нуля только перемещение $U_3 = U$, сдвиговые микронапряжения τ_{13} , τ_{23} и микродеформации γ_{13} , γ_{23} .

На границах ячейки имеют место условия симметрии:

$$U(x_1 = 0, x_2) = 0, \quad U(x_1 = a_1, x_2) = a_1 \tilde{\gamma}_{13}, \quad (2)$$

$$\tau_{23}(x_1, x_2 = 0) = 0, \quad \tau_{23}(x_1, x_2 = a_2) = 0 \quad (3)$$

или

$$\gamma_{23}(x_1, x_2 = 0) = 0, \quad \gamma_{23}(x_1, x_2 = a_2) = 0. \quad (4)$$

Внутри ячейки выполняются основные уравнения теории упругости:

$$\partial \tau_{13} / \partial x_1 + \partial \tau_{23} / \partial x_2 = 0, \quad (5)$$

$$\gamma_{13} = \partial U / \partial x_1, \quad (6)$$

$$\gamma_{23} = \partial U / \partial x_2, \quad (7)$$

$$\gamma_{i3} = \tau_{i3} / G(x_1, x_2), \quad (8)$$

$$\gamma_{23} = \tau_{23}/G(x_1, x_2). \quad (9)$$

В силу разрывности $G(x_1, x_2)$ находится решение краевой задачи (2)–(9), и определяют макронапряжение:

$$\tilde{\tau}_{13} = \frac{1}{a_2} \int_0^{a_2} \tau_{13}(x_1 = a_1, x_2) dx_2 \quad (10)$$

используемое для определения эффективного модуля сдвига \tilde{G}_{13} по формуле (1). Вычисление модуля \tilde{G}_{23} аналогичное.

Упрощенная модель

Фундамент модели – пренебрежение напряжением τ_{23} . Основание – равенство нулю величины τ_{23} на границах ячейки (3), значение $\tilde{\tau}_{23}$ также нулевое.

Таким образом, формулируется упрощающая гипотеза

$$\tau_{23}(x_1, x_2) \equiv 0. \quad (11)$$

После подстановки закона Гука (8) в зависимость Коши (6) последнюю запишем в виде

$$\frac{\partial U(x_1, x_2)}{\partial x_1} = \frac{\tau_{13}(x_2)}{G(x_1, x_2)}.$$

Интегрирование ее с учетом граничных условий (2) приводит к равенству:

$$a_1 \hat{\gamma}_{13} = \tau_{13}(x_2) \int_0^{a_1} \frac{dx_1}{G(x_1, x_2)}.$$

После подстановки $\tau_{13}(x_2)$ из последнего равенства в макронапряжение (10), а его – в равенство (1), получим формулу:

$$\tilde{G}_{13}^{(S)} = \frac{a_1}{a_2} \int_0^{a_2} \left[\int_0^{a_1} \frac{dx_1}{G(x_1, x_2)} \right]^{-1} dx_2 = \int_0^1 \left[\int_0^1 \frac{d\chi_1}{g(\chi_1, \chi_2)} \right]^{-1} d\chi_2, \quad (12)$$

где

$$\chi_i = x_i/a_i, \quad 0 \leq \chi_i \leq 1, \quad (i = 1, 2) \quad (13)$$

Удобна зависимость (12), полученная делением ее на константу G_m :

$$\tilde{g}_{13}^{(S)} = \int_0^1 \left[\int_0^1 \frac{d\chi_1}{g(\chi_1, \chi_2)} \right]^{-1} d\chi_2, \quad (14)$$

где $\tilde{g}_{13}^{(S)} = \tilde{G}_{13}^{(S)}/G_m$, $g = G/G_m$ – безразмерный эффективный модуль сдвига и безразмерный модуль сдвига соответственно.

Граничные условия (3), записанные в виде (4) дают возможность пренебречь сдвиговой деформацией γ_{23} .

Отсюда,

$$\gamma_{23}(x_1, x_2) \equiv 0. \quad (15)$$

Из уравнения Коши (7) следует, что перемещения $U = U(x_1)$, от координаты x_2 эквивалентно представлению ячейки бесконечным множеством последовательно соединенных элементарных слоев толщиной dx_1 , состоящих из параллельно соединенных элементов материалов компонентов (рисунок 7в).

После подстановки закона Гука (8) в зависимость Коши (6) последняя примет вид:

$$\frac{dU(x_1)}{dx_1} = \frac{\tau_{13}(x_1, x_2)}{G(x_1, x_2)}.$$

Решив это равенство относительно $\tau_{13}(x_2)$ и подставив его в (10), получим

$$\tilde{\tau}_{13} = \frac{dU(x_1)}{dx_1} \frac{1}{a_2} \int_0^{a_2} G(x_1, x_2) dx_2,$$

интегрирование которой с учетом (2) приводит к равенству:

$$a_1 \tilde{\gamma}_{13} = a_2 \tilde{\tau}_{13} \int_0^{a_1} \frac{dx_1}{\int_0^{a_2} G(x_1, x_2) dx_2},$$

которое вместе с (1) дает:

$$\tilde{G}_{13}^{(K)} = \frac{a_1}{a_2} \left[\int_0^{a_1} \frac{dx_1}{\int_0^{a_2} G(x_1, x_2) dx_2} \right]^{-1} = \left[\int_0^1 \frac{d\chi_1}{\int_0^1 g(\chi_1, \chi_2) d\chi_2} \right]^{-1} \quad (16)$$

Разделив эту формулу на константу G_m , получим ее в безразмерном виде:

$$\tilde{g}_{13}^{(K)} = \left\{ \int_0^1 \left[\int_0^1 g(\chi_1, \chi_2) d\chi_2 \right]^{-1} d\chi_1 \right\}^{-1}. \quad (17)$$

Формулы (12), (16) дают значения модуля сдвига и являются для \tilde{G}_{13} нижней и верхней границами соответственно:

$$\tilde{G}_{13}^{(S)} \leq \tilde{G}_{13} \leq \tilde{G}_{13}^{(K)}. \quad (18)$$

Для доказательства второго неравенства исследуем функционал Лагранжа ячейки:

$$L = \int_V W dV - \int_V F_3 U dV - \int_{S_\tau} \tau U dS \quad (19)$$

где W – упругий потенциал в деформациях; F_3 – объемная сила; τ – поверхностная сила на поверхностях S_τ .

Ввиду отсутствия объемных сил и однородности граничных условий в (3) два последних слагаемых в (19) равны нулю. Величина функционала с учетом (2) и равенств (10), (1):

$$L = \int_V W dV = \frac{1}{2} \int_0^{a_2} (U\tau) |_{x_i=a_i} dx_2 = \frac{1}{2} a_1 a_2 \tilde{G}_{13} \tilde{\gamma}_{13}^2. \quad (20)$$

Двухкомпонентный композит тетрагонального строения (волокна эллиптического сечения)

Поверхность раздела такого композита является эллиптическим цилиндром с полуосями r_1 и r_2 (рисунок 7а). Распределение безразмерного модуля сдвига примет вид

$$\begin{cases} g_{\xi} \text{ при } \left(\frac{\chi_1}{\rho_1}\right)^2 + \left(\frac{\chi_2}{\rho_2}\right)^2 < 1 \\ g(\chi_1, \chi_2) = \\ 1, \text{ при } \left(\frac{\chi_1}{\rho_1}\right)^2 + \left(\frac{\chi_2}{\rho_2}\right)^2 \geq 1 \end{cases} \quad (21)$$

где $\rho_1 = r_1/a_1$, $\rho_2 = r_2/a_2$ – полуоси эллипса на единичном квадрате. Тогда формулу (14) преобразуем следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{g}_{13}^{(S)} &= \int_0^1 \left[\int_0^1 \frac{d\chi_1}{g(\chi_1, \chi_2)} \text{ при } 0 \leq \chi_2 < \rho_2 \right]^{-1} dx_2 = \\ &= \left\{ \int_0^{\rho_2} \left[\int_0^1 \frac{d\chi_1}{g(\chi_1, \chi_2)} \right]^{-1} d\chi_2 + 1 - \rho_2 \right\} = \left\{ \int_0^{\rho_2} \left[\frac{1}{g_f} \int_0^{\xi_1} d\chi_1 + \int_{\xi_1}^1 d\chi_1 \right]^{-1} d\chi_2 + 1 - \rho_2 \right\}. \end{aligned}$$

Последнее равенство после подстановки координаты границы раздел $\xi_1 = \rho_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\chi_2}{\rho_2}\right)^2}$ (в соответствии с (21)) и интегрирования запишем как:

$$\tilde{g}_{13}^{(S)} = \rho_2 \left[I(d_1^{(S)}) - 1 \right] + 1, \quad (22)$$

где

$$d_1^{(S)} = \rho_1 \left(\frac{1}{g_f} - 1 \right), \quad (23)$$

$$\begin{aligned} I(d) &= \int_0^1 \frac{d\eta}{1 + d\sqrt{1 - \eta^2}} = \\ &= \begin{cases} 1, \text{ при } d = 0, \\ 2 \arctan \sqrt{\frac{1-d}{1+d}}, \text{ при } -1 < d < 1, d \neq 0, \\ \ln \left(\frac{\sqrt{d+1} + \sqrt{d-1}}{\sqrt{d+1} - \sqrt{d-1}} \right), \text{ при } 1 < d < \infty, \\ \frac{\pi}{2} - 1, \text{ при } d = 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

Модуль $\tilde{g}_{23}^{(S)}$ вычисляем по формуле (22) после перестановки индексов $1 \leftrightarrow 2$.

Двухкомпонентный композит тетрагонального строения (волокна прямоугольного сечения)

Прямоугольное поперечное сечение волокна размером $2b_1$ на $2b_2$ на ячейке занимает область $0 \leq x_1 \leq b_1$, $0 \leq x_2 \leq b_2$, а на единичном квадрате – $0 \leq \chi_1 \leq \beta_1$, $0 \leq \chi_2 \leq \beta_2$, где $\beta_1 = b_1/a_1$, $\beta_2 = b_2/a_2$. Тогда формула (14) после преобразований

$$\begin{aligned}\tilde{g}_{13}^{(S)} &= \left\{ \int_0^{\beta_2} \left[\int_0^1 \frac{d\chi_1}{g(\chi_1, \chi_2)} \right]^{-1} d\chi_2 + \int_{\beta_2}^1 \left[\int_0^1 d\chi_1 \right]^{-1} d\chi_2 \right\} \\ &= \left\{ \int_0^{\beta_2} \left[\frac{1}{g_f} \int_0^{\beta_1} d\chi_1 + \int_{\beta_1}^1 d\chi_1 \right]^{-1} dx_2 + 1 - \beta_2 \right\}\end{aligned}$$

примет вид:

$$\tilde{g}_{13}^{(S)} = \beta_2 \left[\frac{1}{\beta_1(1/g_f - 1) + 1} - 1 \right] + 1. \quad (25)$$

Для абсолютно жесткого волокна $g_f \rightarrow \infty$, $\tilde{g}_{13}^{(S)} = \beta_2 \left(\frac{1}{1 - \beta_1} - 1 \right) + 1$. Для композита с пустотами вместо волокон $g_f = 0$, $\tilde{g}_{13}^{(S)} = 1 - \beta_2$.

Металломатричные композиты

Для расширения спектра применения титановых сплавов, разрабатывают целый ряд металломатричных композитов. Моноборид титана – наиболее приемлемый упрочнитель титановых сплавов, так как имеет высокий модуль Юнга, высокую прочность, близкий к титану коэффициент термического расширения (рисунок 8).

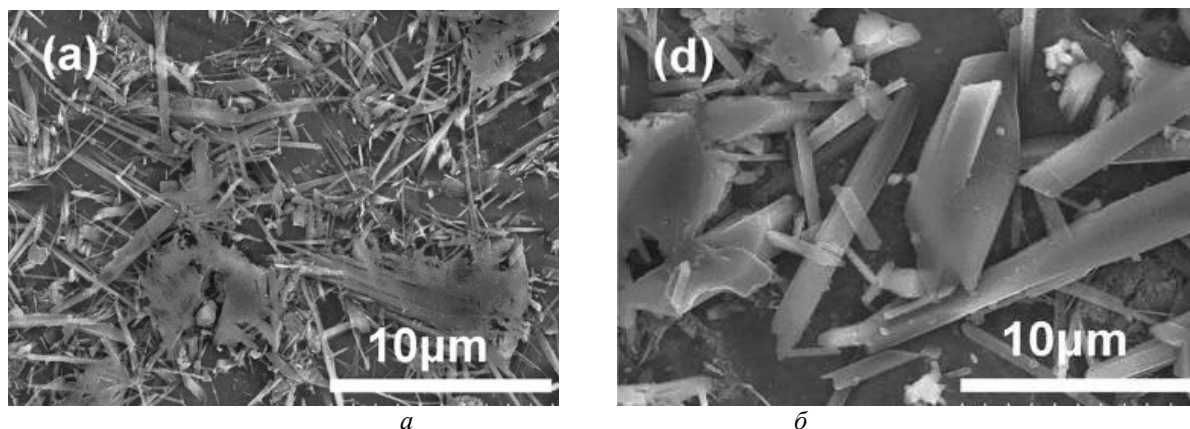


Рисунок 8 - Микроструктура композита титан - моноборид титана:
Температура спекания: а - 950° С, б-1250° С

Микротвердость TiB_2 (рисунок 8а) - 950 ± 170 HV; микротвердость матрицы с TiB составили 640 ± 20 HV (рисунок 9б); увеличение плотности TiB повышает микротвердость до 765 ± 40 HV. Микроструктура композита при деформации на 70% при температурах 500° С (а), 1050° С (б) (рисунок 10).

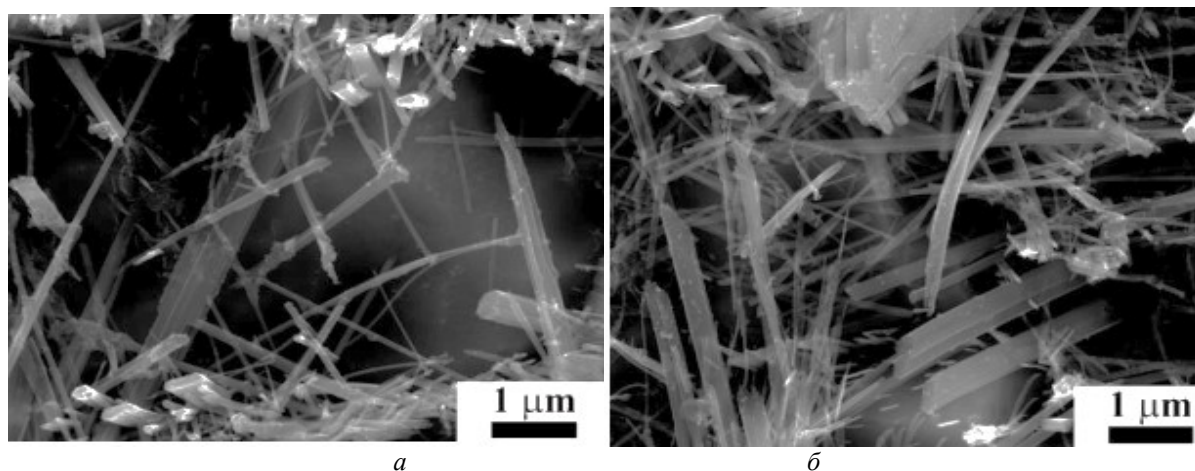


Рисунок 9 - Структура композита Ti -TiB

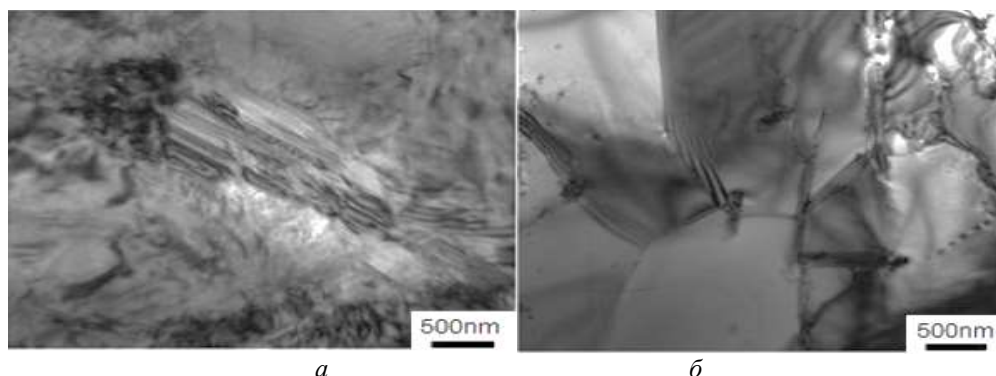


Рисунок 10 - Микроструктура композита при деформации на 70%.
а – при температурах 500° С, б - 1050° С

Моделирование композитов с добавками дисперсных наполнителей

Исследуются эффекты усиления композитов (на основе полимерной и металлической матрицы) при использовании наполнителей различного размерного уровня.

Традиционная схема метода асимптотического усреднения сформулирована для физически нелинейных уравнений термоупругости за счет расширенной трактовки функций быстрых переменных в параметрическом пространстве.

Основным уравнением в методе асимптотического усреднения является задача для функций быстрых переменных на ячейке периодичности (первого порядка).

Рассмотрим уравнения термоупругости с физически нелинейным материалом [12]:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}(x/\varepsilon, T)(\varepsilon_{kl} - T(x/\varepsilon, T)) \quad (26)$$

$$Q_i = -k_{ij}(x/\varepsilon, T)\frac{\delta T}{\delta x_j} \quad (27)$$

$$c_{ijkl} = c_{jikl} = c_{ijlk} = c_{klij}, \alpha_{ij} = \alpha_{ji}, k_{ij} = k_{ji}$$

В соответствии с (26), (27) введем переменные, связанные с дифференцированием сложной функции и параметры, определяющий все зависимости в соотношениях (26), (27):

$$\zeta = x/\varepsilon, \quad x = (x_1, x_2, x_3), \quad \frac{\partial}{\partial x_k} = \varepsilon^{-1} \frac{\partial}{\partial \zeta_k} + D^k, \quad D^k = \frac{\partial}{\partial x_k} p = \{T\} \quad (28)$$

Уравнения равновесия для (26), (27) переписываются с матричными коэффициентами, зависящими от быстрых переменных и набора параметров:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(A_{ij}(\zeta, p) \left(\frac{\partial u}{\partial x_j} - \alpha_j T \right) \right) + F = 0 \quad (29)$$

$$\rho(\zeta) c(\zeta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij}(\zeta, p) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + h, \quad (30)$$

$$A_{ij} = \{a_{ijkl}\}, \quad a_{ijkl} = c_{ijkl}, \quad a_i = \{\alpha_{ij}\}, \quad u = \{u_i\}, \quad F = F\{F_i\}.$$

Условия идеального контакта также переписываются в дивергентном виде с матричными коэффициентами:

$$[u] = \left[A_{ij}(\zeta, p) \left(\frac{\partial u}{\partial x_j} - \alpha_j T \right) n_i \right] = 0, \quad [T] = \left[k_{ij}(\zeta, p) \frac{\partial T}{\partial x_j} n_i \right] = 0. \quad (31)$$

Решение уравнений (29) – (31) в среде с размером ячейки периодичности ε находятся в виде разложений по функциям быстрых и медленных переменных:

$$u(x) = \hat{u}(x, \xi, p) = \sum_{l=0}^{\infty} \varepsilon^l u^{(l)}(x, \xi, p) \quad (32)$$

$$T(x) = \hat{T}(x, \xi, p) = \sum_{l=0}^{\infty} \varepsilon^l T^{(l)}(x, \xi, p) \quad (33)$$

Необходимое условие равенства нулю (29) – (31) с точностью до $O(\varepsilon)$ определяет структуру асимптотических разложений (32), (33) первого порядка:

$$u^{(0)}(x, \xi, p) = V(x), \quad T^{(0)}(x, \xi, p) = T_0(x) \quad (34)$$

$$u^{(1)}(x, \xi, p) = N_{i1}(\xi, p) D^{i1} V(x) + m(\xi, p) T_0(x) \quad (35)$$

$$T^{(1)}(x, \xi, p) = n_{i1}(\xi, p) D^{i1} T_0(x) \quad (36)$$

Здесь $N_{i1}(\xi, p)$, $m(\xi, p)$, $n_{i1}(\xi, p)$ - функции быстрых переменных в параметрическом пространстве (соответственно матричные, векторные и скалярные), периодические с периодом l .

Форма представления (34) определяет равенство нулю членов порядка $O(\varepsilon^2)$, а форма представления (35), (36) определяет уравнения для функций быстрых переменных в классе из условия равенства нулю членов порядка $O(\varepsilon^1)$:

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(A_{ij}(\xi, p) \frac{\partial(N_{i1} + \zeta_{i1}E)}{\partial \xi_{i1}} \right) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(A_{ij}(\xi, p) \left(\frac{\partial m}{\partial \xi_{i1}} - \alpha_j \right) \right) = 0 \quad (37)$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(k_{ij}(\xi, p) \frac{\partial(n_{i1} + \zeta_{i1})}{\partial \xi_j} \right) = 0 \quad (38)$$

Из граничных условий получаем условия для функций быстрых переменных:

$$[N_{i1}] = \left[A_{ij}(\xi, p) \frac{\partial(N_{i1} + \zeta_{i1}E)}{\partial \xi_j} n_i \right] = 0, \quad [m] = \left[A_{ij}(\xi, p) \frac{\partial m}{\partial \xi_j} n_i \right] = 0 \quad (39)$$

$$[n_{i1}] = \left[k_{ij}(\xi, p) \frac{\partial(n_{i1} + \zeta_{i1})}{\partial \xi_j} n_i \right] = 0 \quad (40)$$

В результате для функций медленных переменных $V(x)$ и $T_o(x)$ получаем уравнение, в котором все члены, зависящие от быстрых переменных, заменяются их средними по периоду:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\langle A_{ik}(\xi, p) \frac{\partial(N_j + \zeta_{jk}E)}{\partial \xi_k} \rangle \frac{\partial V}{\partial x_j} + \langle A_{ik}(\xi, p) \left(\frac{\partial m}{\partial \xi_k} - \alpha_k \right) \rangle \right) + \langle F \rangle = 0, \quad (41)$$

$$\langle \rho(\xi) c(\xi) \rangle \frac{\partial T_o}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\langle k_{ik}(\xi, p) \frac{\partial(n_j + \zeta_{jk})}{\partial \xi_k} \rangle \frac{\partial T_o}{\partial x_j} \right) + \langle h \rangle. \quad (42)$$

Здесь m - среднее значение по объему ячейки (среднее по периоду):

$$\langle m(\zeta) \rangle = \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 m(\zeta) d\zeta.$$

Уравнения (41), (42) имеет вид уравнений термоупругости, определяемыми функциями быстрых переменных в параметрическом пространстве:

$$\hat{A}_{ij} = \langle A_{ik}(\xi, p) \frac{\partial(N_j + \zeta_{jk}E)}{\partial \xi_k} \rangle, \quad \hat{a}_j = \hat{A}_{ij}^{-1} \langle A_{ik}(\xi, p) \left(\frac{\partial m}{\partial \xi_k} - \alpha_k \right) \rangle, \quad (43)$$

$$\hat{k}_{ij} = \langle k_{ik}(\xi, p) \frac{\partial(n_j + \zeta_{jk})}{\partial \xi_k} \rangle, \quad \hat{C} = \langle \rho(\xi) c(\xi) \rangle. \quad (44)$$

Здесь \hat{A}_{ij} - эффективная матрица упругости структурно-неоднородного материала, \hat{a}_j - эффективный тензор теплового расширения, \hat{k}_{ij} - эффективный тензор теплопроводности, \hat{C} - эффективная теплоемкость структурно-неоднородного материала.

Уравнения (43), (44) вместе с (37) – (40) определяют численный алгоритм нахождения эффективных характеристик композитного материала.

Обладая гетерогенной структурой КМ имеют пористость уже при изготовлении. В процессе эксплуатации изделий, происходит увеличение пористости, что оказывает существенное влияние на упругие и прочностные свойства КМ. Разработка неразрушающих методов количественной оценки влияния пористости на упругие модули композиционных материалов имеют большое практическое значение.

Известно, что упругие свойства материала влияют на фазовые скорости распространения в нем акустических волн. Для оценки влияния пористости на локальный модуль Юнга изотропных композиционных материалов используем импульсный акустический метод [13].

Пористость P образца КМ – объемная концентрация газовых пор, осредненная по его объему, определяется по формуле:

$$P = (1 - \rho/\rho_o) \cdot 100\%, \quad (45)$$

где ρ - плотность образца, вычисляемая по известному объему образца и результатам его взвешивания; ρ_o - расчетная плотность твердой фазы образца, определяемая по известным плотностям матрицы ρ_m и наполнителя ρ_f и их объемными концентрациями n_m и n_f в этом образце:

$$\rho_o = n_m \rho_m + n_f \rho_f, \quad (46)$$

Согласно теории упругости, расчет модуля Юнга E_o изотропного композита без пор проводится по формуле:

$$E_o = \rho_o c^2 s ((3c_{Lo}^2 - 4c_s^2)/(c_{Lo}^2 - c_s^2)) \quad (47)$$

где ρ_o - определяется по формуле (2); c_{Lo} - теоретически рассчитанное значение фазовой скорости продольных акустических волн в композиционном материале без пор; c_s - измеренное значение фазовой скорости сдвиговых акустических волн в исследуемом образце.

Значения модуля Юнга исследуемых образцов вычисляются по формуле (47) с заменой ρ_o и c_{Lo} на измеренные значения плотности ρ и фазовой скорости продольных акустических волн c_L для каждого образца композиционного материала (рисунк 11-13).

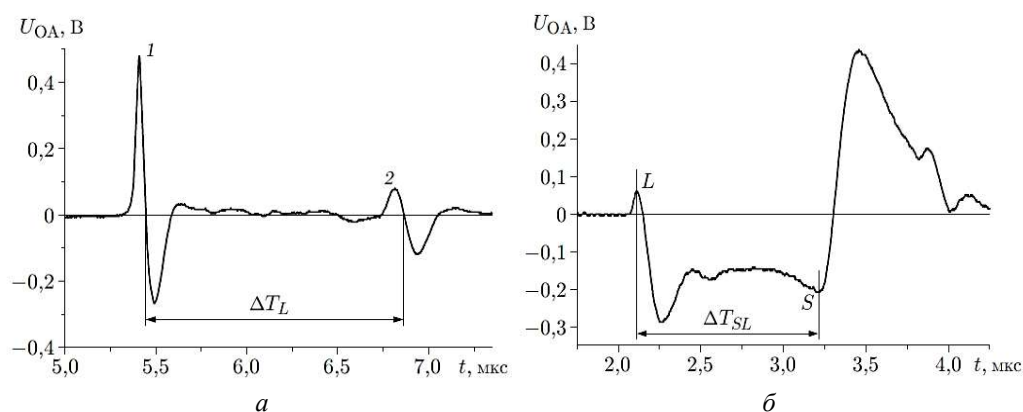


Рисунок 11 - а - форма импульса продольных акустических волн:
1-однократный проход через КМ; 2 – трехкратный проход через КМ;
б) - форма акустического сигнала: L- импульс продольных ультразвуковых волн,
S- импульс поперечных ультразвуковых волн

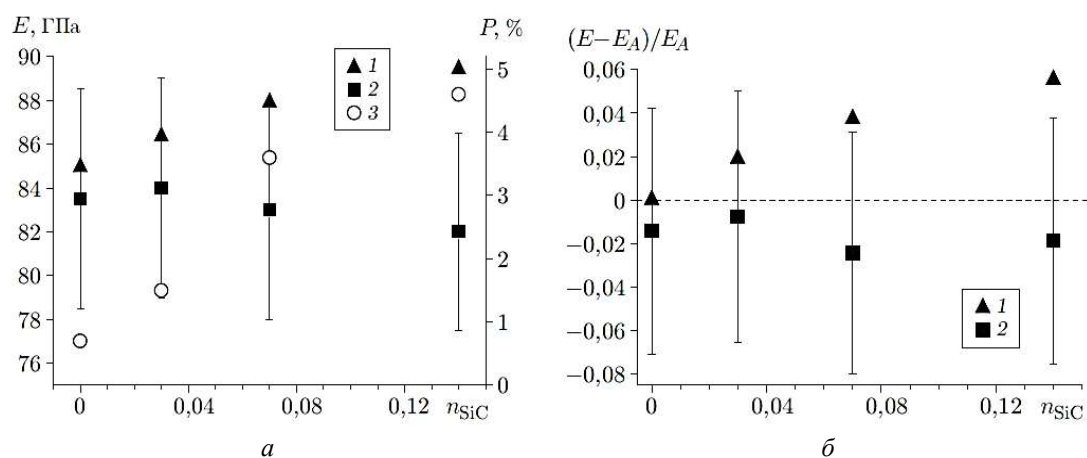


Рисунок 12 – а - значение модуля Юнга (1,2) и пористости (3) КМ на основе алюминия от концентрации наполнителя (SiC): 1-результаты расчета; 2-результаты измерений;
б - изменения модуля Юнга от объемной доли наполнителя

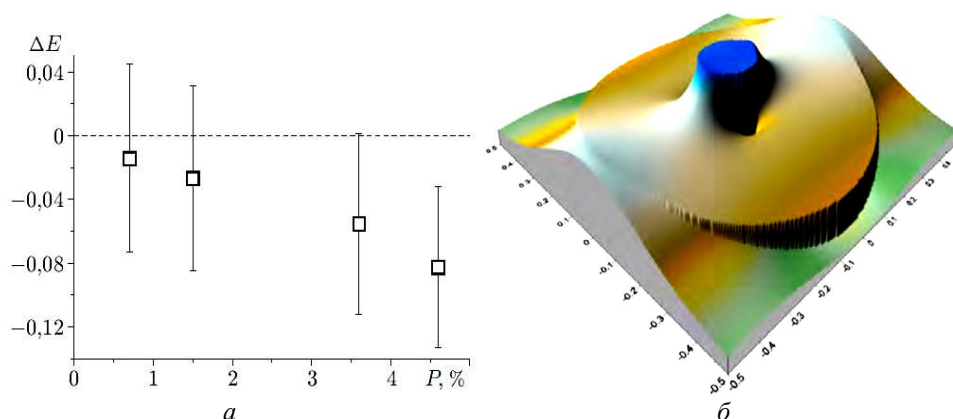


Рисунок 13 – а - зависимость изменения модуля Юнга КМ относительно его расчетного значение от пористости образца ($\Delta E = (E - E_0) / E_0$); б - распределение растягивающих напряжений в ячейке с включением при однородной средней деформации $\varepsilon_3 = 1$

Заключение

В статье рассмотрен ряд перспективных композиционных материалов с различными наполнителями. Используя модели Рейсса и Фойгта, а также принципы Неймана–Кюри, реализована задача деформации на границах и внутри ячейки композита. Представлена упрощенная математическая модель, граничные условия которой выполняют основные

уравнения теории упругости и решают задачу для функций быстрых переменных на ячейке периодичности первого порядка.

Приведенные результаты оценки влияния пористости композиционных материалов на фазовые скорости распространения в нем акустических волн корректны и позволяют прогнозировать их упругие модули, что имеет важное значение при разработке неразрушающих методов контроля свойств композиционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панков В. П. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Технологические процессы производства и ремонта летательных аппаратов и авиационных двигателей / В.П. Панков, А.Л. Бабаян, В.И. Табырца, А.А. Швецов – Краснодар, 2020. – 532с.
2. Панков В. П. Материаловедение и технологические процессы в сервисе. / В. П. Панков, В. Е. Жидков. – Ставрополь: ООО «Мысль», 2012. – 337 с.
3. Панков В. П. Совершенствование химико-физических свойств углеродных волокон и тканей за счет модифицирования их поверхности плазмой: монография / В.П. Панков, А.В. Баженов, Д.В. Панков – Москва: АО «Красная звезда», 2022.- 244с.
4. Урванов С. А. Модифицирование углеродного волокна углеродными наноструктурами: дис. на соиск. ... канд. хим. наук. Троицк; Москва, 2016. –155 с.
5. Смовж Д. В. Влияние фазового состояния катализатора и электрических полей на синтез углеродных волокон и нанотрубок: дис. на соиск. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2008. –107 с.
6. Губанов А. А. Разработка процесса электрохимической модификации поверхности углеродного волокна с целью увеличения прочности углепластиков: дис. на соиск. ... канд. техн. наук. – Москва, 2015. – 152 с.
7. Панков В.П. Исследование электропроводности плазменных покрытий на углеродном волокне / В.П. Панков, А.В. Баженов, Д.В. Панков, И.П. Шепеть // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – № 2 (146). – С. 92–96.
8. Панков В.П. Исследование электромагнитной проницаемости плазменных покрытий на углеродном волокне / В.П. Панков, А.В. Баженов, Д.В. Панков, И.П. Шепеть // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – № 4 (148). – С. 174–179.
9. Патент 2511146 РФ. Способ нанесения теплозащитного электропроводящего покрытия на углеродные волокна и ткани / Панков В.П., Панков Д.В., Жидков В.Е. [и др.] Оpubл. 10.04.2014.
10. Жидков В.Е. Материалы для оборудования пищевых производств / В.Е. Жидков, В.П. Панков, В.А. Соловьев // НаукаПарк. – 2014. – № 2/2(22). – С. 38–42.
11. Панков В.П. Исследование свойств углеродных волокон, модифицированных плазмой/ В.П. Панков, А.В. Баженов, А.А. Швецов, Д.В. Панков: в сборнике: XIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвященной 62-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос. Сборник научных статей конференции. – Краснодар, 2023. – С. 70–83.
12. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Параметрический метод асимптотического усреднения для нелинейных уравнений термоупругости // Механика композиционных материалов и конструкций. 2014. № 4. С. 491-507.
13. Карабутов А.А. Измерение зависимости локального модуля Юнга от пористости изотропных композиционных материалов импульсным акустическим методом с использованием лазерного источника ультразвука/ А.А. Карабутов, Н.Б. Подымова, Е.Б.Черепецкая //Прикладная механика и техническая физика.- 2013.-Т.54, №3.-С.181-190.

Ковалев Вячеслав Данилович

Доктор технических наук, профессор
Начальник отдела АО «Электроавтоматика»
355016, г. Ставрополь, ул. Заводская, 9
Тел. 8(918)751-26-72
E-mail: kwd50@mail.ru

Радченко Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.Тургенева», г. Орел
Доктор технических наук, профессор,
И.о. проректора по научно-технологической
деятельности и аттестации научных кадров
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. +7(4862) 47–50–71
E-mail: radsu@rambler.ru

Куликов Максим Валерьевич

Кандидат технических наук, доцент
Доцент Краснодарского ВВАУЛ
350053, г. Краснодар, ул. Троицкая, д. 84/2, кв. 7.
Тел. 8 (918) 130-01-41
E-mail: mvkulikov@list.ru

Панков Владимир Петрович

Кандидат технических наук, доцент
Профессор Краснодарского ВВАУЛ
350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, 135
Тел. 8 (918) 861-09-36
E-mail: pankovvp61@list.ru

Степанова Марина Валерьевна

Старший преподаватель кафедры
общеобразовательных дисциплин
Краснодарского ВВАУЛ
350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, 135
Тел. 8(900)266-98-15
E-mail: mvvs4967@mail.ru

KOVALEV V.D., PANKOV V.P., RADCHENKO S.Y., STEPANOVA M.V., KULIKOV M.V.

RESEARCH OF DIRECTIONS OF IMPROVEMENT OF COMPOSITE MATERIALS AND FORECASTING THEIR PROPERTIES

Abstract. *The compositions and properties of a number of composites, methods for predicting their properties using simplified models and boundary conditions allowing to neglect shear deformation are investigated. The effect of porosity on the elastic modules of composite materials is estimated.*

Keywords: *carbon fiber, composite material, matrix, filler, catalyst, structure, properties, composite.*

BIBLIOGRAPHY

1. Pankov V. P. Materials science and technology of structural materials. Technological processes of production and repair of aircraft and aircraft engines / V.P. Pankov, A.L. Babayan, V.I. Tabyrtsa, A.A. Shvetsov – Krasnodar, 2020. – 532p.
2. Pankov V. P. Materials science and technological processes in the service. / V. P. Pankov, V. E. Zhidkov. Stavropol: LLC "Mysl", 2012. 337 p.
3. Pankov V. P. Improvement of chemical and physical properties of carbon fibers and fabrics by modifying their surface with plasma: monograph / V.P. Pankov, A.V. Bazhenov, D.V. Pankov – Moscow: Krasnaya Zvezda JSC, 2022.- 244c.
4. Urvanov S. A. Modification of carbon fiber by carbon nanostructures : dis. for the job.... Candidate of Chemical Sciences. Troitsk; Moscow, 2016. 155 p.
5. Smovzh D. V. The influence of the phase state of the catalyst and electric fields on the synthesis of carbon fibers and nanotubes : dis. for the job.... Candidate of Physical and Mathematical Sciences. – Novosibirsk, 2008. -107 p.
6. Gubanov A. A. Development of the process of electrochemical modification of the carbon fiber surface in order to increase the strength of carbon fiber plastics: dis. for the job.... Candidate of Technical Sciences. – Moscow, 2015. 152 p.
7. Pankov V.P. Investigation of electrical conductivity of plasma coatings on carbon fiber / V.P. Pankov, A.V. Bazhenov, D.V. Pankov, I.P. Shepet // Hardening technologies and coatings. – 2017. – № 2 (146). – Pp. 92-96.
8. Pankov V.P. Investigation of electromagnetic permeability of plasma coatings on carbon fiber / V.P. Pankov, A.V. Bazhenov, D.V. Pankov, I.P. Shepet // Hardening technologies and coatings. – 2017. – № 4 (148). – Pp. 174-179.
9. Patent 2511146 of the Russian Federation. Method of applying a heat-protective electrically conductive coating to carbon fibers and fabrics / Pankov V.P., Pankov D.V., Zhidkov V.E. [et al.] Publ. 04/10/2014.
10. Zhidkov V.E. Materials for food production equipment / V.E. Zhidkov, V.P. Pankov, V.A. Soloviev // NaukaPark. – 2014. – № 2/2(22). – Pp. 38-42.
11. Pankov V.P. Investigation of the properties of carbon fibers modified by plasma/ V.P. Pankov, A.V. Bazhenov, A.A. Shvetsov, D.V. Pankov: in the collection: XIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, dedicated to
12. Vlasov A.N., Volkov-Bogorodsky D.B. Parametric method of asymptotic averaging for nonlinear thermoelasticity equations // Mechanics of composite materials and structures. 2014. No. 4. pp. 491-507.
13. Karabutov A.A. Measurement of the dependence of the local Youngs modulus on the porosity of isotropic composite materials by the pulsed acoustic method using a laser ultrasound source/ A.A. Karabutov, N.B. Podymova, E.B.Cherepetskaya //Applied mechanics and technical physics.-2013.-Vol.54, No. 3.-pp.181-190.

Kovalev Vyacheslav Danilovich

Doctor of Technical Sciences. Professor
Head of Department of JSC "Electroavtomatika"
355016, Stavropol, Zavodskaya Str., 9
Tel. 8(918)751-26-72
E-mail kwd50@mail.ru

Pankov Vladimir Petrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Professor of Krasnodar VVAUL
350090, Krasnodar, Dzerzhinskogo str.. 135
Tel. 8(918)861-09-36
E-mail: pankowp61@list.ru

Radchenko Sergey Yuryevich

«Orel State University named after
I.S. Turgenev», Orel
Ph.D., professor, vice-rector for scientific and
technological activities and certification of scientific
personnel
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7(4862)47-50-71
E-mail: radsu@rambler.ru

Stepanova Marina Valeryevna

Senior teacher of Krasnodar VVAUL
350090, Krasnodar, Dzerzhinskogo str. 135
Tel. 8(918)861-09-36
E-mail: mvs4967@mail.ru

Kulikov Maksim Valerievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of Krasnodar VVAUL
350053, Krasnodar, Troitskaya str., 84/2-7
Тел. 8 (918) 130-01-41
E-mail: mvkulikov@list.ru

ГОЛЕНКОВ В.А., РАДЧЕНКО С.Ю., ДОРОХОВ Д.О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА НА ГЛУБИНУ ВЫДАВЛИВАНИЯ ПО ЭРИКСЕНУ ДЛЯ ЛЕНТ ИЗ БРОНЗЫ МАРКИ БрБ2

Аннотация. Рассмотрено влияние содержания никеля и кобальта на глубину выдавливания по Эриксену для лент бериллиевых бронз марки БрБ2 различной толщины. Показано, что содержание никеля и кобальта следует учитывать совместно для назначения технологических параметров для дальнейшей обработки лент сплава БрБ2.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, бериллиевые бронзы, испытание на выдавливание по Эриксену, никель, кобальт, коэффициент линейной корреляции Пирсона.

Введение.

Наибольшее применение в Российской Федерации получил сплав бериллиевой бронзы марки БрБ2, применяемый в основном в виде лент [1-4]. Химический состав сплава БрБ2 регламентируется ГОСТ 18175-78 «Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением», где в основной таблице его наименование по стандарту СЭВ 377-76 указано, как CuBe_2Ni (Co), что повторяется и в приложении: «Характерные свойства и примерное назначение безоловянных бронз, обрабатываемых давлением». Однако, в таблице указано только содержание никеля как легирующего элемента в диапазоне 0,2-0,5, на что обращает внимание работа [5]. С другой стороны, экономическая целесообразность производства бериллиевых бронз говорит о возможности их выплавки в том числе из отходов, в которых одновременно или по отдельности могут присутствовать никель и кобальт. Целесообразно вводить в расплав не чистые металлы: никель марок Н0-Н4 ГОСТ 849-2018, медь М006-М3 ГОСТ 859-2014, а шихтоваться отходами от производства двойных мельхиоров, лент сплава БрК1. Такой подход, наряду с лигатурой Cu-Be, позволяет отказаться до 50% от чистой меди при производстве сплава; при этом сложно прогнозировать содержание никеля и кобальта по отдельности. Так же потребитель всегда больше внимание уделит механическим свойствам, чем их интерпретации при анализе ГОСТ на химический состав, поэтому вопрос содержания никеля и кобальта в сумме от 0,2 до 0,5% в материале актуален, в первую очередь в плане его влияния на механические свойства конечного продукта – ленты. А во-вторую, с экономической точки зрения, так как вклад в себестоимость исходных материалов для плавления значителен.

Постановка задачи.

При анализе источников [2, 4] можно сделать вывод о сходном влиянии по отдельности и совместно Ni и Co на структуру и возможность дисперсионного старения сплава для достижения наилучших показаний по твёрдости и временному сопротивлению разрыву. Однако, результаты исследования по важному технологическому параметру – глубины выдавливания по Эриксену, при различных содержаниях никеля, кобальта и их суммы, не приведены. В то же время параметр глубины выдавливания для лент в состоянии поставки наиболее необходим для практического использования лент при листовой штамповке. Согласно ГОСТ 1789-2003, глубина выдавливания по Эриксену (при радиусе пуансона 10 мм) для полос и лент регламентируется только для толщины 0,10–0,25 мм и должна быть не менее 8 мм для мягкой ленты и не менее 3 мм для твердой. Ненормирование в более толстых размерах связано с перегруженностью ГОСТ 1789-2003 по требованиям к продукции и трудностью испытаний на глубину вдавливания для толщин более 0,25 мм, так как наиболее доступны только ручные машины для испытания по Эриксену. Однако, знание данного параметра важно для конструкторов новых приборов и технологов листовой штамповки.

С другой стороны, заказчики ленты подходят к приемке ленты формально, в плане интерпретации ГОСТ 18175-78 «Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением», и считают содержание кобальта как примесь, относящуюся к сумме всех неучтённых в ГОСТ

элементов, полностью игнорируя информацию в [2-5] и тот факт, что при этом продукция полностью соответствует ГОСТ 1789-2003. Поэтому рассмотрение влияния содержания никеля и кобальта на глубину выдавливания по Эриксену для лент бериллиевых бронз марки БрБ2 различной толщины является актуальной задачей, позволяющей разрешить возможные противоречия в плане оценки качества и пригодности для производства прокатной продукции.

Технология.

Для исследования было получено 46 лент в различных толщинах, из них 26 лент имеют состояние поставки – мягкое, остальные твердое, технология изготовления описана в [1]. Так как вопрос заключается в определении влияния элементов на конечные свойства готовой продукции, то химический состав определялся не только от слитков, но и в готовых изделиях. Для большей точности использовали два прибора для определения состава см. рисунок 1, 2 и комплекты стандартных образцов: IARM Cu172-18 Copper Alloy/CDA/ UNS C17200 производства Analytical Reference Materials International, 276 Abby Road, Manchester; BS 172Be-2 Certified Reference Material for Beryllium Copper Alloy – UNS Number C17200 производства Brammer Standart Company, 14603 Benfer Road, Houston; СОП 3811-2÷3816-92 и стандартные образцы состава бронзы безоловянной типа БрБ2, БрБНТ1,9 (комплект А381) (М18) производства ЗАО «Мценскпрокат».



Рисунок 1 - Оптико-эмиссионный спектрометр для анализа металлов ДФС-500 производства ООО «ОКБ Спектр»



Рисунок 2 - Спектрометр эмиссионный МСА модификации МСАП V5 производства ООО «Спектральная лаборатория»

Ленты изготавливались по принятой технологии: слитки шихтовались согласно требованию по суммарному содержанию Ni +Co в интервале от 0,2-0,4%, при стремлении держаться внизу приведенного интервала, что не всегда удается, так как доля вовлекаемых отходов в виде промежуточной плавки (сплавление отходов прокатного производства марки БрБ2, двойных мельхиоров и сплава БрК1) была равна 50%, а в чистых материалах Ni и Co не было. Указанный подход экономически целесообразен, так как позволяет сберечь катодную медь до 50% от массы заказа при его выполнении.

Готовые размеры для всех толщин в твердом состоянии получали путем деформирования после закалки на 40% по расчету относительных деформаций на четырехвалковом реверсивном стане Ø80/Ø350x350 фирмы Wuxi Xinbao Heavy Industry Technology Co., Ltd (рисунок3), а для мягкого состояния проводили финальную термообработку при одинаковых режимах вне зависимости от конечного размера. Далее ленты испытывались согласно требования ГОСТ 1789-2003 на оборудовании, представленном на

рисунке 4-6. Все 46 образцов соответствовали требованиям нормативной документации, в том числе и после дисперсионного твердения (старения) [1-4].



Рисунок 3 - Стан четырехвалковый реверсивный холодной прокатки Ø80/Ø350x350 фирмы Wuxi Xinbao Heavy Industry Technology Co., Ltd.



Рисунок 4 - Машина для испытания на глубину выдавливания фирмы Erichsen.



Рисунок 5 - Машина испытательная универсальная РЭМ-50-А-1-1 фирмы Метротест



Рисунок 6 - Микротвердомер PMT-3М фирмы "Восток-7"

Исследование.

В первом приближении предположим линейную связь между содержанием основных химических элементов в бронзе марки БрБ2 и глубиной выдавливания по Эриксену, проведём математическую обработку результатов измерений, см. таблицу 1 и 2:

Таблица 1 - Химический состав исследуемых лент в твердом состоянии и значение глубины выдавливания по Эриксену по соответствующим плавкам и толщинам с рассчитанным коэффициентом линейной корреляции.

№ плавки	Толщина ленты, мм	Содержание исследуемых элементов, %				Глубина выдавливания по Эриксену, мм	Коэффициент линейной корреляции Пирсона (1) по элементам
		Ni	Be	Co	Ni+Co		
1	0,10	0,15	1,84	0,06	0,21	4,05	0,466 - Ni 0,669 - Co 0,581 - Ni+Co 0,413 - Be
2		0,15	1,98	0,07	0,22	3,59	
3		0,28	2,02	0,09	0,37	4,20	
4		0,26	2,02	0,13	0,38	4,14	
5		0,24	2,08	0,14	0,38	4,55	
6		0,29	2,02	0,11	0,40	3,95	
7	0,20	0,16	1,88	0,08	0,23	4,55	-0,739 - Ni -0,329 - Co -0,624 - Ni+Co -0,247 - Be
8		0,14	1,90	0,09	0,23	4,78	
9		0,16	1,94	0,10	0,26	4,95	
10		0,27	1,98	0,12	0,39	4,40	
11	0,30	0,15	1,91	0,08	0,23	4,80	0,671 - Ni 0,413 - Co 0,717 - Ni+Co -0,580 - Be
12		0,14	1,93	0,09	0,23	5,04	
13		0,17	1,97	0,10	0,27	4,65	
14		0,20	1,82	0,11	0,31	6,73	
15		0,24	1,80	0,08	0,32	6,09	
16		0,27	2,00	0,10	0,37	5,95	
17	0,50	0,13	1,89	0,08	0,21	5,40	-0,615 - Ni 0,659 - Co 0,657 - Ni+Co -0,491 - Be
18		0,13	1,85	0,09	0,22	5,69	
19		0,12	1,86	0,11	0,23	5,80	
20		0,12	1,91	0,12	0,24	5,65	
Корреляция по формуле (1)		-0,204	-0,588	-0,131	0,111	границы критической области $z(\alpha = 0,05) = 0,475$ $z(\alpha = 0,01) = 0,625$	
Корреляция по формуле (2)		-0,210	-0,599	-0,135	0,114		
Преобразование Фишера (3)		-0,213	-0,692	-0,136	0,115		

Будем использовать коэффициент линейной корреляции Пирсона для оценки тесноты (силы) связи между двумя переменными [6]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$; n - объем выборки.

Таблица 2. Химический состав исследуемых лент в мягком состоянии и значение глубины выдавливания по Эриксену по соответствующим плавкам и толщинам с рассчитанным коэффициентом линейной корреляции.

№ плавки	Толщина полосы, мм	Содержание исследуемых элементов, %				Глубина выдавливания по Эриксену, мм	Коэффициент линейной корреляции Пирсона (1) по элементам
		Ni	Be	Co	Ni+Co		
1	0,10	0,14	1,96	0,07	0,21	8,93	0,692 - Ni 0,361 - Co 0,802 - Ni+Co -0,392 - Be
2		0,17	1,98	0,09	0,26	8,94	
3		0,15	1,99	0,11	0,26	9,70	
4		0,29	1,93	0,08	0,37	9,95	
5	0,15	0,15	1,89	0,07	0,22	9,78	0,811 - Ni 0,101 - Co 0,861 - Ni+Co 0,575 - Be
6		0,15	1,88	0,08	0,23	9,88	
7		0,25	1,91	0,07	0,32	9,95	
8	0,20	0,14	1,87	0,08	0,22	10,55	-0,237 - Ni -0,298 - Co -0,443- Ni+Co -0,687- Be
9		0,16	1,91	0,09	0,25	10,38	
10		0,13	1,98	0,13	0,26	10,05	
11		0,20	1,82	0,09	0,29	10,73	
12		0,24	1,89	0,08	0,32	9,88	
13	0,30	0,14	1,86	0,07	0,21	10,56	-0,722 - Ni -0,236 - Co -0,441- Ni+Co -0,302- Be
14		0,15	1,90	0,09	0,24	10,43	
15		0,14	1,89	0,10	0,24	10,60	
16		0,14	1,87	0,11	0,25	10,47	
17	0,50	0,13	1,87	0,09	0,22	10,53	-0,451 - Ni -0,894 - Co -0,837- Ni+Co -0,718 - Be
18		0,14	1,89	0,11	0,25	10,56	
19		0,14	1,90	0,14	0,28	10,08	
20	0,80	0,14	1,87	0,08	0,22	11,17	-0,202 - Ni -0,534 - Co -0,859- Ni+Co -0,437 - Be
21		0,15	1,88	0,09	0,24	10,70	
22		0,13	1,94	0,12	0,25	10,80	
23	1,00	0,15	1,94	0,09	0,24	11,20	0,301 - Ni -0,081 - Co -0,014- Ni+Co 0,202 - Be
24		0,14	1,85	0,12	0,26	11,03	
25		0,14	1,88	0,13	0,27	10,77	
26		0,14	1,87	0,14	0,28	11,35	
Корреляция по формуле (1)		-0,282	-0,591	-0,352	-0,097	границы критической области $z(\alpha = 0,05) = 0,409$ $z(\alpha = 0,01) = 0,537$	
Корреляция по формуле (2)		-0,288	-0,600	-0,358	-0,099		
Преобразование Фишера (3)		-0,296	-0,693	-0,375	-0,100		

В таблицах приведен расчет для каждого элемента по отдельности для каждой толщины полосы, однако наибольший интерес представляет (в том числе и по точности выводов, так как объем выборки больше) анализ всех плавок вне зависимости от толщины. Представленный подход допустим, так как:

1. Ленты изготовлены по одной технологии – идентичные режимы термообработки и одна и та же величина относительных деформаций при получении готовых размеров;
2. Требуется значительно меньше экспериментальных плавок и работ;
3. Предоставленный диапазон толщин от 0,1мм до 1,0мм отвечает потребностям рынка в лентах марки БрБ2.

Продолжим анализ по элементам вне зависимости от толщины полосы, см. таблицу 1 и 2. При малом объеме выборки значение коэффициента линейной корреляции Пирсона необходимо корректировать по формуле [6]:

$$r^* = r \cdot \left[1 + \frac{1-r^2}{2 \cdot (n-3)} \right] \quad (2)$$

Для проверки гипотезы об отсутствии корреляции между исследуемыми величинами используем преобразование Фишера:

$$u = \frac{1}{2} \ln \frac{1-r^*}{1+r^*}, \quad (3)$$

и определим критические значения:

$$u_{\alpha}(n) = z_{1-\alpha/2} \frac{1}{\sqrt{n-3}}, \quad (4)$$

где $z_{1-\alpha/2}$ – квантили нормированного распределения: $z_{1-\alpha/2} = 1,960$ для $\alpha = 0,05$ и $z_{1-\alpha/2} = 2,576$ для $\alpha = 0,01$.

Если значение $|u| \leq u_{\alpha}(n)$, то корреляционной связи между рассматриваемыми величинами нет, в противном случае связь значима.

Предположение о связи между химическим составом по элементам или по их сумме (Ni+Co) по более сложным зависимостям легко проверяется графическим построением и стандартными средствами анализа, включённым в табличные редакторы и элементарно отвергается.

Заключение.

Из анализа данных в таблице 1 и 2 по формулам (1) – (4) очевидно отсутствие связи между содержанием Ni, Co, Ni+Co и глубиной выдавливания по Эриксену, при этом на лицо связь между основным легирующим элементом Be и показателем пластичности. Также отмечено, что совместное содержание никеля и кобальта в меньшей степени влияет на результат выдавливания по Эриксену, чем каждый компонент по отдельности. Анализ данных в таблице 1, 2 и работ [2, 4] позволяет однозначно говорить о схожести влияния кобальта и никеля. Следовательно, для целей проектирования новых изделий, разработки технологий листовой штамповки, уменьшения себестоимости изготовления наиболее рационально учитывать при анализе качества суммарное содержание Ni и Co в сплаве.

В работе рассмотрено влияние содержания никеля и кобальта на глубину выдавливания по Эриксену для лент бериллиевых бронз марки БрБ2 различной толщины на примере 46 плавок. Показано, что Ni, Co, Ni+Co не оказывают существенного влияния на глубины выдавливания по Эриксену. В связи с этим может быть принята рекомендация по учету совместного содержания никеля и кобальта для назначения технологических параметров для дальнейшей обработки лент сплава БрБ2 и интерпретации ГОСТ 18175-78 в плане учета совместного процентного содержания Ni и Co.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование вакуумного старения тонких лент из бериллиевой бронзы [Текст] / Голенков В.А., Радченко С.Ю., Д.О. Дорохов // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, № 6(368). — 2024г.
2. Пастухова Ж. П. Пружинные сплавы цветных металлов / Ж. П. Пастухова, А. Г. Рахштадт. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Металлургия, 1984. - 363 с.
3. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки [Текст]: справочник/ О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. - 336 с.
4. Зисельман В. Л. Исследование и усовершенствование технологии производства лент из бериллиевой бронзы, обеспечивающей улучшение качества проката: диссертация кандидата технических наук : 05.16.05. - Москва, 2006. - 118 с. : ил.

5. Филатов, А. А. Опираясь на опыт Китая. Простой шаг по совершенствованию бронзы БрБ2 / А. А. Филатов // Стандарты и качество. – 2024. – № 2. – С. 90.

6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816с.

Радченко Сергей Юрьевич
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.
Тургенева», г. Орел
д.т.н., профессор, и.о.
проректора по научно–
технологической
деятельности и аттестации
научных кадров
302020, г. Орел, Наугорское
шоссе, 29
Тел. +7(4862)47–50–71
E-mail: radsu@rambler.ru

Голенков Вячеслав Александрович
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.
Тургенева», г. Орел
Доктор технических наук,
профессор,
руководитель научной школы
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. +7(4862)43–26–06
E-mail: president@ostu.ru

Дорохов Даниил Олегович
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.
Тургенева», г. Орел
Доктор технических наук,
доцент, профессор кафедры
машиностроения
302020, г. Орел, Наугорское
шоссе, 29
Тел. +79102084402
E-mail: ddostu@mail.ru

GOLENKOV V.A., RADCHENKO S.Y., DOROKHOV D.O.

STUDY OF THE INFLUENCE OF NICKEL AND COBALT CONTENT ON THE EXTRUSION DEPTH ACCORDING TO ERIKEN FOR BRONZE STRIPS OF BRB2 GRADE

Abstract. *The effect of nickel and cobalt content on the Eriksen extrusion depth for beryllium bronzes of the BrB2 brand of various thicknesses is considered. It is shown that the nickel and cobalt content should be taken into account together to assign technological parameters for further processing of the BrB2 alloy tapes.*

Keywords: *metal pressure treatment, beryllium bronzes, Ericksen extrusion test, nickel, cobalt, Pearson linear correlation coefficient.*

BIBLIOGRAPHY

1. Golenkov V.A., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O. Investigation of vacuum aging of thin beryllium bronze tapes // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – The eagle: I.S. Turgenev OSU, No. 6(368). -- 2024.

2. Pastukhova J. P. Spring alloys of non-ferrous metals / J. P. Pastukhova, A. G. Rakhshadt. - 2nd ed., revised. and add. Moscow: Metallurgiya Publ., 1984. 363 p.

3. Osintsev, O.E. Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands [Text]: handbook/ O.E. Osintsev, V.N. Fedorov. – M.: Mashinostroenie, 2004. - 336 p.

4. Ziselman V. L. Research and improvement of beryllium bronze ribbon production technology, which improves the quality of rolled products: dissertation of Candidate of Technical Sciences : 05.16.05. Moscow, 2006. 118 p. : ill.

5. Filatov, A. A. Based on the experience of China. A simple step to improve the BrB2 bronze / A. A. Filatov // Standards and quality. – 2024. – No. 2. – p. 90.

6. Kobzar A.I. Applied mathematical statistics. For engineers and researchers. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2006– 816s.

Radchenko Sergey Yuryevich
«Orel State University named after
I.S. Turgenev», Orel
Ph.D., professor, vice-rector for
scientific and technological activities
and certification of scientific
personnel
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7(4862)47–50–71
E-mail: radsu@rambler.ru

Golenkov Vyacheslav Aleksandrovich
«Orel State University named after I.S.
Turgenev», Orel
Ph.D., professor, head of scientific
school
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7(4862)43–26–06
E-mail: president@ostu.ru

Dorokhov Daniil Olegovich
«Orel State University named
after I.S. Turgenev», Orel
Ph.D., assistant professor,
professor, department of
mechanical engineering
302020, Orel, Naugorskoe
Shosse, 29
Ph.: +79102084402
E-mail: ddostu@mail.ru

© Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., 2025

ГАВРИШ В.М., РОЩУПКИН С.И., ШАГОВА Ю.О., ЧАЙКА Т.В.

К ВОПРОСУ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСУЛЬФИДА ВОЛЬФРАМА ИЗ СМЕСИ НАНОРАЗМЕРНОГО ПОРОШКА КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Аннотация. Авторами описана перспективная технология без вакуумного электродугового синтеза наночастиц сульфида вольфрама. Проведен анализ и сравнение существующих технологий получения нанокристаллических сульфидов металлов с предложенным авторами методом, в результате чего выявлен ряд преимуществ, в том числе и экономических. В работе проанализировано ряд научных исследований о положительном влиянии наночастиц дисульфида вольфрама на механические характеристики материалов и их возможное применение. Проведена оценка морфологии и состава спекаемых частиц и проверены трибологические параметры полусинтетического моторного масла 5W-40 (Лукойл) с добавкой полученного спеченного дисульфида вольфрама. Полученные данные позволяют говорить о высоком потенциале к снижению трения в металлических парах при высокой нагрузке. В результате добавление 1 % масс. WS_2 в состав масла привело к уменьшению прироста момента трения вдвое.

Ключевые слова: дисульфид вольфрама, карбид, синтез, трибологические свойства.

Введение

Сульфиды вольфрама и молибдена относятся к катализаторам окислительно-восстановительного типа, изначально они применялись в гидроочистке нефтяных фракций. Однако со временем были обнаружены и другие полезные свойства этих соединений. Например, в составе смазочных композиций данные материалы способны существенно улучшать трибологические свойства [1]. Так же возможно применение сульфида вольфрама и молибдена в качестве сухой смазки.

На сегодняшний день особое внимание уделяется влиянию наночастиц дисульфида вольфрама на механические характеристики композитов.

В исследовании [2] изучаются трибологические характеристики и коррозионная стойкость композитов из алюминиевого сплава 6063, усиленных сочетанием частиц карбида кремния и дисульфида вольфрама. В своей работе авторы пришли к выводу, что включение SiC и WS_2 в качестве армирующих элементов в алюминиевую (6063) матрицу значительно улучшает трибологические характеристики композитов.

Целью исследования [3] было получение представления о трибологических характеристиках смазочной плёнки из дисульфида вольфрама, полученной методом атомно-слоевого осаждения с использованием гексакарбонила вольфрама и сероводорода в качестве прекурсоров. Результаты испытаний на трение показывают, что во влажном воздухе из-за остаточных атомов углерода в плёнке WS_2 плёнка WS_2 не изнашивается.

Многие работы ученых посвящены изучению способов получения этих материалов в виде наночастиц различной конфигурации. Разработки в этом направлении могут позволить расширить спектр применения сульфидов вольфрама и молибдена, как с позиций увеличения площади катализаторов, так и улучшения смазочных свойств.

В настоящее время основным методом получения нанокристаллических сульфидов металлов является гидротермальный метод с продолжительным термостатированием и последующей многостадийной обработкой продуктов реакции [4]. Наночастицы сульфидов металлов также могут быть синтезированы химическим осаждением из газовой фазы [5], сульфидированием оксидов [6], механохимическим методом из исходных веществ [7] и СВС технология [1,8].

Отдельным неразрешенным вопросом остается возможность получения наноразмерных частиц сульфида вольфрама по масштабируемой технологии. В данной работе приведены исследования по возможному получению наноразмерного дисульфида вольфрама с использованием электродугового синтеза. Показана и изучена морфология синтезируемых частиц дисульфида вольфрама, а также проведен эксперимент, целью которого было подтвердить качественные характеристики синтезируемых частиц, в роли присадок для улучшения трибологических свойств смазочных составов.

Краткий обзор технологий синтеза дисульфида вольфрама.

Представленные ниже технологии подразумевают возможность получения наноразмерных кристаллических структур на основе сульфидов металлов, в частности вольфрама.

СВС технология (самораспространяющийся высокотемпературный синтез). В основе схемы лежит образец из прессованной смеси нанопорошка металлов (W, Mo) и элементарной серы, вдоль которого сверху вниз распространяется фронт горения. После инициирования

горения, тепло, передающееся при горении от вышележащих слоев образца, нагревает нижележащие, до температуры плавления серы. Дальнейший нагрев приводит к фазовому переходу $S_{ж}$ (сера в жидкой фазе) $\rightarrow S_{г}$ (сера в газообразной фазе). Возбужденные атомы серы взаимодействуют с поверхностными атомами металла с образованием слоя сульфида и выделением тепла. При наличии оксидного слоя на поверхности наночастицы идет образование оксида серы и сульфида металла. Тепло, выделяющееся при протекании реакции, обеспечивает дальнейшее повышение температуры реагентов, а с учетом того, что диффузия серы вглубь частицы металла не осложнена ввиду малой толщины сульфидного слоя, далее происходит, разогрев до максимальной температуры, который сопровождается видимым фронтом горения. Относительная высота этого фронта мала ввиду быстрого роста барьерного сульфидного слоя и торможения реакции. За фронтом горения скорость взаимодействия реагентов значительно снижается и лимитируется диффузией серы через слой продукта, за счет этого температура в этой зоне меньше максимальной. Таким образом, происходит дореагирование исходных веществ, достройка и образование кристаллической структуры дисульфидов. Ввиду большой скорости распространения фронта горения и быстрому снижению температуры после его прохождения вниз по образцу рост частиц дисульфидов ограничивается размером наночастицы металла [1].

ХОГВ – химическое осаждение из газовой фазы (CVD технология) [5]. В данной работе авторы получили однослойный сульфид вольфрама на сапфировой подложке. Эксперимент проводился в трубчатой печи. В первой зоне находилась кварцевая емкость с серой, во второй зоне – с оксидом вольфрама, дальше по ходу печи располагалась пустая емкость, накрытая сапфировой подложкой, так же сапфировой подложкой была накрыта и емкость с оксидом вольфрама. Кварцевая емкость с серой сначала поддерживалась при комнатной температуре в течение 35 мин, а затем ее повышали до 120 °C за 10 мин. Тем временем, через 5 мин, емкость с оксидом вольфрама нагревали до 200 °C и выдерживали в течение 10 мин, затем ее повысили до 900 °C за 30 мин. И выдерживали на протяжении 10 мин перед остыванием. В печи поддерживался ток газа-носителя Ar/H_2 . По итогу авторы получили монослойный кристаллический сульфид вольфрама.

Сульфидирование оксидов [6]. В описании экспериментальной части работы говорится о том, что оксид вольфрама наносили на кварцевую подложку и помещали в трубчатую печь, после, нагревали до 950 °C, и вводили сероводород со скоростью потока 100 см³мин⁻¹, на протяжении 40 мин. В результате авторы получили пучки нанотрубок диаметром 25 нм.

Механометрический метод [7] подразумевает предварительную механическую активацию смеси серы и оксида вольфрама в соотношении 1:2. Авторы работы помещали изготовленную смесь в шаровую мельницу в среде аргона и выдерживали 24 часа при 400 об/мин. Затем уже готовую смесь перемещали в трубчатую печь и подвергали термообработке в диапазоне температур 500 – 840 °C. На выходе авторы получили нанопластины сульфида вольфрама с толщиной порядка 10 нм.

Производительность вышеперечисленных методов не позволяет массово получать дисульфид вольфрама, также недостатками методов является большое количество энергозатратных операций и необходимость использования различного газового оборудования и инертных сред, что обуславливает высокую стоимость конечного продукта.

Таким образом, в настоящее время существует потребность в разработке технологии производства нано размерных частиц сульфида вольфрама с низкой себестоимостью производства и повышенной производительностью.

Перспективным методом производства нано размерных частиц сульфида вольфрама может выступать – без вакуумный электродуговой метод.

Без вакуумный электродуговой метод позволяет осуществлять прямое синтезирование дисульфида вольфрама совместным спеканием с серой без использования инертных сред.

Данный метод позволяет отказаться от дорогостоящего вакуумного оборудования и дополнительных инертных газов в среде протекания процесса синтеза наночастиц, что в свою очередь значительно упрощает процесс синтеза наночастиц, при этом сокращая издержки на производство и стоимость необходимого оборудования.

Отдельным преимуществом указанной технологии является мгновенное спекание материалов электрической дугой и их быстрое остывание на воздухе, что значительно сокращает время производства одной партии в сравнении с аналогами.

Материалы и оборудование

Для подготовки образцов использовался карбид вольфрама, полученный по технологии [9], а также оксид вольфрама, полученный окислением в среде атмосферного воздуха при

температуре 600 °С. Для приготовления смеси использовалась элементарная сера ХЧ. В качестве органического растворителя использовался ацетон ХЧ.

Для перемешивания приготовленной взвеси использовалась лабораторная магнитная мешалка Tagler MM135 (Россия). Для просушивания образцов использовался сушильный шкаф МИЗ-МА (Россия).

Анализ микроструктуры и спектральный анализ спеченных образцов, проводился при помощи сканирующего электронного микроскопа PHENOM proX PHENOM proX фирмы: Phenom–World B.V. (Нидерланды) с интегрированной системой энергодисперсионного анализа.

Рентгенофазовый анализ был выполнен с помощью рентгеновских 48 дифрактометров марки Shimadzu XRD 7000s (Япония) с использованием $\text{CuK } \alpha$ -излучения ($\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$). На основе полученных данных для синтезированного продукта был выполнен качественный анализ, позволяющий идентифицировать кристаллические фазы в составе продукта, типы их решетки и пространственной группы, с использованием базы данных PDF4+. Количественный анализ, позволяющий определить содержание кристаллических фаз в продукте, параметры элементарной ячейки и размер областей когерентного рассеяния, выполнен в программном пакете Powder Cell 2.4.

Для трибологических испытаний использовалось полусинтетическое моторное масло 5w40 и полученный дисульфид вольфрама. На основе масла были приготовлены тестовые составы с концентрациями 1 и 3 % масс., путем механического перемешивания на протяжении 5 мин. Далее было проведено испытание на четырехшариковой паре трения, в соответствии с ГОСТ 9490-75. Испытание проводилось на трибометре Метротекс МТ393 (Россия).

Подготовка образцов для спекания

Для проведения исследования была приготовлена партия смеси WC+S.

Молотая сера обладает способностью к накоплению статического электричества и комкованию. Для избегания неравномерности распределения составляющих образцов была подготовлена взвесь порошка в ацетоне. В пропорции (WC+S) 1:2,85. Процесс перемешивания происходил в магнитной мешалке Tagler MM135 на протяжении 10 мин. После перемешивания взвесь была помещена в сушильный шкаф на 4 часа при температуре 80 °С, для выпаривания ацетона.

Затем проводили спекание. В графитовый тигель помещалась навеска приготовленной смеси массой 4 г. Затем, тигель помещался в зону образования дуги. Проводились спекания с разной периодичностью: 10 – 50 с, с шагом 10 с. Наиболее эффективно себя показало время воздействия равное тридцати секундам. Температура на крышке тигля по окончании нагрева достигала 1260 °С

Анализ морфологии и состава полученных частиц

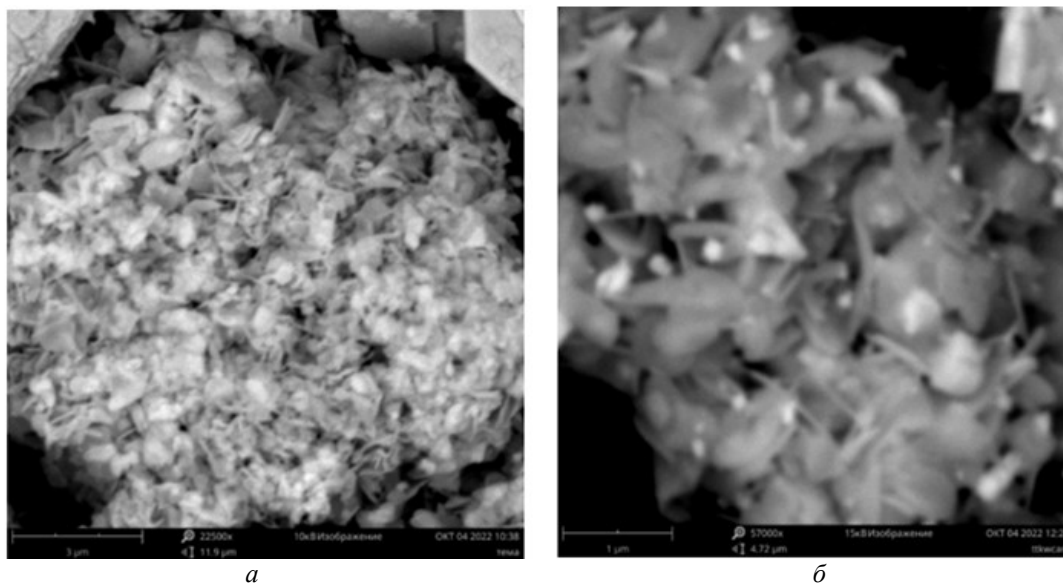


Рисунок 1 – Микрофотографии частиц сульфида вольфрама при увеличении 22500х (а) и 57000х (б)

После спекания, была исследована морфология получившихся частиц (рисунок 1), а также проведен их спектральный анализ (рисунок 2).

Изображенные на рисунке 1 образцы представляют собой глобулы, состоящие из большого количества произвольно ориентированных чешуек (пластин) с отдельными включениями не прореагировавших элементов. Сами чешуйки имеют пластинчатую форму диаметром до 1,5 микрона и толщиной до 100 нм.

При увеличении отдельных пластин сульфида вольфрама были обнаружены треугольные структуры (рисунок 3), схожие с таковыми [5], полученными химическим осаждением из газовой фазы.

По результатам рентгеновской дифрактометрии (рисунок 4) определено, что в составе синтезированного порошка содержатся следующие кристаллические фазы: исходный кубический вольфрам (W – 11,2%) и гексагональный дисульфид вольфрама (WS₂ – 82,6%), также присутствует малая доля оксида вольфрама (WO₃ – 4,6%, WO₂ – 1,6%). Наличие значительного количества непрореагировавшего W может говорить о неравномерности прохождения реакции или неверном соотношении реагирующих элементов в исходной смеси.

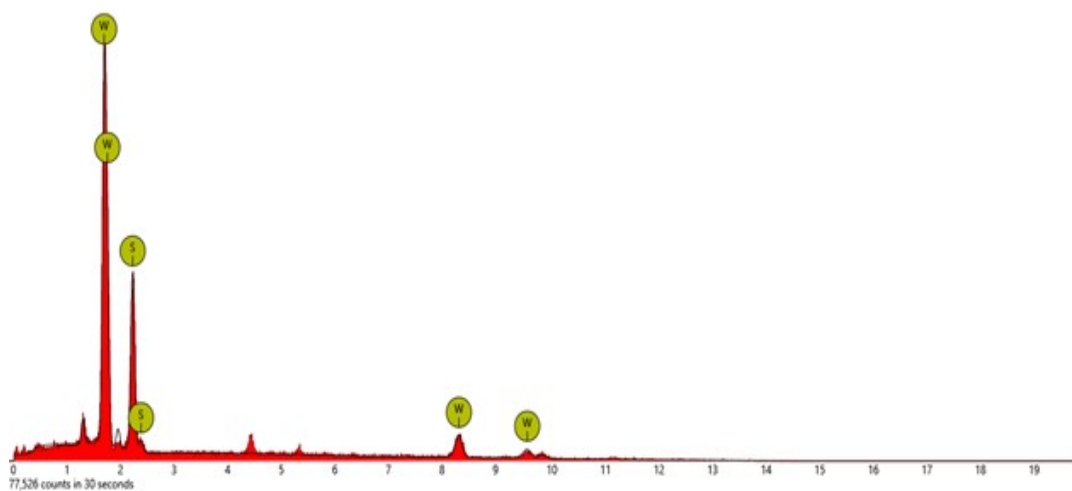


Рисунок 2 – Спектральный анализ в точке

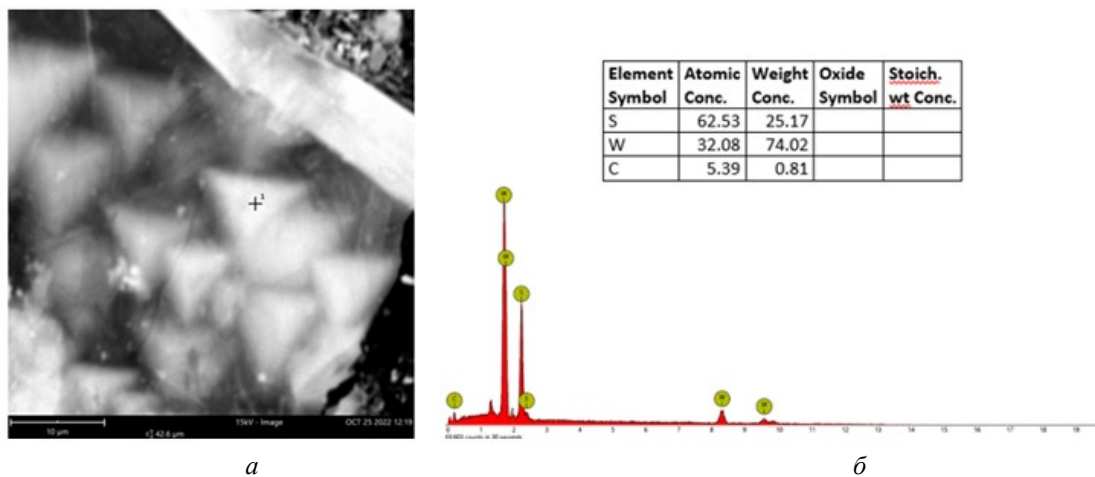


Рисунок 3 – Микрофотографии структуры тонких слоев сульфида вольфрама (а). Спектральный анализ в точке (б)

Результаты трибологических испытаний

Испытание проводилось в соответствии с ГОСТ 9490-75 [10], в четырехшариковой паре трения. Частота оборотов составляла 1470 об/мин., нагрузка – 519 Н или 52,9 кгс. Испытания проводились для определения предельного износа и характеристики графика изменения момента трения. Так же во время испытания фиксировалась рабочая температура масла. После каждого испытания отработанное мало сливалось, шарики подшипников заменялись на новые. На трех нижних опорных шариках фиксировался износ, вычислялось среднее значение диаметра пятна износа.

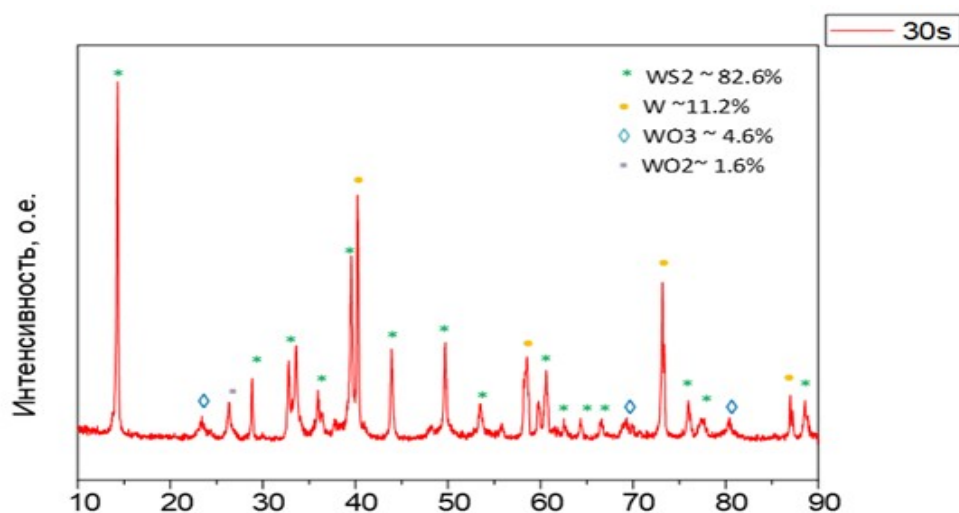


Рисунок 4 – Рентгеновская дифрактограмма продукта синтеза

Подготовка масла.

За основу было взято полусинтетическое моторное масло 5W-40 (Лукойл). Для испытания было необходимо 50 мл масла. В образцы расфасованного масла всыпались навески дисульфида вольфрама по 1 и 3 % масс. Затем после 30 секунд механического перемешивания, образец помещался в ультразвуковой диспергатор УЗД20/40, и диспергировался на протяжении 2 мин. При частоте 20 Гц. После диспергации готовый образец охлаждался до комнатной температуры и помещался в установку для проведения испытания.

Данные по изменению момента трения, температуры, и износу, образцов полусинтетического масла 5W-40, 0 %, 1 % и 3 % представлены на рисунках 5-7.

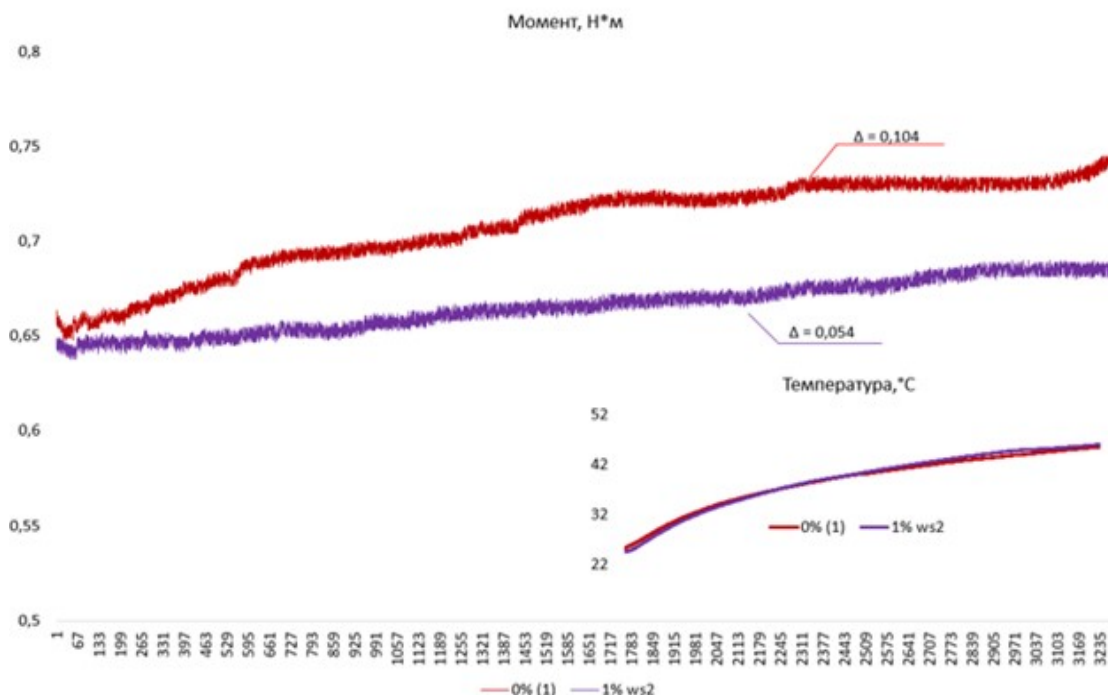


Рисунок 5 – Сравнение приращений температуры и момента трения во время испытания 0 % и 1 %

В результате испытания изменение момента трения на образцах без добавления дисульфида вольфрама составляло примерно 0,1 Н·м, в то время как в образцах с 1 % WS_2 в составе 0,054 Н·м, а 3 % – 0,079 Н·м.

Средний диаметр пятна контакта составил 0,52, 0,54 и 0,62 мм, для 0, 1 и 3 % образцов соответственно.

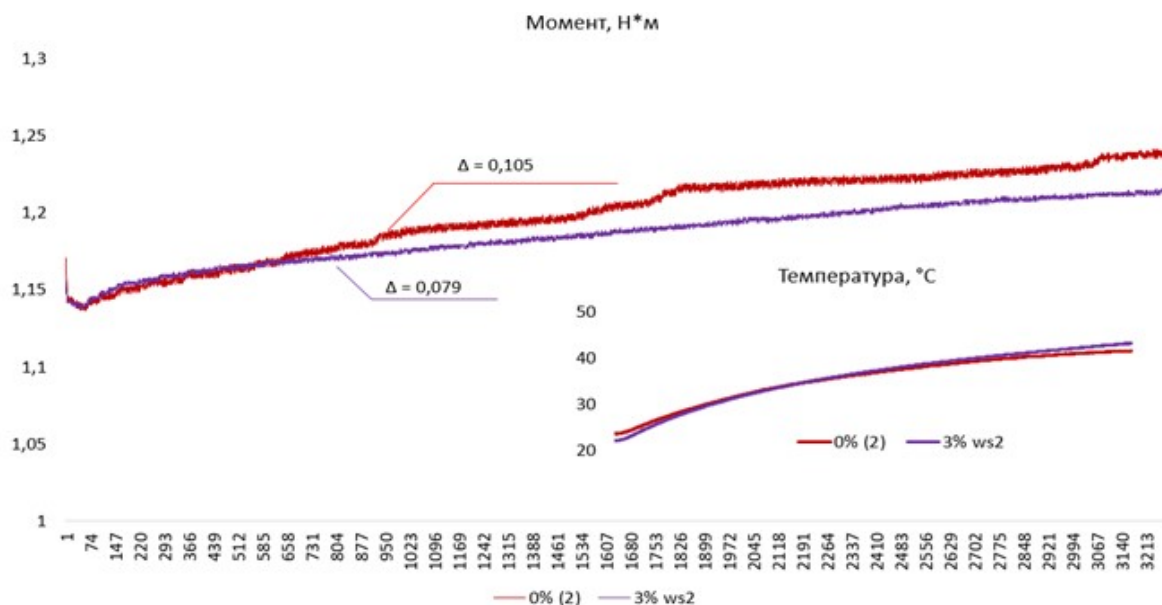


Рисунок 6 – Сравнение приращений температуры и момента трения во время испытания 0 % и 3 %

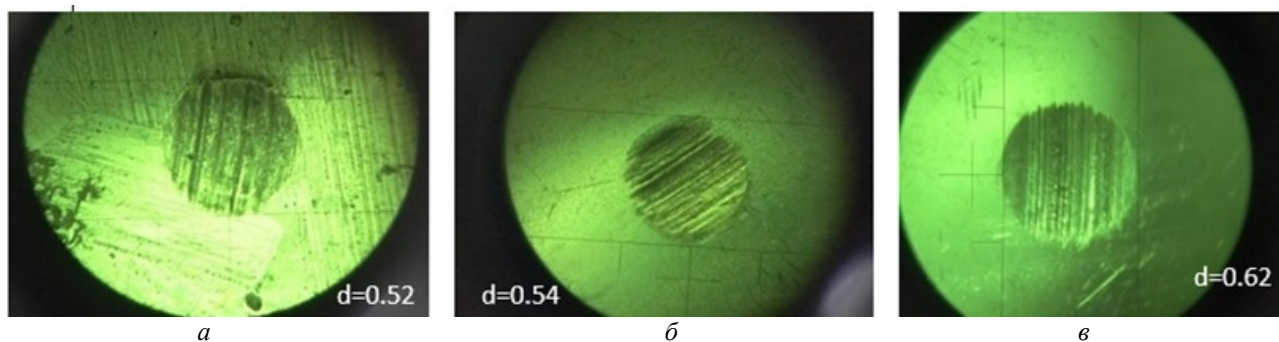


Рисунок 7 – Сравнение диаметров пятен контакта после испытания: а – 1% WS2, б – 0% WS2

Полученные данные позволяют говорить о высоком потенциале к снижению трения в металлических парах при высокой нагрузке. Сопоставимый диаметр пятна контакта образца 1 % и 0 %, говорит об отсутствии дополнительных абразивных эффектов добавки при использовании ее в низких концентрациях. В то же время, повышение концентрации до 3% привело к увеличению пятна контакта. Так же стоит отметить меньшую эффективность 3% образца в воздействии на момент трения.

Исходя из результатов рентгеновской дифрактограммы (рисунок 4) наличие в составе спеченного порошка 11,2 % W, может негативно сказываться на защитных свойствах присадки. W может выступать абразивом. Избавление от остатков вольфрама может существенно улучшить трибологические свойства спеченной смеси.

Заключение

В ходе работы были кратко описаны актуальные технологии синтеза дисульфида вольфрама. Технологии, предоставляющие возможность синтеза наноразмерного слоистого дисульфида вольфрама, подразумевают использование инертных сред или вакуума.

Технологи безвакуумного электродугового синтеза позволяет снизить затраты на синтез материалов, что связано с его конструктивными преимуществами: отказ от дорогостоящего вакуумного оборудования ввиду особенности методики и возможностью синтеза материалов в атмосфере воздуха, а также быстротой протекающих процессов, позволяющих сократить время синтеза.

Оценка морфологии и состава получаемых частиц подтверждает принципиальную возможность получения дисульфид вольфрама таким методом. После спекания был получен порошок, содержащий следующие кристаллические фазы: исходный кубический вольфрам (W – 11,2 %) и гексагональный дисульфид вольфрама (WS₂ – 82,6 %), также присутствует малая доля оксида вольфрама (WO₃ – 4,6 %, WO₂ – 1,6 %).

Анализ микрофотографий показал наличие большого количества глобул, состоящих из тонкослойных нано разменных пластин WS_2 (толщиной до 100 нм, и диаметром до 1,5 мкм), с отдельными включениями непрореагировавших элементов.

Для подтверждения качественных трибологических характеристик WS_2 , как присадки к полусинтетическому моторному маслу, было проведено испытание в соответствии ГОСТ 9490-75. В рамках испытания тестировались составы с концентрациями 1 и 3 %, и сравнивались с исходным маслом. По результатам испытания изменение момента трения на образцах без добавления дисульфида вольфрама составляло примерно 0.1 Н·м, в то время как в образцах с 1 % WS_2 в составе 0,054 Н·м, а 3 % – 0.079 Н·м.

Средний диаметр пятна контакта составил 0,52, 0,54 и 0,62 мм, для 0, 1 и 3 % образцов соответственно.

Полученные данные позволяют говорить о высоком потенциале к снижению трения в металлических парах при высокой нагрузке. Сопоставимый диаметр пятна контакта образца 1 % и 0 %, говорит об отсутствии дополнительных абразивных эффектов добавки при использовании ее в низких концентрациях

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ан, В.В. Трибологические свойства нанослоистых дисульфидов вольфрама и молибдена / В.В. Ан, Ю.А. Иртегов// Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11/3. – С. 326–331.
2. Vijayasarithi, P. Study of tribological performance and corrosion resistance of aluminum alloy 6063 composites enhanced with a combination of silicon carbide and tungsten disulfide particles/ P. Vijayasarithi, R. Palani// Results in Surfaces and Interfaces. – 2024. – V. 15. – P. 100233.
3. Sun Yongfeng Tribological performance of a tungstendisulfide lubricant film prepared by atomic layer deposition using tungsten hexacarbonyl and hydrogen sulfide as precursors/ Sun Yongfeng Zhimin Chaia// Tribology international. – 2017. – V. 114. – P. 478 – 484.
4. Jiang, C. Hydrothermal fabrication of copper sulfide nanocones and nanobelts/ C. Jiang, W. Zhang// Materials Letters. – 2004. – V. 59(8–9). – P. 1008–1011.
5. Zhu, Yao & Yi. Scalable synthesis and defect modulation of large monolayer WS_2 via annealing in H_2S atmosphere/thiol treatment to enhance photoluminescence/ Yao & Yi Zhu, Wen Huan & Hao//Applied Surface Science. – 2019. – V. 481. – P. 184-191.
6. Sun, S. Synthesis of tungsten disulfide nanotubes from different precursor/ S. Sun, Z. Zou// Materials Chemistry and Physics. – 2009. – V. 114(2-3). – P. 884–888.
7. Wu, Z. Synthesis of WS_2 nanosheets by a novel mechanical activation method/ Z. Wu, D.Wang// Materials Letters. – 2010. – V. 64(7). – P. 856–858.
8. Иртегов, Ю.А. Получение наноструктурных сульфидов вольфрама, молибдена, железа, меди и исследование их свойств/ Ю.А. Иртегов, В.В. Ан// Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 5-2. – С. 140–145.
9. Пат. 2763814 Российская Федерация, МПК В22F 9/20, В82В 3/00, С22В 7/00, С22В 3/06, С22В 3/18. Способ получения нанодispersных порошков/ Вишняков С.Р., Гавриш В.М., Виноградский С.С., Хикматуллоев Р.И.; заявитель и патентообладатель Вишняков С.Р., Гавриш В.М., Виноградский С.С., Хикматуллоев Р.И. – № 2021102205; заявл. 29.01.2021; опубл. 11.01.2022. Бюл. № 2. – 16 с.
10. ГОСТ 9490-75 Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине. – Москва: ИПК изд-во стандартов, 1978. – С. 33-40.

Гавриш Владимир Михайлович
ФГАОУ ВО «Севастопольский Государственный Университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, директор НОЦ «Перспективные технологии и материалы»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 8(978) 788-58-45
E-mail: vmgavrish@mail.sevsu.ru

Шагова Юлия Олеговна
ФГАОУ ВО «Севастопольский Государственный Университет», г. Севастополь
Старший преподаватель кафедры «Техногенная безопасность и метрология»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 8(978) 206-70-83
E-mail: yoshagova@mail.sevsu.ru

Рощупкин Станислав Иванович
ФГАОУ ВО «Севастопольский Государственный Университет», г. Севастополь
Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Приборостроение и транспорт»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 8(978) 704-03-95
E-mail: siroshchupkin@mail.sevsu.ru

Чайка Татьяна Валерьевна
ФГАОУ ВО «Севастопольский Государственный Университет», г. Севастополь
Заведующая лабораторией НОЦ «Перспективные технологии и материалы»
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
Тел. 8(978) 778-11-62
E-mail: tvchayika@mail.sevsu.ru

GAVRISH V.M., ROSHCHUPKIN S.I., SHAGOVA Y.O., CHAIKA T.V.

ON THE ISSUE OF OBTAINING TUNGSTEN DISULFIDE FROM A MIXTURE OF NANOSCALE POWDERS OF TUNGSTEN CARBIDES AND TITANIUM

Abstract. *The authors describe a promising technology without vacuum electric arc synthesis of tungsten sulfide nanoparticles. The analysis and comparison of existing technologies for the production of nanocrystalline metal sulfides with the method proposed by the authors has been carried out, as a result of which a number of advantages, including economic ones, have been identified. The paper analyzes a number of scientific studies on the positive effect of tungsten disulfide nanoparticles on the mechanical characteristics of materials and their possible applications. The morphology and composition of the sintered particles were evaluated and the tribological parameters of semi-synthetic engine oil 5W-40 (Lukoil) with the addition of the resulting sintered tungsten disulfide were checked. The data obtained suggest a high potential for reducing friction in metal pairs under high load. As a result, the addition of 1% wt. WS₂ to the oil resulted in a halving of the increase in friction torque.*

Keywords: *tungsten disulfide, carbide, synthesis, tribological properties*

BIBLIOGRAPHY

1. An, V.V. Tribological properties of nanolayer disulfides of tungsten and molybdenum / V.V. An, Yu.A. Irtegov // *Izv. vuzov. Physics.* - 2011. - V. 54. - No. 11/3. - P. 326-331.
2. Vijayasarithi, P. Study of tribological performance and corrosion resistance of aluminum alloy 6063 composites enhanced with a combination of silicon carbide and tungsten disulfide particles/ P. Vijayasarithi, R. Palani// *Results in Surfaces and Interfaces.* - 2024. - V. 15. - P. 100233.
3. Sun Yongfeng Tribological performance of a tungstendisulfide lubricant film prepared by atomic layer deposition using tungsten hexacarbonyl and hydrogen sulfide as precursors/ Sun Yongfeng Zhimin Chaia// *Tribology international.* - 2017. - V. 114. - P. 478 - 484.
4. Jiang, C. Hydrothermal fabrication of copper sulfide nanocones and nanobelts/ C. Jiang, W. Zhang// *Materials Letters.* - 2004. - V. 59(8- 9). - P. 1008-1011.
5. Zhu, Yao & Yi. Scalable synthesis and defect modulation of large monolayer WS₂ via annealing in H₂S atmosphere/thiol treatment to enhance photoluminescence/ Yao & Yi Zhu, Wen Huan & Hao// *Applied Surface Science.* - 2019. - V. 481. - P. 184-191.
6. Sun, S. Synthesis of tungsten disulfide nanotubes from different precursor/ S. Sun, Z. Zou// *Materials Chemistry and Physics.* - 2009. - V. 114(2-3). - P. 884-888.
7. Wu, Z. Synthesis of WS₂ nanosheets by a novel mechanical activation method/ Z. Wu, D.Wang// *Materials Letters.* - 2010. - V. 64(7). - P. 856-858.
8. Irtegov, Yu.A. Obtaining nanostructured sulfides of tungsten, molybdenum, iron, copper and the study of their properties/ Yu.A. Irtegov, V.V. An // *Izvestiya vuzov. Physics.* - 2012. - V. 55. - No. 5-2. - P. 140-145.
9. Pat. 2763814 Russian Federation, IPC B22F 9/20, B82B 3/00, C22B 7/00, C22B 3/06, C22B 3/18. Method for obtaining nanodisperse powders/ Vishnyakov S.R., Gavrish V.M., Vinogradsky S.S., Hikmatulloev R.I.; applicant and patent holder Vishnyakov S.R., Gavrish V.M., Vinogradsky S.S., Hikmatulloev R.I. - No. 2021102205; application No. 29.01.2021; publ. 11.01.2022. Bul. No. 2. - 16 p.
10. GOST 9490-75 Lubricants, liquid and plastic. A method for determining tribological characteristics on a four-ball machine. - Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1978. - P. 33-40.

Gavrish Vladimir Mikhailovich

«Sevastopol State University», Sevastopol
Ph.D., Director of the Research and Development Center
«Advanced Technologies and Materials»
299053, Sevastopol, Universitetskaya str, 33
Ph.: 8(978)788-58-45
E-mail: vmgavrish@mail.sevsu.ru

Shagova Yulia Olegovna

«Sevastopol State University», Sevastopol
Senior Lecturer at the Department of «Technogenic Safety and Metrology»
299053, Sevastopol, Universitetskaya str, 33
Ph.: 8(978)206-70-83
E-mail: yoshagova@mail.sevsu.ru

Roshchupkin Stanislav Ivanovich

«Sevastopol State University», Sevastopol
Ph.D., Candidate of Technical Sciences, Head of the
Department of Instrument Engineering and Transport
299053, Sevastopol, Universitetskaya str, 33
Ph.: 8(978) 704-03-95
E-mail: siroshchupkin@mail.sevsu.ru

Chaika Tatiana Valeryevna

«Sevastopol State University», Sevastopol
Head of the laboratory of the Research Center
«Advanced Technologies and Materials»
299053, Sevastopol, Universitetskaya str, 33
Ph.: 8(978) 778-11-62
E-mail: tvchayika@mail.sevsu.ru

КОЖУС О.Г., БАРСУКОВ Г.В., ЖУРАВЛЕВА Т.А., ПЕТРУХИН А.В.,
БОНДАРЕНКО М.Э., КЛЕПОВА В.Н.

ЗАВИСИМОСТИ ВРЕМЕНИ СКВОЗНОГО ПРОКОЛА ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА ОТ ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПАВ

Аннотация. Авторами статьи предлагается преодолеть возникший технологический предел в развитии технологии гидроабразивного резания путем введения добавок поверхностно-активных веществ (ПАВ) в сопло, где формируется гидроабразивная струя, что позволит снизить гидравлическое сопротивление и турбулентное трение и повысить ранее не доступную скорость потока в сопле. Представлены уравнения регрессии и зависимости времени сквозного прокола обрабатываемого материала от основных режимов гидроабразивного резания, подтверждающие эффективность введения ПАВ для повышения режущих возможностей гидроабразивной струи.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, абразив, сопло, фокусирующая трубка, гидравлическое сопротивление, поверхностно-активное вещество.

1. Введение

Использование добавок в гидрорезании известно с 1970 года, когда N.C. Franz в работе [1] описал эффект улучшения когерентности струи за счет введения полимера, как метод увеличения глубины проникания струи.

Хотя в литературе существует ряд публикаций [2 - 5], исследований протекающих эффектов при введении добавок до сих пор недостаточно, особенно для случая гидроабразивных струй. Основной вывод, вытекающий из этих исследований, касается способности добавок улучшать когерентность струи и уменьшать ее распад на поток капель. Улучшенная когерентность струи представляет интерес при резании струей жидкости без добавки абразива из-за более высокой плотности энергии в поперечном сечении струи, что позволяет улучшить ее режущую способность.

Наиболее широкое технологическое применение гибких полимеров в качестве добавок для потоков жидкости связаны с их способностью значительно снизить пульсацию давления в турбулентных потоках, ограниченных стенками канала [6]. Таким образом, уменьшая потери давления в гидравлической системе станка, можно получить более высокую скорость истечения воды из сопла, а, следовательно, повысить производительность резки.

Однако, несмотря на значительные преимущества этих эффектов, использование добавок в резке струей жидкости не стало широко применяться. Единственной добавкой, имеющей коммерческое применение на рынке предложений новых решений для технологии гидрорезания, является высокомолекулярный полиакриламид, который поставляется в частично гидролизованной форме в виде эмульсии «вода-в-масле» с торговым названием Super Water [7].

Одной из основных технических проблем, связанных с добавками, является их введение в гидравлическую систему гидрорезного станка. Это связано с тем, что молекулы полимера, растворенные в жидкости, нестабильны и необратимо разрушаются при относительно низких напряжениях сдвига. Это не позволяет использовать в системе гидравлики такие устройства, как центробежные насосы или фильтры, чтобы избежать механической деградации полимера [7]. Более того, введение добавок даже в жидкой форме необходимо некоторое время для образования однородной смеси, которое больше, чем время пребывания жидкости в гидравлической системе станка.

В настоящем исследовании предлагается преодолеть возникший технологический предел в развитии технологии активации струи путем введения поверхностно-активных веществ (ПАВ) непосредственно в сопло, где формируется гидроабразивная струя, что позволит снизить гидравлическое сопротивление, турбулентное трение и повысить ранее не доступную скорость потока в канале сопла. Добавки в жидкость молекул ПАВ, наличие в ней частиц абразива, очевидно, меняют свойства среды. Предполагается изменение коэффициента вязкости на стенке канала фокусирующей трубки сопла при введении ПАВ, который определяется физической природой жидкой фазы, состоянием течения (ламинарное или

турбулентное), взаимодействием рабочей среды с твердой стенки канала (прилипание или проскальзывание, наличие с определенной концентрацией или отсутствие взвешенных частиц – абразив, мицеллы, промежуточного слоя, например, ПАВ). Слой ПАВ на твердой металлической поверхности образуется в силу притяжения дипольной группы молекул лиофильных ПАВ под действием быстро убывающего по мере удаления от поверхности электрического поля, что способствует росту скорости истечения гидроабразивного потока [8 - 10].

2. Основная часть

Анализ образования слоя поверхностно-активного вещества на поверхности канала фокусирующей трубки сопла проводится с учетом схемы гидроабразивного резания, изображенной на рисунке 1.

Предполагается, что сухой порошок ПАВ смешивается перед введением с абразивом в специальном смесителе. Полученная смесь вместе с абразивными зернами попадает в стационарный поток жидкости - воды. В результате образуется рабочая смесь, состоящая из воды, и наполняющих ее частиц абразива, молекул и мицелл ПАВ (групп длинных лиофильных молекул ПАВ, образующих дипольной частью ее внешность, а лиофобным «хвостом» - внутрь мицеллы).

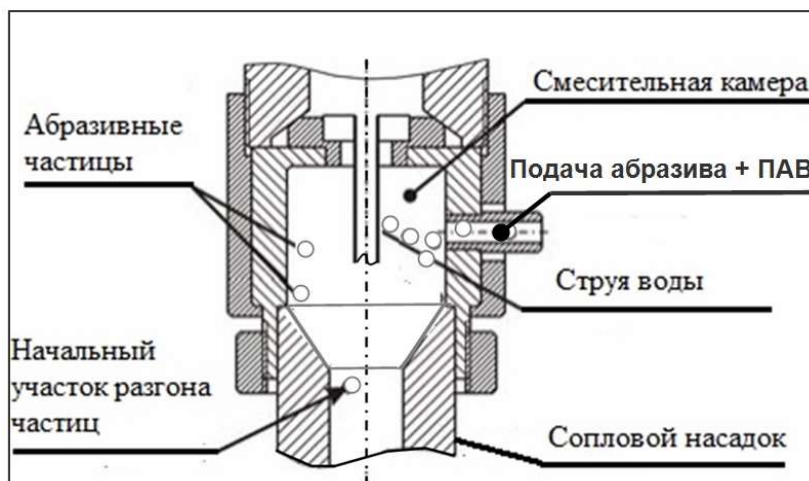


Рисунок 1 - Схема сопла установки гидроабразивной резки

На основании условия о том, что в стационарном течении рабочей среды по каналу длиной L и радиусом R падение давления в ней $p_1 - p_2$ уравнивается касательными напряжениями $\tau = \eta(du/dr)$ о стенки канала, можно получить формулу, устанавливающую связь

$$\tau = \eta \frac{du}{dr} = \frac{R(p_1 - p_2)}{2L}. \quad (1)$$

где p_1 и p_2 - давление в начале и конце канала соответственно,

du/dr - градиент скорости u течения вдоль стенки в перпендикулярном к ней направлении,

r - текущее значение расстояния от оси канала ($0 < r < R$), η - эффективный коэффициентом вязкости рабочей среды.

Наряду со сказанным о состоянии потока рабочей смеси можно допустить нарушение условий прилипания на стенках канала, характерных для вязких жидкостей, и наличие проскальзывания со скоростью u_0 и наоборот – появления дополнительных к вязким касательных напряжений, на что обращалось внимание в работах [8].

Зная распределение скорости $u(r)$, в предположении о том, что в каждом элементарном цилиндре толщиной dr выполняется равенство (1) – жидкость является ньютоновской, можно получить формулу для расчета секундного расхода через поперечное сечение канала.

$$Q = \pi \left[u_0 R_*^2 + \frac{p_1 - p_2}{L} \int_0^{R_*} r \left(\int_r^{R_*} \frac{r dr}{\eta(r)} \right) dr \right] \quad (2)$$

где u_0 - скорость возможного проскальзывания рабочей смеси на покрытии металлической стенки канала материалом ПАВ толщиной $h = R - R_*$.

Анализируя выражение (3) можно заключить, что при неизменных длине L , падении давления в нем $(p_1 - p_2)$ на величину секундного расхода Q влияют:

- наличие проскальзывания рабочей среды на стенках канала, характеризуемом скоростью u_0 ;
- толщина $h = R - R_*$ слоя ПАВ и ее распределение по его длине;
- величина коэффициента вязкости $\eta(r)$ и характер ее распределения по сечению канала;
- радиус R канала.

Перечисленные параметры не являются независимыми. Экспериментально доказанное увеличение расхода Q при использовании специального вида ПАВ [9], наличие абразива в рабочей смеси делают перечисленные факторы взаимосвязанными. Проблема состоит в выявлении теоретическими и экспериментальными методами количественных связей перечисленных параметров между собой, с типом и концентрацией ПАВ и, в конечном счете, с секундным расходом Q .

Представления о различных видах сил адгезии находятся в согласии с объяснением уменьшения кажущейся вязкости потока воды в металлическом канале за счет применения ПАВ и могут быть использованы, в частности, при построении количественной модели процесса движения рабочей среды по каналу сопла для гидроабразивного резания. Рабочей средой, например, является смесь воды кварцевого песка. Экспериментально установлено, что использование ПАВ уменьшает кажущуюся вязкость потока смеси [11].

Вода – полярный диэлектрик, металлическая стенка канала и кварцевые песчинки – материалы, у поверхностей которых образуется электрическое поле. У первого – из-за наличия двойного электрического слоя, у второго – вследствие пьезоэффекта. Молекула ПАВ имеет в своем составе как гидрофильный компонент (полярная функциональная группа), так и гидрофобную часть (неполярный углеводородный радикал).

Молекулы ПАВ адсорбируются на металлических стенках канала и на поверхностях кварцевых песчинок. В результате можно допустить существование на стенках твердого слоя ПАВ. Этот слой на поверхности, контактирующей с металлом, поляризован его электрическим полем. Он, а вместе с ним и весь слой притягивается к металлической поверхности и удерживается около нее электрическими силами адгезии. Внешняя часть слоя ПАВ имеет структуру, характерную для ауксетических материалов [12]. Для них характерно равное нулю или отрицательное значение коэффициента Пуассона. В работе [9] на основе модели адгезионных сил, порожденных парными и тройными нелокальными взаимодействиями электрически нейтральных макрочастиц, показано, что при взаимодействии таких материалов с макрочастицами других материалов преобладают силы отталкивания, порожденные их тройными взаимодействиями. В этом случае энергия активации макрочастиц воды G_0 получает отрицательную добавку: $\Delta G < 0$. Поэтому вязкость воды вблизи слоя ПАВ,

закрывающего металлическую стенку, уменьшится в $\exp\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right)$. В результате появится эффект кажущегося «проскальзывания» вдоль стенок канала, покрытых ПАВ.

Для оценки влияния ПАВ на скорость гидроабразивной струи проведены экспериментальные исследования сквозного прокола обрабатываемого материала от основных режимов гидроабразивного резания при наличии ПАВ. В качестве объекта исследования выбран листовый материал – сталь 20 толщиной 20 и 100 мм (рисунок 2).

Момент сквозного прорезания образца контролировался с помощью тензодатчика Zet7010+ZET7070, фиксирующего падение силы резания при выходе струи из образца путем использования измерительной системы ООО «Зетлаб». Использование акустических датчиков

вблизи зоны внедрения гидроабразивной струи в материал оказалось не информативным из-за наличия высоких шумовых составляющих в сигнале от работы установки.



Рисунок 2 – Экспериментальный образец толщиной 20 мм после сквозного прокола

Для изучения зависимости времени сквозного прокола обрабатываемого материала от основных режимов резания при наличии ПАВ и без введения ПАВ был проведен ряд полных факторных экспериментов.

Исследования включали в себя проведение четырех серий полных факторных экспериментов (ПФЭ). Прошивка образцов проводилась двумя приемами: с движением фокусирующей трубки по окружности \varnothing 1мм и с неподвижной фокусирующей трубкой. В качестве абразивного материала для резания использовался гранатовый абразив с распределением размера от 0,150 мм до 0,400 мм.

Результаты экспериментов подвергали как регрессионному, так и дисперсионному анализу, что позволило с большей объективностью оценить факторы и эффекты их взаимодействия, выявить факторы, оказывающие наиболее существенное, доминирующее влияние на величину расслоений. При этом варьируемыми параметрами были:

- x_1 - давление истечения гидроабразивной струи p , МПа;
- x_2 - расстояние между фокусирующей трубкой и материалом l , мм;
- x_3 - концентрация ПАВ Q_s , мм;
- x_4 - расход абразива Q_a , мм.

Область варьирования входных факторов представлена в таблице 1.

Задача экспериментальных исследований сводилась к определению времени сквозного прокола обрабатываемого материала t и получению уравнения регрессионного анализа.

Уравнение регрессии времени сквозного прокола обрабатываемого материала:

$$t = 1500p^{-0,28}Q_a^{-0,33}L^{0,12}Q_s^{-0,03}, \quad (3)$$

Зависимость времени сквозного прокола обрабатываемого материала от основных режимов гидроабразивного резания при наличии ПАВ представлена на рисунке 3.

Таблица 1 - Область варьирования входных факторов

Факторы	Уровни факторов			Интервал варьирования Δx
	-1	0	1	
Давление p , МПа	70	110	150	40
Расход абразива Q_a , г/мин	100	150	200	1
Расстояние от фокусирующей трубки до материала L , мм	2	3	4	0,0475
Концентрация ПАВ Q_s , %	0,005	0,0525	0,1	50

Уравнение регрессии времени сквозного прокола обрабатываемого материала с движением фокусирующей трубки по окружности:

$$t = 1620p^{-0,30}Q_a^{-0,38}L^{0,16}Q_s^{-0,04}, \quad (4)$$

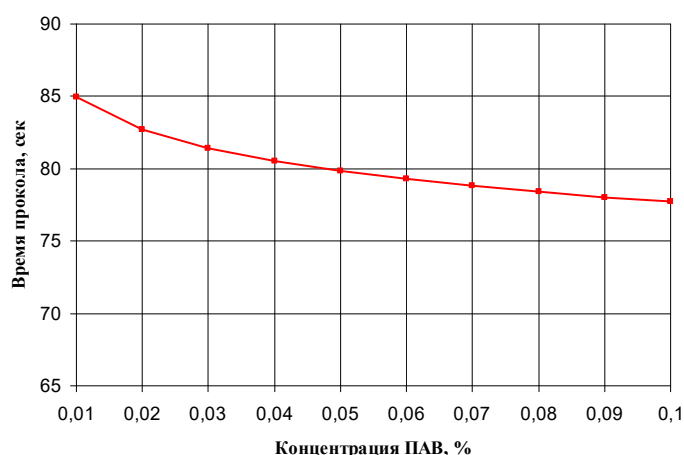


Рисунок 3 - Зависимости времени сквозного прокола обрабатываемого материала от основных режимов резания:
 $p = 70 \text{ МПа}$, $Q_a = 200 \text{ г/мин}$, $L = 1 \text{ мм}$

Зависимость времени сквозного прокола обрабатываемого материала от основных режимов гидроабразивного резания при наличии ПАВ с движением фокусирующей трубки по окружности Ø 1мм представлена на рисунке 4.

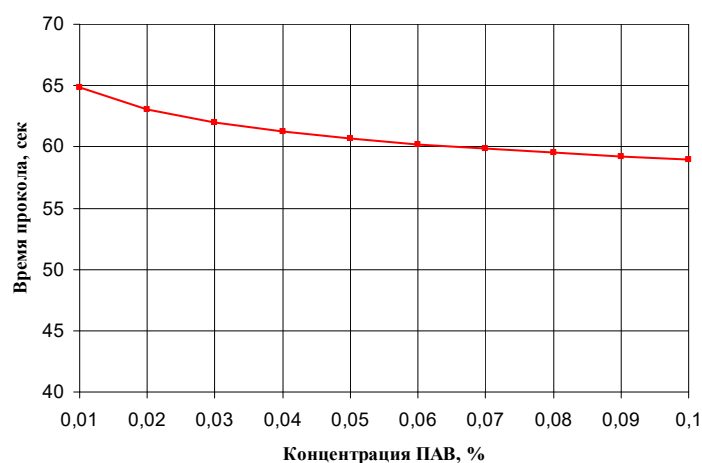


Рисунок 4 - Зависимости времени сквозного прокола обрабатываемого материала от основных режимов резания с движением фокусирующей трубки по окружности Ø 1мм:
 $p = 70 \text{ МПа}$, $Q_a = 200 \text{ г/мин}$, $L = 1 \text{ мм}$

Закключение.

Как показали экспериментальные исследования, повышение давления истечения гидроабразивной струи практически линейно снижает время сквозного прокола. Зависимость описывается уравнением регрессии с высоким коэффициентом -0,28 и -0,3 (уравнения 3 и 4). Кроме этого прослеживается значительное влияние расхода абразива.

Увеличение количества абразива приводит так же к снижению времени сквозного прокола с высоким коэффициентом уравнения регрессии -0,33 и -0,38 (уравнение 3 и 4).

Обратная зависимость наблюдается при увеличении расстояния от сопла до материала L, что объясняется активным взаимодействием струи с окружающей средой, вследствие чего увеличивается диаметр струи.

Установлено, что введение добавки ПАВ до 0,1 % снижает время сквозного прокола с 85 сек до 77 сек, а при круговом движении сопла с 65 сек до 59 сек, что показывает эффективность введения ПАВ для повышения режущих возможностей гидроабразивной струи.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-79-10245.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Franz, N.C. (1970) High Velocity Liquid Jet, Inventor: Norman C. Franz, US Class: 83/53. Int. Class.: B26d 17/00, US Patent No. 3,524,367, 18 August.
2. Hollinger, R.H., Perry, W.D. and Swanson, R.K. (1989) Precision cutting with low pressure abrasive suspension jet, Proc. 5th American Waterjet Conference, St. Louis, USA, pp.245–252.
3. Hashish, M. (1997) Machining of hard materials with abrasive-suspension jets, Proc. 9th American Waterjet Conference, August, Houston, USA, pp.267–280.
4. Howells, W.G. (2007) Polymerblasting – a chemists point of view, WaterJet Technology Association, available at www.wjta.org/Book%20202/9_6a_howells.pdf.
5. Louis, H., Pude, F. and von Rad, C. (2003) Potential of polymeric additives for the cutting efficiency of abrasive waterjets, Proc. WJTA 2003 American Waterjet Conference, Paper 3D, 17th–19th August, Houston, USA.
6. Gyr, A. and Bewersdorff, H-W. (1995) Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives, Kluwer Academic.
7. Howells, W.G. (1999) Super-water jetting applications from 1974 to 1999, Proc. 10th American Waterjet Conference, 14th–17th August, Houston, USA.
8. Kozhus O., Barsukov G., Shorkin V., Petrukhin A., Tinyakova E. Theoretical substantiation of formation of a layer of surfactants on the walls of the nozzle focusing tube for the technological process of waterjet cutting. *AIP Conf. Proc.* 24 April 2024; 3154 (1): 020037. <https://doi.org/10.1063/5.0201249>
9. Kozhus, O., Barsukov, G., Zhuravleva, T., Petrukhin, A., Tinyakova, E. (2024). Modeling of Surfactant Influence on Liquid Velocity in the Channel of the Focusing Tube of the Nozzle of a Waterjet Unit. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_71.
10. Кожус, О.Г., Барсуков Г.В., Журавлева Т.А., Прасолов Е.А., Петрухин А.В., Бондаренко М.Э. Повышение производительности гидроабразивного резания за счет модификации турбулентного пограничного слоя в канале сопла // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2024. № 2 (364). С. 24–31.
11. Romashin, S.N., Shorkin, V.S. Variant of the Relationship between the Mechanical and Adhesive Properties of Solid Materials. *Mech. Solids* 55, 1392–1405 (2020). <https://doi.org/10.3103/S0025654420080233>.
12. Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Об отрицательности коэффициента Пуассона для анизотропных материалов // Доклады академии наук. Механика. 2009, т. 429. № 5, С. 614 – 616.

Кожус Ольга Геннадьевна

Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева,
кандидат технических наук,
Начальник УНИР
г. Орёл ул. Наугорское ш. 29
Тел: +79038806976
E-mail: okozhus@mail.ru

Журавлева Татьяна Александровна

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кандидат технических наук
г. Калуга, ул. Баженова, д. 2.
Тел.: + 7 (4862) 413295
E-mail: sidorov.35mz@mail.ru

Бондаренко Максим Эдуардович

Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева,
Доцент кафедры мехатроники, механики и
робототехники
г. Орёл Наугорское шоссе, д. 29
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

Барсуков Геннадий Валерьевич

Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева,
доктор технических наук,
профессор кафедры машиностроения
г. Орёл ул. Московская д. 34
Тел: +79038806976
E-mail: awj@list.ru

Петрухин Антон Владимирович

Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева,
аспирант кафедры машиностроения
г. Орёл ул. Московская д. 34
Тел: +79038806976
E-mail: antosha.petrukhin@gmail.com

Клепова Василина Николаевна

Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева,
магистр кафедры машиностроения
г. Орёл ул. Московская д. 34
E-mail: vasilinaklepova56@gmail.com

KOZHUS O.G., BARSUKOV G.V., ZHURAVLEVA T.A., PETRUKHIN A.V.,
BONDARENKO M.E., KLEPOVA V.N.

DEPENDENCES OF THE TIME OF THROUGH-PUNCHING OF THE WORKPIECE FROM THE MAIN MODES OF WATERJET CUTTING IN THE PRESENCE OF SURFACTANTS

Abstract. The authors of the article propose to overcome the emerging technological limit in the development of waterjet cutting technology by introducing surfactant additives into the nozzle where the waterjet jet is formed, which

will reduce hydraulic resistance and turbulent friction and increase the previously inaccessible flow rate in the nozzle. The regression equations and the dependence of the through puncture time of the processed material on the main modes of waterjet cutting are presented, confirming the effectiveness of introducing surfactants to increase the cutting capabilities of the waterjet jet.

Keywords: waterjet cutting, abrasive, nozzle, focusing tube, hydraulic resistance, surfactant.

BIBLIOGRAPHY

1. Franz, N.C. (1970) High Velocity Liquid Jet, Inventor: Norman C. Franz, US Class: 83/53. Int. Class.: B26d 17/00, US Patent No. 3,524,367, 18 August.
2. Hollinger, R.H., Perry, W.D. and Swanson, R.K. (1989) Precision cutting with low pressure abrasive suspension jet, Proc. 5th American Waterjet Conference, St. Louis, USA, pp.245–252.
3. Hashish, M. (1997) Machining of hard materials with abrasive-suspension jets, Proc. 9th American Waterjet Conference, August, Houston, USA, pp.267–280.
4. Howells, W.G. (2007) Polymerblasting – a chemists point of view, WaterJet Technology Association, available at www.wjta.org/Book%2029_6a_howells.pdf.
5. Louis, H., Pude, F. and von Rad, C. (2003) Potential of polymeric additives for the cutting efficiency of abrasive waterjets, Proc. WJTA 2003 American Waterjet Conference, Paper 3D, 17th–19th August, Houston, USA.
6. Gyr, A. and Bewersdorff, H-W. (1995) Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives, Kluwer Academic.
7. Howells, W.G. (1999) Super-water jetting applications from 1974 to 1999, Proc. 10th American Waterjet Conference, 14th–17th August, Houston, USA.
8. Kozhus O., Barsukov G., Shorkin V., Petrukhin A., Tinyakova E. Theoretical substantiation of formation of a layer of surfactants on the walls of the nozzle focusing tube for the technological process of waterjet cutting. *AIP Conf. Proc.* 24 April 2024; 3154 (1): 020037. <https://doi.org/10.1063/5.0201249>
9. Kozhus, O., Barsukov, G., Zhuravleva, T., Petrukhin, A., Tinyakova, E. (2024). Modeling of Surfactant Influence on Liquid Velocity in the Channel of the Focusing Tube of the Nozzle of a Waterjet Unit. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_71.
10. Kozhus O.G., Barsukov G.V., Zhuravleva T.A., Prasolov E.A., Petrukhin A.V., Bondarenko M.E. Increasing the productivity of waterjet cutting by modifying the turbulent boundary layer in the nozzle channel // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2024. No. 2 (364). P. 24-31.
11. Romashin, S.N., Shorkin, V.S. Variant of the Relationship between the Mechanical and Adhesive Properties of Solid Materials. *Mech. Solids* 55, 1392–1405 (2020). <https://doi.org/10.3103/S0025654420080233>.
12. Goldstein R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. On the negativity of Poissons ratio for anisotropic materials // Reports of the Academy of Sciences. Mechanics. 2009, v. 429. no. 5, pp. 614–616.

Kozhus Olga Gennadyevna

Oryol State University
named after I.S. Turgenev,
Candidate of Technical Sciences,
Head of the Research Institute
Oryol, Naugorskoe sh. 29
Tel.: +79038806976
E-mail: okozhus@mail.ru

Zhuravleva Tatyana Aleksandrovna

Kaluga branch of Bauman Moscow State Technical
University
Candidate of Technical Sciences
Kaluga, st. Bazhenova, 2.
Tel.: + 7 (4862) 413295
E-mail: sidorov.35mz@mail.ru

Bondarenko Maxim Eduardovich

Oryol State University
named after I.S. Turgenev,
Associate Professor of the Department of Mechatronics,
Mechanics and Robotics
Oryol, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

Barsukov Gennady Valerievich

Oryol State University
named after I.S. Turgenev,
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Mechanical Engineering
Oryol, Moskovskaya st. 34
Tel.: +79038806976
E-mail: awj@list.ru

Petrukhin Anton Vladimirovich

Oryol State University
named after I.S. Turgenev,
Postgraduate student of the Department of Mechanical
Engineering
Oryol, Moskovskaya St., 34
Tel.: +79038806976
E-mail: antosha.petrukhin@gmail.com

Klepova Vasilina Nikolaevna

Oryol State University
named after I.S. Turgeneva,
Master of the Department of Mechanical Engineering
Orel, Moskovskaya St., 34
E-mail: vasilinalepova56@gmail.com

МЫШЕЧКИН А.А., ЗУЕВ В.В., ПРЕОБРАЖЕНСКАЯ Е.В., БОРОВИК Т.Н., СКРИПНИК С.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ОПРАВОК ПРОШИВНЫХ СТАНОВ ИЗ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

Аннотация. В работе разработан и исследован технологический процесс изготовления горячей штамповкой поковок с глухими полостями типа оправок прошивных станов из трубной заготовки, позволяющий снизить износ инструмента и повысить его стойкость. Предложенная технология включает операции отрезки и нагрева трубной заготовки с наружным диаметром 0,80-0,98 диаметра оправки и внутренним диаметром 0,8-1,1 наибольшего диаметра полости и дальнейшее ее формообразование для получения рабочего конуса, заднего конического участка, внутренней водо-охлаждаемой полости и концевого выступа оправки горячей объемной штамповкой за два перехода, при этом на первом переходе происходит штамповка рабочего конуса, концевого выступа и внутренней водо-охлаждаемой полости, а на втором переходе происходит штамповка заднего конического участка оправки. При этом матрицы для формообразование рабочего конуса, концевого выступа оправки на первом и втором переходах расположены в верхней части штампа, а пуансоны для получения полости и заднего конического участка - в нижней части штампа. Для выбора параметров предложенного процесса методом цифрового моделирования в программе QForm выполнено исследование технологических переходов. Исследован характер формоизменения заготовки, напряженно-деформированное состояние и технологическая сила по переходам штамповки. Исследован характер и интенсивность износа инструмента по переходам.

Ключевые слова: поковка, моделирование, программа QForm, горячая объемная штамповка, трубная заготовка, оправка, переходы штамповки, температура, напряжения, деформации, силовые параметры, износ.

Введение

Разработка технологического процесса горячей штамповки предполагает решение следующих задач: максимальное приближение штампуемой поковки к готовой детали с целью снижения расхода металла и уменьшения последующей механической обработки, получение заданных механических характеристик, микро- и макроструктуры металла с целью повышения эксплуатационных характеристик деталей. Однако при горячей штамповке некоторых поковок достижение поставленных задач ограничено технологическими возможностями процессов, прежде всего стойкостью инструмента. Примером таких поковок являются поковки с глухими, узкими и глубокими полостями. К таким поковкам с глубокими полостями можно отнести муфты, стаканы, гильзы, оправки косовальковых прошивных станов, рубашки цилиндров и др. Сложность промышленного использования технологии горячей штамповки таких поковок связана с тяжелыми условиями работы и низкой стойкостью инструмента для выдавливания полостей оправки. Для проведения исследований и разработки технологического процесса в данной работе использована оправка прошивного стана, используемая при производстве бесшовных труб (рисунок 1). Особенностью оправок прошивных станов является наличие глухой и глубокой полости и обратного конуса на наружной поверхности. Такие оправки работают в условиях действия высоких температур и удельных усилий, изготавливаются из легированных сталей (стали 20ХН4ФА, 4Х2В5МФ и др.). Прошивная оправка совместно с другим инструментом стана обеспечивает получение полой заготовки, из которой на последующих станах раскатки, прокатки, редуцирования, правки и калибровки получается бесшовная труба.

Оправка условно состоит из трех участков: концевой выступ (носик) диаметром d , рабочая часть оправки с максимальным диаметром D , обратный конус длиной l_k с диаметром у основания D_k и имеет полость глубиной h . Рабочая часть может быть выполнена в виде конуса или по радиусу R . Технологической особенностью оправки прошивного стана в сравнении с другими аналогичными поковками с глубокими полостями является наличие заднего конического участка с размерами D_k , l_k (рисунок 1). При этом $D_k = (0,94-0,97)D$, $l_k = (0,2-0,25)H$. Общую длину прошивной оправки рекомендуется выбирать в пределах $H/D = 1,9-2,8$ в зависимости от размеров оправки, вида и материала заготовки, радиус рабочей части $R/D = 2,0-5,0$. Диаметр оправки определяется в зависимости от размеров получаемой при прокатке гильзы: $D = D_g - 2S_g$, где: D_g – диаметр гильзы; S_g – толщина стенки гильзы. Диаметр носика оправки определяют в зависимости от диаметра заготовки D_3 : $d = (0,15-0,25) D_3$.

Увеличение износостойкости и срока службы прошивных оправок имеет важное практическое значение и позволяет уменьшить расход оправок и повысить производительность процесса прокатки за счет снижения числа переналадок оборудования

при смене оправки. При этом исследованиями установлено, что на износостойкость прошивных оправок оказывают влияние различные факторы: химический состав материала и режим термообработки оправок, их калибровка, марка прошиваемой стали, качество нагрева заготовок, режимы прокатки и условия охлаждения оправок. На стойкость оправок также влияет размер прошиваемых заготовок [1,2,3,4]. Увеличение длины гильзы ведет к увеличению времени контакта оправки с горячим деформируемым металлом, что естественно повышает ее температуру, тем самым снижая стойкость. Опыт трубопрокатного производства показывает, что основными видами дефектов и износа оправок являются: пластическая деформация носка и рабочей поверхности, местная выработка, истирание, задиры металла на теле оправки, трещины в виде сетки разгара, зональные трещины, налипание металла заготовки на оправку.

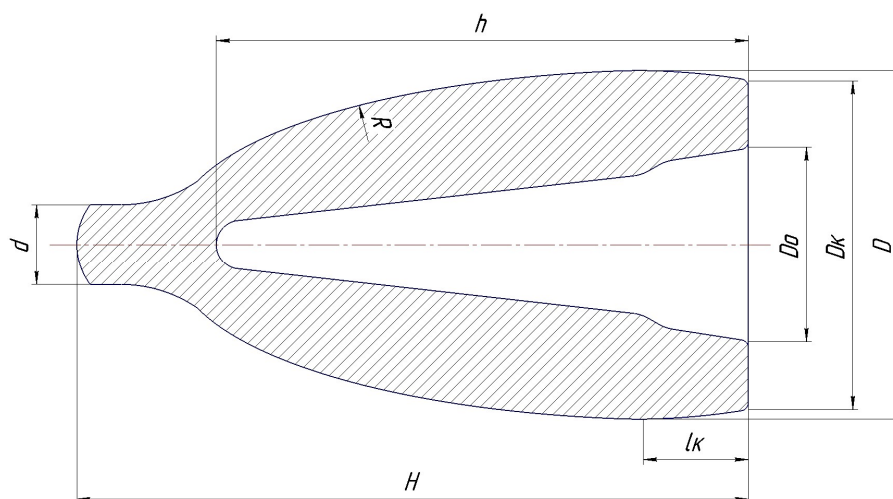


Рисунок 1 - Оправка прошивного стана

Анализ опыта использования оправок показывает также, что большое влияние на стойкость прошивных оправок оказывает способ их получения [3]. В настоящее время одним из основных способов является литье с последующей механической обработкой, а также заковка патрубков из толстостенных труб.

Литые оправки требуют расточки посадочного конуса и другие отделочные операции, в том числе заварка и зачистка поверхностных дефектов. В процессе работы на поверхности литых оправок могут вскрываться пороки литья (пузыри, раковины), что приводит к образованию дефектов на прокатываемых гильзах и снижению времени работы таких оправок. Кованые оправки имеют более высокую стойкость, но требуют значительной механической обработки наружной и внутренней поверхности, что повышает трудоемкость и себестоимость их получения. Кроме того, на поверхность таких оправок выходят перерезанные при механической обработке волокна металла, это снижает износостойкость оправок.

Для повышения стойкости оправок необходимо создать специальную волокнистую макроструктуру металла, которая позволяет повысить износостойкость и долговечность изделий. При этом необходимо также, чтобы волокна подходили к наружным поверхностям детали по касательной и не перерезались наружными поверхностями изделия, а наибольшие растягивающие напряжения, возникающие в изделиях в процессе работы, были направлены вдоль волокон.

Такую структуру можно получить пластической деформацией. Поэтому для повышения стойкости оправок в ряде работ предложено получать их горячей объемной штамповкой с минимальной механической обработкой [5,6,7,8]. Штампованные оправки имеют плотную макроструктуру, волокна которой могут полностью описывать контур изделия. Это будет способствовать повышению износостойкости прошивных оправок. Однако такие оправки не нашли широкого применения вследствие сложности технологического процесса и не достаточной его исследованности для определения оптимальных параметров (размеры заготовки, оптимальные переходы штамповки и др.).

Исследования технологических процессов горячей штамповки поковок с глубокими полостями показывают, что пуансон для выдавливания полости испытывает большие удельные усилия при значительном тепловом воздействии. Температура на поверхности

пуансона в наиболее нагруженной нижней части достигает 900 °С [5,7,8]. Применение теплостойких инструментальных сталей (4Х2В5МФ, 5Х3В3МФ, 2Х6В8М2К8 и др.) не позволяет решить эту проблему.

В последнее время для ускорения и повышения качества разработки технологических процессов горячей объемной штамповки широко используются методы цифрового моделирования. Для исследования технологического процесса горячей штамповки оправки прошивного стана с целью повышения стойкости инструмента и расширения технологических возможностей процесса использована программа QForm, которая хорошо зарекомендовала себя при моделировании процессов горячей объемной штамповки и позволяет моделировать формоизменение заготовки с учетом действия различных факторов, выявлять возможные дефекты поковок на этапе проектирования технологического процесса, прогнозировать износ и стойкость инструмента [9, 10].

Целью настоящей работы является разработка и исследование цифровым моделированием в программе QForm технологического процесса горячей объемной штамповки поковок типа оправки прошивного стана из трубной заготовки для повышения стойкости инструмента и расширения технологических возможностей процесса.

Основная часть

Анализ известных технологических процессов горячей штамповки поковок с глухими и узкими полостями типа муфт, стаканов, гильз, оправок прошивных станов показывает, что наибольшие удельные усилия, разогрев и низкую стойкость имеет пуансон для выдавливания внутренней полости [5,7,8] на который действует высокая удельная сила до 600 МПа при температуре на поверхности пуансона до 900°С. На основе конструктивно-технологического анализа особенностей оправки прошивного стана и существующих технологических процессов [5, 7, 8, 11] для снижения нагрева инструмента и действующих на него усилий и повышения стойкости инструмента в настоящей работе предложен технологический процесс горячей штамповки оправки, включающий в себя операции формирования рабочего конуса, концевого выступа, внутренней водо-охлаждаемой полости и заднего конического участка оправки горячей объемной штамповкой за два перехода из трубной заготовки. При этом на первом переходе происходит штамповка рабочего конуса, концевого выступа и внутренней водо-охлаждаемой полости оправки, а на втором переходе происходит штамповка заднего конического участка оправки.

Анализ предлагаемого технологического процесса, требований к соотношению размеров заготовки при штамповке и моделирование процесса показывает, что для установки и центрирования исходной заготовки в матрице наружный диаметр трубной заготовки D_z целесообразно выбрать в пределах 0,80-0,98 диаметра D прошивной оправки, т.е. $D_z / D = 0,80-0,98$. При $D_z / D < 0,80$ увеличивается высота заготовки, зазор между заготовкой и матрицей на первом переходе, уменьшается толщина стенки заготовки и ее устойчивость. При $D_z / D > 0,98$ сложнее устанавливать заготовку в матрицу перед штамповкой.

На основе предварительных результатов цифрового моделирования предложенного процесса установлено, что внутренний диаметр трубной заготовки d_z должен находиться в пределах: $d_z/d = 0,8-1,1$, где: d - наибольший диаметр полости оправки (рисунок 2).

После определения размеров, отрезки и нагрева исходной заготовки происходит установка ее в штамп (рисунок 2а) и далее предварительное формообразование рабочего конуса, концевого выступа и внутренней водо-охлаждаемой полости оправки на первой позиции штампа (рисунок 2б).

На втором переходе происходит штамповка заднего конического участка оправки и окончательное формообразование рабочего конуса, концевого выступа и внутренней водо-охлаждаемой полости оправки (рисунок 2в). Оправка после охлаждения имеет окончательные размеры внутренней полости, рабочего конуса, концевого выступа, заднего конического участка (D, D_k, d, h, H, H_n).

Однако, анализ конструктивно-технологических особенностей оправок прошивных станов показывает, что они имеют достаточно большую высоту ($H/D = 1,9-2,8$), например, оправка диаметром $D = 130$ мм будет иметь высоту не менее 250 мм. При этом глубина полости матрицы на первом переходе будет еще больше, например, для оправки длиной 250 мм глубина полости должна быть не менее 270 мм. При этом анализ параметров кривошипных горячештамповочных прессов показывает, что ход нижнего выталкивателя пресса ограничен и составляет $\approx 0,2$ от рабочего хода ползуна и при нижнем расположении матрицы поковку после штамповки невозможно или трудно захватить для извлечения ее из штампа. Поэтому в настоящей работе предлагается матрицы для предварительного формообразование рабочего

конуса, концевого выступа оправки на первой позиции штампа и окончательного формообразования оправки на втором переходе, а также выталкиватели поковок расположить в верхней части штампа, а матрицу для штамповки заднего конического участка на втором переходе и пуансоны для предварительного окончательного формообразования полости на первом и втором переходах – в нижней (рисунок 3). При верхнем расположении матрицы достаточно небольшого перемещения верхнего выталкивателя, чтобы поковка выпала из матрицы под действием собственного веса. Такое расположение матриц упрощает также обслуживание штампа и очистку его от загрязнений. Использование трубной заготовки в этом случае упрощает процесс установки и центрирования заготовки.

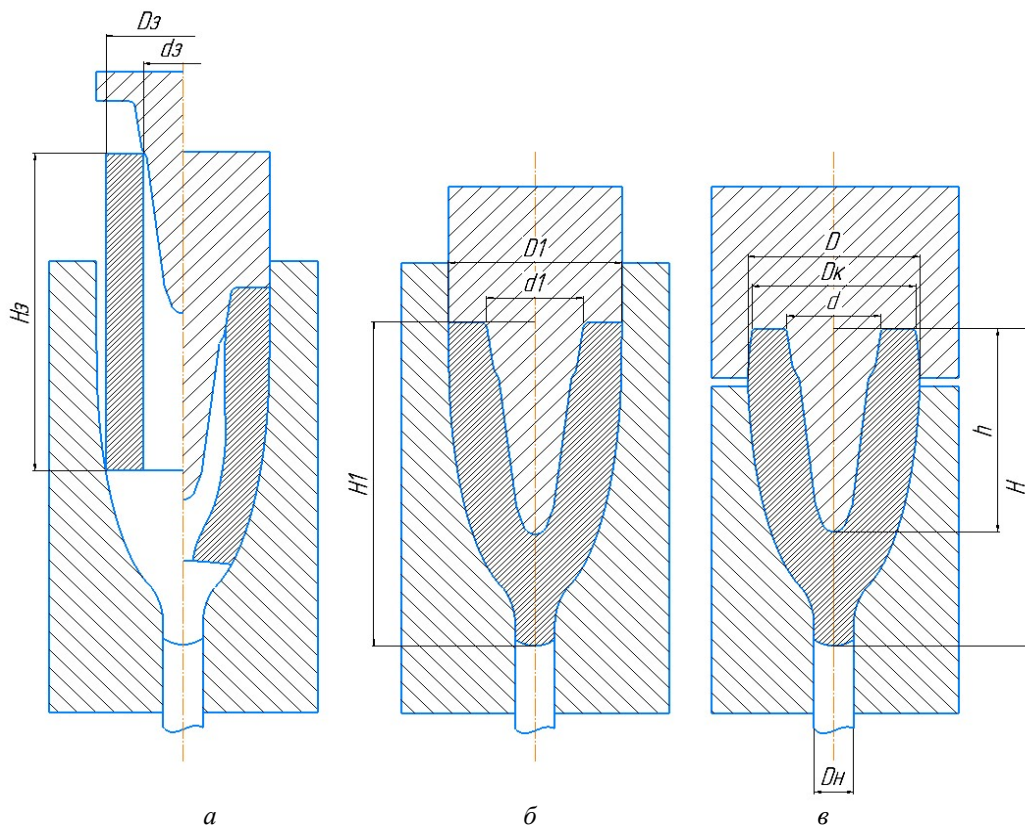


Рисунок 2 - Технологические переходы горячей штамповки поковки типа оправки прошивного стана из трубной заготовки: а-установка заготовки в штамп; б, в - первый и второй переходы штамповки

Диаметр заготовки D_1 , получаемый на первой позиции, для надежной установки и центрирования на следующем переходе выбирается равным или на 1-2 мм меньше диаметра заднего конического участка оправки D_k .

Разработка и исследование цифровым моделированием в программе QForm предложенного способа изготовления прошивных оправок из трубной заготовки выполнено на примере технологического процесса горячей штамповки оправки прошивного стана $D=130$ мм, $H=250$ мм, $D_k = 126$ мм, $D_o = 70$ мм, $h = 160$ мм из стали 20ХН4ФА (рисунок 3). Для проведения цифрового моделирования в соответствии с методикой моделирования в программе QForm была подготовлена технологическая оснастка, из базы данных программы определены исходные данные (температура металла и его механические характеристики, условия трения, материал и условия остановки инструмента, его температура, условия работы и др.). Моделирование проводилось с использованием закона трения Леванова со стандартными параметрами, фактор трения $m=0.4$. В качестве смазки выбрана смесь графита с водой. Для уменьшения охлаждения заготовки и уменьшения температурного перепада по сечению штампуемой поковки используется подогрев инструмента, температура подогрева принята 200°C . Сопротивление деформации при заданной температуре горячей штамповки в зависимости от степени и скорости деформации принимается из базы данных программы QForm.

В соответствии с выше приведенными рекомендациями при разработке и моделировании технологического процесса горячей штамповки оправки прошивного стана $D=130$ мм, $H=250$ мм использована трубная заготовка с наружным диаметром $D_3 = 116$ мм (D_3

$/D = 0,89$) и внутренним диаметром $d_3 = 70$ мм ($d_3 / d = 1,0$). После выбора наружного и внутреннего диаметров из условия постоянства объема определена высота трубной заготовки $H_3 = 271$ мм. Температура нагрева исходной заготовки принята 1200 °С. При определении размеров заготовки по переходам диаметр заготовки после первого перехода (D_1) принят равным диаметру заднего конического участка оправки ($D_1 = D_k$). При разработке технологии изготовления оправки $D=130$ мм принимаем: $D_1 = 126$ мм (рисунок 3б). При исследовании характера формоизменения поковки установлено, что высота получаемой заготовки после первого перехода в зависимости от размеров штампуемой оправки и принятого размера D_1 на 2-6 мм меньше высоты готовой оправки. При штамповке оправки $D=130$ мм, $H=250$ мм высота заготовки, получаемой на первом переходе при заданных условиях равна $H_1 \approx 248$ мм (рисунок 3б). На следующем переходе при штамповке заднего конического участка высота на 2-6 мм увеличивается. При этом при штамповке обратного конуса на втором переходе между матрицами 1, 2 (рисунок 3в) может образоваться небольшой заусенец, который удаляется при последующей обработке оправки.

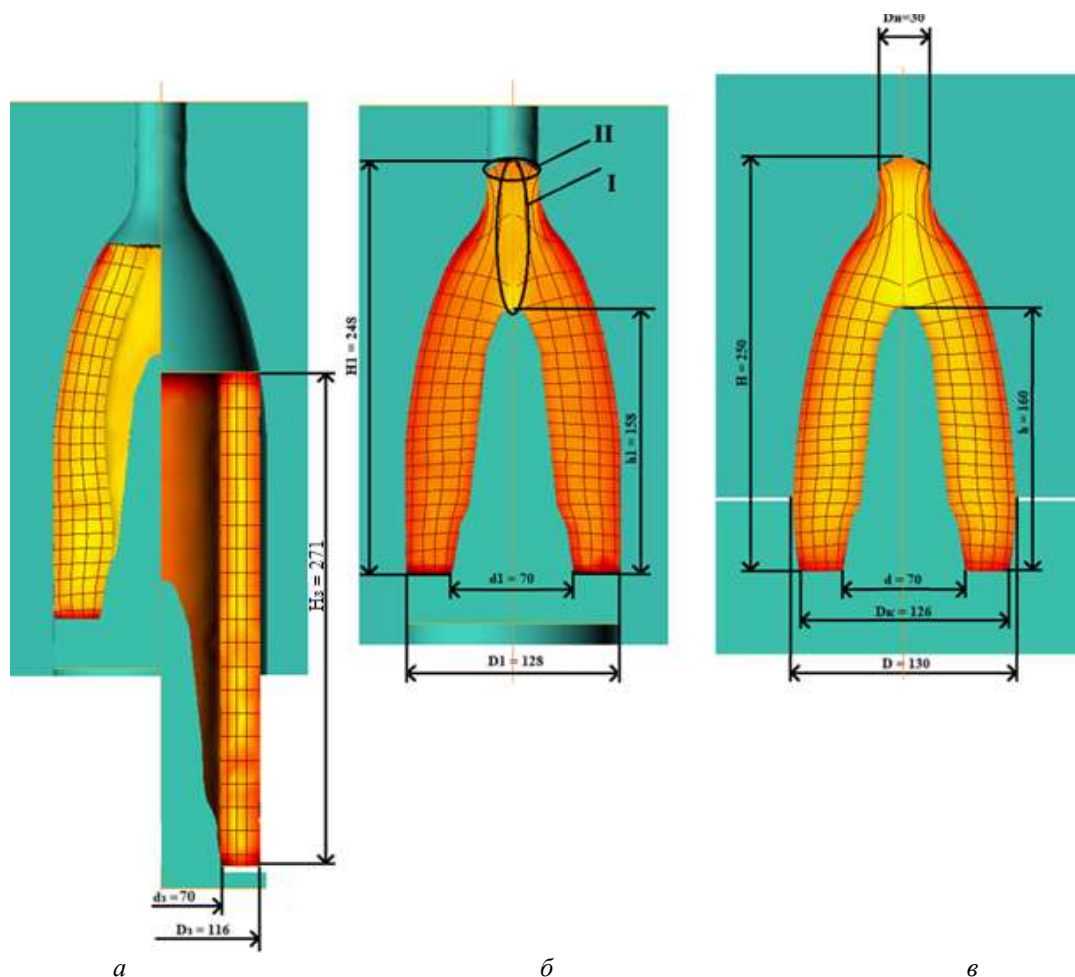


Рисунок 3 - Технологические переходы при горячей штамповке оправки прошивного стана $D=130$ мм, $H=250$ мм из трубной заготовки $D_3=116 \times 271$ мм:

а-установка заготовки в штамп; б-первый переход штамповки; в-второй переход

Цифровое моделирование процесса показало, что технологическая сила на первом переходе при использовании трубной заготовки с внутренним диаметром $d_3 = 70$ мм равна 8,2 МН.

Цифровое моделирование технологического процесса горячей штамповки оправок прошивного стана показало, что температура по сечению поковки на первом переходе находится в диапазоне $t=940-1269$ °С. При этом температура металла в осевой зоне поковки (зона I, рисунок 3б) находится в области 1220-1260 °С, что соответствует температуре кузнечной сварки и обеспечивает надежное соединение внутренних стенок трубной заготовки в зоне I.

Среднее напряжение по сечению поковки – $\sigma_{cp} = +56 \div (-676)$ МПа, при этом положительное значение σ_{cp} наблюдается только в концевой части оправки (зона II, рисунок

36). Вследствие этого на торце концевой части поковки после первого перехода может наблюдаться небольшой дефект в виде борозды. Однако на втором переходе штамповки этот дефект полностью исчезает.

Накопленная пластическая деформация по сечению поковки находится в пределах $\varepsilon = 0,17 - 3,24$. При этом в зоне I степень деформации $\varepsilon = 2,4 - 3,1$, что также способствует надежному соединению металла в зоне I, так как для кузнечной сварки необходима значительная пластическая деформация металла в зоне соединения.

На рисунке 4 представлен график изменения технологической силы и характер формоизменения поковки на первом (а) и втором (б) переходах при получении оправки прошивного стана $D=130$ мм, $H=250$ мм.

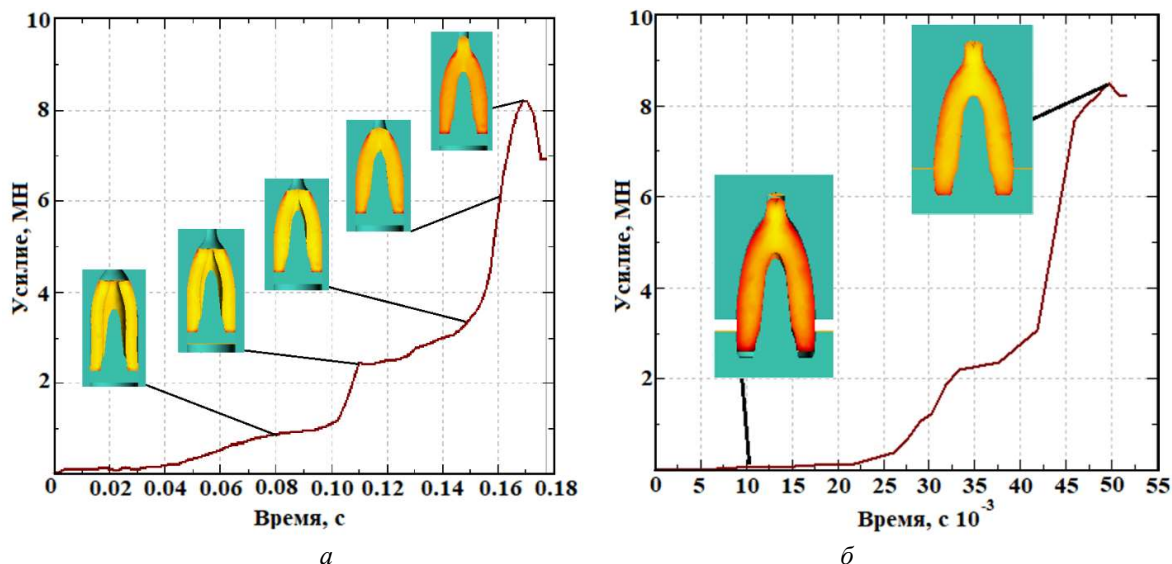


Рисунок 4 - График изменения технологической силы и характер формоизменения поковки на первом (а) и втором (б) переходах при получении оправки прошивного стана $D=130$ мм, $H=250$ мм

Характер формоизменения заготовки на первом переходе показывает, что в начале процесса происходит осадка верхней части трубной заготовки и заполнение полости между нижней частью пуансона и матрицей. Далее идет постепенное заполнение остальной части полости снизу вверх, при этом соприкосновение горячего металла заготовки с наиболее тонкой частью пуансона происходит в последний момент штамповки. Вследствие этого время контакта тонкой части пуансона с металлом в процессе штамповки незначительно. Пошаговый анализ процесса показывает, что оно составляет не более 0,1с. Это способствует снижению температуры нагрева пуансона в тонкой его части. Температура поверхности пуансона в этой части на первом переходе находится в пределах от 270-370 °С. Температура в нижней части выше и находится в пределах от 370-600°С. Более низкая температура в верхней (более тонкой) части пуансона объясняется характером формоизменения поковки, горячий металл соприкасается с пуансоном в верхней части полости только в последний момент штамповки (рисунок 4а). Значение температуры и среднего напряжения на поверхности пуансона и матрицы представлено на рисунке 5а, б.

Изучение характера перемещения металла по сечению поковки по переходам с использованием линий Лагранжа (рисунок 3) показывает, что линии Лагранжа плавно огибают контур поковки и не выходят на поверхность по всей рабочей зоне оправки. Это способствует формированию в поверхностных слоях оправки волокнистой макроструктуры, что обеспечивает повышение износостойкости оправки [14, 15].

Исследование условий работы пуансона на первой позиции штамповки показывает, что в наиболее нагруженной части (зона II, рисунок 5а, б) пуансон работает в следующих условиях: температура на поверхности $t = 270-370$ °С, среднее напряжение $\sigma_{ср} = 60 - 110$ МПа, интенсивность напряжений $\sigma_{ин} = 85-90$ МПа. Анализ механических свойств сталей, применяемых для изготовления таких пуансонов, показывает, что при температуре 600°С сопротивление деформации таких сталей $\sigma_T \approx 150$ МПа, что свидетельствует о приемлемых условиях работы инструмента при горячей штамповке оправок прошивных станом из трубной заготовки.

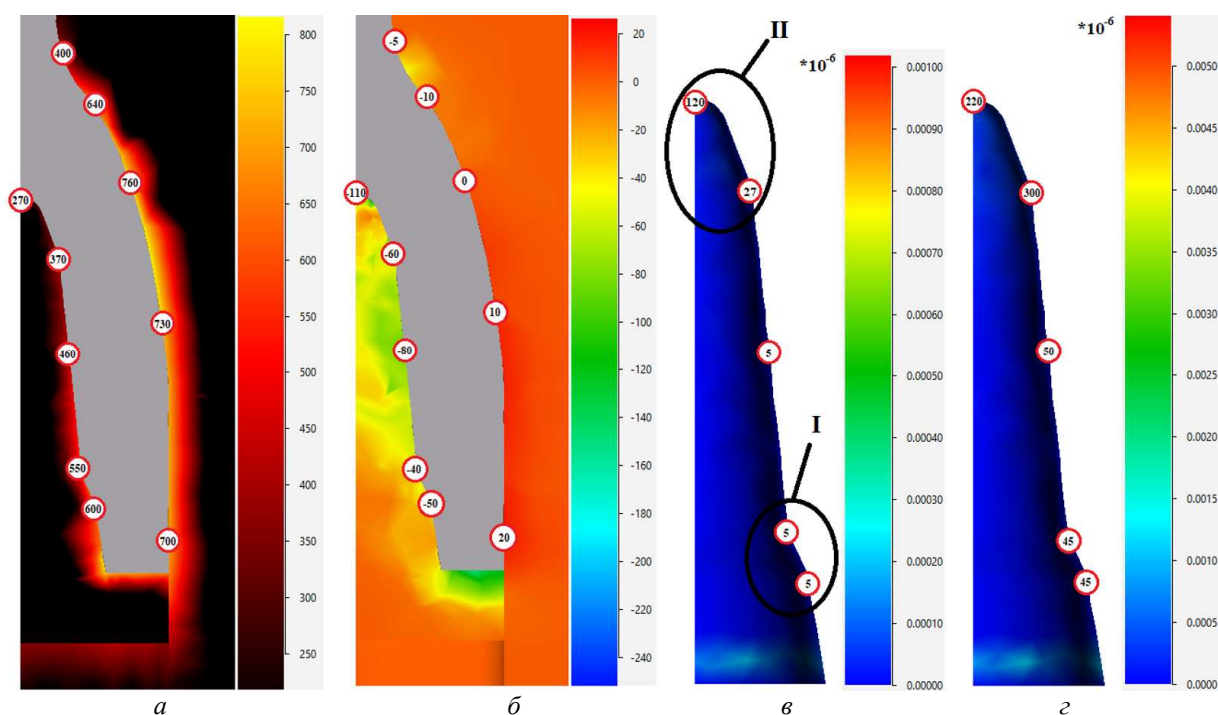


Рисунок 5 - Температура (а), среднее напряжение (б) пуансона и матрицы и показатели износа пуансона $K_{тр}$ (в) и $K_{дав}$ (г) на первом переходе горячей штамповки оправки прошивного стана из трубной заготовки $D_3=116$ мм, $d_3 = 70$ мм

Моделирование технологического процесса пластической деформации в программе QForm дополнительно позволяет контролировать температуру инструмента по сечению, среднее напряжение, интенсивность напряжений и параметры, характеризующие износ инструмента с учетом свойств материала инструмента, температурно-скоростных условий на его поверхности и заданных условий трения. В работе исследованы условия работы пуансона и матрицы (температура, среднее напряжение, интенсивность напряжений, показатели износа) при получении оправки прошивного стана $D=130$ мм, $H=250$ мм при $D_3=116$ мм, $d_3 = 70$ мм и $d_3 = 60$ мм.

Изучение характера течения металла на первом переходе показывает, что при горячей штамповке оправки прошивного стана из трубной заготовки скорость сдвига металла по поверхности пуансона не значительна, что должно способствовать уменьшению его износа от действия сил трения. Коэффициенты, характеризующие износ пуансона от действия сил трения ($K_{тр}$) и давления ($K_{дав}$), полученные цифровым моделированием процесса штамповки оправки из трубной заготовки подтверждают это. На рисунке 5в,г представлены показатели износа пуансона $K_{тр}$ и $K_{дав}$ на первом переходе горячей штамповки оправки прошивного стана $D=130$ мм, $H=250$ мм при $D_3=116$ мм, $d_3 = 70$ мм, которые находятся в следующих пределах: $K_{тр}=0,000005-0,000120$, $K_{дав}=0,000045-0,000220$.

Для анализа влияния размеров заготовки на характер износа инструмента был дополнительно изучен характер формоизменения и износ инструмента при использовании заготовки при $d_3 = 60$ мм. Значения коэффициентов $K_{тр}$ и $K_{дав}$ для пуансона при $d_3 = 60$ мм изменились незначительно и находятся в следующих пределах: $K_{тр}=0,000006-0,000120$, $K_{дав}=0,000040-0,000210$. Анализ величины и характера распределения коэффициентов $K_{тр}$ и $K_{дав}$ показывает, что показатели износа инструмента незначительно зависят от диаметра заготовки в исследуемом диапазоне $60 < d_3 < 70$ мм. Однако при использовании заготовки $d_3 = 60$ мм заметно увеличивается $K_{тр}$ инструмента в зоне I. Это можно объяснить тем, что при $d_3 = 60$ мм в начальной стадии процесса происходит раздача заготовки пуансоном, вследствие этого происходит значительное перемещение горячего металла по пуансону и его износ в зоне I. Однако показатели износа в зоне I значительно ниже, чем в зоне II. При этом необходимо отметить, что полученные значения $K_{тр}$ и $K_{дав}$ значительно ниже в сравнении со штамповкой оправки прошивного стана из обычной (сплошной) заготовки [11]. Значения коэффициентов $K_{тр}$ и $K_{дав}$ при горячей штамповке из трубной заготовки свидетельствуют о снижении износа пуансона, что должно способствовать повышению его стойкости и расширению

технологических возможностей процесса горячей штамповки поковок с полостями из трубных заготовок.

Исследование условий работы матрицы на первой позиции штамповки (рисунок 5а, б) показывает, что матрица работает в следующих условиях: температура на поверхности $t = 400-760$ °С, среднее напряжение $\sigma_{\text{ср}} = (-10) \div (+20)$ МПа. Значения коэффициентов $K_{\text{тр}}$ и $K_{\text{дав}}$ для матрицы при $d_3 = 60$ мм находятся в следующих пределах (рисунок 6 а,б): $K_{\text{тр}} = 0,00025 - 0,00055$, $K_{\text{дав}} = 0,00150 - 0,00490$. При $d_3 = 70$ мм значения $K_{\text{тр}}$ и $K_{\text{дав}}$ находятся в следующих пределах: $K_{\text{тр}} = 0,00024 - 0,00044$, $K_{\text{дав}} = 0,00160 - 0,00513$. Анализ полученных результатов показывает, что износ матрицы от сил действия трения и давления в зависимости от внутреннего диаметра d_3 изменяется разнонаправленно, при увеличении d_3 значение $K_{\text{дав}}$ увеличивается на 5-6%, значение $K_{\text{тр}}$ уменьшается на 20%.

Характер изменения технологической силы и формоизменения поковки на втором переходе представлен на рисунке 4б. Максимальное усилие штамповки на втором переходе равно 8,5 МН. Характер формоизменения поковки на втором переходе показывает, что в начале происходит формообразование заднего конического участка, небольшое увеличение высоты поковки и окончательное оформление концевой участка оправки. На втором переходе может образоваться небольшой заусенец между верхним пуансоном-матрицей и нижней матрицей (рисунок 6г).

Температура по сечению поковки на втором переходе находится в диапазоне $t = 810-1220$ °С, что соответствует температурному интервалу горячей штамповки.

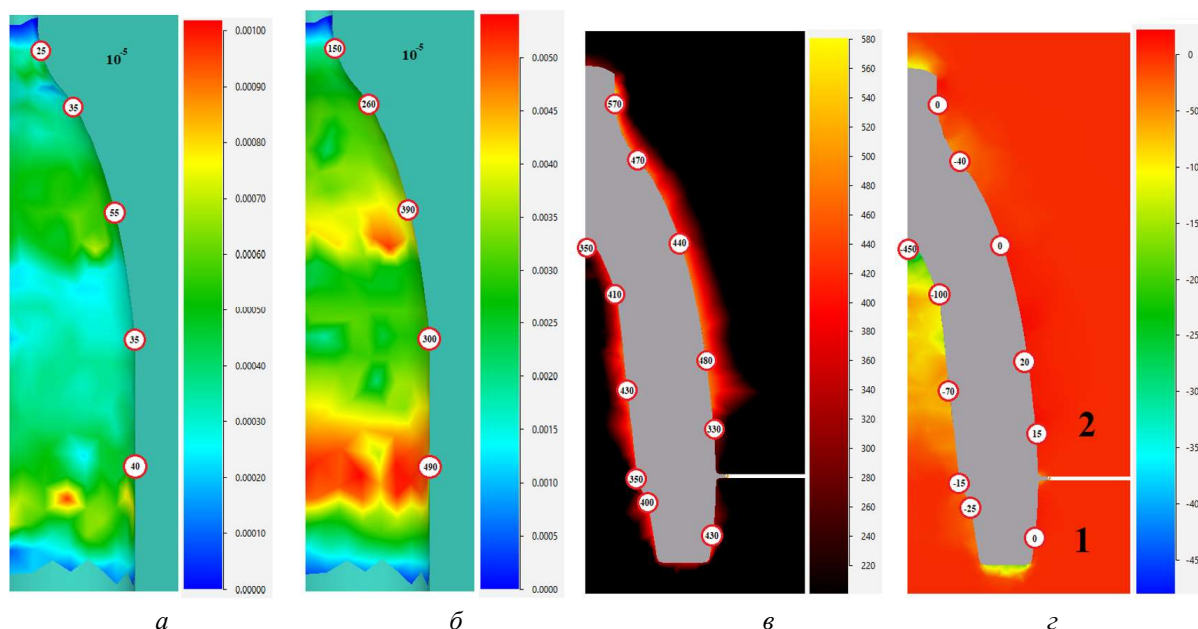


Рисунок 6 - Показатели износа матрицы $K_{\text{тр}}$ (а) и $K_{\text{дав}}$ (б) на первом переходе и температура (в) и среднее напряжение (г) пуансона 1 и матрицы 2 на втором переходе при горячей штамповке оправки прошивного стана из трубной заготовки $D_3=116$ мм, $d_3 = 70$ мм (а,б) и $D_3=116$ мм, $d_3 = 60$ мм (в,г)

Среднее напряжение по сечению поковки — $\sigma_{\text{ср}} = +3 \div (-905)$ МПа, при этом положительное значение наблюдается только в области заусенца.

Накопленная пластическая деформация по сечению поковки находится в пределах $\epsilon = 0,19 - 4,45$. Цифровое моделирование технологического процесса горячей штамповки оправки из трубной заготовки дефектов на оправке (зажимов, трещин, несоответствие размеров) не выявило.

Как показало цифровое моделирование технологического процесса горячей штамповки оправки прошивного стана рассмотренные технологические параметры (сила, характер формоизменения, износ инструмента) на втором переходе не зависят от отношения внутреннего диаметра отверстия трубной заготовки к диаметру полости в рассмотренном диапазоне $0,8 < d_3/d < 1,1$.

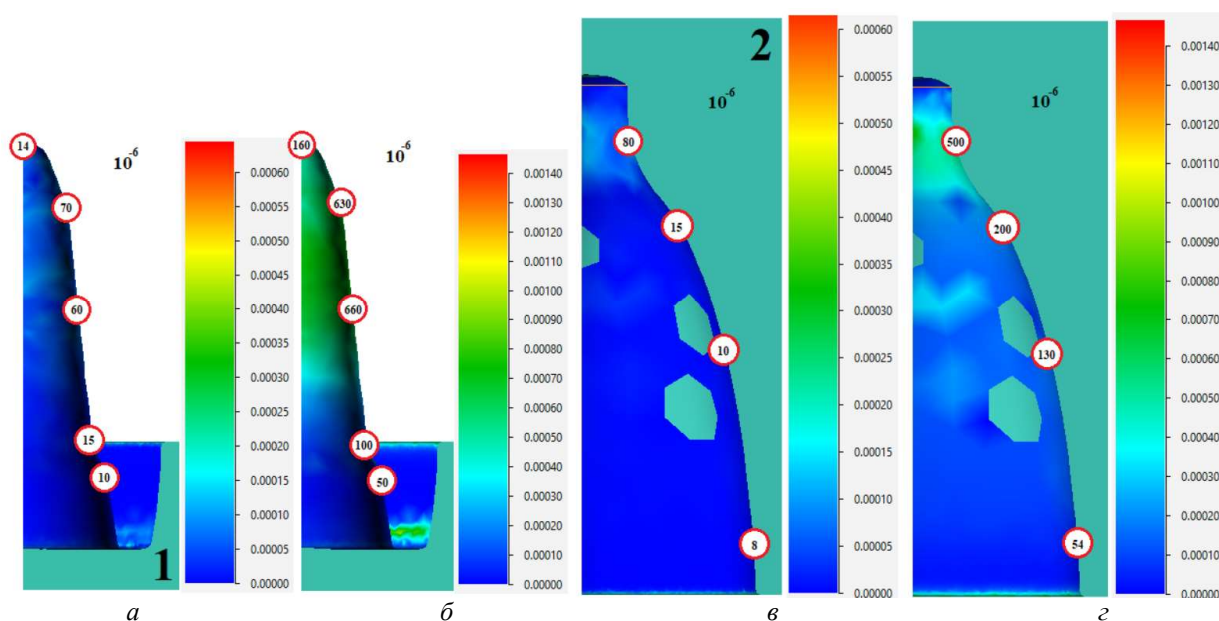


Рисунок 7 - Показатели износа $K_{тр}$ и $K_{дав}$ пуансона 1 (а, б) и матрицы 2 (в, г) на втором переходе

Температура и среднее напряжение на поверхности инструмента на втором переходе представлены на рисунке 6 в,г. Температура на поверхности пуансона 1 находится в пределах $t=350-430$ °С, температура на поверхности матрицы 2 – $t=330-570$ °С. Среднее напряжение на поверхности пуансона $\sigma_{ср} = -(15 \div 450)$ МПа, на поверхности матрицы: $\sigma_{ср} = 0 \div (-40)$ МПа.

На рисунок 7 представлен характер и показатели износа нижнего пуансона 1 (а, б) и верхней матрицы 2 (в, г) на втором переходе горячей штамповки оправки прошивного стана $D=130$ мм, $H=250$ мм из трубной заготовки $D_3=116$ мм, определяемый коэффициентами $K_{тр}$ (а,в) и $K_{дав}$ (б,г). Значения коэффициентов $K_{тр}$ и $K_{дав}$ для пуансона находятся в следующих пределах: $K_{тр}=0,000010-0,000070$, $K_{дав}=0,000050-0,0000660$. Значения коэффициентов $K_{тр}$ и $K_{дав}$ для матрицы находятся в следующих пределах: $K_{тр} = 0,000008 - 0,000080$, $K_{дав} = 0,000054 - 0,000500$.

Анализ полученных результатов показывает, что характер износа пуансонов на первом и втором переходах отличается. На втором переходе наибольшее значение коэффициентов $K_{тр} = 60-70$ и $K_{дав} = 630-660$ наблюдается в средней части пуансона, в то время, как на первом переходе наибольшее значение коэффициентов $K_{тр} = 120$ и $K_{дав} = 220-300$ наблюдается в верхней части пуансона. Изменение характера износа инструмента на первом и втором переходах объясняется характером формоизменения заготовки на этих переходах.

Для реализации технологического процесса горячей штамповки поковок с полостями типа оправок прошивного стана предложена оснастка. На рисунке 8 представлен штамп для горячей штамповки оправки прошивного стана $D130 \times 250$ мм из трубной заготовки $D_3=116 \times 271$ мм.

Штамп имеет две позиции штамповки (I, II) и состоит из матриц 1, 2, расположенных в верхней части штампа, пуансона 3 и пуансона-матрицы 4, расположенных в нижней части штампа, верхней и нижней плит 5,6, выталкивателей 9, 10. Позициями 7,8 обозначена поковка по переходам. На первом переходе (I) вначале происходит установка трубной заготовки на пуансон 3 и предварительная штамповка рабочего конуса, концевого выступа и внутренней водо-охлаждаемой полости оправки. Диаметр получаемой заготовки на первом переходе $D_1=126$ мм, $d_1=70$ мм, высота – $H_1 \approx 248$ мм. На втором переходе (II) происходит штамповка заднего конического участка оправки и окончательное формообразование внутренней полости, рабочего и концевого участков. Поковка оправки имеет окончательные размеры. Размеры оправки после второго перехода штамповки: $D=130$ мм, $D_k=126$ мм, $H=250$ мм, $d=70$ мм, $h=160$ мм. При этом при разработке штамповой оснастки необходимо учитывать, что размеры инструмента (матрицы, пуансона) выбираются с учетом уменьшения размеров штампуемой поковки после ее охлаждения. Поэтому размеры инструмента (пуансон, пуансон-матрица, матрицы) необходимо увеличить на 1-1,2 %.

Анализ данных, полученных в результате разработки и исследований предложенного технологического процесса горячей штамповки поковок с глубокими полостями типа оправки прошивного стана из трубной заготовки (технологические усилия, напряжения, температура,

показатели износа инструмента), свидетельствует о снижении показателей износа инструмента для получения глубоких полостей при использовании предложенной технологии в сравнении с технологией при использовании сплошной заготовки из прутка. Это позволит значительно повысить стойкость инструмента и снизить требования к свойствам материала для его изготовления.

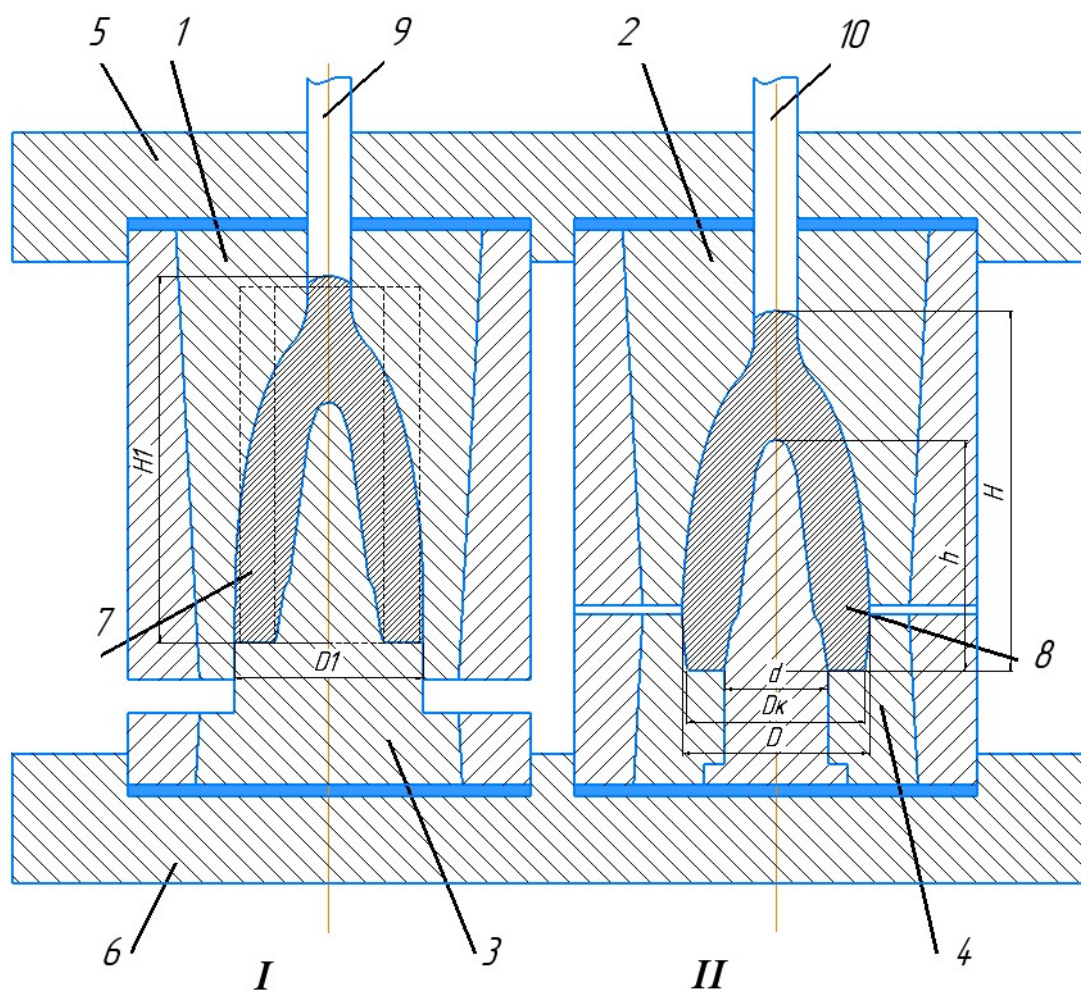


Рисунок 8 - Штамп для горячей штамповки оправки $D=130$ мм, $H=250$ мм из трубной заготовки $D_z=116 \times 271$ мм

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования в промышленности предложенного способа изготовления изделий с глубокими полостями горячей объемной штамповкой из трубной заготовки.

Заключение

1. Разработан и исследован технологический процесс горячей штамповки поковок с глубокими полостями, например, полых прошивных оправок, из трубной заготовки с расположением матрицы на первом и втором переходе в верхней части штампа, обеспечивающий снижение износа и повышение стойкости инструмента.

2. Выполнено цифровое моделирование и определены параметры технологических переходов разработанного процесса горячей штамповки поковок. Определено напряженное состояние, температурные условия и показатели износа инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилкин Н. М., Бухмиров В. В. Прошивная оправка. М.: МИСиС, 2000, 125с.
2. Обработка металлов давлением: Учеб. для вузов / Б. А. Романцев, А. В. Гончарук, Н. М. Вавилкин, С. В. Самусев. М.: МИСиС, 2008, 960с.
3. Сазоненко И.О., Земцов В.А., Юрчак А.Н. К вопросу повышения стойкости оправок прошивных станков // Литье и металлургия. 2012. № 4 (68). С. 135–138.

4. Шамилов А.Р. Король А.В., Гончарук А.В. Способы увеличения эксплуатационных характеристик оправок прошивного стана // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2022. Т. 22. № 3. С. 76–83.
5. Мышечкин А.А., Юсупов В.С., Скрипник С.В. Определение оптимальных параметров процесса горячей объемной штамповки оправки прошивного стана моделированием в программе QForm// Прокатное производство. Приложение к журналу "Технология металлов". 2023. № 21
6. Способ изготовления оправки для прошивного стана. Патент на изобретение RU №2791720. Заявл. 01.07.2022; Опубликовано: 13.03.2023, Бюл. № 8. Авторы: Мышечкин А.А., Белоусов И.В., Юсупов В.С., Кудрявцев И.В., Скрипник С.В.
7. Мышечкин А.А., Юсупов В.С., Преображенская Е.В., Скрипник С.В. Моделирование процесса горячей штамповки оправки прошивного стана.-Ж. Сталь, №10, 2022г., с.30-34.
8. Биба Н.В., Стебунов С.А., Гладков Ю.А. и др. QForm – универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 1. С. 36–42.
9. Сомкина А.С., Власов А.В. Применение математического моделирования методом конечных элементов для совершенствования процессов объемной штамповки деталей из цветных сплавов // Инженерный вестник. 2014. № 12. С. 71–82.
10. Мышечкин А.А., Кравченко И.Н., Преображенская Е.В., Зуев В.В., Скрипник С.В. Разработка технологического процесса горячей объемной штамповки поковок с использованием цифрового моделирования. - Ж. Новые огнеупоры, № 8, 2024, с.62-68.
11. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л. Технологияковки и объемной штамповки. Ч. 1. Объемная штамповка выдавливанием. 2-изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение-1, 2005. 500 с.
12. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка // Под ред. Е.И. Семенова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. 592 с.
13. Соколов Г.Н., Литвиненко-Арьков В.Б., Лысак В.И. Способы повышения ресурса прошивных оправок трубопрокатных станков. –Ж. Заготовительные производства в машиностроении, № 11, 2011, с.10-13.
14. Лакиза В.А., Романцев Б.А., Алещенко А.С., Назаров К.И. Исследование износа оправок при прошивке заготовок на стане винтовой прокатки «МИСиС-130Д». Металлург. 2023, № 11, с. 124–128.

Мышечкин Алексей Александрович
МИРЭА – Российский
технологический университет
Кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Цифровых и
аддитивных технологий»
119454, Россия, г. Москва пр-т
Вернадского, д. 78
Тел.: +7 (916) 685-56-39

Зуев Владимир Валерьевич
МИРЭА – Российский
технологический университет
Кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры
«Цифровых и аддитивных
технологий»
119454, Россия, г. Москва пр-т
Вернадского, д. 78
Тел.: +7 (926) 678-74-02

Преображенская Елена Викторовна
МИРЭА – Российский
технологический университет
Кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Цифровых и
аддитивных технологий»
119454, Россия, г. Москва пр-т
Вернадского, д. 78
Тел.: +7 (926) 869-45-04

Боровик Татьяна Николаевна
МИРЭА – Российский
технологический университет
Старший преподаватель кафедры
«Цифровых и аддитивных
технологий»
119454, Россия, г. Москва пр-т
Вернадского, д. 78
Тел.: +7 (926) 262-72-36

Скрипник Сергей Васильевич
МИРЭА – Российский
технологический университет
Преподаватель кафедры
«Цифровых и аддитивных
технологий»
119454, Россия, г. Москва пр-т
Вернадского, д. 78
Тел.: +7 (916) 745-45-80

MYSHECHKIN A.A., ZUEV V.V., PREOBRAZHenskAYA E.V., BOROVIK T.N., SKRIPNIK S.V.

DEVELOPMENT AND RESEARCH BY DIGITAL MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF HOT STAMPING MANDRELS OF SEWING MILLS FROM A PIPE BILLET

Abstract. *The paper develops and investigates the technological process of hot-stamping forgings with blind cavities such as mandrels of sewing mills from a tube billet, which reduces tool wear and increases its durability. The proposed technology includes cutting and heating a pipe billet with an outer diameter of 0.80-0.98 of the mandrel diameter and an inner diameter of 0.78-1.1 of the largest cavity diameter and its further shaping to obtain a working cone, a rear conical section, an inner water-cooled cavity and an end protrusion of the mandrel by hot volumetric stamping in two transitions, with stamping taking place at the first transition the working cone, the end protrusion and the inner water-cooled cavity, and at the second transition, the rear conical section of the mandrel is stamped. To select the parameters of the proposed process by digital modeling in the QForm program, a study of technological transitions was performed. The nature of the shape change of the workpiece, the stress-strain state and the technological force along the stamping transitions are investigated. The nature and intensity of tool wear across transitions is investigated.*

Keywords: *forging, modeling, QForm program, hot volume stamping, tube billet, mandrel, stamping transitions, temperature, stresses, deformations, force parameters, wear.*

BIBLIOGRAPHY

1. Vavilkin N. M., Bukhmirov V. V. Stitching mandrel. M.: MISIS, 2000, 125 p.
2. Metal forming: Textbook. for universities / B. A. Romantsev, A. V. Goncharuk, N. M. Vavilkin, S. V. Samusev. M.: MISIS, 2008, 960 p.
3. Sazonenko I.O., Zemtsov V.A., Yurchak A.N. On the issue of increasing the durability of piercing mill mandrels // Casting and metallurgy. 2012. No. 4 (68). pp. 135–138.
4. Shamilov A.R. Korol A.V., Goncharuk A.V. Methods for Increasing the Performance Characteristics of Piercing Mill Mandrels // Bulletin of the South Ural State University. 2022. Vol. 22. No. 3. Pp. 76–83.
5. Myshechkin A.A., Yusupov V.S., Skripnik S.V. Determination of Optimal Parameters of the Hot Die Forging Process of a Piercing Mill Mandrel by Modeling in the QFORM Program // Rolling Production. Supplement to the Journal "Technology of Metals". 2023. No. 21
6. Method for Manufacturing a Mandrel for a Piercing Mill. Patent for Invention RU No. 2791720. Claimed 01.07.2022; Published: 13.03.2023, Bull. № 8. Authors: Myshechkin A.A., Belousov I.V., Yusupov V.S., Kudryavtsev I.V., Skripnik S.V.
7. Myshechkin A.A., Yusupov V.S., Preobrazhenskaya E.V., Skripnik S.V. Simulation of the Hot Forging Process of Mandrels for Piercing Mill // Steel in Translation. 2022. Vol. 52. No. 10. P. 974–978.
8. Biba N.V., Stebunov S.A., Gladkov Yu.A., et al. QForm – a universal and efficient program for modeling forging and stamping // Forging and stamping production. Processing of materials by pressure. 2011. No. 1. Pp. 36–42.
9. Somkina A.S., Vlasov A.V. Application of mathematical modeling by the finite element method to improve the processes of volume stamping of parts from non-ferrous alloys // Engineering Bulletin. 2014. No. 12. Pp. 71–82.
10. Myshechkin A.A., Kravchenko I.N., Preobrazhenskaya E.V., Zuev V.V., Skripnik S.V. Development of a technological process for hot volume stamping of forgings using digital modeling. - J. Novye ognepury, No. 8, 2024, pp. 62-68.
11. Dmitriev A. M., Vorontsov A. L. Forging and Die Forging Technology. Part 1. Die Forging by Extrusion. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005. 500 p.
12. Forging and Stamping: Handbook. In 4 volumes. Volume 2. Hot Die Forging // Ed. by E. I. Semenov. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Mashinostroenie, 2010. 592 p.
13. Sokolov G. N., Litvinenko-Arkov V. B., Lysak V. I. Methods for Increasing the Service Life of Piercing Mandrels of Pipe-Rolling Mills. - J. Blank production in mechanical engineering, No. 11, 2011, pp. 10-13.
14. Lakiza V.A., Romantsev B.A., Aleshchenko A.S., Nazarov K.I. Study of wear of mandrels during piercing of blanks on the screw rolling mill "MISiS-130D". Metallurgist. 2023, No. 11, pp. 124-128.

Myshechkin Aleksey Aleksandrovich
MIREA – Russian Technological
University
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Digital
and Additive Technologies
119454, Russia, Moscow, Vernadsky
Ave., 78
Tel.: +7 (916) 685-56-39

Zuev Vladimir Valerievich
MIREA – Russian Technological
University
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Associate
Professor of the Department of
Digital and Additive Technologies
119454, Russia, Moscow,
Vernadsky Ave., 78
Tel.: +7 (926) 678-74-02

Preobrazhenskaya Elena Viktorovna
MIREA – Russian Technological
University
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Associate
Professor of the Department of
Digital and Additive Technologies
119454, Russia, Moscow, Vernadsky
Ave., 78
Tel.: +7 (926) 869-45-04

Borovik Tatyana Nikolaevna
MIREA – Russian Technological
University
Senior Lecturer, Department of Digital
and Additive Technologies
119454, Russia, Moscow, Vernadsky
Ave., 78
Tel.: +7 (926) 262-72-36

Skripnik Sergey Vasilyevich
MIREA – Russian Technological
University
Lecturer, Department of Digital
and Additive Technologies
119454, Russia, Moscow,
Vernadsky Ave., 78
Tel.: +7 (916) 745-45-80

© Мышечкин А.А., Зуев В.В., Преображенская Е.В., Боровик Т.Н., Скрипник С.В., 2025

КОЛОСОВСКИЙ А.М., КОЙЧЕВ В.С., РОЖКОВ А.С., ЧЕРКАСОВ В.Е.

АДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАПАСНЫХ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Аннотация. Статья посвящена решению задачи ремонта и изготовления дефицитных деталей импортных сельскохозяйственных машин с использованием стремительно набирающих популярность аддитивных технологий. Показано, что такие технологии не только позволяют избавиться от дефицита дорогостоящих импортных деталей иностранной автотракторной техники, но и целесообразно организовать отделения (участки) 3d-сканирования и печати в составе сервисных предприятий по ремонту сельхозтехники. Сравнение характеристик образцов, изготовленных традиционными и аддитивными технологиями, выявляет преимущества и недостатки каждой технологии, важные для выбора.

Ключевые слова: аддитивные технологии; 3d-сканирование и печать; сельскохозяйственная техника; деталь; сервисные предприятия; изготовление; ремонт.

Введение

Последние более чем 10 лет в России действует стратегия импортозамещения [1], принятая в 2014 году, охватывающая практически все отрасли народного хозяйства, в т.ч. и агропромышленный комплекс. В 2022 г. ситуация с обеспечением сельхозмашин импортными запасными частями еще более обострилась. В связи указанными обстоятельствами представляет особую актуальность развитие технологий, кардинально сокращающих потребность в импортных запчастях. В качестве ответа на эти вызовы в последние несколько лет стремительно развиваются аддитивные технологии создания трехмерных объектов посредством сканирования и последующей печати деталей машин, механизмов, в том числе, и в АПК (далее, 3d-сканирование и печать). Причем, как отмечают Катаев Ю.В. и др., названные технологии уже вышли за пределы чисто научных лабораторий. Они превращаются в актуальные технологии ремонта и изготовления запасных частей машин и механизмов в условиях дефицита оригинальных запчастей импортного сельскохозяйственного оборудования [7]. Задается этому процессу позитивная динамика за счет благоприятной политической поддержки Правительством РФ. Так, в соответствии с распоряжением Правительства от 14.07.2021 N 1913-р запланирован трёхкратный рост объёма российского рынка аддитивных технологий в период с 2023 по 2030 годы (рисунок 1) [2]. Что касается ситуации на мировом рынке аддитивных технологий, то ожидается, что к 2027 году объём производства в мире достигнет 34,22 миллиарда долларов США при темпе роста 20,8%. Внедрение технологии 3d-печати в процессы производства и ремонта сельскохозяйственной техники находится на подъёме [17].

Основная часть

В настоящее время на сервисных предприятиях АПК широко используются различные технологии ремонта деталей сельхозмашин посредством восстановления их изношенных поверхностей [11]. Однако, как отмечается в различных работах [3;5;6;7;15;16;17], будущее – за аддитивными технологиями.

Целью исследования является изучение технологических возможностей аддитивных технологий в решении вопроса по обеспечению потребности отечественных предприятий АПК в дорогостоящих импортных запасных частях для автотракторной и другой сельскохозяйственной техники иностранного производства.

Рабочей гипотезой исследования является предположение о технологической возможности аддитивных технологий обеспечить требуемый уровень качества по производству и восстановлению уникальных, импортных запасных частей эксплуатируемых в АПК РФ автотракторной техники иностранного производства.

Материалы, методы и объекты исследования. В ходе исследования были использованы материалы специальной научной периодики, интернет-изданий, методы научного сравнительного, логического, статистического анализа, методы индукции и дедукции, анализа

и синтеза, графоаналитический метод. По результатам литературного анализа российских профессиональных источников были построены статистические модели, позволяющие графически интерпретировать, а также построить линии тренда развития ситуации с развитием аддитивных технологий в РФ.

На рисунке 1 представлена графическая интерпретация запланированной (прогнозируемой) динамики роста объёма российского рынка аддитивных технологий в период с 2023 по 2030 годы (при консервативном и целевом сценариях).

Как отмечает Новиков В.Г., существует несколько методов создания трёхмерных металлических изделий с помощью аддитивных технологий [15]. Один из наиболее распространенных методов – селективное лазерное спекание, где лазерный луч плавит и спекает металлический порошок. Другой метод – электронно-лучевая плавка (EBM), использующая электронный луч для тех же целей. Существуют технологии, такие как DMLS и SLS, которые обеспечивают высокую точность, но имеют меньшую скорость, в тоже время DED и FDM печатают быстрее, но менее точно.

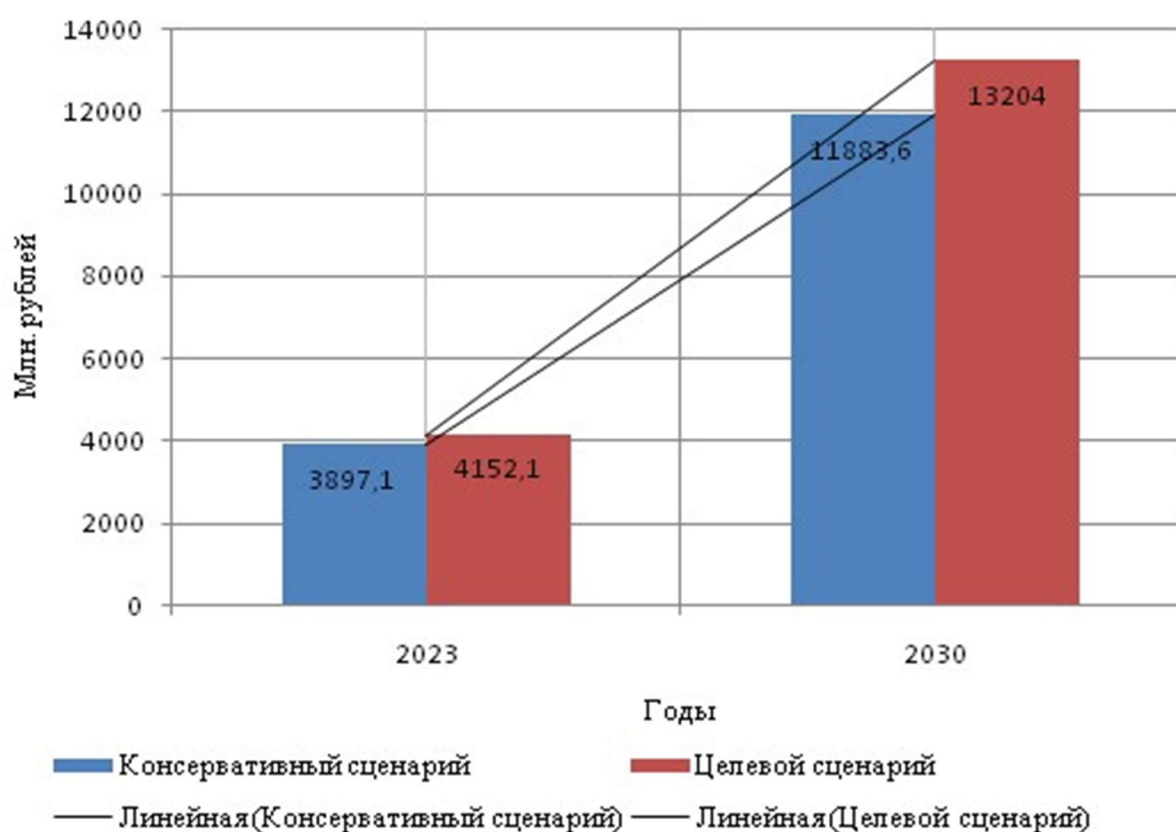


Рисунок 1 - Запланированный рост объёма российского рынка аддитивных технологий в период с 2023 по 2030 годы (при консервативном и целевом сценариях). Разработано авторами по материалам [3;4;7].

Аддитивная трехмерная технология имеет свои преимущества и свои недостатки. К преимуществам следует отнести:

- Внедрение этой технологии открывает перспективы для создания деталей со сложной геометрией. Одно из преимуществ такого подхода – возможность получения деталей, которые трудно, дорого или невозможно изготовить традиционными методами. Трёхмерная печать также позволяет снизить затраты на создание прототипов и проведение экспериментов. Благодаря 3d -печати фермеры и компании, занимающиеся агротехнологиями, могут производить компоненты по запросу, сокращая время изготовления и сводя к минимуму ожидание замены деталей. Это позволяет снизить время простоя и повысить производительность на ферме. Когда речь идёт о производстве тракторов, навесного

оборудования и самоходных машин, 3d-печать предлагает множество преимуществ. Одно из главных – повышение эффективности;

- Возможность производить детали прямо на ферме позволяет аграриям отказаться от длинных цепочек поставок и транспортировки, что в конечном итоге снижает потребление энергии и транспортно-логистические расходы;

- Традиционные методы производства часто требуют дорогостоящей оснастки, пресс-форм и производственных линий. Однако при использовании 3d-печати необходимость в этих затратных процессах отпадает. Вместо этого компоненты могут быть напечатаны непосредственно по цифровым проектам, что экономит время и деньги, делая этот метод привлекательным для мелкосерийного или индивидуального производства;

- Изделие может быть создано непосредственно на основе цифровой модели, без необходимости изготовления инструмента для получения детали. Кроме того, эта технология помогает сократить время производства деталей при их штучном изготовлении и уменьшить количество отходов материала;

- Кроме того, 3d-печать позволяет настраивать производственный процесс. С помощью этой технологии становится гораздо проще адаптировать компоненты к конкретным сельскохозяйственным операциям. Будь то изменение дизайна детали или создание совершенно нового компонента, 3d-печать обеспечивает гибкость и персонафикацию, которые зачастую не достигаются традиционными методами производства.

Следует отметить, однако, и недостатки, присущие трехмерной печати: ограниченные материалы, высокая стоимость, низкая скорость, необходимость высокой квалификации, что делает ее непрактичной для крупнопромышленного производства. Также возможно снижение качества из-за анизотропии и механических свойств, вызванных слоистым сложением материала [15].

Как указывают Ю.В. Катаев и др., по сравнению со многими традиционно применяемыми технологиями 3d-печать выгодно отличается возможностью изготовления изделий сложной формы без использования специальной дорогостоящей оснастки, например с ЧПУ, поскольку последние по сравнению с 3d-принтерами гораздо дороже. Следует также отметить, что использование станков с ЧПУ предусматривает наличие высококвалифицированного персонала, кроме того, требуется разработка сложных управляющих программ [18]. В этой связи следует отметить перспективность технологии использования 3d-сканирования для осуществления эффективного инструментального контроля процесса дефектоскопии. Оно успешно может быть применимо для последующего ремонта автотракторных деталей на примере шатуна двигателя трактора К-744 [6]. На основании проведенных Катаевым Ю.В. с соавторами исследований, была разработана новая стратегия технического обслуживания ответственных деталей автотракторной техники, основанная на использовании нескольких допусков, причем каждый допуск соответствует определенной скорости изнашивания детали. Указанными соавторами отмечается существенное снижение потока отказов и возрастание среднего срока службы. С другой стороны, как отмечают Свечников А.А. и Игнатьев М.И. для распечатки деталей металлом (предпочтительно сталью) необходимы принтеры типа SLM, работающие по принципу спекания порошкообразного металла лазером. После процесса спекания необходима, например, фрезерная обработка на станке с ЧПУ. Наиболее перспективным авторы считают 5d-принтеры (3d + вращение печатающей головы в двух проекциях дополнительно) [16].

Результаты исследования и их обсуждение. Стремительное развитие техники и технологий 3d -печати в различных отраслях народного хозяйства, в т.ч., сельском хозяйстве ставит во главу угла вопрос создания в составе ремонтных предприятий сельхозтехники специальных участков по 3d-моделированию и печати. Развитие указанной аддитивной технологии можно рассматривать как направление современных комбинированных электрофизических методов упрочнения и нанесения покрытий с использованием концентрированных источников энергии [10]. Причем, уже освоена 3d-печать различных широко применяемых конструкционных материалов, в т.ч. и сталей [5]. Как отмечают Нефёлов И.С. и Баурова Н.И., изучавшие поведение образцов из ABS-пластика в условиях

низких температур (от -30 до -50 $^{\circ}\text{C}$) [14], воздействие на образцы отрицательных температур приводит к снижению их ударной вязкости. Авторы связывают это с тем, что при низких температурах пластмассы становятся более хрупкими. Влияние отрицательных температур на пластмассы неоднозначно. Например, для некоторых образцов ударная вязкость при -50 $^{\circ}\text{C}$ выше, чем при -30 $^{\circ}\text{C}$.

Структура образца из стали 316L, полученного с помощью лазерного 3d-принтера, как указывают Казанцева Н.В. и др., зависит от технологических параметров 3d-принтера. В результате проведенных исследований фазовых превращений в образце, установлено появление в аустенитном образце дополнительных фаз (δ -феррита или мартенсита), в целом, не снижающих физико-механических характеристик исходного материала.

На рисунке 2 представлена графическая интерпретация результатов испытаний образцов по материалам различных авторов [3;5;14]. Объемная печать осуществлялась на промышленном 3d-принтере по металлу Renishaw AM 600 по технологии DMLS. Так, испытания на разрыв показали, что напечатанные образцы имеют временные сопротивления разрыву, близкие к образцам, изготовленным традиционными методами, для материалов 12X18H10T и AlSi10Mg.

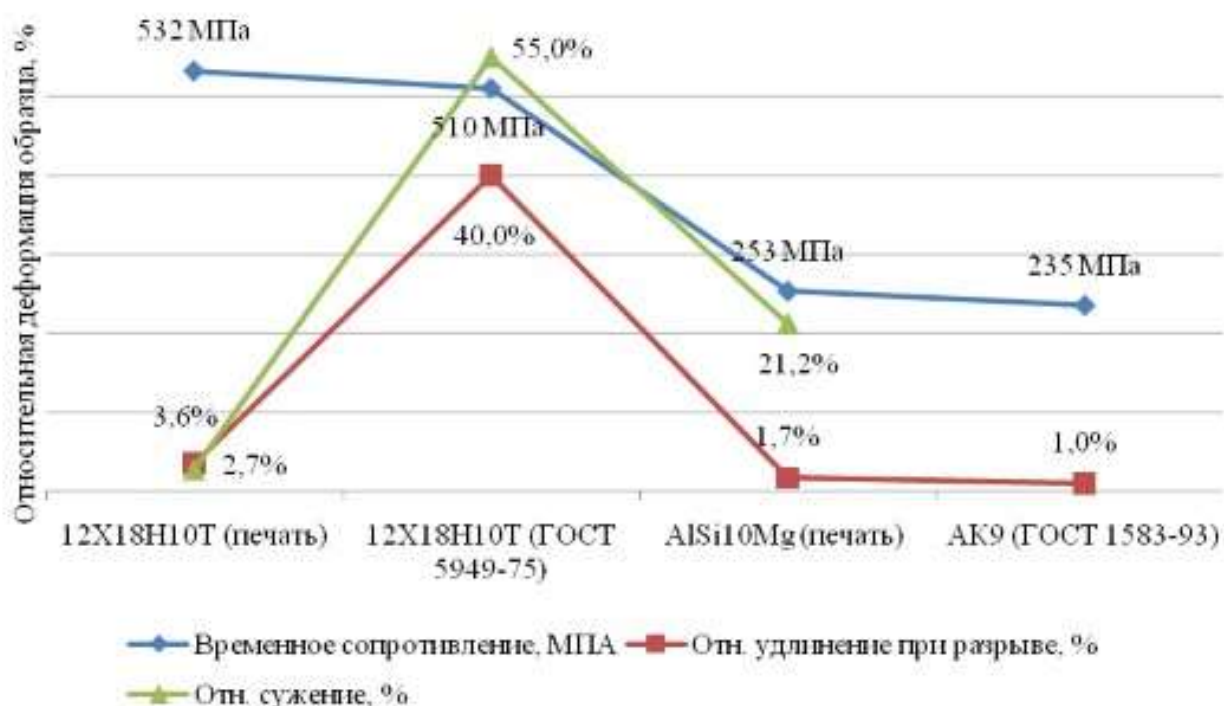


Рисунок 2 - Сравнение результатов испытаний образцов на разрыв после спекания порошков 12X18H10T и AlSi10Mg на промышленном 3d-принтере по металлу Renishaw AM 600 по технологии DMLS. Составлено авторами по материалам [3;5;14]

Аддитивные технологии способствуют решению проблемы дефицита запчастей на предприятии, а также позволяет оптимизировать затраты на закупку несложных в производстве деталей из композитных материалов. В качестве иллюстрации можно привести зубчатую муфту с внутренним зацеплением, которая используется в немецких вакуумных насосах для соединения электродвигателя и насоса. Эта деталь проста в изготовлении, но широко применяется в зарубежных сельскохозяйственных машинах. Однако её изготовление на токарном станке по традиционной технологии представляет сложность. В настоящее время стоимость такой детали составляет 25 тысяч рублей, в то время как себестоимость её производства с использованием технологии 3d-печати составляет всего 1 тысячу рублей [4]. Аналогичная ситуация наблюдается и с втулкой привода высевающего аппарата на канадском посевном комплексе фирмы SALFORD. Производство с использованием 3d-печати обходится предприятию на порядок дешевле, чем покупка готовой детали. Кроме того, было

сэкономлено время, которое особенно ценно в период посевной кампании. В компании ZorgService (г. Ставрополь) по 3d-технологии могут изготовить детали любого типа: от бичей, биттеров молотильных устройств и шкивов до ступиц, валов и шестерён.

Авторы проводили эксперименты по изготовлению способом 3d-печати запасных частей для технологического оборудования животноводческого комплекса Компании «Залесский фермер» (г. Полесск Калининградской области) на 3d-принтере фирмы Bambu Lab X-1 Carbon (Model Pf001-P). Принтер позволяет печатать такие широко востребованные детали, как клапана, ролики, шестерни, лейки для смесителей, различные крепления и переходники (рисунок 3). Результаты испытаний можно использовать для выбора оптимальных режимов 3d-печати пластиковых деталей машин, чтобы обеспечить требуемые прочностные характеристики деталей. Использование определённой структуры заполнения позволяет создавать деформируемые элементы, которые можно применять как для ремонта, так и для производства деталей машин.



Рисунок 3 - Работа 3d-принтера фирмы Bambu Lab X-1 Carbon (Model Pf001-P) по изготовлению запасной детали для технологического оборудования животноводческого комплекса Компании «Залесский фермер» (г. Полесск Калининградской области)

Применение трехмерной печати деталей из специально подготовленных порошков открывает значительные перспективы для применения технологии лазерного спекания формирующего материала. Авторы проводили соответствующие исследования, продемонстрировавшие технологические возможности описываемого способа [9]. Одним из перспективных направлений в области создания покрытий с высокими физико-механическими свойствами является использование гибридных технологий, соединяющих

лазерные и передовые электрофизические методы (рисунок 4). Эти методы позволяют создавать покрытия с уникальными свойствами, которые ранее были недоступны.

Перспективам применения нанопорошковых материалов с целью восстановления ответственных деталей сельхозмашин посвящен ряд работ отечественных авторов [12;8]. Как показывают результаты исследований Ли Р.И. и др. наполнение эластомера Ф-40 металлическими наночастицами повышает выносливость материала и, соответственно, долговечность восстановленных посадок подшипников в корпусной детали при циклическом нагружении [13]. Как представляется авторам, использование аддитивных технологий нанесения нанопорошковых покрытий с помощью лазерного излучения в условиях управляющего воздействия магнитного поля соответствующей конфигурации является весьма актуальным направлением. Особенно заманчивым является развитие и совершенствование гибридных технологий, основанных на использовании аддитивных технологий ремонта ответственных деталей за счет 3d-печати упрочняющих покрытий высококогерентными источниками под управляющим воздействием магнитных полей.

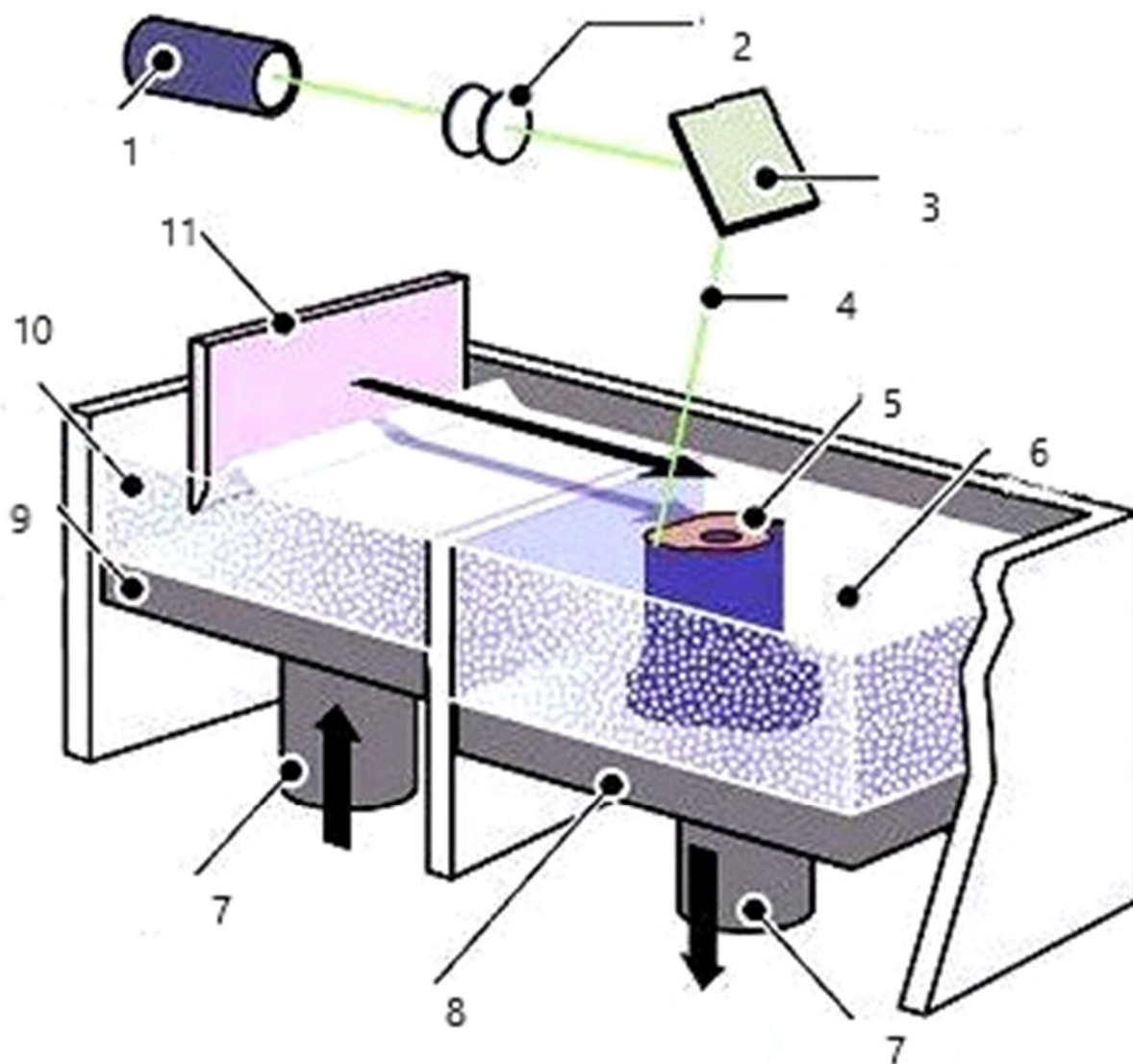


Рисунок 4 - Пример 3d-печати детали SLM-методом:

Лазер – 1; фокусирующее зеркало – 2; подвижное зеркало – 3; луч лазера – 4; модель – 5; порошок – 6; поршни – 7; подвижное дно рабочей камеры – 8; подача порошка – 9; подача порошка – 10; разравниватель порошка – 11. Разработано авторами

Заключение

В результате выполненного исследования подтверждается гипотеза о технологической возможности аддитивных технологий обеспечить требуемый уровень качества по

восстановлению уникальных, импортных запасных частей эксплуатируемых в АПК РФ автотракторной техники иностранного производства. Такие технологии не только позволяют избавиться от дефицита дорогостоящих импортных деталей иностранной автотракторной техники, но и целесообразно организовать отделения (участки) 3d-сканирования и печати в составе сервисных предприятий по ремонту сельхозтехники.

В настоящее время развитие аддитивных технологий демонстрирует высокую динамику в своем развитии и значительные перспективы использования в ремонте различных деталей импортной сельскохозяйственной техники. При сравнении физико-механических, эксплуатационных характеристик образцов, изготовленных традиционными методами и методами трехмерной печати, при условии проведения термической обработки, демонстрируются определенные преимущества и недостатки, которые следует учитывать при принятии решения о её применении.

При выборе трехмерной технологии важно оценить её влияние на качество, стоимость и время производства. Несмотря на некоторые недостатки, трёхмерная печать металлических изделий позволяет создавать более сложные по форме изделия, что открывает новые возможности для различных отраслей промышленности. Многообещающим является развитие гибридных технологий производства и восстановления деталей, совмещающих преимущества 3d-печати и применения высококогерентных источников энергии.

Трёхмерная печать металлических и неметаллических изделий имеет огромный потенциал для дальнейшего развития. В ближайшие годы ожидается появление новых методов, материалов и технологий, которые позволят улучшить точность, скорость, стоимость и общую производительность трёхмерной печати. Это, в свою очередь, расширит область применения этой технологии и создаст новые возможности для инноваций и развития индустрии. Таким образом, цель, поставленная в настоящем исследовании, достигнута.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. N 328 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности".
2. Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 N 1913-р «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года». Дата обновления: 22 января 2025.
3. Васильева В.А., Устьянцев Ю.А., Корягин С.И. Исследование свойств образцов, полученных при помощи 3d-печати порошками 12X18H10T и AlSi10Mg//Технико-технологические проблемы сервиса. №2(68) 2024. С.9-12.
4. Запчасти для сельхозтехники: от простого копирования до 3D-печати. [Электронный ресурс] – URL: <https://поле.рф/journal/publication/4687?ysclid=m8yclsfvtq775212737>. (Дата обращения: 28.03.25).
5. Казанцева Н.В., Виноградова Н.И., Козмец Ю.Н., Ежов И.В., Давыдов Д.И. Электронно-микроскопическое исследование фазовых превращений в образцах из аустенитной стали 316L, полученных лазерной 3D печатью//Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 10. С. 1404-1409.
6. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Соломашкин А.А. Интерактивная система 3D для измерительного контроля деталей при ремонте автотракторных двигателей // Технический сервис машин. 2021. Т. 59. N2(143). С. 39-45. DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-2-39-45.
7. Катаев Ю.В., Гончарова Ю.А., Свиридов А.С., Тужилин С.П. Применение технологий 3D-печати и 3D-сканирования при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники//Техника и оборудование для села. 2023. № 1 (307). С. 34-38.
8. Колосовский А.М. Пути повышения надежности и долговечности ответственных деталей на основе перспективных материалов и технологий// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 5 (343). С. 46-54.
9. Колосовский А.М., Вихтевский В.И., Тристанова Е.Б., Черкашина Е.Ф. Анализ современных лазерных методов упрочнения деталей машин и инструмента// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 1 (345). С. 45-53.
10. Колосовский А.М., Вихтевский В.И., Тристанова Е.Б., Черкашина Е.Ф. Анализ развития комбинированных электрофизических методов упрочнения деталей машин и инструмента// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 2 (346). С. 77-86.
11. Колосовский А.М., Рожков А.С., Ожегов Н.М., Черкасов В.Е. Упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 6 (362). С. 77-87.
12. Ли Р.И., Псарев Д.Н., Киба М.Р. Эластомерный нанокомпозит для восстановления корпусных деталей автотракторной техники//Наука в центральной России. 2021. № 1 (49). С. 69-79.

13. Ли Р.И., Ризаева Ю.Н., Быконя А.Н., Псарев Д.Н., Киба М.Р. Метод расчета установок инфракрасной обработки полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей автотракторной техники//Наука в центральной России. 2022. № 5 (59). С. 110-119.
14. Нефёлов И. С., Баурова Н. И. Исследование влияния технологических режимов 3D-печати на вязкоупругие свойства деталей машин в условиях отрицательных температур// Грузовик, Грузовик, 2021, № 11. С. 21-24.
15. Новиков В.Г. Применение трехмерной печати для получения деталей машиностроительного производства//Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 8. С. 107-109.
16. Свечников А.А., Игнатьев М.И. Замещение импортных деталей локомотивов деталями отечественного производства с применением современных методов 5д печати металлом//Наука и образование транспорту. 2024. № 1. С. 65-66.
17. 3D-печать для сельхозтехники и оборудования. [Электронный ресурс] – URL: <https://agbz.ru/news/3d-pechat-dlya-selkhoztekhniki-i-oborudovaniya/?ysclid=m8yekmysnf323692324> (Дата обращения: 28.03.25).
18. Leonov O.A., Shkaruba N. Zh., Kataev Yu.V. Measurement risk management method at machine-building enterprises // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 52060.

Колосовский Андрей Михайлович

КФ ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Полесск
Калининградской обл.
К.т.н., доцент, доцент кафедры механизации
сельского хозяйства,
238630, Россия, Калининградская обл., г. Полесск,
ул. Советская, д. 10.
Тел.: +7(921)617-61-64,
E-mail: akolosovski_61@mail.ru

Рожков Александр Сергеевич

КФ ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Полесск Калининградской
обл.;
К.т.н., доцент, зав. кафедрой механизации сельского
хозяйства, 238630, Россия, Калининградская обл., г.
Полесск, ул. Советская, д. 10.
Тел.: +7(905)242-50-71
E-mail: alex-ser-rozhkov@mail.ru

Койчев Владимир Сагитович

КФ ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Полесск
Калининградской обл.;
К.т.н., доцент, зав. лабораторией УНЛ топливно-
смазочные материалы
238630, Россия, Калининградская обл., г. Полесск,
ул. Советская, д. 10.
Тел.: +7(962)440-25-08
E-mail: labtsm@yandex.ru

Черкасов Валерий Евгеньевич

КФ ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Полесск Калининградской
обл.
Старший преподаватель кафедры механизации
сельского хозяйства,
238630, Россия, Калининградская обл., г. Полесск, ул.
Советская, д. 10.
Тел.: +7(921)712-67-22, E-mail: cher_val@mail.ru

KOLOSOSVSKY A.M., KOYCHEV V.S., ROZHKOVA A.S., CHERKASOV V.E.

ADDITIVE TECHNOLOGY OF THE SPARE PARTS MANUFACTURE FOR AGRICULTURAL MACHINES

Abstract. The article is devoted to the solution of the problem of repair and manufacture of scarce parts of imported agricultural machines using additive technologies, which are rapidly gaining popularity. It is shown that such technologies not only make it possible to get rid of the shortage of expensive imported parts of foreign automotive and tractor equipment, but also it is advisable to organize departments (sections) of 3D scanning and printing as part of service enterprises for the repair of agricultural machinery. Comparing the characteristics of samples made with conventional and additive technologies reveals the advantages and disadvantages of each technology that are important for selection.

Keywords: additive technologies; 3D scanning and printing; agricultural machinery; detail; service enterprises; production; repair.

BIBLIOGRAPHY

1. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 15 aprelya 2014 g. N 328 "Ob utverzhdenii gosudarstvennoj programmy Rossijskoj Federacii "Razvitie promyshlennosti i povyshenie ee konkurentosposobnosti".
2. Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 14.07.2021 N 1913-r «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya additivnykh tekhnologij v Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda». Data obnovleniya: 22 yanvarya 2025.
3. Vasileva V.A., Ustyancev YU.A., Koryagin S.I. Issledovanie svojstv obrazcov, poluchennykh pri pomoshchi 3d-pechati poroshkami 12KH18N10T i AlSi10Mg//Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa. №2(68) 2024. S.9-12.
4. Zapchasti dlya selkhoztekhniki: ot prostogo kopirovaniya do 3D-pechati. [Elektronnyj resurs] – URL: <https://pole.rf/journal/publication/4687?ysclid=m8yclsfvtq775212737>. (Data obrashcheniya: 28.03.25).

5. Kazanceva N.V., Vinogradova N.I., Koehmec YU.N., Ezhov I.V., Davydov D.I. Ehlektronno-mikroskopicheskoe issledovanie fazovykh prevrashchenij v obrazcakh iz austenitnoj stali 316L, poluchennykh lazernoj 3D pechatyu//Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya fizicheskaya. 2023. T. 87. № 10. S. 1404-1409.
6. Kataev YU.V., Gerasimov V.S., Solomashkin A.A. Interaktivnaya sistema 3D dlya izmeritelnogo kontrolya detalej pri remonte avtotraktornykh dvigatelej // Tekhnicheskij servis mashin. 2021. T. 59. N2(143). S. 39-45. DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-2-39-45.
7. Kataev YU.V., Goncharova YU.A., Sviridov A.S., Tuzhilin S.P. Primenenie tekhnologij 3D-pechati i 3D-skanirovaniya pri izgotovlenii i remonte selskokhozyajstvennoj tekhniki//Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2023. № 1 (307). S. 34-38.
8. Kolosovskij A.M. Puti povysheniya nadezhnosti i dolgovechnosti otvetstvennykh detalej na osnove perspektivnykh materialov i tekhnologij// Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2020. № 5 (343). S. 46-54.
9. Kolosovskij A.M., Vikhtevskij V.I., Tristanova E.B., Cherkashina E.F. Analiz sovremennykh lazernykh metodov uprochneniya detalej mashin i instrumenta// Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2021. № 1 (345). S. 45-53.
10. Kolosovskij A.M., Vikhtevskij V.I., Tristanova E.B., Cherkashina E.F. Analiz razvitiya kombinirovannykh ehlektrofizicheskikh metodov uprochneniya detalej mashin i instrumenta// Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2021. № 2 (346). S. 77-86.
11. Kolosovskij A.M., Rozhkov A.S., Ozhegov N.M., Cherkasov V.E. Uprochnenie rabochikh organov selskokhozyajstvennykh mashin// Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2023. № 6 (362). S. 77-87.
12. Li R.I., Psarev D.N., Kiba M.R. Ehlastomernyj nanokompozit dlya vosstanovleniya korpusnykh detalej avtotraktornoj tekhniki//Nauka v centralnoj Rossii. 2021. № 1 (49). S. 69-79.
13. Li R.I., Rizaeva YU.N., Bykonya A.N., Psarev D.N., Kiba M.R. Metod rascheta ustanovok infrakrasnoj obrabotki polimernykh pokrytij pri vosstanovlenii korpusnykh detalej avtotraktornoj tekhniki//Nauka v centralnoj Rossii. 2022. № 5 (59). S. 110-119.
14. Nefyolov I. S., Baurova N. I. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh rezhimov 3D-pechati na vyazkoprugie svoystva detalej mashin v usloviyakh otricateľnykh temperatur// Gruzovik, 2021, № 11. S. 21-24.
15. Novikov V.G. Primenenie trekhmernoj pečati dlya polucheniya detalej mashinostroitel'nogo proizvodstva//Izvestiya Tuls'kogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2023. № 8. S. 107-109.
16. Svechnikov A.A., Ignatev M.I. Zameshchenie importnykh detalej lokomotivov detal'yami otechestvennogo proizvodstva s primeneniem sovremennykh metodov 5d pečati metallom//Nauka i obrazovanie transportu. 2024. № 1. S. 65-66.
17. 3D-pechat dlya selkhoztekhniki i oborudovaniya. [Ehlektronnyj resurs] – URL: <https://agbz.ru/news/3d-pechat-dlya-selkhoztekhniki-i-oborudovaniya/?ysclid=m8yekmysnf323692324> (Data obrashcheniya: 28.03.25).
18. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Kataev Yu.V. Measurement risk management method at machine-building enterprises // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 52060.

Kolosovsky Andrey Mikhailovich

Kaliningrad Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education of St. Petersburg State Agrarian University, Polessk, Kaliningrad Region

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Agricultural Mechanization, 238630, Russia, Kaliningrad Region, Polessk, Sovetskaya str., 10.

Phone: +7(921)617-61-64,

E-mail: akolosovski_61@mail.ru

Koichev Vladimir Sagitovich

Kaliningrad Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education of St. Petersburg State Agrarian University, Polessk, Kaliningrad Region

Ph.D., Associate Professor, Head of the Laboratory of UNL Fuel and Lubricants 238630, Russia, Kaliningrad Region, Polessk, Sovetskaya str., 10.

Phone: +7(962)440-25-08

E-mail: labtsm@yandex.ru

Rozhkov Alexander Sergeevich

Kaliningrad Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education of St. Petersburg State Agrarian University, Polessk, Kaliningrad Region

Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Agricultural Mechanization, 238630, Russia, Kaliningrad Region, Polessk, Sovetskaya str., 10.

Phone: +7(905)242-50-71

E-mail: alex-ser-rozhkov@mail.ru

Cherkasov Valery Evgenievich

Kaliningrad Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education of St. Petersburg State Agrarian University, Polessk, Kaliningrad Region

Senior Lecturer of the Department of Agricultural Mechanization, 238630, Russia, Kaliningrad Region, Polessk, Sovetskaya str., 10.

Phone: +7(921)712-67-22, E-mail: cher_val@mail.ru

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА

УДК 517.984, 54.534, 51.74

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-371-3-89-93

САФИНА Г.Ф.

АКУСТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЖЕСТКОСТИ РОТОРА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТУРБОМАШИНЫ

Аннотация. В работе рассмотрена задача восстановления коэффициентов жесткостей опор ротора синхронного двигателя турбомашин по известным значениям частот его свободных осевых колебаний. Поставлен вопрос о существовании и условиях решения задачи, доказана соответствующая теорема. Показан алгоритм восстановления искомых параметров жесткости ротора синхронного двигателя путем рассмотрения систем алгебраических уравнений с поиском их общих решений. Представлен численный расчет использования алгоритма на конкретном примере, который подтверждает аналитические модели. К расчетам использованы функциональные команды и встроенных функционал и библиотеки математического пакета Maple.

Ключевые слова: синхронный двигатель, ротор, частотное уравнение, частоты колебаний, коэффициенты жесткостей, акустическое диагностирование, алгоритм решения.

Введение

Исследованная в работе акустическая задача по свободным осевым колебаниям ротора синхронного двигателя продолжает поиск алгоритмов и технологий неразрушающего контроля различного рода механических систем по значениям частот их колебаний [1-4].

Подобный акустический контроль технического состояния любого роторного оборудования проводится чаще при его эксплуатации путем измерения частот вращения. Известно, что крутильные колебания роторов могут вести к образованию периодических колебаний (в осевом или в радиальном направлениях), причем с опасными значениями их амплитуд, совпадающими с резонансными значениями.

Задачи вибродиагностики не могут рассматриваться без исследований в прямых задачах определения частот колебаний механизмов и влияния их параметров на значения частот [5-8]. Такие исследования с ротором синхронного двигателя турбомеханизма рассмотрены в работе [9]. Приведены численные расчеты частот колебаний при известных значениях параметров ротора. В данном же исследовании ставится впервые обратная задача – задача акустического восстановления коэффициентов жесткостей опор ротора синхронного двигателя по известным значениям первых трех частот его свободных осевых колебаний, приводится алгоритм решения поставленной задачи.

Постановка акустической задачи

Приведем краткие сведения по прямой спектральной задаче для ротора синхронного двигателя турбомеханизма (любого компрессорного агрегата, насосного механизма и т.п.). Динамическая модель-схема ротора, вращающегося вокруг оси симметрии со скоростью ω в декартовой системе Oxy , представлена на рисунке 1.

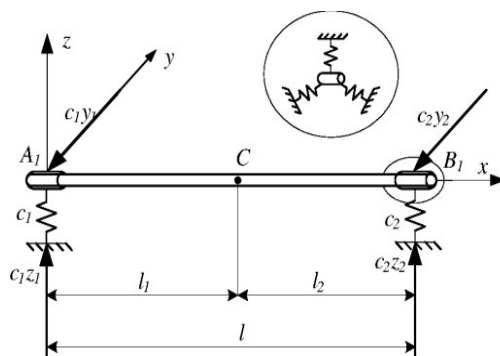


Рисунок 1 – Модель-схема ротора синхронного двигателя турбомеханизма

Здесь: M , l , R – масса, длина, радиус ротора; $A_1(x_1, y_1, z_1)$ и $B_1(x_2, y_2, z_2)$ – точки опор ротора; $C(x_c, y_c, z_c)$ – центр тяжести ротора; c_1 и c_2 – коэффициенты жесткостей опор.

В симметричной модели ротора: $l/2 = l_1 = l_2$, где l_1, l_2 – расстояния от центра тяжести до опор, причем $x_c = (x_1 + x_2)/2$; $y_c = (y_1 + y_2)/2$; $z_c = (z_1 + z_2)/2$. Колебательный процесс по координатам x_1, y_1, x_2, y_2 описывается системой уравнений [5, 9]:

$$\begin{cases} M(l_2\ddot{y}_1 + l_1\ddot{y}_2) + c_1l y_1 + c_2l y_2 = 0; \\ M(l_2\ddot{z}_1 + l_1\ddot{z}_2) + c_1l z_1 + c_2l z_2 = 0; \\ (MR^2/2)\omega(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - (M(R^2 + l^3/3)/4)(\ddot{z}_2 - \ddot{z}_1) - c_2l_2z_2 + c_1l_1z_1 = 0; \\ (MR^2/2)\omega(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + (M(R^2 + l^3/3)/4)(\ddot{y}_2 - \ddot{y}_1) + c_2l_2y_2 - c_1l_1y_1 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

В работе [9] подстановка решений $x_1 = C_1 \sin(pt + \alpha)$, $y_2 = C_2 \sin(pt + \alpha)$; $z_1 = C_3 \cos(pt + \alpha)$, $z_2 = C_4 \cos(pt + \alpha)$ (p – собственная частота, $C_i (i = \overline{1, 4})$ – амплитуды колебаний) в систему (1) привела к системе четырех уравнений, решая которую относительно нетривиальных амплитуд колебаний получено частотное уравнение для четырех нормальных форм колебаний симметричного ротора в виде:

$$\begin{vmatrix} c_1l - Ml_2p^2 & c_2l - Ml_1p^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_1l - Ml_2p^2 & c_2l - Ml_1p^2 \\ -Awp & Awp & c_1l_1l - Bp^2 & Bp^2 - c_2l_2l \\ Bp^2 - c_1l_1l & c_2l_2l - Bp^2 & Awp & -Awp \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

По известным параметрам ротора и значениям коэффициентов жесткостей его опор из уравнения (2) можно определять значения частот колебаний (используя, например, функциональные команды пакета Maple). Проведено исследование влияния характеристик ротора на значения частот его колебаний, в том числе влияние коэффициентов упругих опор ротора. На численных примерах показано, что увеличение параметров жесткостей ведет к росту значений частот осевых колебаний ротора синхронного двигателя.

В продолжение исследований поставим к прямой спектральной задаче с частотным уравнением (2) обратную: по известным значениям частот колебаний ротора синхронного двигателя восстановить коэффициенты жесткостей его опор. В принятых обозначениях: известны частоты $p_i (i = \overline{1; 4})$, необходимо восстановить коэффициенты c_1, c_2 опор ротора.

Метод решения задачи акустического диагностирования

Преобразуем частотное уравнение (2) к следующему виду:

$$\Delta(p_i) = c_1^2 c_2^2 a + c_1 c_2 (c_1 + c_2) f_1(p_i) + c_1^2 f_2(p_i) + c_2^2 f_3(p_i) + c_1 c_2 f_4(p_i) + c_1 f_5(p_i) + c_2 f_6(p_i) + f_7(p_i) = 0, \quad (3)$$

где параметр a и функции $f_j(p_i) (j = \overline{1; 7}; i = \overline{1; 4})$ выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} a &= -l^4(l_1 + l_2)^2; \quad f_1(p_i) = 2p_i^2 l^3 (Ml_1^2 + B)(l_1 + l_2); \\ f_2(p_i) &= p_i^4 l^2 (Aw^2 - (B + Ml_1^2)^2); \quad f_3(p_i) = p_i^4 l^2 (Aw^2 - (B + Ml_2^2)^2); \\ f_4(p_i) &= 2p_i^2 l^2 (Aw^2 - p_i^2 (Ml_1^2 l_2^2 + 2MB(l_1 + l_2)^2 + B^2)); \\ f_5(p_i) &= 2p_i^4 Ml(l_1 + l_2)(B Mp_i^2 (l_1^2 + 1) - A^2 w^2); \quad f_6(p_i) = 2p_i^4 Ml(l_1 + l_2)(B Mp_i^2 (l_2^2 + 1) - A^2 w^2); \\ f_7(p_i) &= p_i^6 M^2 (l_1 + l_2)^2 (A^2 w^2 - B^2 p_i^2). \end{aligned} \quad (4)$$

Вместе со спектральной задачей L с уравнением (3) рассмотрим задачу \bar{L} с аналогичным уравнением:

$$\bar{\Delta}(p_i) = \tilde{c}_1^2 \tilde{c}_2^2 a + \tilde{c}_1 \tilde{c}_2 (\tilde{c}_1 + \tilde{c}_2) f_1(p_i) + \tilde{c}_1^2 f_2(p_i) + \tilde{c}_2^2 f_3(p_i) + \tilde{c}_1 \tilde{c}_2 f_4(p_i) + \tilde{c}_1 f_5(p_i) + \tilde{c}_2 f_6(p_i) + f_7(p_i) = 0, \quad (5)$$

но с другими коэффициентами \tilde{c}_1, \tilde{c}_2 жесткостей опор ротора. Тогда будет справедлива теорема.

Теорема. При совпадении частот колебаний p_i спектральных задач L и \bar{L} (корней уравнений $\Delta(p_i)$ и $\bar{\Delta}(p_i)$) будут совпадать и коэффициенты жесткостей опор ротора, т.е. $c_1 = \tilde{c}_1$, $c_2 = \tilde{c}_2$.

Доказательство. Уравнения (3) и (5) являются целыми и линейно-независимыми функциями от переменных p_i (что проверяется численно с функционалом пакета Maple). Тогда функции $\Delta(p_i)$ и $\bar{\Delta}(p_i)$ определяются по значениям частот p_i ($i = \overline{1;4}$) с точностью до постоянного множителя K (по теореме Адамара [10]). Значит $\Delta(p_i) - \bar{\Delta}(p_i) = 0$, или $K = 1$, откуда: $c_1 = \tilde{c}_1$, $c_2 = \tilde{c}_2$. Теорема доказана.

В итоге, зная частоты колебаний ротора симметричного двигателя турбомашин, можно восстанавливать значения коэффициентов жесткостей опор ротора.

Остановимся теперь на методе, использующем значения трех частот колебаний ротора для однозначного решения поставленной обратной задачи. Итак, известны частоты колебаний ротора: p_1, p_2, p_3 . При значениях частот p_1 и p_2 имеем систему нелинейных алгебраических уравнений относительно искомых параметров $(c_1; c_2)$

$$\begin{cases} c_1^2 c_2^2 a + c_1 c_2 (c_1 + c_2) f_1(p_1) + c_1^2 f_2(p_1) + c_2^2 f_3(p_1) + c_1 c_1 f_4(p_1) + c_1 f_5(p_1) + c_2 f_6(p_1) + f_7(p_1) = 0; \\ c_1^2 c_2^2 a + c_1 c_2 (c_1 + c_2) f_1(p_2) + c_1^2 f_2(p_2) + c_2^2 f_3(p_2) + c_1 c_1 f_4(p_2) + c_1 f_5(p_2) + c_2 f_6(p_2) + f_7(p_2) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

с конечным набором ее решений. При значениях частот p_1 и p_3 – систему

$$\begin{cases} c_1^2 c_2^2 a + c_1 c_2 (c_1 + c_2) f_1(p_1) + c_1^2 f_2(p_1) + c_2^2 f_3(p_1) + c_1 c_1 f_4(p_1) + c_1 f_5(p_1) + c_2 f_6(p_1) + f_7(p_1) = 0; \\ c_1^2 c_2^2 a + c_1 c_2 (c_1 + c_2) f_1(p_3) + c_1^2 f_2(p_3) + c_2^2 f_3(p_3) + c_1 c_1 f_4(p_3) + c_1 f_5(p_3) + c_2 f_6(p_3) + f_7(p_3) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

со своим набором решений. Тогда общий набор параметров $(c_1; c_2)$ решений систем (6) и (7) и будет являться искомым набором для обратной задачи.

Численный расчет

Приведем численный пример использования команд Maple к приведенному методу решения задачи. Известны значения трех частот колебаний ротора симметричного двигателя: $p_1 = 0,156 \text{ c}^{-1}$, $p_2 = 0,158 \text{ c}^{-1}$, $p_3 = 0,569 \text{ c}^{-1}$, а также физические и геометрические параметры:

$$l = 0,4 \text{ м}, \quad l_1 = l_2 = 0,2 \text{ м}, \quad w = 206 \text{ / с}, \quad R = 0,02 \text{ м}. \quad (8)$$

Восстановим соответствующие этим частотам колебаний коэффициенты жесткостей c_1, c_2 опор ротора.

Подставим числовые значения частот p_1, p_2, p_3 , а также характеристики (8) в равенства (4), получим: $a = -4,096 \cdot 10^{-3}$

$$\begin{aligned} f_1(p_1) &= 7,2807 \cdot 10^{-4}; \quad f_1(p_2) = 7,4186 \cdot 10^{-4}; \quad f_1(p_3) = 9,5971 \cdot 10^{-3}; \\ f_2(p_1) &= f_3(p_1) = -3,2351 \cdot 10^{-5}; \quad f_2(p_2) = f_3(p_2) = -3,3588 \cdot 10^{-5}; \quad f_2(p_3) = f_3(p_3) = -5,6217 \cdot 10^{-3}; \\ f_4(p_1) &= -9,54797 \cdot 10^{-5}; \quad f_4(p_2) = -9,9129 \cdot 10^{-5}; \quad f_4(p_3) = -1,6591 \cdot 10^{-2} \\ f_5(p_1) &= f_6(p_1) = 0,2735 \cdot 10^{-5}; \quad f_5(p_2) = f_6(p_2) = 2,8933 \cdot 10^{-5}; \quad f_5(p_3) = f_6(p_3) = 6,2649 \cdot 10^{-3}; \\ f_7(p_1) &= -5,7807 \cdot 10^{-8}; \quad f_7(p_2) = -6,2311 \cdot 10^{-8}; \quad f_7(p_3) = 1,7454 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Подстановка найденных значений $f_j(p_i)$ ($j = \overline{1;6}$; $i = \overline{1;4}$) в систему (6) приводит к наборам решений:

$$\begin{aligned} &(0,09999; 0,50000); (0,0340-0,03342I; 0,0340 + 0,03342I); \\ &(0,04253-0,04434I; 0,04253+0,04434I); (0,0428-0,0453I; 0,0428+0,0453I); \\ &(0,04281+0,0452I; 0,04281-0,0452I); (0,50000; 0,09999); \\ &(0,0425+0,0443I; 0,0425-0,0443I); (0,03401+0,0334I; 0,03401-0,0334I) \end{aligned}$$

Подстановка в систему (7) дает решения:

$$\begin{aligned} &(0,5014; 0,0979); (0,5011; 0,0979); (0,50000; 0,10000); (0,4997, c_2 = 0,1000), \\ &(0,1001; 0,4745); (0,09999; 0,50000); (0,0978; 0,50107); (0,09787, 0,5013). \end{aligned}$$

Общими наборами решений являются пары:

$$(0,09999; 0,50000); (0,50000; 0,09999).$$

Значит, по заданным значениям трех частот колебаний ротора симметричного двигателя турбомашин восстанавливаются коэффициенты жесткостей опор ротора:

$$c_1 = 0,1 \frac{H}{M}; \quad c_1 = 0,5 \frac{H}{M} \quad \text{или} \quad c_1 = 0,5 \frac{H}{M}; \quad c_1 = 0,1 \frac{H}{M}.$$

Проверка расчетов (в пакете Maple проводятся до порядка 10^{-20}) показывает, что при восстановленных значениях коэффициентов c_1 , c_2 опор ротора и заданных параметрах (8) вычисляются (определяются) заданные частоты колебаний $p_1 = 0,156 \text{ c}^{-1}$, $p_2 = 0,158 \text{ c}^{-1}$, $p_3 = 0,569 \text{ c}^{-1}$.

Заключение

Исследована и решена обратная спектральная задача – задача восстановления параметров жесткостей опор ротора синхронного двигателя турбомеханизма. Доказаны условия существования решения, сформулированные в виде теоремы. Приведен метод решения обратной задачи, который сведен к решению систем двух нелинейных алгебраических уравнений с последующим подбором их общих решений.

Представлен численный пример по рассматриваемому методу решения с применением функциональных команд пакета Maple. Подобные исследования обратной спектральной задачи должны учитываться при постановках задач сохранения безопасных частот колебаний ротора с помощью соответствующих изменений в параметрах жесткости его опор. Приведенный метод можно применить к широкому классу обратных задач, моделируемых как в виде динамических роторных турбомашин, так и компрессорных и насосных агрегатов, валов и т.д.

Заключение

Таким образом, в проведенном исследовании решена обратная спектральная задача по поиску жесткостей упругих опор валов обрабатывающего механизма по акустическому отклику: известным значениям частот асимметричных колебаний механизма.

Доказана единственность решения задачи с помощью еще одной введенной спектральной задачи с аналогичным частотным уравнением, но с отличными коэффициентами жесткостей. Представлен алгоритм решения обратной задачи, сведенный к поиску общей пары решения двух нелинейных систем относительно безразмерных коэффициентов жесткостей опор, от которых можно перейти к размерным значениям жесткостей. Приведен численный расчет к найденному алгоритму решения задачи диагностирования.

Приведенный алгоритм диагностирования жесткостей валов обрабатывающего механизма можно использовать для обеспечения качества обработки, а также для виброзащитной работы механизма путем соответствующих изменений в условиях упругих закреплений (в коэффициентах жесткостей опор) валов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахтямов А.М. Теория идентификации краевых условий и ее приложения. – М.: Физматлит, 2009. – 272 с.
2. Ahmadian H., Mottershead J. E., Friswell M. I. Boundary condition identification by solving characteristic equation // J. Sound Vibrat. – 2001. № 247. – PP. 755-763.
3. Hung-Jen Liu, Nien-Sheng Hsu, Tim Hau Lee. Simultaneous identification of parameter, initial condition, and boundary condition in groundwater modelling // Hydrol. Process. – 2009. № 23. – PP. 2358-2367.
4. Сафина Г.Ф. Диагностирование жесткостей опор валов обрабатывающего механизма по частотам его асимметричных колебаний // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. № 3 (365). – С. 21-25.
5. Шатохин В.Ф. Исследование развития обката ротора по статору в условиях разного быстрогодействия систем защиты турбоагрегата // Теплоэнергетика. – 2014. №7. – С. 53-62.
6. Тондл А. Динамика роторов турбогенераторов. – Л.: Энергоиздат, 1971. – 388с.
7. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов 3-е изд. – М.: МЭИ, 2007. – 476 с.

8. Muszynska A. Rotor to stationary part rubbing contact in rotating machiner // Rotordynamicx. CRC Press. (Chapter 5). – 2005. – P. 327-335.
9. Сафина Г.Ф. Влияние параметров ротора синхронного двигателя турбомшины на частоты его колебаний // Инженерная физика. – 2022. № 10. – С. 32-38.
10. Ланкастер П. Теория матриц: Пер. с англ. – М.: Наука, 1982. – 272 с.

Сафина Гульнара Фриловна,

Нефтекамский филиал ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»,

Кандидат физико-математических наук, доцент,

452680, Республика Башкортостан, г. Нефтекамск, ул. Тракторная, д.1.

Тел. 8(917) 40–399–79

E-mail: safinagf@mail.ru

SAFINA G.F.

ACOUSTIC RECOVERY OF TURBOMACHINE SYNCHRONOUS MOTOR ROTOR STIFFNESS

Abstract. *The paper discusses the task of restoring the stiffness coefficients of the rotor supports of the synchronous motor of the mechanism*

by known values of frequencies of its free axial oscillations. The question was raised about the existence and conditions for solving the problem, the corresponding theorem was proved. Algorithm of recovery of required parameters of rotor rigidity of synchronous motor is shown by consideration of systems of algebraic equations with search of their general solutions. A numerical calculation of the use of the algorithm using a specific example is presented, which confirms the analytical models. The calculations used functional commands and built-in functionality and libraries of the Maple mathematical package.

Keywords: *synchronous motor, rotor, frequency equation, vibration frequencies, hardness coefficients, acoustic diagnostics, solution algorithm.*

BIBLIOGRAPHY

1. Akhtyamov A.M. Theory of identification of boundary conditions and its applications. - M.: Fizmatlit, 2009. – 272 s.
2. Ahmadian H., Mottershead J. E., Friswell M. I. Boundary condition identification by solving characteristic equation // J. Sound Vibrat. – 2001. № 247. – S. 755-763.
3. Hung-Jen Liu, Nien-Sheng Hsu, Tim Hau Lee. Simultaneous identification of parameter, initial condition, and boundary condition in groundwater modelling // Hydrol. Process. – 2009. № 23. – S. 2358-2367.
4. Safina G.F. Diagnosing the stiffness of the supports of the shafts of the processing mechanism by the frequencies of its asymmetric vibrations//Fundamental and applied problems of technology and technology. – 2024. № 3 (365). – S. 21-25.
5. Shatokhin V.F. Study of the development of rotor rolling by stator in conditions of different speed of turbine unit protection systems // Thermal power engineering. – 2014. №7. – S. 53-62.
6. Tondl A. Dynamics of turbine generator rotors. – L.: Energoizdat, 1971. – 388 s.
7. Kostyuk A.G. Dynamics and strength of turbomachines: textbook for universities 3rd ed. – M.: MPEI, 2007. – 476 s.
8. Muszynska A. Rotor to stationary part rubbing contact in rotating machiner // Rotordynamicx. CRC Press. (Chapter 5). – 2005. – S. 327-335.
9. Safina G.F. Influence of rotor parameters of synchronous engine of turbomachine on frequencies of its oscillations//Engineering physics. – 2022. № 10. – S. 32-38.
10. Lancaster P. Matrix Theory: Per. since English – M.: Science, 1982. – 272 s.

Safina Gulnara Frilovna

Ph.D., associate professor

«Ufa University of Science and Technology» Neftekamsk branch,

452680, Bashkortostan, Neftekamsk, Traktovaya, 1.

Ph.: 8(917) 40–399–79

E-mail: safinagf@mail.ru

ИВАНОВСКИЙ В.С., СПИРИН М.С., КОСАРИЧ М.Б.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ: ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ, СЛОЖНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ

Аннотация. В статье рассматриваются робототехнические комплексы (РТК) как важный элемент современных боевых действий и гражданского сектора. Анализируются термины и определения, связанные с РТК, а также сложности их классификации. Введение в тему подчеркивает актуальность использования РТК в различных сферах, включая военное применение, где они демонстрируют значительные преимущества в разведке и боевых операциях. В статье приводится исторический обзор развития робототехники, определения термина «робот» из различных источников, формулируются типовые признаки робота. В статье также представлены различные классификации роботов по назначению, типу управления, способу перемещения и другим критериям, что помогает лучше понять их функциональные возможности и области применения. Заключение подчеркивает необходимость уточнения определений и расширения классификаций для более точного понимания и использования РТК.

Ключевые слова: роботы, РТК, робототехнические комплексы, классификация, робототехника.

Введение

В настоящее время робототехнические комплексы (РТК) все более активно применяются на театре современных боевых действий. Ход боевых действий уже показал преимущества робототехнических комплексов как в разведке, так и в качестве нового типа вооружения, продемонстрировал снижение рисков для личного состава и возможность выполнения сложных задач в условиях, опасных для человека. Однако, если промышленные и бытовые комплексы получили широкое распространение в гражданском секторе, то активное внедрение РТК военного назначения началось сравнительно недавно. Это создает необходимость в детальном анализе их определения и классификации, поскольку существующие подходы часто оказываются недостаточно точными или устаревшими. Сложности, возникающие при попытке четко определить и классифицировать РТК, обусловлены разнообразием технологий и их функциональных возможностей. Например, одни РТК могут быть полностью автономными, в то время как другие требуют постоянного контроля со стороны оператора. Это разнообразие делает необходимым разработку универсальных критериев для их классификации, проанализировать опыт и проблемы разработок, проведенных до начала Специальной Военной Операции.

Теория

Термины «робот» и «робототехника» были придуманы в XX веке. Чешский писатель Карел Чапек придумал термин «робот» и впервые использовал его в своей пьесе R.U.R. («Универсальные роботы Россума») в 1921 году. А слово «робототехника» ввёл в обращение американский учёный-биохимик и писатель-фантаст Айзек Азимов. Он же сформулировал три основных закона робототехники, которые определили представления о роботах и активно используются до сих пор [1].

Современная робототехника появилась во второй половине XX века. С 1950-х годов началось активное внедрение различных манипуляторов в промышленное производство. Первый робот с зачатками искусственного интеллекта и компьютерного зрения был создан в 1968 году и мог объезжать предметы и препятствия, хотя был неустойчивым.

Первым по-настоящему серьёзным роботом можно считать «Луноход-1» - первый аппарат, успешно исследовавший лунную поверхность в 1970 году. В этот же период появились микропроцессорные системы управления, которые заменили специализированные блоки управления роботов на программируемые контроллеры. Это позволило уменьшить стоимость моделей в три раза [2, 3].

В 1982 году в IBM разработали официальный язык для программирования робототехнических систем, а в 1984 году компанией Adept была представлена первый робот Scara с электроприводом. В 1986 году роботы были впервые применены в Чернобыле для очистки радиоактивных отходов [4, 5].

В конце века возродился интерес к андроидам. Появились модели, способные двигаться по лестнице и преодолевать другие препятствия, выполнять сложные манипуляции и вести диалог с человеком.

С 2000 года робототехника стала одним из основных областей науки развитых стран, начали появляться роботы максимально правдоподобно имитирующие живые организмы.

В настоящее время роботы используются во всех сферах жизни человека начиная от роботов, используемых в медицинских целях заканчивая РТК, используемых в ходе боевых действий.

Некоторые определения термина «робот» в различных словарях приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Определения термина «робот»

Источник	Определение
ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012	Исполнительный механизм, программируемый по двум или более степеням подвижности, обладающий определенной степенью автономности и способный перемещаться во внешней среде с целью выполнения задач по назначению [6].
ГОСТ Р 60.0.0.4-2023/ИСО 8373:2021	Программируемый исполнительный механизм, обладающий определенным уровнем автономности и предназначенный для выполнения перемещения, манипулирования или позиционирования с целью выполнения задач по назначению [7].
Большой Энциклопедический Словарь	Робот (чеш. robot) - термин, употребленный впервые К. Чапеком в пьесе «R. U. R.» в 1920, которым часто обозначают машины с так называемым антропоморфным (человекоподобным) действием; обычно им придают внешнее сходство с человеком. Такие роботы, как правило, экспонаты технических выставок. В промышленном производстве и научных исследованиях применяют промышленные роботы - автоматические программно-управляемые манипуляторы, выполняющие рабочие операции со сложными пространственными перемещениями [8].
Большая советская энциклопедия	Робот (чеш. robot, от robota – подневольный труд, rob - раб) машина с антропоморфным (человекоподобным) поведением, которая частично или полностью выполняет функции человека (иногда животного) при взаимодействии с окружающим миром [9].
Большая политехническая энциклопедия	Робот - стационарная или передвижная автоматическая машина (или дистанционно управляемый механизм), способная выполнять аналогично человеку двигательные и управляющие функции, и призванная заменить человека при выполнении тяжёлой, однообразной или опасной для его жизни и здоровья работы, а также при проведении её при недоступности объекта. Робот может быть запрограммирован на самообучение, выполнение различных видов сложных технологических операций при функционировании с различными моделями технологического оборудования и т.п. [10]

Разберем определения из ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012, подготовленного Государственным научным центром РФ ЦНИИ РТК, на основе собственного перевода международного стандарта ISO 8373:2012 и ГОСТ Р 60.0.0.4-2023/ИСО 8373:2021.

Степень подвижности - параметр, используемый для задания поступательного или вращательного движения робота. Данное определение разночтений не вызывает.

Далее в ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012 сказано про «определенную степень автономности», понимаемой как способность выполнять задачи по назначению на основе текущего состояния и восприятия внешней среды без вмешательства человека.

Под такое определение не попадают устройства, дистанционно управляемые человеком. То есть, под такое определение не попадают роботы с дистанционным управлением в режиме реального времени.

Под способностью перемещаться во внешней среде понимается изменение местоположения физического тела в пространстве. Однако, некоторые промышленные роботы, такие как роботы сварщики, роботы для укладки паллет и т.п. остаются неподвижными в пространстве, тогда как двигается только его часть (например, Aripix A1, RM2000 6). Данное противоречие отсутствует в ГОСТ Р ИСО 8373-2014, в котором вместо «способный перемещаться во внешней среде» дана формулировка «движущийся внутри своей рабочей среды». Так же данная неопределённость устранена в ГОСТ Р 60.0.0.4-2023/ИСО

8373:2021, в котором чётко определено, что робот может использоваться для выполнения перемещения, манипулирования, или позиционирования.

Согласно ИСО/ТК 299 «Робототехника» определение звучит следующим образом:

Робот (robot): Программируемый исполнительный механизм с определенным уровнем автономности для выполнения перемещения, манипулирования или позиционирования.

Данное определение содержит те же формулировки, что и предыдущее, в частности «определенный уровень автономности». Также вызывает разночтения понятие «манипулирование». Только роботы-манипуляторы или под манипуляцией следует понимать весь спектр действий, осуществляемый рабочим органом робота.

Сформулируем несколько типовых признаков, характеризующих (но не всегда определяющих) роботов:

Первым и обязательным признаком является приводной механизм, служащий основой для движения робота, без которого он не смог бы выполнять свои функции.

Следующим обязательным признаком является программное управление. Этот признак подразумевает, что робот управляется через заранее заданные команды, которые определяют его действия и реакции на внешние воздействия.

Так же обязательным признаком является выполнение поставленных человеком задач. Это означает, что робот должен быть способен выполнять конкретные функции, которые были определены его разработчиками или операторами.

Признак некоторой (большей или меньшей) автономности размыт даже в своей постановке и отражает, скорее, стремление к автономности.

Приведём определения терминов «приводной механизм» и «программное управление» в соответствии с ГОСТ Р 60.0.0.4-2023/ИСО 8373:2019.

Приводной механизм (привод) - Силовой механизм, преобразующий электрическую, гидравлическую, пневматическую или любую другую энергию для осуществления движения робота.

Программное управление - управление роботом через управляющую программу и программу выполнения задания.

Управляющая программа - Встроенная совокупность команд управления, определяющая возможности, действия и реакции робота или робототехнического комплекса. Данный тип программы обычно разрабатывают до ее записи в память робота, и впоследствии только изготовитель робота может вносить в нее изменения.

Программа выполнения задания - Совокупность команд, определяющих движения и другие функции робота, необходимые для выполнения конкретного задания для робота или робототехнического комплекса.

Таким образом, можно сформулировать определение робота в следующем виде:

Робот - программируемый исполнительный механизм, обладающий некоторой степенью автономности и движущийся внутри своей рабочей среды с целью выполнения задач по назначению.

РТК - комплекс, состоящий из одного или нескольких роботов, их рабочих органов и любых механизмов, оборудования, приборов или датчиков, обеспечивающих выполнение роботом функционального назначения.

Если рассматривать робота как часть более крупной системы, включающей вспомогательное оборудование, то назначение и функции робота и РТК схожи. Для того, чтобы понять для чего и где используются роботы и РТК рассмотрим их общую классификацию.

Роботов можно классифицировать следующим образом:

- 1) По назначению
- 2) По типу управления
- 3) По свойствам материалов
- 4) По способу перемещения
- 5) По истории создания
- 6) По управлению
- 7) По позиционированию возможных перемещений

Представленная классификация проиллюстрирована на рисунке 1.



Рисунок 1 - Классификация роботов

Приведём подробные пояснения к представленной классификации. По назначению [11]:



Промышленные роботы



Бытовой робот



Боевой робот Уран-9



Медицинский робот-фармацевт

Рисунок 2 - Роботы по назначению

Промышленные. Выполняют задачи по автоматизации различных процессов производства (сборочные, строительные, литейные, фасовочно-сортировочные, транспортные, сельскохозяйственные и другие).

Бытовые (сервисные). Помогают человеку в повседневной жизни. Среди бытовых роботов выделяют две основных категории: персональные (роботы-пылесосы, кухонные роботы, роботы-питомцы и так далее) и профессиональные (роботы-консультанты, роботы-гиды, роботы-администраторы, роботы-курьеры и другие).

Боевые роботы. Представляют собой многофункциональные технические устройства, участвуют в боевых операциях. К ним относят воздушные (роботы-беспилотники),

сухопутные (роботы-саперы, самоходные танки и БТР, полноценные боевые комплексы) и морские (надводные и подводные аппараты, выполняющие поиск мин, функции патрулирования, сопровождения и другие).

Медицинские. Участвуют в диагностике и хирургических операциях, помогают изготавливать лекарственные препараты, ухаживать за больными, обучать людей медицинским навыкам.

По типу управления [11]:

Автономные. При решении поставленной задачи не требуют присутствия человека. Способны обрабатывать, анализировать информацию при помощи ИИ, самостоятельно принимать решения.

Полуавтономные. Не требуют постоянного присутствия живого оператора, однако способны действовать исключительно по заложенному алгоритму, не отступая от него ни на шаг.

Управляемые. Для использования такой робототехники нужно постоянное присутствие оператора. Человек может управлять устройством как с близкого расстояния, так и удалённо.

По свойствам материалов:

Жёсткие роботы. Изготавливаются из жёсткого сырья, приспособлены для выполнения однотипной задачи, требующей высокой точности и большой физической силы.

Мягкие (эластичные) роботы. Производятся из материала, схожего с тем, что встречается в живой природе. Могут менять форму, приспосабливаться к внешнему миру.

Гибридные роботы. На «теле» устройства есть как жёсткие, так и эластичные конструкции, помогающие захватывать объекты и манипулировать ими.

По способу перемещения:



Колесный робот



Гусеничный робот



Шагающий робот



Летающий робот



Плавающий робот



Стационарный робот



Гексапод

Рисунок 3 - Роботы по способу передвижения

Колесные. Самое простое решение для перемещения робота. Чем больше колёс, тем устойчивее и манёвреннее машина.

Гусеничные. Чаще всего это боевые роботы, которым требуется передвигаться по пересечённой местности.

Шагающие. Имитация ходьбы человека, применяется в отношении антроидов. Для большей устойчивости чаще используются не двуногие, а трёх- и четырёхногие машины.

Летающие. В группу относят дроны и беспилотные самолёты.

Плавающие. Перемещение на воде или под водой с помощью силы ветра, винтов или реактивной тяги.

Стационарные. Роботы, которые обычно устанавливаются на фундаменте, потолке или несущих стенах, чаще всего используются в производственных процессах.

Гексаподы. Роботы с шестью ногами, передвигающиеся подобно насекомым.

По истории создания [2, 3]:

Первое поколение. Это роботы разрабатываемые с 1950 по середину 1970-х годов, роботы работали по жесткой программе и не могли адаптироваться к изменяющимся условиям. Они включали автооператоры и механические руки, используемые для выполнения простых производственных задач.

Второе поколение. Эти роботы разрабатывались с середины 1970-х по середину 1990-х годов. Роботы управлялись с помощью микроЭВМ и микропроцессоров, что позволяло им решать более сложные задачи по сравнению с роботами первого поколения.

Третье поколение. Это роботы разрабатываемые с середины 1990-х годов по настоящее время. Они принципиально отличаются от предыдущих поколений сложностью и совершенством управляющей системы, включающей элементы искусственного интеллекта.

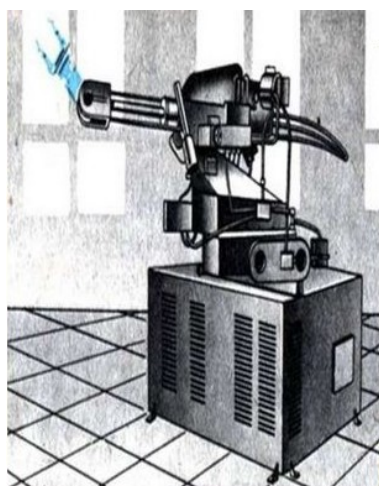


Рисунок 4 - Роботы первого, второго и третьего поколения

По управлению:

Жесткопрограммируемые (переобучаемые). Они не могут корректировать свои действия в зависимости от меняющихся внешних условий, поэтому при их применении в промышленности внешняя среда должна быть организована. Информация программы не меняется в процессе работы, однако такие роботы подлежат переналадке.

Перепрограммируемые (обучаемые). Их обучение осуществляется по первому рабочему циклу. Так, к примеру, перед началом работы захватного устройства человек-оператор сначала вручную проводит его по необходимой траектории. При этом программное обеспечение таких роботов позволяет на основе сигналов обратных связей корректировать управление машиной с учетом фактической обстановки.

Гибкопрограммируемые (самообучаемые). Могут формировать программу в зависимости от поставленной цели и информации об объектах и условиях внешней среды. Кроме развитой сенсорной системы обладают мощной управляющей системой и передовым алгоритмическим и программным обеспечением, за счет чего способны распознавать образы и ситуации, моделировать окружающую среду, планировать поведение и самообучаться в процессе функционирования. Такие роботы применяются в самых сложных технологических процессах сборки, монтажа, контрольно-измерительных технологиях.

По позиционированию возможных перемещений:

Шарнирные. Имеют несколько управляемых осей, благодаря чему могут выполнять движения с широкой траекторией. Как правило, это роботизированные руки, которые применяются в шлифовании, паллетировании, покраске, сварке и многом другом.

SCARA. (Selective Compliance Articulated Robot Arm) - шарнирно-сочлененный робот с избирательной податливостью манипулятора. В основе механизма лежит система, состоящая не менее чем из двух рычагов и двух отдельных приводов. Такие роботы характеризуются

высокой скоростью выполнения задач. Удобны для операций по сборке и монтажу. Могут не просто захватывать объекты согласно программе, но также самостоятельно регулировать нагрузку и контролировать движение.

Сферические. Имеют две степени вращения и одну поступательную степень. Совершают вращательное вертикальное движение, благодаря чему образуют в пространстве сферу. Универсальны, выполняют широкий спектр задач в промышленности и на производстве.

Цилиндрические. Характеризуются наличием двух шарниров: поворотного (для вращения) и призматического (для углового перемещения вокруг оси шарнира). С помощью таких роботов происходит процесс управления станками, точечная сварка, сборка и прочее.

Декартовы. Работают в декартовой системе координат, используют линейные оси для движения. Имеют простую систему программирования, но при этом отличаются высокой грузоподъемностью и точностью выполняемых операций.

Результаты

В литературе встречаются различные определения термина робот, однако определение, закрепленное в ГОСТе сформулировано не корректно, в следствии этого возникает путаница, связанная с применением этого термина. Вследствие этого было предложено новое определение термина «робот», которое дает более ясное представление о понятии «робот», его возможностях и назначении.

Так же в ходе исследования был выявлена проблема смежности определений РТК и «робот», проведя анализ определений был сделан вывод о том, что каждый РТК подходит под определение робота, однако не каждый робот является РТК так как, это понятие включает в себя не только робота способного выполнять узконаправленный круг задач, но и дополнительные системы дающие большую автономность и расширяющие его функционал.

Выводы

Существующая классификация, не дает полной картины о правильном порядке применения и использования РТК, так же данную классификацию не рационально применять для РТК не гражданского назначения, так как не хватает критериев для оценки возможностей и однозначной классификации таких РТК. Необходимо расширить классификацию, добавить больше признаков, которые помогут более подробно раскрыть предназначение, область применения и технические характеристики РТК. Существует необходимость создания единого классификатора для более правильного определения функционала рассматриваемого РТК, и постановки задач для него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров И. М., Топчиев Ю. И. Робототехника: История и перспективы. – М.: Наука. 2003. 349 с.
2. Никифоров П. В. История развития и современное состояние робототехники // Вестник науки. 2019. №1 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-razvitiya-i-sovremennoe-sostoyanie-robototekniki> (дата обращения: 13.03.2025).
3. В. Л. Конюх. История робототехники // Основы робототехники. – Ростов-на-Дону: «Феникс». 2008. С. 21. 281 с.
4. Овчинников Валентин Васильевич, Батанов Александр Федорович, Мингалеев Салават Галимджанович Роботы в Чернобыле // Технологии гражданской безопасности. 2019. №4 (62). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/roboty-v-chernobyle> (дата обращения: 13.03.2025).
5. R.H. Taylor, P.D:Summers, and J.M. Meyer, “AML: A Manufacturing Language,” Zntl. J. Robotics Research, vol. 1, no. 3, pp. 19-41, Fall 1982.
6. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. М: Стандартинформ, 2019. 32 с.
7. ГОСТ Р 60.0.0.4-2023. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. М: Российский институт стандартизации, 2023. 28 с.
8. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Большая Российская энциклопедия; Спб.: Норинт, 2004. – 1456 с.
9. Большая советская энциклопедия : в 30 т. / гл. ред. А.М. Прохоров. – М. : Сов. энцикл., 1970–1981. – 30 т.
10. Большая политехническая энциклопедия. - М.: Мир и образование. Рязанцев В. Д.. 2011.
11. Сергиевич Т. В. Классификация роботов в целях экономических исследований // Экономическая наука сегодня. 2022. №16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-robotov-v-tselyah-ekonomicheskikh-issledovaniy> (дата обращения: 13.03.2025).

Ивановский Владимир Сергеевич
Правительство Орловской области
Адрес: 302021, г. Орёл, пл. Ленина, 1
Доктор технических наук, первый
заместитель Губернатора Орловской
области в Правительстве Орловской
области
E-mail: post@adm.orel.ru

Спирин Максим Сергеевич
Федеральное государственное
автономное учреждение
«военный инновационный
технополис «эра»
Адрес: 353456, Россия, г.
Анапа, Пионерский пр-кт, д. 41
Кандидат технических наук,
начальник научного
исследовательского отдела
E-mail: era_otd2@mil.ru

Косарич Марк Богданович
Федеральное государственное
автономное учреждение «военный
инновационный технополис «эра»
Адрес: 353456, Россия, г. Анапа,
Пионерский пр-кт, д. 41
Командир 1 взвода (научного) 2
роты (научной) – младший
научный сотрудник
E-mail: markkosaritch@yandex.ru

IVANOVSKIY V.S., SPIRIN M.S., KOSARICH M.B.

ROBOTIC COMPLEXES: TERMS AND DEFINITIONS, CLASSIFICATION DIFFICULTIES

Abstract. *The article discusses robotic complexes (RTCs) as an important element of modern warfare and the civilian sector. The terms and definitions related to RTCs are analyzed, as well as the complexity of their classification. The introduction to the topic highlights the relevance of using RTCs in various fields, including military applications, where they demonstrate significant advantages in intelligence and combat operations. The article provides a historical overview of the development of robotics, definitions of the term "robot" from various sources, and formulates typical features of a robot. The article also presents various classifications of robots by purpose, type of control, method of movement and other criteria, which helps to better understand their functionality and applications. The conclusion highlights the need to clarify definitions and expand classifications for a more accurate understanding and use of RTC.*

Keywords: *robots, RTC, robotic complexes, classification, robotics*

BIBLIOGRAPHY

1. Makarov I. M., Topcheyev YU. I. Robototekhnika: Istoriya i perspektivy. – М.: Nauka. 2003. 349 s.
2. Nikiforov P. V. Istoriya razvitiya i sovremennoye sostoyaniye robototekhniki // Vestnik nauki. 2019. №1 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-razvitiya-i-sovremennoe-sostoyanie-robototekhniki> (data obrashcheniya: 13.03.2025).
3. V. L. Konyukh. Istoriya robototekhniki // Osnovy robototekhniki. – Rostov-na-Donu: «Feniks». 2008. S. 21. 281 s.
4. Ovchinnikov Valentin Vasilyevich, Batanov Aleksandr Fedorovich, Mingaleev Salavat Galimdzhanovich. Roboty v Chernobyle // Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti. 2019. №4 (62). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/roboty-v-chernobyle> (data obrashcheniya: 13.03.2025).
5. R.H. Taylor, P.D:Summers, and J.M. Meyer, “AML: A Manufacturing Language,” Zntl. J. Robotics Research, vol. 1, no. 3, pp. 19-41, Fall 1982.
6. GOST R 60.0.0.4-2019. Roboty i robototekhnicheskiye ustroystva. Terminy i opredeleniya. М: Standartinform, 2019. 32 с.
7. GOST R 60.0.0.4-2023. Roboty i robototekhnicheskiye ustroystva. Terminy i opredeleniya. М: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2023. 28 с.
8. Bolshoy entsiklopedicheskiy slovar / gl. red. A. M. Prokhorov. – 2-ye izd., pererab. i dop. – М.: Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya; Spb.: Norint, 2004. – 1456 s.
9. Bolshaya sovetetskaya entsiklopediya : v 30 t. / gl. red. A.M. Prokhorov. – М. : Sov. entsikl., 1970–1981. – 30 t.
10. Bolshaya politekhnicheskaya entsiklopediya. - М.: Mir i obrazovaniye. Ryazantsev V. D.. 2011.
11. Sergiyevich T. V. Klassifikatsiya robotov v tselyakh ekonomicheskikh issledovaniy // Ekonomicheskaya nauka segodnya. 2022. №16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-robotov-v-tselyah-ekonomicheskikh-issledovaniy> (data obrashcheniya: 13.03.2025).

Ivanovskiy Vladimir Sergeevich
Government of the Orel region
Address: 302021, Russia, Orel, Lenin
Square, 1
Doctor of Technical Science, First
Deputy Governor of the Orel region
in the Government of the Orel region
E-mail: post@adm.orel.ru

Spirin Maxim Sergeevich
Federal state autonomous institution
«military innovation technopolis
«era»
Address: 353456, Russia, Anapa,
Pionersky ave, 41
Candidate of Technical Science,
Head of the Scientific Research
Department
E-mail: era_otd2@mil.ru

Kosarich Mark Bogdanovich
Federal state autonomous institution
«military innovation technopolis
«era»
Address: 353456, Russia, Anapa,
Pionersky ave, 41
Commander of the 1st platoon
(scientific) of the 2nd company
(scientific) – junior researcher
E-mail: markkosaritch@yandex.ru

ЗЛОБИН С.Н., КАРПОВ А.Е.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ТЯГОВЫХ ПРИВОДОВ ЛОКОМОТИВА

Аннотация. Рассмотрены основы поиска и анализа конструктивных решений тяговых приводов локомотивов. В результате анализа узлов тягового привода зарубежных локомотивов с использованием методов технической инновационики выявлены недостатки, приводящие к ухудшению процессов технологичности сборки и обслуживания. Предложены новые конструкции тягового привода локомотивов и его узлов.

Ключевые слова: теория конструирования, изобретательское творчество, инженерный эксперимент, прогнозирование, локомотивы, моторвагонный подвижной состав.

Введение

Использование агрегатного ремонта локомотивов позволяет повысить качество ремонта в целом и сократить издержки на содержание и развитие основных фондов в виде производственных мощностей ремонтно-обслуживающих предприятий, находящихся в составе ОАО «РЖД». С другой стороны, это усиливает зависимость эксплуатационных служб железных дорог от производителей локомотивов и затрудняет импортозамещение, учитывая, что в эксплуатации находится значительное количество локомотивов, созданных в сотрудничестве с зарубежными фирмами, в конструкции которых были использованы импортные узлы. Обычно технические решения принято выбирать с учетом изучения современных тенденций конструирования в мировой практике и стали определяться политикой нескольких крупных компаний, заинтересованных в невозможности проникновения на рынок новых производителей за счет продвижения таких конструкций, которые технологически сложно воспроизвести конкурентам.

Возникает проблема оценки методов процессов проектирования при выборе вариантов конструкции узлов локомотива (в рассматриваемом случае – тягового привода) применительно к задаче повышения технологичности производства его в отечественных условиях. Предлагаемая статья является попыткой решения указанной проблемы.

Алгоритмизация процесса проектирования

В качестве алгоритмической основы поиска проектного решения тягового привода предложены алгоритмы (рисунок 1 и рисунок 2).

Алгоритм на рисунке 1 представляет собой формализованную общую процедуру поиска проектных решений, которая, в свою очередь, состоит из пяти процедур (далее – этапов) выбора варианта решения на уровне определения функций, физических принципов работы, способов использования физических эффектов, определяющих конфигурацию (геометрию) проектного решения, конструктивной схемы и технического исполнения (технологии изготовления). Алгоритм входит в качестве процедуры в алгоритмы решения задач создания новых конструкций. Выполнение процедур алгоритма в обратном порядке представляет собой алгоритм анализа известной конструкции (прототипа) для устранения ее недостатков.

На рисунке 2 представлен общий алгоритм процедур решения проблем, возникающих во время проектирования, который также является алгоритмом синтеза алгоритмов поиска решения изобретательских задач, потому что последние могут быть выведены из него, как частные случаи, с учетом отраслевой специфики изобретаемых устройств. Алгоритм на рисунке 1 входит в его состав в качестве процедур декомпозиции объекта (исполнение подпроцедур в обратном порядке) и композиции нового объекта (исполнение в прямом порядке).

В нашей стране слово «алгоритм» по отношению к пошаговой методике решения технической задачи, которую можно применять по отношению к неопределенно широкому кругу решения технических задач, было впервые предложено Г.С. Альтшуллером в 1965 году [1]. Дальнейшее развитие предложенного Г.С. Альтшуллером алгоритма решения изобретательских задач шло по пути усложнения структуры алгоритма. Аналогичный подход к алгоритмизации в отечественной методологии создания технических объектов характерен для прикладной теории изобретений В.И. Огнева [2].

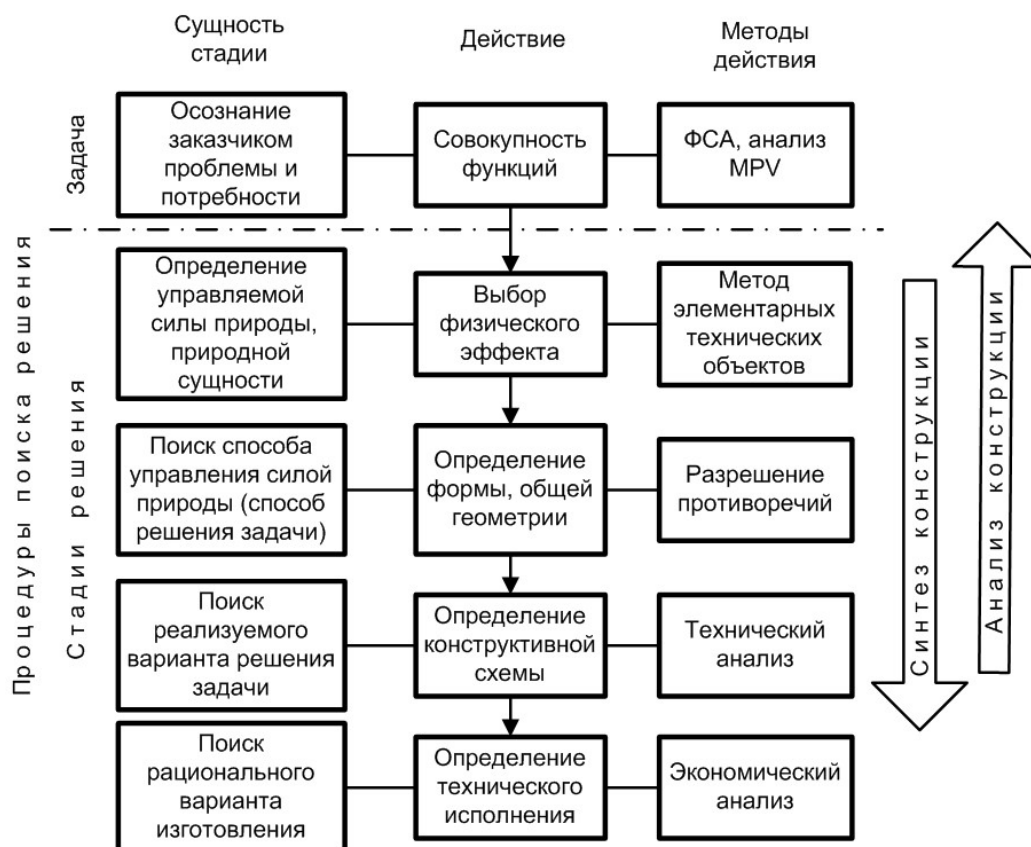


Рисунок 1 – Алгоритм поиска проектного решения

В методе К. Рота [3] представлен наиболее развитый на сегодняшний день подход к созданию алгоритмов проектирования, который в общем виде включает в себя создание систематизированных баз, данных (каталогов) и процедур возможного условного перехода для обхода части процедур при самоочевидности решения.

Дальнейшее развитие алгоритмизации проектирования предполагает решение трех методологических задач. Во-первых, это дальнейшее осмысление на научно-теоретическом уровне стадий процесса проектирования. Во-вторых, это сближение двух направлений алгоритмизации, создание алгоритмов, объединяющих в себе алгоритмы проектирования и алгоритмы решения изобретательских задач. В-третьих, это переход от создания отдельных алгоритмов к общему методу построения алгоритмов проектирования применительно к специфике конкретных задач. Попытка найти подход к решению второй и третьей задач предпринята в [4], в виде универсального метода синтеза алгоритмов решения изобретательских задач, вариант которого с учетом матрицы уровней управления природными явлениями изображен на рисунке 2.

Начальной процедурой алгоритма является возникновение ситуации, когда задача не решается известными методами, то есть алгоритм решения изобретательской задачи в общем алгоритме действий проектировщика, это процедура, когда в поставленных условиях содержится противоречие между требуемыми свойствами объекта и возможными свойствами готовых решений, описанных в конструкторских каталогах, справочниках, и т.п.

Это противоречие, в свою очередь, обнаруживается вследствие обычных для проектирования действий. Если вариант решения, соответствующий требованиям к техническому объекту, выбран, процедура не запускается.

Описание проблемы (проблемной ситуации) есть общий начальный элемент любого алгоритма, поскольку выражает потребность в поиске нового решения, что самоочевидно: нет потребности, нет и поиска.

Следующая часть, обязательная для всех алгоритмов, с точки зрения цели представляет собой переход от описания проблемной ситуации к подготовке формулировки задачи, а с точки зрения средств – процесс декомпозиции одного или нескольких исходных технических объектов, определенных в качестве прототипов. Таким образом, сущность декомпозиции – это

последовательное абстрагирование от конкретного прототипа, переход от него к функциональной схеме.

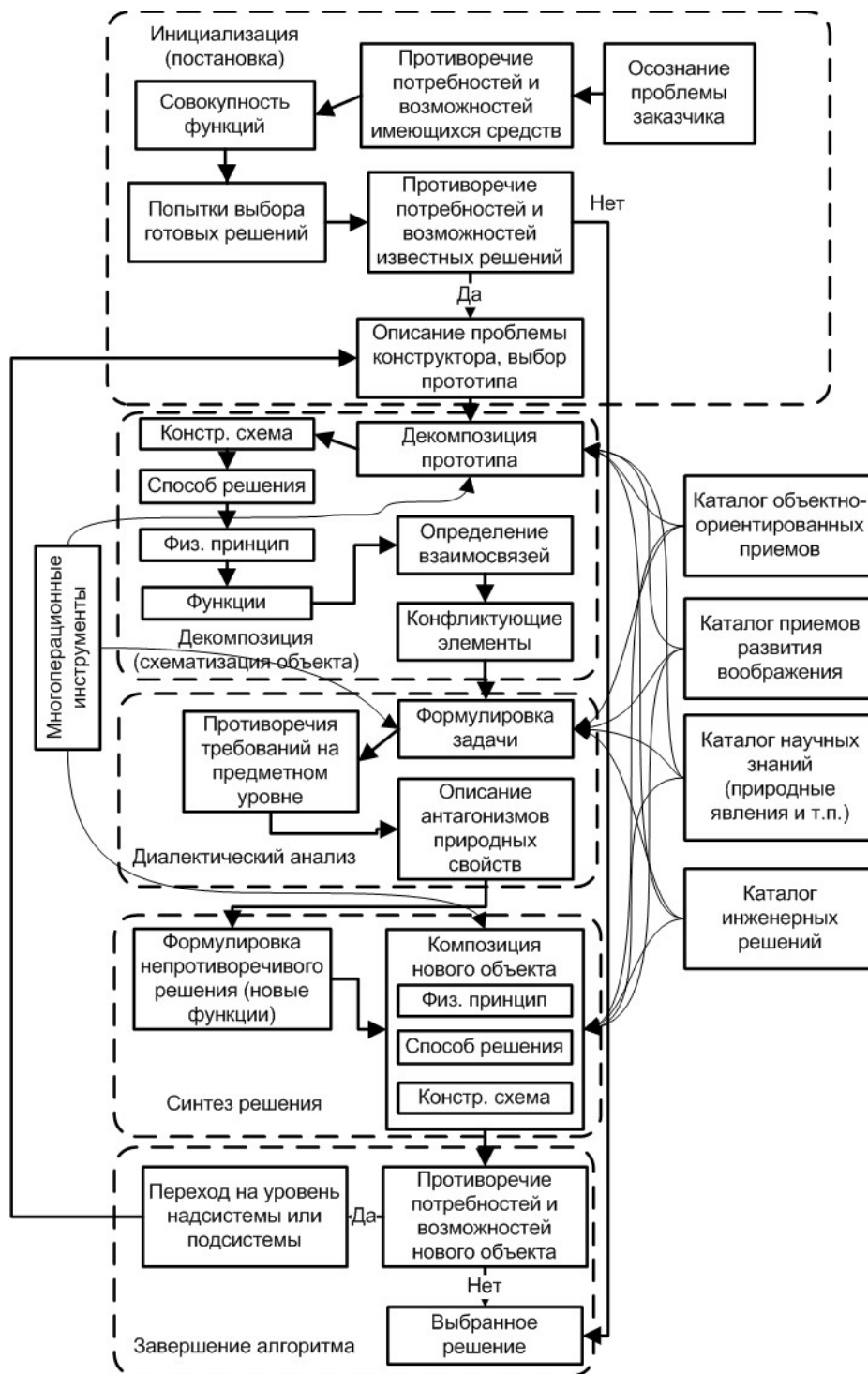


Рисунок 2 – Общий алгоритм решения проблем, возникающих при проектировании

При создании алгоритма процедура декомпозиции формируется разработчиком в виде последовательности операций, которые представляют собой два основных вида типовых приемов. Первый вид – это проблемно-ориентированные приемы функционального моделирования, универсальные или рассчитанные на рассматриваемый класс технических объектов. Второй вид приемов – это приемы, развивающие творческое воображение безотносительно к рассматриваемому объекту. Цель следующей части алгоритма – сформулировать техническую задачу, абстрагированную от конкретного конструктивного исполнения объекта и технологии его изготовления, на уровне функциональных моделей и моделей структуры природных явлений, используемых в объекте. Основываясь на

выделенных частных функциях и осознанном антагонизме, проектировщик составляет на уровне функций непротиворечивое описание цели решения задачи как идеального объекта. Это ключевая стадия алгоритма, цель которой – формулировка решения задачи на уровне частных функций.

Основываясь на описании частных функций идеального объекта, проектировщик переходит к стадии композиции нового объекта, которая в целом аналогична методу вариации эффектов при выявленных частных функциях [4].

В предлагаемом методе в качестве общих приняты способы синтеза нового объекта «с нуля» любым способом, в первую очередь, способами методического конструирования, а приемам разрешения противоречий отводится роль самостоятельных инструментов для частного случая синтеза нового объекта на основе известного прототипа.

Наконец, событием, завершающим процедуру решения, является установление соответствия возможных свойств сгенерированного нового объекта первоначальным требованиям к его свойствам. Если соответствие есть, процедура завершается.

Исходя из общих теоретических закономерностей развития индустриального общества, можно сделать вывод о назревшей потребности в создании новых методов проектирования машин, учитывающих заведомый недостаток опыта и знаний при проектировании. Теоретической основой для создания таких методов является техническая инновационика.

Характеристика решаемой проблемы

Анализ известных методов повышения коэффициента сцепления показал, что ни один из них в том виде, в каком его пытались реализовывать на локомотивах, не обеспечил стабильного увеличения сцепных свойств при приемлемых для железных дорог затратах. Кроме того, создание системы управления устройствами повышения коэффициента сцепления затрудняется слабой предсказуемостью коэффициента сцепления: данные разных исследований о его величине из зависимости от внешних факторов существенно различны.

Постановка и решение задачи

Путем применения алгоритма (рисунок 1) в обратной последовательности для определения базовых функций, авторами сделан вывод, что в комплексе систем, относящихся к реализации силы тяги (тяговый привод, система управления тяговым приводом, противобоксовочные устройства) не предусмотрена функция стабилизации силы тяги, потому что нерегулируемость коэффициента сцепления принималось как объективно заданное условие, а системы повышения сцепных свойств реализовывали функцию простого увеличения сцепления, но не поддержания его постоянства. После определения нового комплекса функций алгоритм был реализован в прямой последовательности.

В результате выполнения процедур второго этапа принятия решений выбраны физические эффекты, реализующие данную функцию – пропускание через поверхность контакта электрического тока или магнитного поля. Данные эффекты позволяют выполнить условия плавности и безынерционности регулирования и не требуют расхода песка или другого материала при работе.

При выполнении процедур третьей стадии (выбор способа использования физического эффекта) было установлено, что попытки реализации воздействия магнитного поля на поверхность контакта на существующих тяговых приводах локомотивов не всегда оказывались эффективными из-за недостаточного магнитного потока, создаваемого индуктором (ТЭМ2УС). Кроме того, необходимо, чтобы система управления прогнозировала начало боксования.

Таким образом, возникает необходимость поиска конструктивного варианта тягового привода, который обеспечивает достаточное место для размещения устройств регулирования коэффициентов сцепления, и свойства которого позволяют получить управляющий сигнал для регулирования коэффициента сцепления. Эта задача соответствует выполнению процедур четвертой стадии принятия решений – выбора конструктивной схемы.

Для решения задачи на основе алгоритма синтеза решения изобретательских задач авторами создан алгоритм инженерного анализа по влиянию магнитного поля на коэффициент трения [5], разработана классификация технических решений усилителей сцепления и конструкций тяговых приводов [6], разработан алгоритм (рисунок 3) создания конструкций энергосберегающего тягового привода (7).

Благодаря классификации технических решений усилителей сцепления удалось установить, что наиболее эффективной, с точки зрения создания максимального магнитного потока в контакте колеса и рельса, является аксиальная схема индуктора.

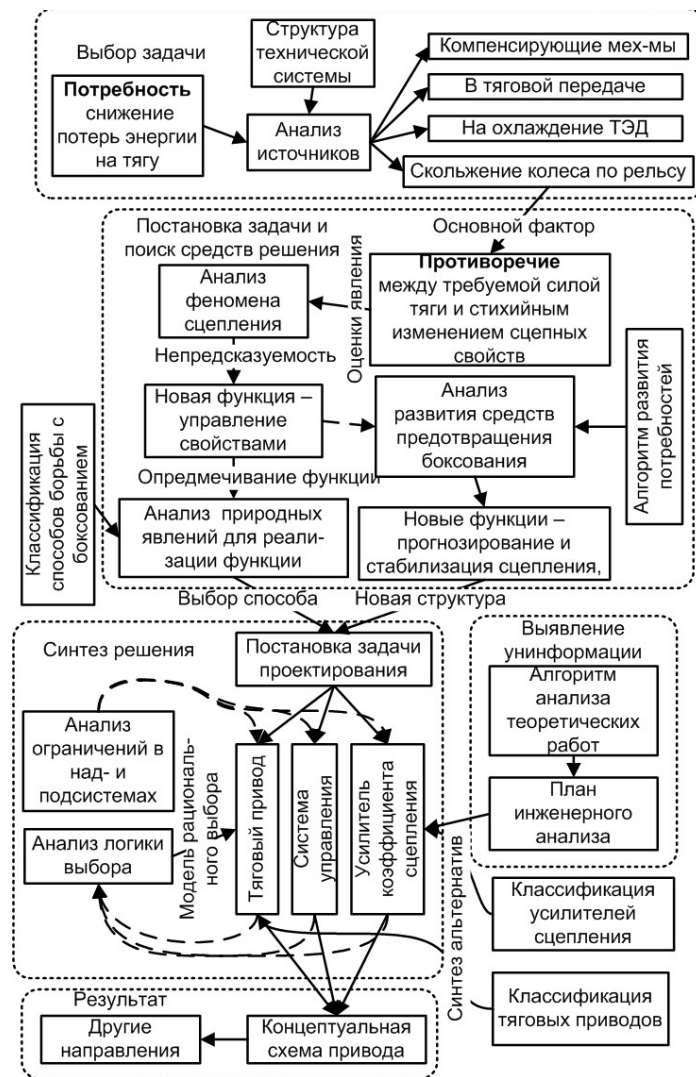


Рисунок 3 – Общий алгоритм создания конструкций энергосберегающего привода

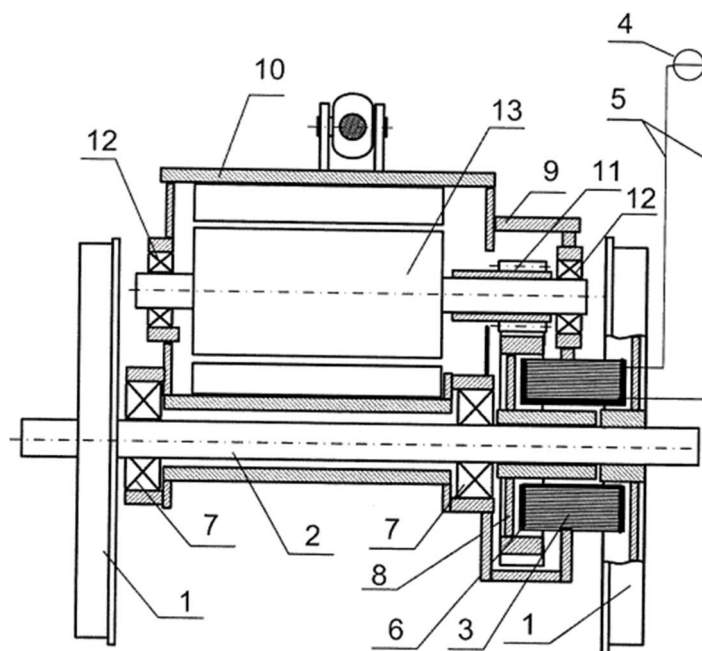


Рисунок 4 – Устройство для увеличения сцепления ведущих колёс локомотива с рельсами:

1 – колесо; 2 – ось; 3 – катушка; 4 – источник питания; 5 – провод; 6 – каркас; 7 – подшипник качения; 8 – большое зубчатое колесо; 9 – редуктор; 10 – тяговый электродвигатель; 11 – малое зубчатое колесо; 12 – подшипник; 13 – ротор тягового электродвигателя

В качестве примера использования алгоритма (рисунок 3) ниже приведена схема устройства тягового привода для повышения сцепных качеств локомотива (рисунок 4).

Предложенное устройство послужило основой для разработки ряда запатентованных устройств [8 – 14].

Отличительной особенностью конструкции является то, что намагничивающая обмотка в виде катушки размещена между диском колеса колесной пары и большим зубчатым колесом тяговой передачи. Предложенная конструкция позволяет повысить производительность локомотива путем увеличения коэффициента сцепления между колесами и рельсами вследствие увеличения магнитного потока, создаваемого катушкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтшуллер, Г.С. Внимание! Алгоритм изобретения! / Г.С. Альтшуллер // Приложение к «Экономической газете» от 01.09.1965.
2. Огнев, В.И. Творчески мысля, работая, создавать... Прикладная теория изобретений: компендиум / В.И. Огнев. – Петрозаводск: Фолиум, 2010. – 108 с.: ил.
3. Roth, K. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre: монография / K. Roth. – 3. Aufl. Springer. – Berlin, 2000. – 440 с.
4. Техническая инновационика. Методы изобретательского творчества: монография / О.В. Измеров [и др.]. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2011. – 213 с.
5. Техническая инновационика. Применение физико-технических эффектов при конструировании транспортных машин: монография / В.И. Воробьев, С.Н. Злобин, О.В. Измеров [и др.]. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – 208 с. – ISBN 978-5-9929-1423-8.
6. Техническая инновационика. Классификации в технике: монография / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, Д.В. Воробьев [и др.]. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – 186 с. – ISBN 978-5-9929-1305-7.
7. Концепция развития энергосберегающих электромеханических систем: монография / А.С. Космодамианский [и др.]; под ред. академика Академии электротехн. наук Рос. Федерации, д-ра техн. наук, проф. А.С. Космодамианского. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2014. – 244 с.
8. Патент 187010 Российская Федерация, МПК В61С 15/08 (2006.01) Устройство для увеличения сцепления колес локомотива с рельсами / Антипин Д.Я., Воробьев В.И., Маслов М.А. и др. / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». – №2017138306; заявл. 02.11.2017; опубл. 13.02.2019, Бюл. № 5.
9. Патент 217859 Российская Федерация, МПК В61С 15/08. Тяговый привод локомотива / Воробьев В.И., Злобин С.Н., Измеров О.В. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева». – № 2022128487; заявл. 01.11.2022; опубл. 21.04.2023, Бюл. № 12.
10. Патент 223262 Российская Федерация, МПК В61С 15/08. Тяговый привод локомотива / Воробьев В.И., Злобин С.Н., Измеров О.В. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева». – № 2023126944; заявл. 18.10.2023; опубл. 09.02.2024, Бюл. № 4.
11. Патент 214497 Российская Федерация, МПК В61С 15/08. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Воробьев В.И., Злобин С.Н., Измеров О.В. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева». – № 2022119827; заявл. 19.07.2022; опубл. 01.11.2022, Бюл. № 31.
12. Патент 221671 Российская Федерация, МПК В61С 15/08. Устройство для увеличения сцепления колёсной пары тепловоза с рельсами / Злобин С.Н., Космодамианский А.С., Воробьев В.И. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева». – № 2023118340; заявл. 11.07.2023; опубл. 16.11.2023, Бюл. № 32.
13. Патент 224580 Российская Федерация, МПК В61С 9/48. Тяговый привод локомотива / Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Измеров О.В. и др.; заявитель и патентообладатель Космодамианский А.С. – № 2023135014; заявл. 25.12.2023; опубл. 29.03.2024, Бюл. № 10.
14. Патент 222894 Российская Федерация, МПК В61С 9/48. Тяговый привод локомотива / Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Измеров О.В. и др.; заявитель и патентообладатель Космодамианский А.С. – № 2023128801; заявл. 08.11.2023; опубл. 23.01.2024, Бюл. № 3.

Злобин Сергей Николаевич

Орловский государственный университет имени
И.С. Тургенева, г. Орёл

Кандидат технических наук, доцент кафедры
машиностроения

E-mail: zsn2@rambler.ru

Карпов Артем Евгеньевич

Российский университет транспорта (МИИТ),
г. Москва

Ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав»

E-mail: akarpov576@gmail.ru

ZLOBIN S.N., KARPOV A.E.

METHODOLOGICAL BASIS OF DESIGN SOLUTIONS FOR LOCOMOTIVE TRACTION DRIVES

Abstract. *The article considers the principles of searching for and analyzing design solutions for locomotive traction drives. As a result of analyzing the traction drive units of foreign locomotives using technical innovation methods, shortcomings leading to deterioration in assembly and maintenance processes have been identified. New designs of locomotive traction drives and their units have been proposed.*

Keywords: *design theory, inventive creativity, engineering experiment, forecasting, locomotives, motor-car rolling stock.*

BIBLIOGRAPHY

1. Altshuller, G.S. Vnimanie! Algoritm izobreteniya! / G.S. Altshuller // Prilo-zhenie k «Ekonomicheskoy gazete» ot 01.09.1965.
2. Ognev, V.I. Tvorcheskii myslya, rabotaya, sozdat... Prikladnaya teoriya izobrete-nij: kompendium / V.I. Ognev. – Petrozavodsk: Folium, 2010. – 108 s.: il.
3. Roth, K. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre: mono-grafiya / K. Roth. – 3. Aufl. Springer. – Berlin, 2000. – 440 s.
4. Tekhnicheskaya innovacionika. Metody izobretatelskogo tvorchestva: monografiya / O.V. Izmerov [i dr.]. – Orel: Gosuniversitet – UNPK, 2011. – 213 s.
5. Tekhnicheskaya innovacionika. Primenenie fiziko-tekhnicheskikh effektiv pri konstruirovanii transportnykh mashin: monografiya / V.I. Vorobev, S.N. Zlobin, O.V. Izmerov [i dr.]. – Oryol: OGU imeni I.S. Turgeneva, 2023. – 208 s. – ISBN 978-5-9929-1423-8.
6. Tekhnicheskaya innovacionika. Klassifikatsii v tekhnike: monografiya / A.S. Kosmodamianskij, V.I. Vorobev, D.V. Vorobev [i dr.]. – Oryol: OGU imeni I.S. Turgeneva, 2023. – 186 s. – ISBN 978-5-9929-1305-7.
7. Konceptsiya razvitiya energosberegayushchih elektromekhanicheskikh sistem: monografiya / A.S. Kosmodamianskij [i dr.]; pod red. akademika Akademii elektrotekhn. nauk Ros. Federatsii, d-ra tekhn. nauk, prof. A.S. Kosmodamianskogo. – Orel: Gosuniversitet – UNPK, 2014. – 244 s.
8. Patent 187010 Rossijskaya Federaciya, MPK B61C 15/08 (2006.01) Ustrojstvo dlya uvelicheniya scep-leniya koles lokomotiva s relsami / Antipin D.YA., Vorobyov V.I., Maslov M.A. i dr. / zayavitel i patentoobladatel FGBOU VO «Bryanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». – №2017138306; zayavl. 02.11.2017; opubl. 13.02.2019, Byul. № 5.
9. Patent 217859 Rossijskaya Federaciya, MPK B61C 15/08. Tyagovyy privod lokomotiva / Vorobev V.I., Zlobin S.N., Izmerov O.V. i dr.; zayavitel i patentoobladatel FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva». – № 2022128487; zayavl. 01.11.2022; opubl. 21.04.2023, Byul. № 12.
10. Patent 223262 Rossijskaya Federaciya, MPK B61C 15/08. Tyagovyy privod lokomotiva / Vorobev V.I., Zlobin S.N., Izmerov O.V. i dr.; zayavitel i patentoobladatel FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva». – № 2023126944; zayavl. 18.10.2023; opubl. 09.02.2024, Byul. № 4.
11. Patent 214497 Rossijskaya Federaciya, MPK B61C 15/08. Ustrojstvo dlya uvelicheniya scep-leniya vedushchih koles lokomotiva s relsami / Vorobev V.I., Zlobin S.N., Izmerov O.V. i dr.; zayavitel i patentoobla-datel FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva». – № 2022119827; zayavl. 19.07.2022; opubl. 01.11.2022, Byul. № 31.
12. Patent 221671 Rossijskaya Federaciya, MPK B61C 15/08. Ustrojstvo dlya uvelicheniya scep-leniya ko-lyosnoj pary teplovoza s relsami / Zlobin S.N., Kosmodamianskij A.S., Vorobev V.I. i dr.; zayavitel i pa-tentoobladatel FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva». – № 2023118340; zayavl. 11.07.2023; opubl. 16.11.2023, Byul. № 32.
13. Patent 224580 Rossijskaya Federaciya, MPK B61C 9/48. Tyagovyy privod lokomotiva / Kosmoda-mianskij A.S., Vorobev V.I., Izmerov O.V. i dr.; zayavitel i patentoobladatel Kosmodamianskij A.S. – № 2023135014; zayavl. 25.12.2023; opubl. 29.03.2024, Byul. № 10.
14. Patent 222894 Rossijskaya Federaciya, MPK B61C 9/48. Tyagovyy privod lokomotiva / Kosmoda-mianskij A.S., Vorobev V.I., Izmerov O.V. i dr.; zayavitel i patentoobladatel Kosmodamianskij A.S. – № 2023128801; zayavl. 08.11.2023; opubl. 23.01.2024, Byul. № 3.

Zlobin Sergey Nikolaevich

Orel State university, Orel

Candidate of technical sciences, Associate Professor of
the Department of Mechanical engineering

E-mail: zsn2@rambler.ru

Karpov Artem Evgenievich

Russian University of Transport (MIIT), Moscow

Assistant of the Department «Traction rolling stock»

E-mail: akarpov576@gmail.ru

ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 676.052.484, 616.13, 616.14

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-371-3-109-118

САЙФУТДИНОВА М.С., ЛЕОНОВ Д.В., ВАСИЛЬЕВ Ю.А., ОМЕЛЯНСКАЯ О.В.,
КОСТЕНКО Е. А., БУЛГАКОВА Ю.В., НАСИБУЛЛИНА А.А., ВЛАСОВА О.В.,
ГРЕБЕННИКОВА В.В., БЕЛЯКОВА Е.Д., АКОПОВА А.Ю.

ФОРМИРОВАНИЕ НАБОРА СИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНЕРА, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ТРАКТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ IN VIVO ИССЛЕДОВАНИИ КРОВОТОКА

Аннотация. Проведено клиническое исследование кровотока у добровольцев. Из тракта предварительной обработки сканера Сономед-500 получены радиочастотные ультразвуковые сигналы, на основе которых сформирована база данных. База данных дополнена ультразвуковыми снимками и видео со сканера Mindray M9T, который использовался в качестве эталонного прибора. Сигналы крупных артерий и вен были получены с использованием доплеровского режима и стандартных протоколов сканирования. Исследовались: сонная, плечевая и бедренная артерии, печеночная и воротная вены. База данных включает наборы «сырых» сигналов, а также изображения и видео. Собранные данные могут служить основой для разработки новых алгоритмов ультразвуковой визуализации и улучшения существующих подходов к обработке доплеровских сигналов.

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика; база данных; «сырые» данные УЗИ; цветное доплеровское картирование; кровоток.

Введение

Современные технологии доплеровской ультразвуковой визуализации широкодоступны и применяются во многих медицинских учреждениях [1–3]. Они в реальном времени дают врачу ценную информацию о состоянии сосудов, что критически важно для планирования дальнейшего лечения [4]. Сердечно-сосудистые заболевания и заболевания сосудов имеют высокие показатели смертности не только в России (РФ), но и в мире [5–7]. В Рязанском регионе болезни сосудов составляют 28,2% [8]. Основные факторы риска: дислипидемия и артериальная гипертензия [9], которой в РФ страдают 29% женщин и 41,1% мужчин [10], что значительно влияет на состояние стенок артерий и вен [10, 11]. При этом восстановление нормы артериального давления достигается у 31,5% женщин и у 14,5% мужчин. В РФ среди пожилого населения от превышения уровня холестерина в крови страдают 56,3% мужчин и 58,4% женщин, от превышения уровня триглицеридов – 30,8% и 22,8%, соответственно, от повышенного содержания липопротеинов – 13,2% и 15,2%, соответственно. Отклонения от нормы увеличивают риск атеросклеротического поражения сосудов, что значительно влияет на их проходимость [12–15]. Также актуальным является диагностика заболеваний вен. Например, наиболее распространенным (более 90% случаев) заболеванием вен является тромбоз. Тромбоз нижней полой вены может стать причиной тромбоэмболии легочной артерии, которая в развитых странах встречается у 1/1000 населения [16].

Рост количества заболеваний ведет к увеличению числа исследований, и, как следствие, к повышению требований к качеству диагностической информации [17, 18]. Повышение качества информации достигается за счет разработки и внедрения новых алгоритмов обработки сигналов. Стоит отметить, что сигналы из тракта предварительной обработки ультразвуковой системы содержат больше информации, чем изображение на экране ультразвукового сканера [19]. Совершенствование ультразвуковой диагностики во многом связано именно с тем, что новые алгоритмы извлекают из этих сигналов больше информации, чем тот объем данных, который удавалось получить прежде [20]. Поэтому такие данные необходимы для развития алгоритмов обработки сигналов ультразвуковой диагностики и повышения информативности ультразвуковой визуализации.

В данной работе формируется и описывается открытая база сигналов доплеровского тракта ультразвукового прибора, полученная при исследовании кровотока на разных участках крупных вен и артерий добровольцев, которая может быть использована для разработки и тестирования новых алгоритмов цифровой обработки сигналов доплеровского тракта ультразвукового устройства.

Основная часть

Материалы и методы

В исследованиях и записи сигналов кровотока принимали участие четыре здоровых добровольца в возрасте от 21 до 35 лет. В базу включены цифровые записи наблюдений сигналов кровотока крупных артерий и вен, записанные в режимах цветового доплеровского картирования (ЦДК) и В-режиме с помощью ультразвукового прибора Mindray M9T (Mindray, Shenzhen, PRC) с датчиком L14-6Ns и датчиком C5-1s и прибора Сономед-500 (Спектромед, г. Москва), с линейным датчиком 7.5 L38 и конвексным датчиком 3,5 C60. На рисунке 1 изображена схема предварительной обработки, которой подверглись сигналы, формирующие базу данных [19]. Таким образом, сигналы с ультразвукового датчика прошли этапы усиления, оцифровки, преобразования Гильберта и когерентного сложения, обозначенные на схеме рисунка 1 как «У», «АЦП», «ПГ», « t_1 » и « Σ », соответственно.

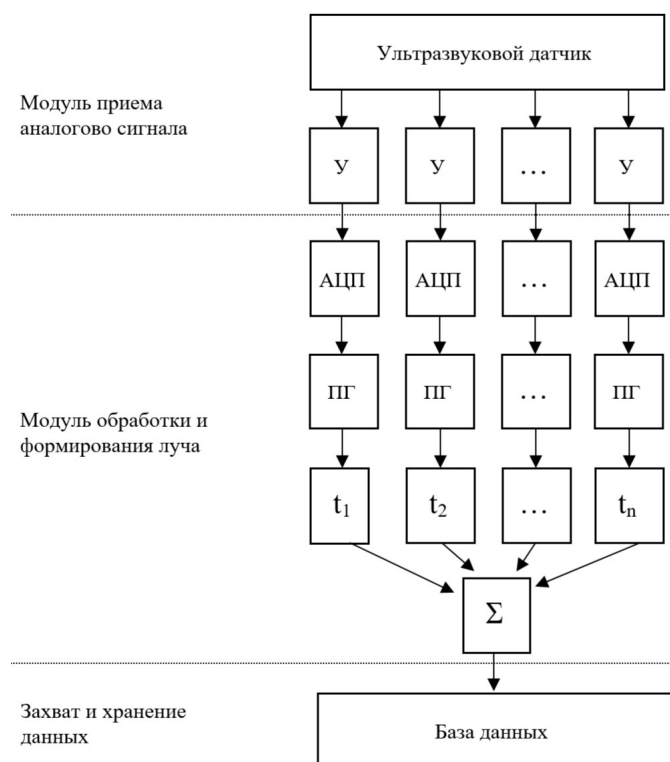


Рисунок 1 – Схема когерентного сложения сигналов

Подробное описание механизма формирования луча дано в статье [21]. Обозначим ключевые моменты: 64 элемента фазированного датчика излучают импульсы с задержками; в В-режиме длительность импульса – 1 мкс, в режиме ЦДК – 4 мкс. Каждый эхо-сигнал принимается и пишется отдельно, усиливается в аналоговом приемном модуле и оцифровывается. В формирователе луча суммируются все цифровые сигналы от отдельных каналов, после чего сформированный сигнал луча декодируется. Режимы исследования с линейным датчиком: мощность 74-97%, несущая частота 6,3-7,5 МГц; для конвексного датчика: мощность 95-98%, несущая частота 3,3 МГц; частота импульсов 750-1000 Гц. Набор сигналов в ЦДК состоит из 5-17 импульсов.

В режиме ЦДК зона интереса облучается N раз, образуя «пачку» сигналов. «Медленное» время – это время облучения одного участка в «пачке», по которому

отслеживаются характеристики кровотока в одной «пачке» (если изменений нет - сигналы совпадают); «быстрое» – время вдоль глубинной координаты для каждого луча.

М лучей в одной «пачке» собираются в подобласть. Всего S подобластей, формирующих всю область интереса. Полученные сигналы и параметры сканирования записываются в файлах *.par и *.dat.

Объект и условия исследования

Получены сигналы крупных артерий и вен у четырех добровольцев в В-режиме и режиме ЦДК. Добровольцы размещались в горизонтальном положении тела, без фиксации. Исследование проводилось поочередно для всех сосудов и сохранялось в базе, как показано на рисунке 2. Ультразвуковые данные были получены путем сканирования каждого сосуда по три раза. Положение датчика и угол наклона к поверхности кожи подбирались индивидуально для каждого добровольца. Давление на датчик отсутствовало.



Рисунок 2 – Схема записи базы ультразвуковых данных кровотока

На первом этапе исследования выполнялось сканирование ультразвуковым прибором Сономед-500, в результате которого формировались последовательности ультразвуковых изображений и сохранялись в формате видео, а также записывались сырые данные из тракта предварительной обработки ультразвукового диагностического устройства. На втором этапе исследования проводилось сканирование на ультразвуковом приборе Mindray M9T, который использовался в качестве эталонного прибора. Видео с Mindray M9T также сохранялись в базу данных. Исследовались сосуды: сонная, плечевая артерия и бедренная артерии: левая и правая стороны в продольном и поперечном направлениях сканирующего луча; печеночная вена в положении лежа на спине; воротная вена в положениях тела: лежа на спине и лежа на левом

боку. Горизонтальное положение тела добровольца во время сканирования, обусловлено тем, что при исследовании необходимо обеспечить беспрепятственный ток крови в артериях и венах. Схема тела с указанием областей исследования представлена на рисунке 3.

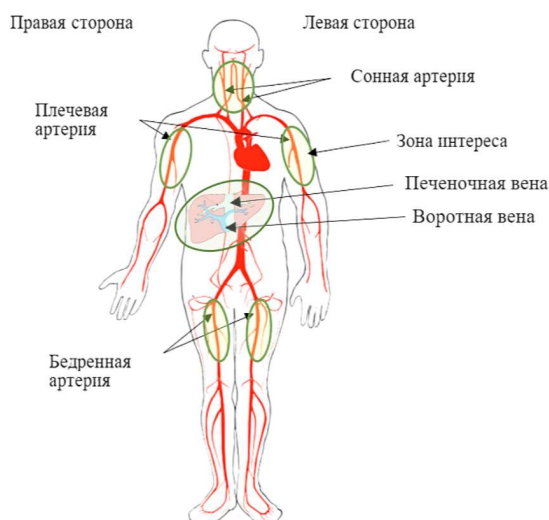


Рисунок 3 – Схема расположения исследуемых артерий и вен тела человека

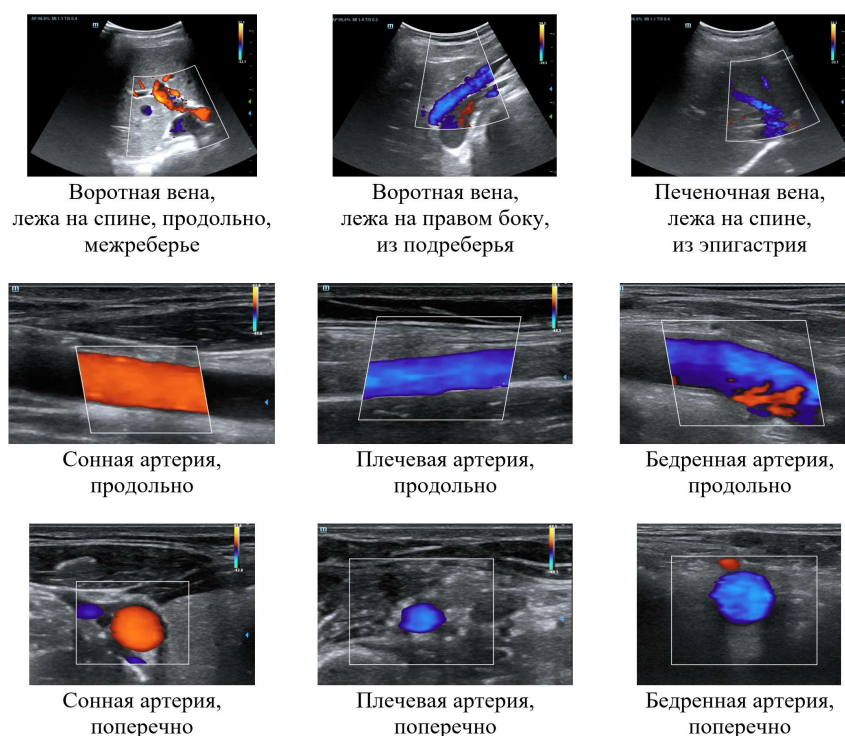


Рисунок 4 – Примеры ультразвуковых изображений исследуемых артерий и вен на Mindray M9T

Результаты и обсуждение

В результате работы была создана база данных (144 Гб) сигналов кровотока [22]. Каждое исследование записано в виде двух файлов формата *.dat и *.par, приложены изображения и видеофрагменты. Обозначения: “linear” указывает на использование линейного датчика (7.5 L38 или L14-6Ns), “convex” – конвексного датчика (3.4 C60 или C5-1s).

На рисунке 4 представлены примеры изображений, характеризующих содержимое базы данных, полученные путем остановки кадра видео исследования кровотока с ультразвукового прибора Mindray M9T. На рисунке 5 представлены примеры изображений, полученные путем остановки кадра видео исследования кровотока с ультразвукового прибора Сономед-500.

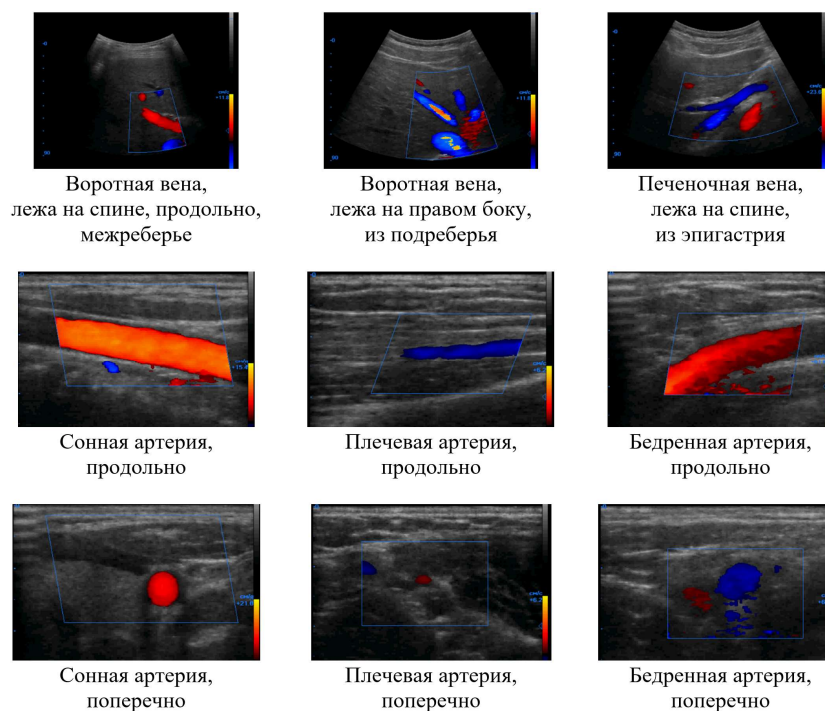


Рисунок 5 – Примеры ультразвуковых изображений исследуемых артерий и вен на SonoMed- 500

Содержание и запись данных:

1. в файле *.dat содержатся комплексные данные для построения кадра в В- и ЦДК режимах; в формате «32 bit little-endian signed integer» записаны действительная и мнимая части каждого отсчета; в начале обозначен заголовок, потом – отсчёт луча; далее записывались отсчёты для построения карты кровотока: заголовок, потом –отсчёты по глубине для каждого импульса в пачке.

2. в файле *.rag записана информация о параметрах сканирования.

3. в файле *.mp4 видеоматериалы артерий и вен.

Преимущества предлагаемой базы данных ультразвуковых сигналов кровотока:

1. Доступ в тракт обработки ультразвуковых сигналов.

Дело в том, что в литературе [1–6, 9-10, 23–30] описываются сигналы кровотока не из модуля обработки сигналов, а которые уже прошли ряд преобразований и фильтрации «внутри» программного обеспечения ультразвуковых диагностических приборов. Полученные в этом случае сонограммы на экране недостаточно информативны и могут создать проблемы с воспроизводимостью. Алгоритмы обработки у различных производителей – уникальны и закрыты для общего доступа, поэтому у исследователей не всегда есть представление и понимание, какая именно обработка сигналов заложена в программное обеспечение прибора, поэтому и сигналы на выходе не могут быть сопоставимы.

2. Свободный доступ.

Предлагаемые нами данные сигналов кровотока находятся в свободном доступе, что является значимым инструментом для разработки новых методов ультразвуковой визуализации.

3. Возможность сравнить эффективность разработанных алгоритмов и режимов в одинаковых условиях.

В литературе публикуется большое количество алгоритмов фильтрации сигналов кровотока [31–36], а также разрабатываются новые режимы визуализации на основе данных картирования кровотока [37, 38]. Публикация настоящей базы данных кровотока артерий и вен человека дает возможность желающим сравнить эффективность таких алгоритмов и режимов.

4. Доступ к программе и ее коду.

Программа [19] находится в свободном доступе. Она является понятным и простым инструментом для просмотра материалов базы данных и получения информации. При этом, программа написана на распространенном языке программирования C++, код программы – открыт, что дает возможность желающим вносить изменения в программу с целью решения конкретной исследовательской задачи.

Примером использования базы данных может служить рисунок 6, на котором были обработаны данные, полученные из области сонной артерии добровольца. На изображениях видно, что фаза сигнала распределена неравномерно. Она имеет стохастический характер в местах отсутствия кровотока, а в области русла сосуда она меняется плавно. По изображению карты энергии можно сказать, что после фильтрации энергия сигнала кровотока преобладает над энергией сигнала, отраженного от малоподвижных тканей, что свидетельствует о качественно выполненной фильтрации.

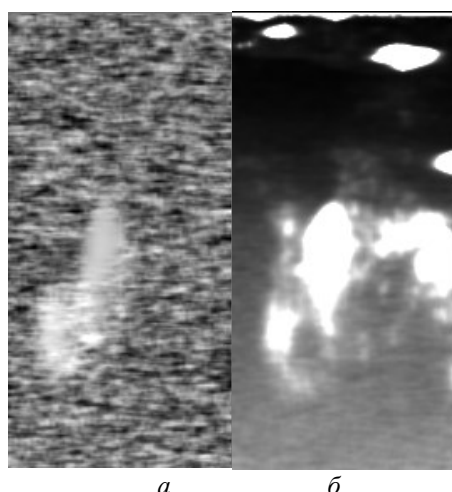


Рисунок 6 – Обработка содержимого базы данных: а – карта пространственного распределения фазы, б – карта распределения энергии доплеровских сигналов в области сонной артерии

В дальнейшем представляется интерес дополнить базу данных сигналами кровотока, полученными с привлечением обширной группы добровольцев с целью расширения и развития базы данных, расширения вариативности получаемых данных. А также базу данных можно дополнить сигналами в других режимах работы прибора: в спектральном доплеровском [39], векторного потока [40].

Заключение

Проведены клинические исследования ультразвуковых сигналов крупных артерий и вен у четырех добровольцев. Сформирована база данных цифровых записей «сырых» радиочастотных сигналов из тракта предварительной обработки с применением ультразвукового прибора Сономед-500. Также в базу включены вспомогательные изображения и видеофрагменты, полученные с Сономед-500 и Mindray M9T. Любой желающий вправе использовать базу данных и код для её просмотра по своему усмотрению. База данных является доступным инструментом для разработки и тестирования программ и алгоритмов обработки сигналов приборов ультразвуковой диагностики. Она дает возможность в одинаковых условиях сравнить эффективность разрабатываемых методов фильтрации сигналов, что в итоге будет приближать к ключевой цели: улучшение ультразвукового изображения и повышение точности диагностики.

Исследования проведены при поддержке ДЗМ (№ ЕГИСУ: № 123031500001-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meola M., Ibeas J., Lasalle G., Petrucci I. "Basics for performing a high-quality color Doppler sonography of the vascular access." The Journal of Vascular Access 22.1_suppl (2021): 18-31.

2. Синицына Д.Э., Юхнев А.Д., Зайцев Д.К. Ультразвуковое и численное исследование структуры течения в трехмерной модели бифуркации брюшной аорты / Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки – 2019. vol. 12, no. 4, pp. 50-60.
3. Гленза А., Добрынина Н. В., Якушин С. С. Изучение некоторых предикторов возникновения атеросклероза у лиц с повышенным артериальным давлением и у больных с гипертонической болезнью в популяции региона с высоким уровнем смертности // Наука молодых (Eruditio Juvenium). – 2024. Т. 12, № 2. С. 221-228.
4. Борсуков А.В., Горбатенко О.А. Возможности дифференциальной диагностики диабетического и атеросклеротического ангионевросклероза на основе эхоконтрастирования почек и ультразвукового исследования магистральных сосудов шеи // Acta Medica Eurasica – 2023. No. 1, pp. 19-30.
5. Кухарчук В.В., Ежов М.В., Сергиенко И.В. Диагностика и коррекция нарушений липидного обмена с целью профилактики и лечения атеросклероза / Российские рекомендации, VII пересмотр 2020 // Атеросклероз и дислипидемии – 2020. № 1 (38). С. 7-40.
6. Якушин С.С., Филиппов Е.В. Анализ смертности от болезней системы кровообращения и сердечно-сосудистой заболеваемости в Рязанской области за период 2012-2016 гг. // Наука молодых (Eruditio Juvenium). – 2018. Т. 6, № 3. С. 448-461.
7. Якушин С.С., Никулина Н.Н., Филиппов Е.В. Результаты пилотной части госпитального регистра передозировок кардиологических лекарственных препаратов (ГРОЗА): фокус на медикаментозно обусловленную брадикардию // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова – 2020. Т. 28, № 2. С. 153-163.
8. Данилов А.В., Кобзарь И.И., Нагибин О.А. Заболеваемость и смертность от сердечно-сосудистых заболеваний в Рязанской области: 2014-2018 гг. // Наука молодых – 2019, Т. 7, № 3. С. 439-449.
9. Конради А.О., Алиева А.С. Артериальная гипертензия и дислипидемия. Параллельный контроль двух факторов риска - роль комбинаций препаратов // Артериальная гипертензия. – 2021. Т. 27, № 3. С. 376-383.
10. Шарипова Г.Х., Саидова М.А., Мычка В.Б. Толщина комплекса интима-медиа общей сонной артерии у больных артериальной гипертензией с наличием и отсутствием метаболического синдрома // Кардиоваскулярная терапия и профилактика – 2008. Т. 7, № 7. С. 45-50.
11. Бойцов С.А., Баланова Ю.А., Шальнова С.А. Артериальная гипертензия среди лиц 25-64 лет: распространенность, осведомленность, лечение и контроль. По материалам исследования ЭССЕ // Кардиоваскулярная терапия и профилактика – 2014. Т. 13, № 4. С. 4-14.
12. Метельская В.А., Шальнова С.А., Деев А.Д. Анализ распространенности показателей, характеризующих атерогенность спектра липопротеинов, у жителей Российской Федерации (по данным исследования ЭССЕ-РФ) // Профилактическая медицина – 2016. Т. 19, № 1. С. 1523.
13. Гринштейн Ю.И., Шабалин В.В., Руф Р.Р. Распространенность сочетания артериальной гипертензии и дислипидемии среди взрослого населения крупного восточносибирского региона // Кардиоваскулярная терапия и профилактика – 2021. Т. 20, № 4. С. 2865.
14. Ашер Э. Сосудистая хирургия по Хаймовичу: в 2 томах. Москва: Бином.Лаборатория знаний – 2012. Т.2.
15. Калинин Р.Е., Сучков И.А., Климентова Э.А. Алгоритм исследования глубоких бедренных сосудов с помощью ультразвукового дуплексного ангиосканирования // «Неотложная медицинская помощь» - 2022. vol. 11, no. 4, pp. 676-682.
16. Стойко Ю.М., Кириенко А.И., Затевахин И.И. Российские клинические рекомендации по диагностике и лечению хронических заболеваний вен. Флебология – 2018. Т. 3., №12, с. 146-240.
17. Иванков А.А. Программный комплекс для изучения механизмов авторегуляции транскраниального кровообращения в режиме реального времени // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки – 2014. №3 (201).
18. Машков К.В., Скрипаль А.В. Программа для оценки эффективности физиопроцедур на основе метода обработки данных ультразвуковых доплерограмм. Патент RU 202466001. 02.05.2024.
19. Леонов Д.В., Решетников Р.В., Кульберг Н.С., Насибуллина А.А., Громов А.И. Наблюдения доплеровского мерцающего артефакта: база данных радиочастотных ультразвуковых сигналов // Digital Diagnostics – 2021. Т. 2, № 3 С. 261–276.
20. Luijten, B., Chennakeshava, N., Eldar, Y. C., Mischi, M., & van Sloun, R. J. (2023). Ultrasound signal processing: from models to deep learning. Ultrasound in medicine & biology, 49(3), 677-698.
21. Subochev P. Advances in wideband (0.3-30 MHz) laser optoacoustic diagnostics // Сборник трудов конференции «International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT)» - 2024., no. 24, pp. 103
22. Ultrasound CFI RF Signals https://www.researchgate.net/publication/389135301_Ultrasound_CFI_RF_Signals
23. Golemati S., Cokkinos D.D. Recent advances in vascular ultrasound imaging technology and their clinical implications // Ultrasonics. 2022 Feb;119:106599.
24. Thakrar D.B., Sultan M.J. The Role of Contrast-Enhanced Ultrasound in Managing Vascular Pathologies // J. Med Imaging Radiat. Sci. – 2019. Vol. 50. №4. pp. 590-595.
25. Frederick M.K., Stolz L.A., Duran-Gehring P.E. Vascular Ultrasound // Emerg. Med. Clin. North. Am. – 2024. Vol. 42. №4. pp. 805-818.
26. Балахонова Т.В., Ершова А.И. Фокусированное ультразвуковое исследование сосудов // Консенсус Рос. Эксп. – Кардиоваскулярная терапия и профилактика – 2022, vol. 21, no. 7, pp. 105-126.
27. Прозоровский К.В., Пручанский В.С. Визуализация сосудов коллатерального кровообращения и их влияние на кровоток по воротной вене у больных циррозом печени // Вестник рентгенологии и радиологии, no. 1. – 2008. pp. 36-39.

28. Тухбатуллин М.Г., Ахунова Г.Р., Галеева З.М. Возможности эхографии в диагностике цирроза печени и портальной гипертензии // Практическая медицина – 2014. Vol. 3 №79. pp. 54-61.
29. Лызинов А.Н., Скуратов А.Г., Шпаковский Ю.П. Значение методов визуализационной диагностики цирроза печени и портальной гипертензии // Проблемы здоровья и экологии – 2016. Vol 2 (48), pp. 21-25.
30. Иванков А.А. Программный комплекс для изучения механизмов авторегуляции транскраниального кровообращения в режиме реального времени // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки – 2014. №3 (201).
31. Golemati, S., Cokkinos, D. D. Recent advances in vascular ultrasound imaging technology and their clinical implications. // Ultrasonics – 2022. №119, 106599.
32. Huang C., Lok U.W., Zhang J. Real-time Adaptive and Localized Spatiotemporal Clutter Filtering for Ultrasound Small Vessel Imaging. arXiv preprint arXiv:2405.11105. – 2024
33. Leonov D.V., Kulberg N.S., Fin V.A., et al. Clutter filtering for diagnostic ultrasound color flow imaging // Biomedical Engineering. 2019. T. 53. № 3. C. 217-221.
34. Yu H., Zhang J., Yin J. Improving microvascular sensitivity of color Doppler using phase mask based flow recycling algorithm // Physics in Medicine & Biology – 2024. Vol. 69. No 21, 215010.
35. Leonov D.V., Kulberg N.S., Fin V.A., et al. Comparison of filtering techniques in ultrasound color flow imaging // Biomedical Engineering. 2019. T. 53. № 2. C. 97-101.
36. Leonov D.V., Kulberg N.S., Gromov A.I., Morozov S.P. Detection of microcalcifications using the ultrasound Doppler twinkling artifact // Biomedical Engineering – 2020. T. 54. № 3. C. 174-178.
37. Abdel-Gawad A.M., Moustafa B.A., Abouelgreed T.A., Elnady E.A., Khater S., Rehan M., Elebiary M.F., Fathy B.A., Shaaan A., Ramadan N., Hindawy M., Abdelkader S.F. Exploring the potential of combined B-mode features and color Doppler ultrasound in the diagnosis of ureteric stone as an alternative to ionizing radiation exposure by computed tomography." Archivio Italiano di Urologia e Andrologia 96.2 (2024).
38. Ubeyli E. D. Doppler ultrasound techniques in 2008, Medicine. Bulletin of the International Scientific Surgical Association, vol. 3, no. 1, pp. 100-103.
39. Thanoon S.A., Alomari Z. A New Discrimination Method of Imaging Regions for Improved Ultrafast Ultrasound Imaging Performance // Journal of Biomedical Photonics & Engineering, vol. 9, no. 4, 2023, pp. 94-103.
40. Hvid R., Stuart M. B., Jensen J. A. Intra-Cardiac Flow from Geometry Prescribed Computational Fluid Dynamics: Comparison with Ultrasound Vector Flow Imaging. Cardiovascular Engineering and Technology – 2023. 14(4), pp. 489-504.

Сайфутдинова Марина Сергеевна
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва. Младший научный сотрудник
+79151863186
E-mail: sayfutdinova.marina@bk.ru

Леонов Денис Владимирович
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва.
К.т.н., докторант, ведущий науч. сотрудник
+7-909-958-69-38
E-mail: strat89@mail.ru

Васильев Юрий Александрович
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва. Директор

Омелянская Ольга Васильевна
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва. Руководитель по управлению подразделениями Дирекции наука

Костенко Евгения Александровна
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва. Врач ультразвуковой диагностики

Булгакова Юлия Владиславовна
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва. Младший научный сотрудник

Насибуллина Анастасия Александровна
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва. Начальник лаборатории

Власова Ольга Викторовна
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва. Младший научный сотрудник

Гребенникова Вероника Вячеславовна
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва. Младший научный сотрудник

Белякова Екатерина Дмитриевна
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва. Техник

Акопова Анна Юрьевна
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва. Аналитик

SAYFUTDINOVA M.S., LEONOV D.V., VASILIEV YU.A., OMELYANSKAYA O.V.,
KOSTENKO E.A., BULGAKOVA YU.V., NASIBULLINA A.A., VLASOVA O.V.,
GREBENNIKOVA V.V., BELYAKOVA E.D., AKOPOVA A.YU.

A SET OF ULTRASOUND DOPPLER RF SIGNALS OBTAINED DURING IN VIVO BLOOD FLOW STUDIES

Abstract. The article presents the results of a clinical research of blood flow. In the course of the research, radiofrequency ultrasound signals were obtained from the preprocessing path of the Sonomed-500 ultrasound scanner with 7.5 L38 and 3.5 C60 sensors. The database was supplemented with ultrasound images and videos from the Mindray

M9T and the L14-6Ns, C5-1s sensors. Signals from large arteries and veins were obtained from four volunteers using Doppler mode and standard scanning protocols. The carotid, brachial and femoral arteries, hepatic and portal veins were examined. The database includes sets of "raw" signals, as well as images and videos. The collected data can serve as a basis for developing new ultrasound imaging algorithms and improving existing approaches to processing Doppler signals.

Keywords: *ultrasound imaging; color Doppler mapping; database; raw radiofrequency data; color flow imaging; blood flow.*

BIBLIOGRAPHY

1. Meola M., Ibeas J., Lasalle G., Petrucci I. "Basics for performing a high-quality color Doppler sonography of the vascular access." *The Journal of Vascular Access* 22.1 suppl (2021): 18-31.
2. Sinitsyna D.E., Yukhnev A.D., Zaitsev D.K. Ultrasound and numerical investigation of the flow structure in a three-dimensional model of abdominal aortic bifurcation / *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Physical and Mathematical Sciences* – 2019. vol. 12, No. 4, pp. 50-60.
3. Glenza A., Dobrynina N. V., Yakushin S. S. The study of some predictors of atherosclerosis in people with high blood pressure and in patients with hypertension in the population of a region with a high mortality rate // *Science of the young (Eruditio Juvenium)*. – 2024. Vol. 12, No. 2. pp. 221-228.
4. Borsukov A.V., Gorbatenko O.A. Possibilities of differential diagnosis of diabetic and atherosclerotic angioneurosis based on kidney echocontrast and ultrasound examination of the main vessels of the neck // *Acta Medica Eurasica* – 2023. No. 1, pp. 19-30.
5. Kukharchuk V.V., Yezhov M.V., Sergienko I.V. Diagnosis and correction of lipid metabolism disorders for the prevention and treatment of atherosclerosis / *Russian recommendations, VII revision 2020* // *Atherosclerosis and dyslipidemia* – 2020. No. 1 (38). pp. 7-40.
6. Yakushin S.S., Filippov E.V. Analysis of mortality from diseases of the circulatory system and cardiovascular morbidity in the Ryazan region for the period 2012-2016 // *Science of the young (Eruditio Juvenium)*. - 2018. Vol. 6, No. 3. pp. 448-461.
7. Yakushin S.S., Nikulina N.N., Filippov E.V. Results of the pilot part of the hospital register of cardiac drug overdoses (GROZA): focus on drug-induced bradycardia // *Russian Medical and Biological Bulletin named after Academician I.P. Pavlov* – 2020. Vol. 28, No. 2. pp. 153-163.
8. Danilov A.V., Kobzar I.I., Nagibin O.A. Morbidity and mortality from cardiovascular diseases in the Ryazan region: 2014-2018 // *Science of the young* – 2019, Vol. 7, No. 3. Pp. 439-449.
9. Konradi A.O., Alieva A.S. Arterial hypertension and dyslipidemia. Parallel control of two risk factors - the role of drug combinations // *Arterial hypertension*. – 2021. Vol. 27, No. 3. pp. 376-383.
10. Sharipova G.Kh., Saidova M.A., Mychka V.B. Thickness of the intima-media complex of the common carotid artery in patients with arterial hypertension with and without metabolic syndrome // *Cardiovascular therapy and prevention* – 2008. Vol. 7, No. 7. pp. 45-50.
11. Boytsov S.A., Balanova Yu.A., Shalnova S.A. Arterial hypertension among people aged 25-64 years: prevalence, awareness, treatment and control. Based on the materials of the ESSAY study // *Cardiovascular therapy and prevention* – 2014. Vol. 13, No. 4. pp. 4-14.
12. Metelskaya V.A., Shalnova S.A., Deev A.D. Analysis of the prevalence of indicators characterizing the atherogenicity of the lipoprotein spectrum in residents of the Russian Federation (according to the ESSAY-RF study) // *Preventive medicine* – 2016. Vol. 19, No. 1. P. 1523.
13. Grinstein Yu.I., Shabalin V.V., Ruf R.R. The prevalence of a combination of arterial hypertension and dyslipidemia among the adult population of a large East Siberian region // *Cardiovascular therapy and prevention* – 2021. Vol. 20, No. 4. pp. 2865.
14. Asher E. Vascular surgery according to Khaimovich: in 2 volumes. Moscow: Binom.Laboratory of Knowledge – 2012. Vol.2.
15. Kalinin R.E., Suchkov I.A., Klimentova E.A. Algorithm for examining deep femoral vessels using ultrasound duplex angioscanning // *"Emergency medical care"* - 2022. vol. 11, No. 4, pp. 676-682.
16. Stoyko Yu.M., Kiriyaenko A.I., Zatevakhin I.I. Russian clinical guidelines for the diagnosis and treatment of chronic venous diseases. *Phlebology* – 2018. Vol. 3., No. 12, pp. 146-240.
17. Ivankov A.A. A software package for studying the mechanisms of transcranial circulation autoregulation in real time // *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Pedagogical University. Physical and Mathematical Sciences* – 2014. No. 3 (201).
18. Mashkov K.V., Skripal A.V. A program for evaluating the effectiveness of physiotherapy based on the data processing method of ultrasound Dopplerograms. Patent RU 202466001. 05/02/2024.
19. Leonov D.V., Reshetnikov R.V., Kulberg N.S., Nasibullina A.A., Gromov A.I. Doppler twinkling artifact observations: an open-access database of raw ultrasonic signals // *Digital Diagnostics* – 2021. Vol. 2, No. 3 pp. 261-276.
20. Luijten, B., Chennakeshava, N., Eldar, Y. C., Misch, M., & van Sloun, R. J. (2023). Ultrasound signal processing: from models to deep learning. *Ultrasound in medicine & biology*, 49(3), 677-698.
21. Subochev P. Advances in wideband (0.3-30 MHz) laser optoacoustic diagnostics // *Proceedings of the International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT)* - 2024, No. 24, pp. 103
22. Ultrasound CFI RF Signals https://www.researchgate.net/publication/389135301_Ultrasound_CFI_RF_Signals.
23. Golemati S., Cokkinos D.D. Recent advances in vascular ultrasound imaging technology and their clinical implications // *Ultrasonics*. 2022 Feb;119:106599.

24. Thakrar D.B., Sultan M.J. The Role of Contrast-Enhanced Ultrasound in Managing Vascular Pathologies // J. Med Imaging Radiat. Sci. – 2019. Vol. 50. №4. pp. 590-595.
25. Frederick M.K., Stolz L.A., Duran-Gehring P.E. Vascular Ultrasound // Emerg. Med. Clin. North. Am. – 2024. Vol. 42. No. 4. pp. 805-818.
26. Balakhonova T.V., Yershova A.I. Focused ultrasound examination of blood vessels // Consensus Russian. Exp. – Cardiovascular therapy and Prevention – 2022, vol. 21, No. 7, pp. 105-126.
27. Prozorovsky K.V., Pruchansky B.C. Visualization of collateral circulation vessels and their effect on portal vein blood flow in patients with cirrhosis of the liver // Bulletin of Radiology and Radiology, No. 1. 2008. pp. 36-39.
28. Tukhbatullin M.G., Akhunova G.R., Galeeva Z.M. Possibilities of echography in the diagnosis of liver cirrhosis and portal hypertension // Practical medicine – 2014. Vol. 3 No. 79. pp. 54-61.
29. Lyzikov A.N., Skuratov A.G., Shpakovsky Yu.P. The importance of imaging diagnostic methods for liver cirrhosis and portal hypertension // Problems of health and ecology – 2016. Vol 2 (48), pp. 21-25.
30. Ivankov A.A. A software package for studying the mechanisms of transcranial circulation autoregulation in real time // Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University. Physical and Mathematical Sciences – 2014. No. 3 (201).
31. Golemati, S., Cokkinos, D. D. Recent advances in vascular ultrasound imaging technology and their clinical implications. // Ultrasonics – 2022. №119, 106599.
32. Huang C., Lok U.W., Zhang J. Real-time Adaptive and Localized Spatiotemporal Clutter Filtering for Ultrasound Small Vessel Imaging. arXiv preprint arXiv:2405.11105. – 2024
33. Leonov D.V., Kulberg N.S., Fin V.A., et al. Clutter filtering for diagnostic ultrasound color flow imaging // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. No. 3. pp. 217-221.
34. Yu H., Zhang J., Yin J. Improving microvascular sensitivity of color Doppler using phase mask based flow recycling algorithm // Physics in Medicine & Biology – 2024. Vol. 69. No. 21, 215010.
35. Leonov D.V., Kulberg N.S., Fin V.A., et al. Comparison of filtering techniques in ultrasound color flow imaging // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. No. 2. pp. 97-101.
36. Leonov D.V., Kulberg N.S., Gromov A.I., Morozov S.P. Detection of microcalcifications using the ultrasound Doppler twinkling artifact // Biomedical Engineering – 2020. Vol. 54. No. 3. pp. 174-178.
37. Abdel-Gawad A.M., Moustafa B.A., Abouelgreed T.A., Elnady E.A., Khater S., Rehan M., Elebiary M.F., Fathy B.A., Shaalan A., Ramadan N., Hindawy M., Abdelkader S.F. Exploring the potential of combined B-mode features and color Doppler ultrasound in the diagnosis of ureteric stone as an alternative to ionizing radiation exposure by computed tomography." Archivio Italiano di Urologia e Andrologia 96.2 (2024).
38. Ubeyli E. D. Doppler ultrasound techniques in 2008, Medicine. Bulletin of the International Scientific Surgical Association, vol. 3, no. 1, pp. 100-103.
39. Thanoon S.A., Alomari Z. A New Discrimination Method of Imaging Regions for Improved Ultrafast Ultrasound Imaging Performance" // Journal of Biomedical Photonics & Engineering, vol. 9, no. 4, 2023, pp. 94-103.
40. Hvid R., Stuart M. B., Jensen J. A. Intra-Cardiac Flow from Geometry Prescribed Computational Fluid Dynamics: Comparison with Ultrasound Vector Flow Imaging. Cardiovascular Engineering and Technology – 2023. 14(4), pp. 489-504.

Sayfutdinova Marina Sergeevna
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow. Junior
researcher
+79151863186
E-mail: sayfutdinova.marina@bk.ru

Leonov Denis Vladimirovich
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow.
PHD of Technical Sciences, leading
scientist
+79099586938
E-mail: strat89@mail.ru

Vasilev Yuri Alexandrovich
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow. Director

Omelyanskaya Olga Vasilyevna
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow. Head of
Unit Management of the Science
Directorate

Kostenko Evgeniya Aleksandrovna
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow. Doctor of
an ultrasound diagnostics

Bulgakova Yulia Vladislavovna
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow. Junior
researcher

Nasibullina Anastasia Aleksandrovna
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow. Head of the
laboratory.

Vlasova Olga Viktorovna
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow. Junior
researcher

Grebennikova Veronika Vyacheslavovna
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow. Junior
researcher

Belyakova Ekaterina Dmitrievna
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow. Technician.

Akopova Anna Yurievna
Center for Diagnostics and
Telemedicine, Moscow. Analyst

ПОЛЯКОВ Е.В., ДМИТРИЕВА В.В., ШУВАЛОВА Е.В., ФИЛАТОВА Н.А.,
КОЛБАЦКАЯ О.П., КЛИМАНОВ И.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОЭТАПНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Аннотация. Научная работа посвящена исследованию одноэтапной архитектуры нейронной сети на примере YOLO для анализа биомедицинских изображений. Исследование проводится на изображениях ядросодержащих клеток крови и костного мозга. Для обработки экспериментальных данных разработаны модули по обработке выходных данных до обучения и после обучения. Аугментация данных продемонстрировала значительное увеличение качества распознавания изображений нейронной сетью. Анализ обученной модели проведен на тестовой выборке изображений препаратов, не включенных в обучение, с использованием коэффициента Каппа. Результаты эксперимента подтвердили высокую эффективность архитектуры YOLO для анализа биомедицинских изображений. Данные обученной модели подтверждены высокими показателями согласованности – коэффициент Каппа составил от 71% до 97%. Анализ изображений гемопоэтических клеток костного мозга показал точность 90%.

Ключевые слова: биомедицинские изображения, нейронные сети, анализ изображений YOLO, аугментация данных, обнаружение объектов, классификация клеток, диагностика заболеваний, костный мозг, оценка качества, эффективность, глубокое обучение.

Введение

В последние годы наблюдается стремительное развитие и внедрение новых алгоритмов и архитектур нейронных сетей, а также методов классического машинного обучения. Эти достижения приводят к постоянным изменениям в подходах к решению задач обнаружения и классификации объектов интереса по микроскопическим изображениям, что имеет критическое значение для диагностики и лечения различных заболеваний. Анализ биомедицинских изображений в этом контексте играет ключевую роль, так как от его качества и точности зависит не только диагностика, но и эффективность последующего лечения с применением методов машинного обучения. Поэтому решение задач, связанных с развитием и применением новых методов анализа изображений, становится особенно актуальным и важным для улучшения здоровья пациентов [1-6].

Одним из основных этапов в процессе анализа изображений является сегментация, позволяющая, например выделить области, содержащие ядросодержащие клетки костного мозга, для последующей классификации. Часто используемые алгоритмы, такие как k-means [2, 6], показывают хорошие результаты, однако применение нейронных сетей с добавлением слоев, выполняющих деконволюцию красителей, может существенно повысить информативность признаков изображения [7]. Появление новых архитектур, таких как Vision Transformers (ViT), также открывает новые возможности для эффективной классификации изображений [4].

Исследования последних лет свидетельствуют о повышении интереса к задаче комплексной классификации клеток. Вместо простой бинарной классификации здоровых и атипичных клеток, авторы начинают уделять внимание выделению конкретных типов ядросодержащих клеток, необходимых для дальнейших диагностических процедур [7-9]. Существующие методы демонстрируют высокие показатели точности, достигающие 95–99% в ряде случаев, хотя эти значения сильно зависят от используемого набора данных. Глубокие нейронные сети и методы трансферного обучения заметно повышают точность классификации по сравнению с традиционными подходами. Примеры новых эффективных методов включают SD-Layer и WBCsNet, которые могут применяться в различных областях медицинской визуализации [10-12].

Тем не менее, несмотря на высокий уровень достигнутых результатов, остаются нерешенными значимые проблемы. Во-первых, разнородность исследований ведет к недостаточному сравнительному анализу, поскольку многие работы сосредоточены на отдельных методах детектирования и применяют разные критерии оценки качества. Во-вторых, неоднородность данных ограничивает обобщаемость результатов, так как исследования часто основываются на неполных наборах данных. Частичное покрытие этапов обработки данных усложняет решение конечных задач, а невозпроизводимость результатов требует дополнительного контроля. Высокая потребность в вычислительных ресурсах представляет собой еще один барьер для исследователей [13-18].

Таким образом, для дальнейшего прогресса необходимы следующие шаги: разработка унифицированных метрик оценки качества, создание более полных и разнообразных наборов данных, обеспечение полного покрытия всех этапов обработки данных, повышение воспроизводимости результатов через использование открытых данных и моделей, а также исследование методов оптимизации вычислительных процессов для снижения требований к оборудованию. Эти меры помогут преодолеть существующие препятствия и способствовать дальнейшему развитию методов анализа биомедицинских изображений, что в конечном итоге улучшит диагностику пациентов.

Целью данной работы - исследование одноэтапной нейронной сети глубокого обучения для анализа биомедицинских изображений.

Основная часть

Исследование проводилось на изображениях ядросодержащих клеток крови и костного мозга, полученных в рамках совместного проекта Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России. Для получения изображений применялась система МЕКОС-Ц2 с цифровой камерой Imperx IPX-4M15TGCFB, размер кадра 2048 на 2048 пикселей [19].

Аннотирование и проверка адекватности распознавания изображений выполнена специалистами Национального медицинского исследовательского центра онкологии имени Н.Н. Блохина МЗ РФ.

Обучение и анализ результатов проводились на сервере Supermicro с материнской платой x10DRI, оснащенный двумя процессорами XEON E5 2690V3 и 64 ГБ оперативной памяти. Для хранения данных использовались два HDD по 16 Тб, объединенные в RAID 1, а для операционной системы – два SSD по 480 Гб, также объединенные в RAID 1. В качестве графического ускорителя использовался NVIDIA RTX 4060 с 16 ГБ видеопамати. Вычислительный кластер работал под управлением операционной системы Debian 12 с гипервизором qemu-KVM, что позволяло эффективно управлять виртуальными машинами для выполнения вычислений и исследования методов глубокого обучения.

В качестве одноэтапной нейронной сети глубокого обучения для анализа биомедицинских изображений выбрана современная, постепенно улучшающаяся, архитектура YOLO восьмой версии. Изменение в архитектуру, в ходе исследования, не вносились. Входное изображение, с которым работала рассматриваемая архитектура, было 640 на 640 пикселей.

На начальном этапе, если изображение не 640 на 640 пикселей, а больше, то на нем выделяются квадраты 640 на 640 пикселей (тайлы), при этом разбиение на тайлы центрировано относительно объекта из файла меток. Проверялось, чтобы все объекты входили хотя бы один раз в один из тайлов. Все координаты и размеры пересчитывались относительно размеров нового файла.

Для увеличения количества изображений редких классов и повышения качества распознавания изображений нейронной сети выполнялась аугментация. Аугментация включала такие пространственные преобразования, как изменение размера, масштаба, яркости, контраста, размытия и отображения по вертикали. До выполнения всех преобразований было 2390 изображений, после выполнения операций стало 121692 изображений.

Далее набор данных разделялся на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении 80/10/10. При этом учитывалась частотность появления классов в наборе данных. Клетки каждого класса равномерно, но случайным образом распределены по рабочим выборкам. Количественный состав выборки до и после преобразований представлен в таблице 1.

Аугментация, как видно из данных таблицы 1, значительно увеличила количество объектов для большинства классов. Например, количество лимфоцитов возросло с 1118 до 16498, а количество бластов – с 12535 до 249141. Однако, несмотря на общее увеличение, некоторые классы остались недостаточно представленными. В частности, количество палочкоядерных нейтрофилов и моноцитов после аугментации составляет 4300 и 3623 соответственно, что может быть недостаточно для эффективного обучения модели. Это особенно важно, так как моноциты и лимфоциты часто вызывают наибольшие сложности при классификации из-за их схожести с бластами.

Обучение модели проводилось с использованием сформированного набора данных, подготовленного для 80 эпох. Процесс обучения был реализован с помощью команды:

model.train(data="YOLOv8.yaml", epochs=80)

Для обработки экспериментальных данных разработаны модули по обработке выходных данных до обучения и после обучения.

Таблица 1 – Количественный состав выборки изображений.

№	Тип ядросодержащего элемента	Число объектов	
		До аугментации	После аугментации
1.	Бласты	12535	249141
2.	Промиеоциты	4	60
3.	Миелоциты	292	5184
4.	Метамиеоциты	200	3624
5.	Палочкоядерные нейтрофилы	243	4300
6.	Сегментоядерные нейтрофилы	653	8920
7.	Эозинофилы	86	1119
8.	Базофилы	6	87
9.	Моноциты	285	3623
10.	Лимфоциты	1118	16498
11.	Плазматические клетки	8	93
12.	Нормобласты	20	315
13.	Прозэритробласты	11	123
14.	Нормобласты: базофильные	33	430
15.	Нормобласты: полихроматофильные	105	1539
16.	Нормобласты: оксифильные	493	7267
17.	Мегакариоциты	2	21
Прочие объекты			
18.	Макрофаги	1	69
19.	Клетки не пригодные для анализа	1065	21957
20.	Митозы	39	663
21.	Артефакты	25	291
22.	Тени Гумпрехта	1929	26130

Модуль detect.py предназначен для задач обнаружения объектов с использованием модели Ultralytics YOLO. Основные функции включают обработку изображений, обнаружение объектов на этих изображениях, объединение обнаруженных ограничивающих рамок на основе заданного порога пересечения по объединению (IoU) и сохранение результатов в определенном формате. Программа инициализирует модель YOLO, загружая предварительно обученные веса из файла «best.pt». Он создает директории для сохранения результатов обнаружения, обрабатывает изображения, выполняет обнаружение объектов и объединение рамок, а затем сохраняет результаты в текстовые файлы.

Результат тестирования обученной модели для сформированного набора данных представлен в таблице 2.

Анализ результатов обучения и тестирования проводился с применением следующих характеристик:

P (Precision) – точность (precision) ограничивающих рамок, то есть доля правильно предсказанных объектов среди всех предсказанных.

R – полнота (recall), то есть доля правильно предсказанных объектов среди всех объектов на изображении.

mAP@50 – средняя точность (mean Average Precision) при пороге пересечения по объединению (IoU) 0.5. Показывает, насколько точно модель предсказывает объекты при этом пороге.

mAP@55 – аналогично mAP@50, но при пороге IoU 0.55.

По результатам обучения проведено тестирование обученной модели на изображениях 10 препаратов, которые не участвовали в обучении, тестировании и валидации. Критерием качества выбран коэффициент Каппа. Исследование показало потенциал применения нейронных сетей для автоматизированного анализа морфологии клеток костного мозга на основе изображений микропрепаратов, позволяя дифференцировать гемопоэтические клетки. Обученная модель продемонстрировала способность эффективно обнаруживать объекты и объединять перекрывающиеся рамки, что важно для точной классификации клеток. Однако, для повышения точности необходимо учитывать такие факторы, как размер и структура клеток, чтобы избежать ошибок классификации, дополнительно увеличить представительность классов. Результат представлен в таблице 3.

Таблица 2 – Результаты исследования обученной модели для сформированного набора данных.

№	Тип ядросодержащего элемента	Box (P)	R	mAP@50	mAP@55
1.	Бласты	0,98	0,99	0,99	0,97
2.	Промиелоциты	0,99	1,00	0,99	0,98
3.	Миелоциты	0,95	0,98	0,99	0,96
4.	Метамиелоциты	0,97	0,98	0,99	0,96
5.	Палочкоядерные нейтрофилы	0,97	0,83	0,88	0,83
6.	Сегментоядерные нейтрофилы	0,97	0,99	0,99	0,97
7.	Эозинофилы	0,99	1,00	0,99	0,94
8.	Базофилы	0,98	1,00	0,97	0,89
9.	Моноциты	0,97	0,98	0,99	0,99
10.	Лимфоциты	0,94	0,93	0,89	0,90
11.	Плазматические клетки	1,00	0,90	0,94	0,87
12.	Нормобласты	0,97	0,99	0,99	0,98
13.	Проэритробласты	0,88	0,92	0,92	0,99
14.	Нормобласты: базофильные	0,94	0,93	0,89	0,90
15.	Нормобласты: полихроматофильные	0,97	0,98	0,99	0,95
16.	Нормобласты: оксифильные	0,79	1,00	0,98	0,94
17.	Мегакариоциты	0,87	1,00	0,98	0,90
Прочие объекты					
18.	Макрофаги	0,88	0,92	0,92	0,99
19.	Клетки не пригодные для анализа	0,96	0,98	0,99	0,95
20.	Митозы	0,97	0,98	0,99	0,94
21.	Артефакты	0,93	0,95	0,97	0,83
22.	Тени Гумпрехта	0,96	0,99	0,99	0,92

Таблица 3 - Результаты исследования обученной модели на неизвестных препаратах.

№	Препарат	Коэффициент Каппа
1.	240612.017	0,98
2.	240612.006	0,99
3.	240612.009	0,95
4.	240612.001	0,97
5.	240612.018	0,97
6.	240612.026	0,97
7.	240612.027	0,99
8.	240612.005	0,98
9.	240612.043	0,97
10.	240612.052	0,94

Одним из ключевых аспектов является обучение сети на больших и разнообразных наборах данных с использованием методов аугментации и привлечения экспертов для анализа результатов. Это позволит улучшить качество модели и снизить вероятность ошибок.

Стоит отметить, что некоторые классы, такие как моноциты и палочкоядерные нейтрофилы, хотя и не относятся к наиболее редким типам в выборке, но при их детекции обученная модель допускала ошибки. Это особенно важно, так как моноциты весьма сходны с бластами, что может повлиять на точность диагностики.

Несмотря на несбалансированность выборки, результаты исследования показали высокий уровень согласованности между экспертной оценкой и результатами модели представлены в таблице 3. Это свидетельствует о том, что обученная модель способна эффективно выполнять дифференцированный подсчет гемопоэтических клеток, даже при наличии артефактов и других объектов, которые эксперт не размечал.

Таким образом, исследование подтверждает потенциал нейронных сетей в медицинской диагностике и указывает на необходимость дальнейшего развития методов обучения и анализа данных для повышения точности и надежности результатов.

Заключение

В работе проведено исследование одноэтапной архитектуры нейронной сети на примере YOLO восьмой версии для анализа биомедицинских изображений. Исследование проводилось на изображениях ядросодержащих клеток крови и костного мозга. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность применения современных нейронных

сетей для анализа биомедицинских изображений, особенно в дифференцированном подсчете кроветворных клеток по изображениям препаратов костного мозга. Экспериментальные исследования с применением обученной модели показали высокую согласованность результатов, что было оценено с помощью коэффициента Каппа, который колебался от 71% до 97%. Точность анализа изображений гемопоэтических клеток костного мозга составила 90%. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку новых методов повышения точности предсказания и стабильности работы обученной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ChenY., ZhangC., ChenB., HuangY., SunY., WangC., FuX., DaiY., QinF., PengY., GaoY. Accurate leukocyte detection based on deformable-DETR and multi-level feature fusion for aiding diagnosis of blood diseases // *Computers in biology and medicine*. – 2024. – Т. 170. – С. 107917.
2. Поляков Е.В., Попов В.В., Дмитриева В.В. Система анализа изображений ядросодержащих клеток костного мозга для формирования диагностического заключения в онкогематологии // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2025. – Т. 13. – №. 1. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.016>
3. Bagg A., Raess P.W., Rund D., Bhattacharyya S., Wiszniewska J., Horowitz A., Jenghino D., Fan, G., Huynh M., Sanogo A., Avivi I., Katz B. Performance Evaluation of a Novel Artificial Intelligence-Assisted Digital Microscopy System for the Routine Analysis of Bone Marrow Aspirates // *Modern Pathology*. – 2024. – Т. 37. – №. 9. – С. 100542.
4. Koch V., Wagner S.J., Kazemina S., Sancar E., Hehr M., Schnabel J.A., Peng T., Marr C. DinoBloom: a foundation model for generalizable cell embeddings in hematology Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2024. MICCAI 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 15012. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72390-2_49
5. Matek C., Krappe S., Münzenmayer C., Haferlach T., Marr C. Highly accurate differentiation of bone marrow cell morphologies using deep neural networks on a large image data set // *Blood, The Journal of the American Society of Hematology*. – 2021. – Т. 138. – №. 20. – С. 1917-1927.
6. Negm A. S., Hassan O. A., Kandil A. H. A decision support system for Acute Leukaemia classification based on digital microscopic images // *Alexandria engineering journal*. 2018. № 4 (57). С. 2319–2332.
7. Kreiss L., Jiang S., Li X., Xu S., Zhou K., Lee K., Muhlberg A., Kim K., Chaware A., Ando M., Barisoni L., Seung Ah L., Zheng G., Lafata K., Friedrich O., and Horstmeyer R. Digital staining in optical microscopy using deep learning - a review // *PhotonIX*. – 2023. – Vol. 4.
8. Дмитриева В.В., Магманова Я.А., Цыпьяк В.И., Поляков Е.В. Система аннотирования биомедицинских изображений на основе интернет-технологий в онкогематологии // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2025. – Т. 13. – №. 3. – С. 52-57.
9. Cheng, Zhizhao and Yuan-Ya Li. “Improved YOLOv7 Algorithm for Detecting Bone Marrow Cells” // *Sensors (Basel, Switzerland)*. – 2023.
10. Luo, Y., Xu, Y., Wang, C., Li, Q., Fu, C., Jiang, H. ResNeXt-CC: a novel network based on cross-layer deep-feature fusion for white blood cell classification // *Scientific Reports*. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 18439.
11. Singh A., Dwivedi R. K., Rastogi R. Machine Learning Based Framework for Lung Cancer Detection and Image Feature Extraction Using VGG16 with PCA on CT-Scan Images // *SN Computer Science*. – 2024. – Т. 5. – №. 8. – С. 1040.
12. Firat H. Classification of microscopic peripheral blood cell images using multibranch lightweight CNN-based model // *Neural Computing and Applications*. – 2024. – Т. 36. – №. 4. – С. 1599-1620.
13. Tajvidi Asr, R., Rahimi, M., Hossein Pourasad, M., Zayer, S., Momenzadeh, M., Ghaderzadeh, M. Hematology and Hematopathology Insights Powered by Machine Learning: Shaping the Future of Blood Disorder Management // *Iranian Journal of Blood and Cancer*. – 2024. – Т. 16. – №. 4. – С. 9-19.
14. Al-rahawi A. F., Atasoy N. A. Optimizing Capsule Network Performance with Enhanced Squash Function for Classification Large-Scale Bone Marrow Cells // *Black Sea Journal of Engineering and Science*. – 2024. – Т. 7. – №. 5. – С. 1050-1065.
15. Esteva A., Robicquet A., Ramsundar B., Kuleshov V., DePristo M. A., Chou K., Cui C., Corrado G. S., Thrun S., Dean J. A guide to deep learning in healthcare // *Nature Medicine*. 2019. Т. 25. С. 24-29.
16. Han Y. Deep learning methods and corresponding applications in medical imaging // *Applied and Computational Engineering*. 2024. Т. 46. – С. 79-83. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/46/20241106>
17. Sistaninejad B., Rasi H., Nayeri P. A Review Paper about Deep Learning for Medical Image Analysis // *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2023. Т. 2023.
18. Semmelrock, H., Ross-Hellauer, T., Kopeinik, S., Theiler, D., Haberl, A., Thalmann, S., & Kowald, D. Reproducibility of the Methods in Medical Imaging with Deep Learning // *Medical Imaging with Deep Learning*. – PMLR, 2024. – С. 95-106.
19. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621283 Российская Федерация. База данных клеток костного мозга больных острым лимфобластным лейкозом / Поляков Е.В., Тупицын Н.Н., Серебрякова И.Н., Палладина А.Д.; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). – № 2023620945; заявл. 06.04.2023; опублик. 20.04.2023. Бюл. № 4.

Поляков Евгений Валерьевич

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва
К.т.н., доцент кафедры медицинской физики, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
E-mail: EVpolyakov@mephi.ru

Филатова Нелли Анатольевна

ФГБУ НМИЦ онкологии имени Н.Н. Блохина МЗ РФ, г. Москва
Врач клинической лабораторной диагностики централизованного научно-клинического лабораторного отдела
115522, г. Москва, Каширское шоссе д. 24, Россия, E-mail: filatova.nelli@gmail.com

Дмитриева Валентина Викторовна

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва
К.т.н., доцент кафедры электрофизических установок
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31,
E-mail: VVDmitriyeva@mephi.ru @mephi.ru

Колбаская Ольга Павловна

ФГБУ НМИЦ онкологии имени Н.Н. Блохина МЗ РФ, г. Москва
К.м.н., врач клинической лабораторной диагностики централизованного научно-клинического лабораторного отдела
115522, г. Москва, Каширское шоссе д. 24, Россия
E-mail: helgaopk69@yandex.ru

Шувалова Екатерина Викторовна

Предуниверситет №1511 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва
К.ф.-м. н. учитель физики
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
E-mail: ekaterina2504@ya.ru

Климанов Игорь Александрович

ФГБУ НМИЦ онкологии имени Н.Н. Блохина МЗ РФ, г. Москва
К.м.н., заведующий централизованного научно-клинического лабораторного отдела
115522, г. Москва, Каширское шоссе д. 24, Россия
E-mail: Igorklimanov@yandex.ru

POLYAKOV E.V., DMITRIEVA V.V., SHUVALOVA E.V., FILATOVA N.A.,
KOLBASKAYA O.P., KLIMANOV I.A.

STUDY OF ONE-STAGE DEEP LEARNING NEURAL NETWORK FOR BIOMEDICAL IMAGE ANALYSIS

Abstract. *The research work is devoted to the study of one-stage neural network architecture on the example of YOLO for analyzing biomedical images. The study is carried out on images of nucleus-containing blood and bone marrow cells. Pre-training and post-training output data processing modules are developed to process the experimental data. Data augmentation has demonstrated a significant increase in the quality of image recognition by the neural network. The trained model was analyzed on a test sample of drug images not included in the training using Kappa coefficient. The experimental results confirmed the high efficiency of YOLO architecture for biomedical image analysis. The trained model data was validated by high consistency scores, with Kappa coefficient ranging from 71% to 97%. Differential scoring performed by the expert and trained model reached the result of 90%.*

Keywords: *biomedical imaging, neural networks, image analysis; YOLO, data augmentation, object detection, cell classification, disease diagnosis, bone marrow, quality assessment, efficiency, deep learning.*

BIBLIOGRAPHY

1. Chen Y., Zhang C., Chen B., Huang Y., Sun Y., Wang C., Fu X., Dai Y., Qin F., Peng Y., Gao Y. Accurate leukocyte detection based on deformable-DETR and multi-level feature fusion for aiding diagnosis of blood diseases // Computers in biology and medicine. – 2024. – T. 170. – C. 107917.
2. Polyakov E.V., Popov V.V., Dmitrieva V.V. A system for analyzing images of nucleated bone marrow cells for the formation of a diagnostic conclusion in oncohematology. Modeling, Optimization and Information Technology. – 2025. – T. 13. – №. 1. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.016> (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.016>
3. Bagg A., Raess P.W., Rund D., Bhattacharyya S., Wiszniewska J., Horowitz A., Jengehino D., Fan, G., Huynh M., Sanogo A., Avivi I., Katz B. Performance Evaluation of a Novel Artificial Intelligence-Assisted Digital Microscopy System for the Routine Analysis of Bone Marrow Aspirates // Modern Pathology. – 2024. – T. 37. – №. 9. – C. 100542.
4. Koch V., Wagner S.J., Kazeminia S., Sancar E., Hehr M., Schnabel J.A., Peng T., Marr C. DinoBloom: a foundation model for generalizable cell embeddings in hematology Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2024. MICCAI 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 15012. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72390-2_49
5. Matek C., Krappe S., Münzenmayer C., Haferlach T., Marr C. Highly accurate differentiation of bone marrow cell morphologies using deep neural networks on a large image data set // Blood, The Journal of the American Society of Hematology. – 2021. – T. 138. – №. 20. – C. 1917-1927.
6. Negm A. S., Hassan O. A., Kandil A. H. A decision support system for Acute Leukaemia classification based on digital microscopic images // Alexandria engineering journal. 2018. № 4 (57). C. 2319–2332.
7. Kreiss L., Jiang S., Li X., Xu S., Zhou K., Lee K., Muhlberg A., Kim K., Chaware A., Ando M., Barisoni L., Seung Ah L., Zheng G., Lafata K., Friedrich O., and Horstmeyer R. Digital staining in optical microscopy using deep learning - a review // PhotonIX. – 2023. – Vol. 4.

8. Dmitrieva, V. V., Magmanova, Y. A., Tsypliyak, V. I., Polyakov, E. V. A system for annotating biomedical images based on internet technology in oncohematology // International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – Т. 13. – №. 3. – С. 52-57.
9. Cheng, Zhizhao and Yuan-Ya Li. “Improved YOLOv7 Algorithm for Detecting Bone Marrow Cells” // Sensors (Basel, Switzerland). – 2023.
10. Luo, Y., Xu, Y., Wang, C., Li, Q., Fu, C., Jiang, H. ResNeXt-CC: a novel network based on cross-layer deep-feature fusion for white blood cell classification //Scientific Reports. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 18439.
11. Singh A., Dwivedi R. K., Rastogi R. Machine Learning Based Framework for Lung Cancer Detection and Image Feature Extraction Using VGG16 with PCA on CT-Scan Images // SN Computer Science. – 2024. – Т. 5. – №. 8. – С. 1040.
12. Firat H. Classification of microscopic peripheral blood cell images using multibranch lightweight CNN-based model //Neural Computing and Applications. – 2024. – Т. 36. – №. 4. – С. 1599-1620.
13. Tajvidi Asr, R., Rahimi, M., Hossein Pourasad, M., Zayer, S., Momenzadeh, M., Ghaderzadeh, M. Hematology and Hematopathology Insights Powered by Machine Learning: Shaping the Future of Blood Disorder Management //Iranian Journal of Blood and Cancer. – 2024. – Т. 16. – №. 4. – С. 9-19.
14. Al-rahawi A. F., Atasoy N. A. Optimizing Capsule Network Performance with Enhanced Squash Function for Classification Large-Scale Bone Marrow Cells //Black Sea Journal of Engineering and Science. – 2024. – Т. 7. – №. 5. – С. 1050-1065.
15. Esteva A., Robicquet A., Ramsundar B., Kuleshov V., DePristo M. A., Chou K., Cui C., Corrado G. S., Thrun S., Dean J. A guide to deep learning in healthcare // Nature Medicine. 2019. Т. 25. С. 24-29.
16. Han Y. Deep learning methods and corresponding applications in medical imaging // Applied and Computational Engineering. 2024.Т. 46. – С. 79-83. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/46/20241106>
17. Sistaninejad B., Rasi H., Nayeri P. A Review Paper about Deep Learning for Medical Image Analysis // Computational and Mathematical Methods in Medicine. 2023. Т. 2023.
18. Semmelrock, H., Ross-Hellauer, T., Kopeinik, S., Theiler, D., Haberl, A., Thalmann, S., & Kowald, D. Reproducibility of the Methods in Medical Imaging with Deep Learning //Medical Imaging with Deep Learning. – PMLR, 2024. – С. 95-106.
19. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2023621283 Rossiyskaya Federatsiya. Baza dannykh kletok kostnogo mozga bolnykh ostrym limfoblastnym leykozom / Polyakov E.V., Tupitsyn N.N., Serebryakova I.N., Palladina A.D.; zayavitel i pravobladatel federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Natsionalnyy issledovatel'skiy yadernyy universitet «MIFI» (NIYAU MIFI). – № 2023620945; zayavl. 06.04.2023; opubl. 20.04.2023. Byul. № 4.

Polyakov Evgeny Valeryevich

National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Medical Physics,
115409, Moscow, Kashirskoe Shosse, 31
E-mail: EVpolyakov@mephi.ru

Filatova Nelly Anatolyevna

N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow
Doctor of clinical laboratory diagnostics of the centralized scientific and clinical laboratory department
115522, Moscow, Kashirskoe shosse 24
E-mail: filatova.nelli@gmail.com

Dmitrieva Valentina Viktorovna

National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrophysical Installations
115409, Moscow, Kashirskoe Shosse, 31
E-mail: VVDmitriyeva@mephi.ru @mephi.ru

Kolbatskaya Olga Pavlovna

N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow
Candidate of Sciences in Medicine, Doctor of clinical laboratory diagnostics of the centralized scientific and clinical laboratory department
115522, Moscow, Kashirskoe shosse 24
E-mail: helgaopk69@yandex.ru

Shuvalova Ekaterina Viktorovna

Pre-University #1511 National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, teacher of physics
115409, Moscow, Kashirskoe Shosse, 31
E-mail: ekaterina2504@ya.ru

Klimanov Igor Aleksandrovich

N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow
Candidate of Sciences in Medicine, Head of Centralized Scientific and Clinical Laboratory Department
115522, Moscow, Kashirskoe shosse 24
E-mail: Igorklimanov@yandex.ru

© Поляков Е.В., Дмитриева В.В., Шувалова Е.В., Филатова Н.А., Колбацкая О.П., Климанов И.А., 2025

ЖИДКОВ А.В., НЕМОВ В.П., ПОДМАСТЕРЬЕВ К.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛУЧЕЙ СВЕТА В ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ МОНОХРОМАТОРА МАТРИЧНОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА НАРУЖНЫХ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА

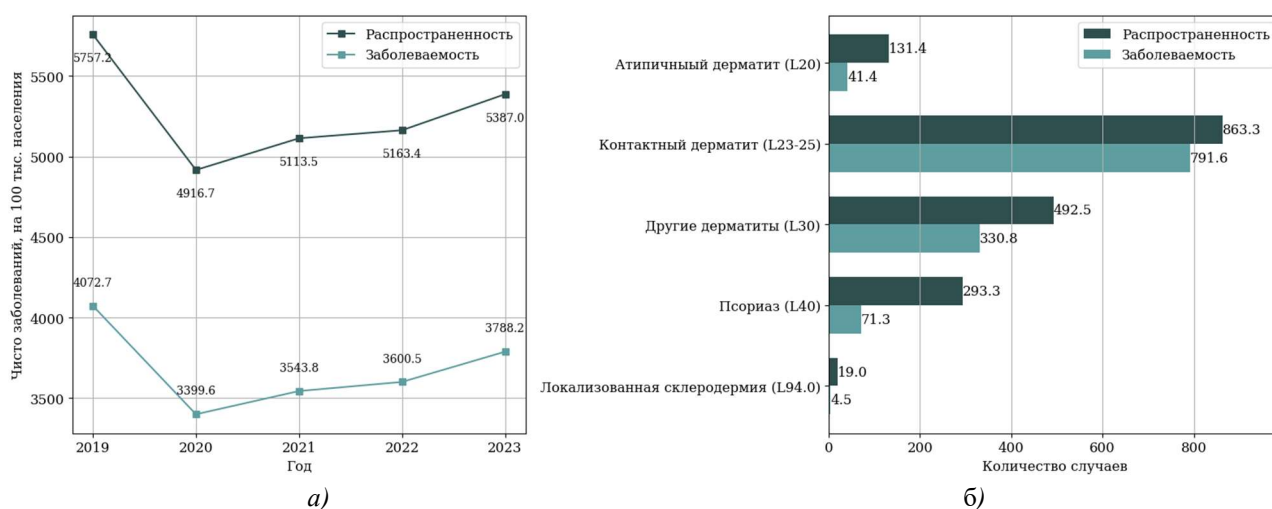
Аннотация. Предложен функциональный прототип монохроматора для выделения узкой полосы длин волн и модель распространения лучей света заданных длин в зависимости от линейного перемещения линзы в функциональном прототипе. Проведены теоретические и экспериментальные исследования, по результатам которых произведена оценка адекватности предложенной модели.

Ключевые слова: моделирование, распространение лучей света, оптическая схема, монохроматор, диагностика, кожные заболевания.

Введение

Актуальность современной диагностики кожных заболеваний трудно переоценить, поскольку своевременное выявление и адекватное лечение этих состояний играют ключевую роль в предотвращении серьезных осложнений болезней, а также снижают социальный дискомфорт, вызванный поражениями кожи на видимых частях тела [1]. Запоздалое обращение за медицинской помощью или неправильно подобранная терапия могут привести к ухудшению состояния пациента, включая развитие инфекций, хронических воспалительных процессов и даже рубцевания тканей [2]. Важно учитывать, что проявления кожных заболеваний могут быть изменчивыми, а состояние пациента может колебаться от улучшения до значительного ухудшения [3].

На рисунке 1 представлена статистика динамики заболеваемости болезнями кожи [4].



**Рисунок 1 – Статистика распространения заболеваний кожи
в Российской Федерации в период с 2019 по 2023 годы:**

а – распространённость (на 100 тысяч населения) и заболеваемость болезнями кожи по годам;

б – статистика различных заболеваний кожи за весь период

Исходя из положительной тенденции заболеваемости и распространенности болезней кожи за последние 5 лет можно сделать вывод о недостаточной эффективности существующих методов и инструментов в области дерматологии.

Основным методом диагностики в дерматологии долгое время оставался клинический метод, заключающийся в сборе первичного анамнеза, классификации и локализации высыпаний на коже, а также определения цвета, формы и границ поражений органолептическими методами или с применением увеличительного стекла. Недостатком

клинического метода является субъективность постановления диагноза, а применение различных индексов, например SCORAD, все также создаёт проблемы несогласованности мнений различных специалистов [5].

Для объективных оценок состояния кожи требуется переход к инструментальным методам неинвазивной диагностики заболеваний кожи. Метод по информативности приближенный к традиционной биопсии – конфокальная сканирующая лазерная микроскопия [6, 7]. К недостаткам такой микроскопии относятся: высокая стоимость оборудования, сложность проведения процедуры в области труднодоступных мест поражения кожи [2, 8]. Альтернативным методом для оценки пораженной болезнью кожи является ультразвуковое исследование [8]. Данный метод при его сравнительной доступности обладает существенными недостатками – сложностью позиционирования ультразвукового датчика, а также необходимостью взаимодействия непосредственно с больным участком кожи с обязательным требованием в виде нанесения на пораженную ткань специализированного геля.

Отдельный интерес в области исследования кожи вызывает метод оптической когерентной томографии (ОКТ), так как он позволяет проводить неинвазивное исследование срезов кожи с высоким разрешением (от 3-5 до 25 мкм) [9, 10]. Несмотря на то, что ОКТ широко распространен в научно-исследовательской среде, внедрение его в клиническую практику отягощается сложностью проведения процедуры и высокой стоимостью оборудования.

В настоящее время активно развивается метод матричной спектрофотометрии, по принципу работы схожий с методом гиперспектральной визуализации, применение которой находит себя в рамках исследовательских проектов для классифицирования патологий кожи [11], но дополненный собственным источником монохроматического излучения с возможностью выбора интересующего диапазона длин волн.

Метод матричной спектрофотометрии заключается в зондировании участка кожи монохроматическим светом, получаемым с помощью разложения белого света на диспергирующем элементе. Далее свет после поглощения и рассеивания в участке кожи, отражается на ПЗС матрицу, где регистрируется и обрабатывается. В конечном итоге медицинский сотрудник получает набор оптических спектральных характеристик каждого пикселя изображения для принятия диагностического решения.

На основании вышеописанных достоинств метода возникает необходимость в разработке отечественных устройств, способствующих повышению эффективности диагностики заболеваний, сокращению времени, затрачиваемого на принятие врачебных решений, а также переходу к персонализированной медицине.

С этой целью предлагается создание матричного спектрофотометра для экспресс-анализа наружных тканей человека. Ключевую роль в функционировании устройства играет возможность выбора заданной длины волны оптического излучения, используемого для сканирования участка кожи. Эта функция реализуется с помощью блока монохроматора – технически сложного и дорогостоящего устройства, как правило, интегрируемого непосредственно в целевые системы и редко представленного в виде отдельного узла.

Таким образом, для перехода к проектированию матричного спектрофотометра и последующей обработки полученных оптических данных с участков кожи необходимо решить техническую задачу разработки самого монохроматора, а также оптимального геометрического расположения элементов, обеспечивающих формирование и выделение нужной длины волны.

Целью настоящей работы является разработка функционального прототипа монохроматора с обоснованием его характеристик посредством создания геометрической модели распространения света в нем и проведения верификационных исследований..

Успешная реализация этих задач может стать основой для дальнейшего проектирования перспективных оптических диагностических устройств.

Априорные данные и результаты моделирования

Моделирование распространения света в функциональном прототипе монохроматора основывается на геометрических законах оптики таких, как закон прямолинейного

распространения пучка излучения, принцип обратимости хода пучков излучения, закон отражения пучков излучения, закон преломления пучков излучения [12].

Объектом исследования является процесс прохождения света с различными длинами волн, полученных от разложения полихроматического света на дифракционной решётке в функциональном прототипе монохроматора.

Моделирование трассировки лучей осуществляется в программной среде Comsol Multiphysics с использованием модуля Ray Optics, позволяющего моделировать распространения света в заданных условиях с учётом их волновых характеристик за счёт применения принципа Гюйгенса Френелля, который является основным постулатом волновой теории и объясняет дифракционные явления [13]. Моделирование распространения лучей соответствует структурной схеме, представленной на рисунке 2.

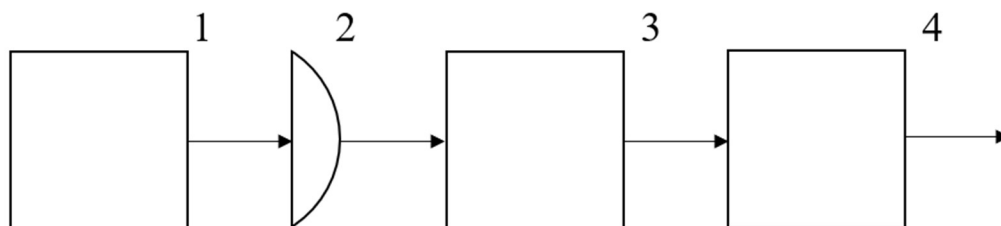


Рисунок 2 – Оптическая структурная схема:

1 – полихроматический источник излучения, 2 – плоско-выпуклая линза, 3 – дифракционная решётка, 4 – выходная щель

При создании модели приняты следующие допущения, характеристики и параметры элементов:

1. Модель распространения света приведена к упрощённой схеме в двумерном пространстве с сохранением всех геометрических характеристик и расположением элементов в соответствии со структурной схемой (элементы и их геометрическое расположение представлены на рисунках 2 и 3).

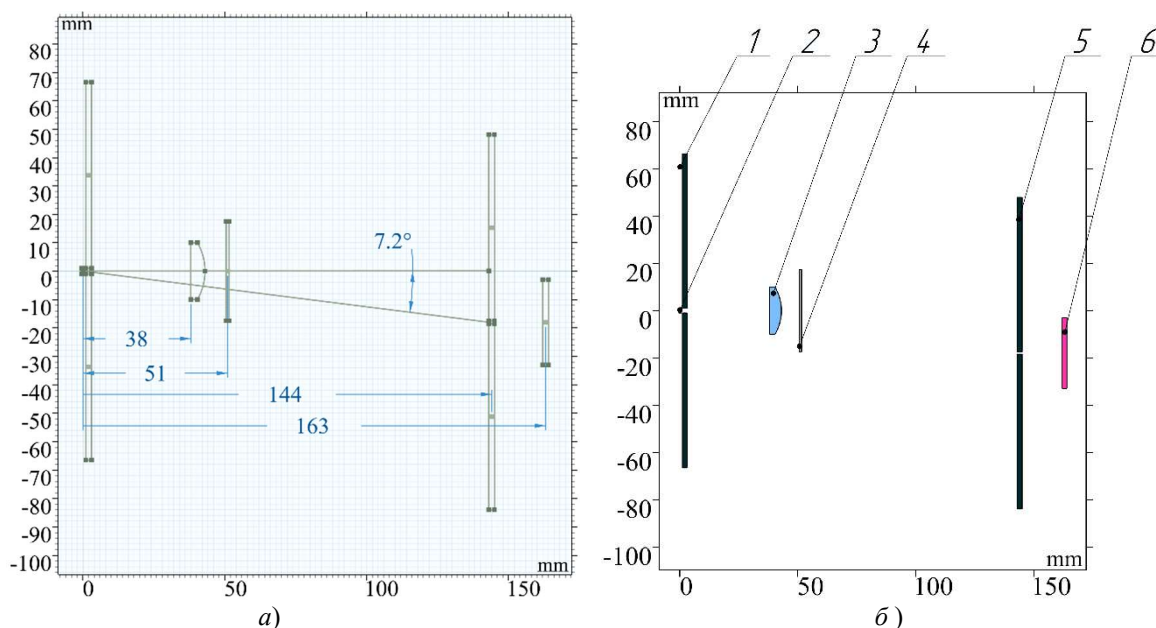


Рисунок 3 – Геометрические характеристики модели:

а – размеры корпусных элементов модели, б – размеры оптических элементов модели;

1; 5 – стенки прототипа, 2 – полихроматический источник излучения, 3 – плоско-выпуклая линза, 4 – дифракционная решётка, 6 – выходная щель

2. Источник света в модели является полихроматическим с заданной конусностью распространения света и детерминированным значением количества исходящих лучей, полихроматический свет находится в детерминированном видимом диапазоне 480 – 660 нм с шагом 1 нм;

3. Фокусирующая линза имеет радиус кривизны равный 20 мм, материал - оптическое стекло CDGM HWS5 Glass;

4. Для моделирования дифракции света на решетке использованы уравнения, включающие расчет волнового вектора после дифракции, а также условия существования дифракционного порядка. Расчёты выполнены по формулам, инкорпорированным в среду моделирования [13]:

$$k'_p = k_p + mG, \quad (1)$$

где k'_p – волновой вектор после дифракции (параллельная компонента);

k_p – волновой вектор падающего света (параллельная компонента);

m – порядок дифракции;

G – вектор обратной решетки, определяемый как:

$$G = \frac{2\pi}{d} T_g, \quad (2)$$

где d – расстояние между штрихами дифракционной решётки;

T_g – единичный вектор, указывающий периодичность решетки.

COMSOL вычисляет полный волновой вектор после дифракции, включая перпендикулярную компоненту по формуле [10]:

$$k' = k'_p + k_n n_s, \quad (3)$$

где k – полный волновой вектор после дифракции;

n_s – нормаль к поверхности решётки;

k_n – перпендикулярная компонента волнового вектора, равный:

$$k_n = \sqrt{(k_0 n)^2 - \|k'_p\|^2}; \quad (4)$$

5. Изменение длины волны света, попадающего в щель монохроматора относительно оптической оси источника освещения, достигается за счёт линейного перемещения плоско-выпуклой линзы 2 (рисунок 3).

6. Порядок дифракционной решётки равен 1 ($m = 1$) с плотностью линий дифракционной решётки 600 лин/мм. Период дифракционной решётки 1666.67 нм с невозможностью отражения света.

В ходе моделирования получены средние значения и обусловленные определенным размером выходной щели пределы длин волн в зависимости от смещения линзы относительно источника излучения с шагом 0,3 мм (рисунок 4). Пример моделирования распространения лучей на разных длинах волн в зависимости от перемещения линзы представлен на рисунке 5.

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод о наличии линейной зависимости между положением линзы относительно источника излучения и длиной волны света, проходящего через выходную щель монохроматора. При этом зависимость длины волны λ от перемещения линзы x для принятых при моделировании характеристик и параметрах элементов прототипа может быть представлена выдвинутым:

$$\lambda = 63,95x + 466,33$$

Следует отметить, что предложенная схема выделения нужной длины волны отличается простотой регулировки подвижных компонентов.

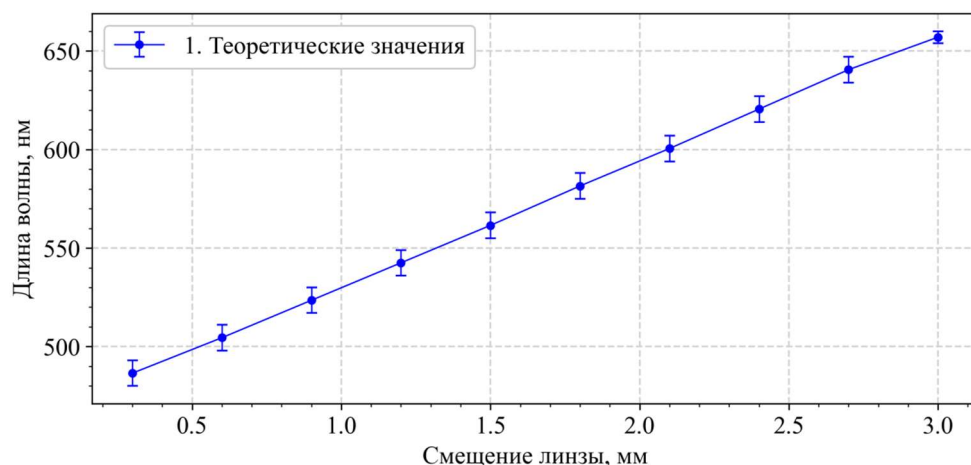


Рисунок 4 – Теоретические значения построенной модели функционального прототипа

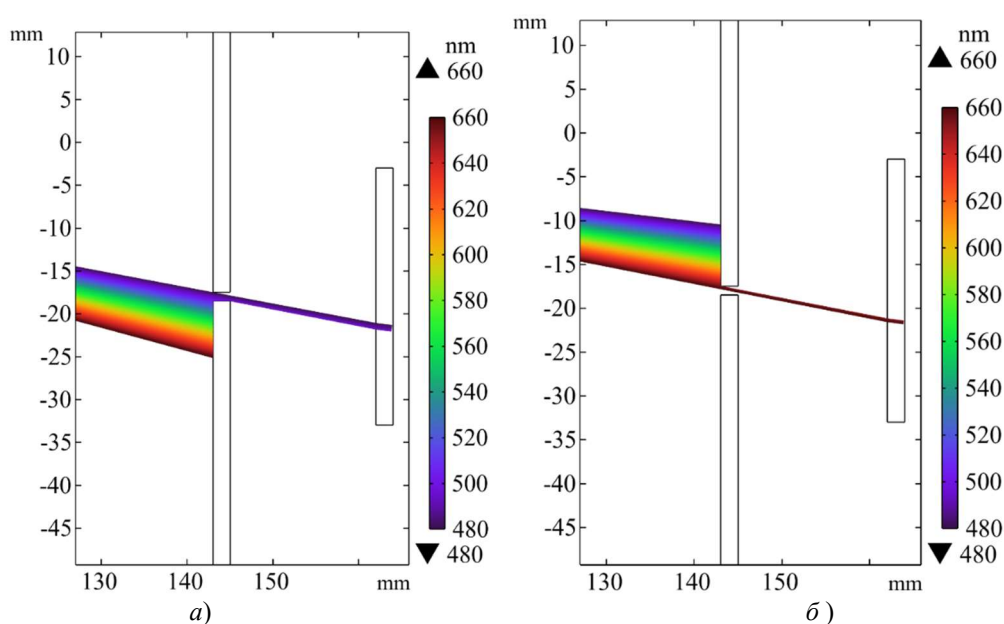


Рисунок 5 – Пример детектирования длины волны в модели:

а – длина волны 480 нм при смещении линзы на 0,3 мм, б – длина волны 660 нм при смещении линзы на 3,0 мм

Экспериментальные исследования

Для подтверждения адекватности полученной модели разработан функциональный прототип монохроматора, основанный на представленной выше структурной схеме (рисунок 2) и геометрических размерах (рисунок 3) и содержащий полихроматический источник излучения, плоско-выпуклую линзу, дифракционную решётку и выходную щель. Для возможности линейного перемещения фокусирующей линзы на заданное значение x в плоскости, перпендикулярной оптической оси источника, разработано специализированное конструктивное приспособление. На рисунке 6 представлена схема функционального прототипа монохроматора во время эксперимента. Длина волны определялась спектрометром ФСД-10, имеющим спектральный диапазон от 180 до 1080 нм, чувствительность CCD матрицы 160 В/(лк·с), спектральное разрешение 2,5-10 нм, среднюю дисперсию $\pm 0,2$ нм (для длины волны 638 нм). В качестве диспергирующего элемента использовалась дифракционная решётка с плотностью 600 лин/мм. Для измерения линейного перемещения линзы использовался цифровой штангенциркуль Inforce 06-11-39 класса точности 1 (предельная погрешность 0,02 мм), с размером шага 0,01 мм.



Рисунок 6 – Схема проведения эксперимента с функциональным прототипом монохроматора

Пример измерения длины волны спектрометром согласно схеме функционального прототипа монохроматора представлен на рисунке 7, а пример зафиксированного результата его работы – на рисунке 8.

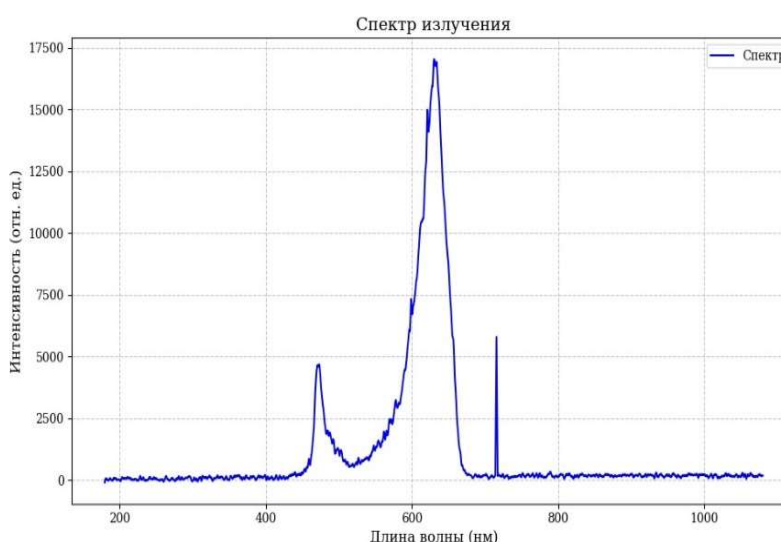


Рисунок 7 – Пример измерения длины волны спектрометра

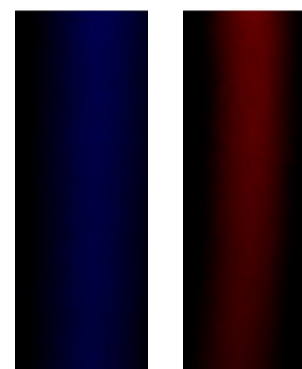


Рисунок 8 – Пример зафиксированного результата экспериментальных исследований: а) свет длиной волны 480 нм; б) свет длиной волны 660 нм

Измерения длин волн проводились при различных фиксированных значениях перемещения линзы в диапазоне от 0 до 3 мм с шагом 0,3 мм (в 10 точках, для которых проводились теоретические исследования на модели). Эксперимент повторялся четыре раза с установлением каждый раз заданного перемещения линзы. Результаты проведенных измерений представлены в таблице 1 и на рисунке 9, а на рисунке 10 приведены графики теоретической и экспериментальной (регрессионной) зависимостей.

Оценка адекватности и точности модели

Полученные экспериментальные данные подтверждают установленный путем моделирования линейный характер зависимости длины волны от перемещения линзы. Проанализируем количественно точность предложенной модели и функционального прототипа и оценим работоспособность технического решения в виде изменения линейного перемещения линзы для выделения необходимой длины волны.

Для оценки точности модели в качестве одного из подходов воспользуемся методикой [14], основанной на определении абсолютной и средней относительной погрешностей.

Таблица 1 – Результаты измерения длин волн на выходе щели монохроматора при линейном передвижении линзы

№	Перемещение линзы x , мм	Длина волны λ , нм				
		Экспериментальные значения				Среднее значение
		№1	№2	№3	№4	
1	0,3	470	460	480	480	472,5
2	0,6	480	480	490	520	492,5
3	0,9	490	500	500	545	508,8
4	1,2	530	520	510	580	535,0
5	1,5	555	540	535	590	555,0
6	1,8	560	575	575	610	580,0
7	2,1	560	600	600	615	593,8
8	2,4	615	625	620	620	620,0
9	2,7	640	650	640	630	640,0
10	3	660	675	660	645	660,0

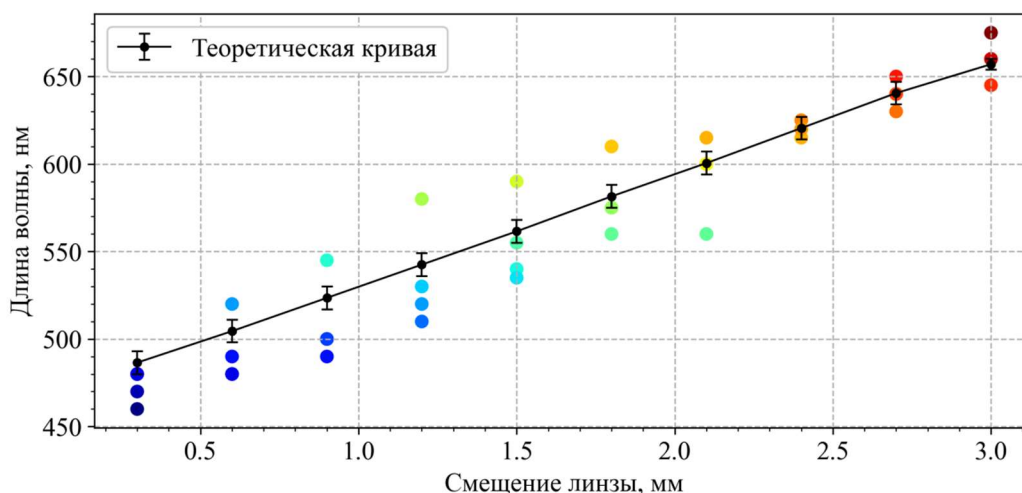


Рисунок 9 – Результаты экспериментальных исследований

Абсолютная погрешность $AE(\lambda)$ рассчитывается по формуле:

$$AE(\lambda) = \left| \bar{y}_{предск}(\lambda) - M(\lambda) \right|, \quad (5)$$

где $M(\lambda)$ – математическое ожидание экспериментальных данных длины волны;

$\bar{y}_{предск}(\lambda)$ – среднее значение длины волны, полученное при моделировании.

Относительная погрешность $RE(\lambda)$ рассчитывается по формуле:

$$RE(\lambda) = \frac{AE(\lambda)}{M(\lambda)} \times 100\%, \quad (6)$$

Точность модели определяется по формуле:

$$Точность = 100\% - \frac{\sum_{i=1}^{10} RE(\lambda_i)}{10}, \quad (7)$$

где $RE(\lambda_i)$ – относительная погрешность длины волны для i -ого значения перемещения.

Представленные в таблице 2 результаты расчётов свидетельствуют о высокой точности модели, соответствующей 98,6 %.

Таблица 2 – Результаты измерения длин волн на выходе щели монохроматора при линейном передвижении линзы

Перемещение линзы, мм	Теоретическое среднее значение длины волны, нм	Экспериментальное среднее значение длины волны, нм	Абсолютная погрешность, мм	Относительная погрешность, %
0,3	486,5	472,5	14	2,9
0,6	505	492,5	12,5	2,5
0,9	524	508,75	15,25	2,9
1,2	543	535	8	1,5
1,5	562	555	7	1,2
1,8	581,5	580	1,5	0,3
2,1	601	593,75	7,25	1,2
2,4	620,5	620	0,5	0,1
2,7	640,5	640	0,5	0,1
3	657	660	-3	-0,5
Точность модели, %				98,6 %

В качестве других статистических подходов к оценке адекватности и точности модели определим относительное среднеквадратическое отклонение полученных при эксперименте сорока значений длин волн от соответствующих теоретических значений по предлагаемой модели, и коэффициент детерминации экспериментальных значений относительно линейной теоретической зависимости. Формулы для нахождения указанных параметров представлены ниже:

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_{i\text{эксп}} - \lambda_{i\text{теор}}}{\lambda_{i\text{теор}}} \right)^2}, \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_{i\text{эксп}} - \lambda_{i\text{теор}})^2}{\sum_{i=1}^n (\lambda_{i\text{эксп}} - \bar{\lambda}_{\text{эксп}})^2}, \quad (9)$$

где $\lambda_{i\text{эксп}}$ – значение длины волны, полученное в i -ом эксперименте;

$\lambda_{i\text{теор}}$ – значение длины волны, полученное по математической модели при перемещении линзы, соответствующем i -ому эксперименту;

$\bar{\lambda}_{\text{эксп}}$ – среднее экспериментальное значение длины волны.

Подставив значения из таблицы 1 и 2 в формулы (8) и (9), получим:

$$CKO = 1,6 \%; R^2 = 0,98.$$

Сравнивая описанное выше аналитическое выражение для зависимости длины волны от перемещения линзы, полученное при моделировании, с зависимостью, полученной путем регрессионного анализа экспериментальных значений (рисунок 10), можно видеть их некоторое расхождение. Линейность зависимостей не вызывает сомнения, но имеет место некоторые аддитивный и мультипликативный тренды в отклонениях между ними. Данные отклонения могут быть обусловлены, как допущенными упрощениями в рамках моделирования (в частности, использованием идеализированной дифракционной решётки и линзы с номинальными параметрами), так и погрешностями экспериментальных измерений, включая возможные отклонения при позиционировании линзы и калибровке источника излучения. В то же время, найденные статистические оценки, такие как точность (98,6 %), относительное среднее квадратическое отклонение экспериментальных значений от аналитической зависимости (1,6 %) и коэффициент детерминации (0,98), с учетом метрологических характеристик используемых для измерения перемещения и длины волны

средств измерений свидетельствуют о несущественности этих отклонений, адекватности и высокой точности предложенной модели.

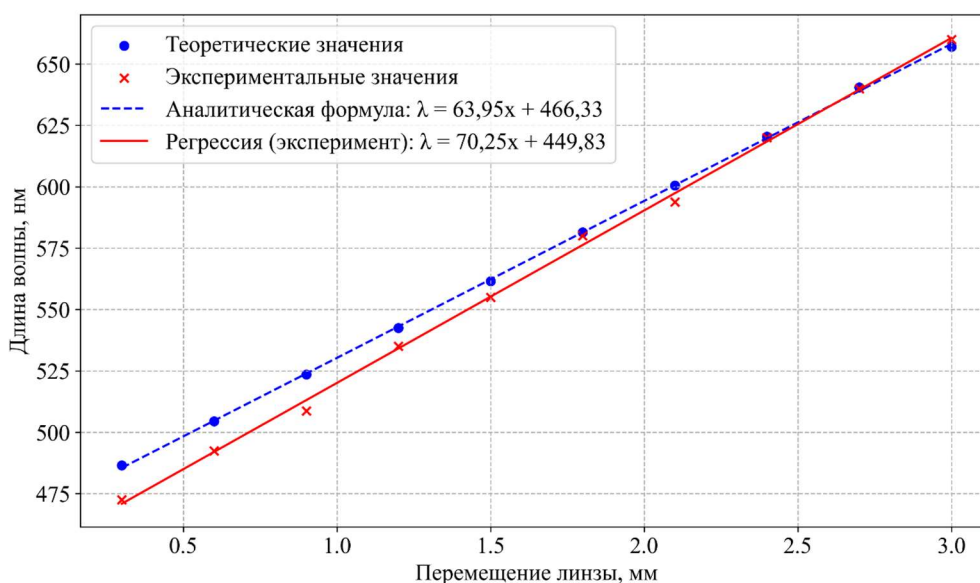


Рисунок 10 – Аналитическая формула по значениям модели и линейная регрессия по экспериментальным значениям

Заключение

Разработанный функциональный прототип монохроматора и его математическая модель, основанная на законах геометрической оптики, позволяют прогнозировать длину волны света при определенном перемещении линзы монохроматора в различных технических устройствах.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность и высокую точность предложенной модели, работоспособность технического решения в виде изменения линейного перемещения линзы для выделения необходимой длины волны.

Разработанная модель открывает перспективы в области проектирования спектрофотометров для экспресс-анализа наружных тканей человека, а также других оптических биомедицинских приборов. Она может быть использована для оптимизации выбора конструктивных параметров элементов и материалов, геометрических и оптических характеристик проектируемых устройств, их компоновки.

Помимо модели, определенную ценность представляет и функциональный прототип монохроматора, который при доработке и технической адаптации может использоваться как самостоятельное устройство для выделения заданной длины волны, пригодное для интеграции в более сложные оптические системы, в том числе в медицинской и промышленной сферах.

Выражаем благодарность НТЦ биомедицинской фотоники ОГУ имени И.С. Тургенева за предоставление возможности измерить длину волны спектрометром.

Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00196-24-02 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов от 01.04.2024 г., проект № FSGN-2024-0007 (1023110800218-7-3.2.4;3.1.3;2.6.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайнуллина, О. Н. Современные методы оценки состояния кожи при atopическом дерматите у детей / О.Н. Зайнуллина, З.Р. Хисматуллина, Д.В. Печуров // Аллергология и иммунология в педиатрии. – 2017. – № 4 (51). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-otsenki-sostoyaniya-kozhi-pri-atopicheskom-dermatite-u-detey> (дата обращения: 31.01.2025).
2. Воронина, В. Р. Особенности микробиоценоза кожи больных atopическим дерматитом и терапия его осложнений / В.Р. Воронина, А.Н. Пампура, Е.С. Феденко // Российский аллергологический журнал. – 2007. – № 3. – С. 3–11.
3. Камка, Н. Н. Особенности кожных проявлений (экзантем) при некоторых медленных вирусных инфекционных заболеваниях / Н.Н. Камка, Л.Л. Катаныхова, О.В. Козловская // Вестник СурГУ. Медицина. –

2017. – № 4 (34). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-kozhnyh-proyavleniy-ekzantem-pri-nekotoryh-medlennyh-virusnyh-infektsionnyh-zabolevaniyah> (дата обращения: 04.02.2025).
4. Кубанов, А. А. Дерматовенерология в Российской Федерации: итоги 2023 г. / А.А. Кубанов, Е.В. Богданова // Вестник дерматологии и венерологии. – 2024. – Т. 100, № 4. – С. 9–24. – DOI: <https://doi.org/10.25208/vdv16795>
5. Шеншова, С. В. Социальная адаптация при кожных заболеваниях: взгляд современных студентов / С.В. Шеншова, А.А. Гатиятуллина // FORCIPE. – 2022. – № S3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialnaya-adaptatsiya-pri-kozhnyh-zabolevaniyah-vzglyad-sovremennyh-studentov> (дата обращения: 31.01.2025).
6. Хисматуллина, З. Р. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия в диагностике онкологической патологии: современные аспекты и перспективы применения / З.Р. Хисматуллина и др. // Креативная хирургия и онкология. – 2021. – № 1. – С. 76–84.
7. Дурнова, А. О. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия – применение в патоморфологических исследованиях / А.О. Дурнова, Ю.С. Крылова, Л.Н. Пантелеев, С.Ф. Мусихин // Биотехносфера. – 2014. – № 5 (35). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konfokalnaya-lazernaya-skaniruyushchaya-mikroskopiya-primenenie-v-patomorfologicheskikh-issledovaniyah> (дата обращения: 04.02.2025).
8. Спиридонов, В. Е. Диагностика эритродермий кожи: современный подход и перспективы / В.Е. Спиридонов и др. // Достижения фундаментальной, клинической медицины и фармации. – 2019. – С. 95–97.
9. Захаров, В. П. Повышение информативности оптической когерентной томографии при диагностировании кожных патологий / В.П. Захаров, К. Ларин, И.А. Братченко // Вестник СГАУ. – 2011. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-informativnosti-opticheskoy-kogerentnoy-tomografii-pri-diagnostirovanii-kozhnyh-patologiy> (дата обращения: 04.02.2025).
10. Братченко, И. А. Гиперспектральная визуализация патологий кожи в видимой области / И.А. Братченко, М.В. Алонова, О.О. Мякинин, А.А. Морятов, С.В. Козлов, В.П. Захаров // Клиническая офтальмология. – 2016. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/giperspektralnaya-vizualizatsiya-patologiy-kozhi-v-vidimoy-oblasti> (дата обращения: 04.02.2025).
11. Белашенков, Н. Р. Микроскоп-спектрофотометр с матричным фотоприемником / Н.Р. Белашенков, И.П. Гуров, А.И. Лопатин, А.В. Мельников // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2007. – № 43. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikroskop-spektrofotometr-s-matrichnym-fotopriemnikom> (дата обращения: 31.01.2025).
12. COMSOL Multiphysics. Руководство пользователя. – Стокгольм: COMSOL AB, 2023. – Версия 6.1. – 1490 с.
13. Захаров, Н. П. Оптико-электронные узлы электронно-вычислительных средств, измерительных приборов и устройств автоматики: учебное пособие / Н.П. Захаров, С.П. Тимошенко, Ю.А. Крупнов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2018. – 335 с.
14. Freitas, C. J. Standards and Methods for Verification, Validation, and Uncertainty Assessments in Modeling and Simulation / C. J. Freitas // Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification. – 2020. – Т. 5. – №. 2. – С. 021001-1-021001-9 (65).

Жидков Алексей Владимирович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент кафедры
приборостроения, метрологии и сертификации
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: epipro@rambler.ru

Немов Виталий Павлович

ФГБОУ «ОГУ имени И. С. Тургенева», г. Орёл
Студент кафедры приборостроения, метрологии и
сертификации
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: VP.Nemov@yandex.ru

Подмастерьев Константин Валентинович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Доктор технических наук, профессор кафедры
приборостроения, метрологии и сертификации,
директор института приборостроения, автоматизации
и информационных технологий
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
E-mail: asms-orel@mail.ru

ZHIDKOV A.V., NEMOV V.P., PODMASTEREV K.V.

MODELLING OF LIGHT RAY PROPAGATION IN THE OPTICAL SCHEME OF A SPECTROPHOTOMETER

Abstract. A functional prototype of a monochromator for isolating a narrow wavelength band has been developed, along with a model of light ray propagation for specified wavelengths based on the linear displacement of the lens in the monochromators functional prototype. Theoretical and experimental studies were conducted, and the results were used to evaluate the adequacy of the proposed model..

Keywords: *modelling, light ray propagation, optical scheme, spectrophotometer, diagnostics, skin diseases, impedance, medical care, therapy, inflammatory processes.*

BIBLIOGRAPHY

1. Zainullina, O. N. Sovremennye metody otsenki sostoyaniya kozhi pri atopicheskom dermatite u detey / O.N. Zainullina, Z.R. Khismatullina, D.V. Pechurov // *Allergologiya i immunologiya v pediatrii*. – 2017. – No. 4 (51). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-otsenki-sostoyaniya-kozhi-pri-atopicheskom-dermatite-u-detey> (data obrashcheniya: 31.01.2025).
2. Voronina, V. R. Osobennosti mikrobiotsenoza kozhi bolnykh atopicheskim dermatitom i terapiya ego oslozhnenii / V.R. Voronina, A.N. Pampura, E.S. Fedenko // *Rossiiskii allergologicheskii zhurnal*. – 2007. – No. 3. – S. 3–11.
3. Kamka, N. N. Osobennosti kozhnykh proyavlenii (ekzantem) pri nekotorykh medlennykh virusnykh infektsionnykh zabolevaniyakh / N.N. Kamka, L.L. Katanakhova, O.V. Kozlovskaya // *Vestnik SurGU. Meditsina*. – 2017. – No. 4 (34). – URL:... (data obrashcheniya: 04.02.2025).
4. Kubanov, A. A. Dermatovenerologiya v Rossiiskoi Federatsii: itogi 2023 g. / A.A. Kubanov, E.V. Bogdanova // *Vestnik dermatologii i venerologii*. – 2024. – Vol. 100, No. 4. – P. 9–24. – DOI: <https://doi.org/10.25208/vdv16795>
5. Shenshova, S. V. Sotsialnaya adaptatsiya pri kozhnykh zabolevaniyakh: vzglyad sovremennykh studentov / S.V. Shenshova, A.A. Gatiyatullina // *FORCIPE*. – 2022. – No. S3. – URL:... (data obrashcheniya: 31.01.2025).
6. Khismatullina, Z. R. Konfokalnaya lazernaya skaniruyushchaya mikroskopiya v diagnostike onkologicheskoi patologii: sovremennye aspekty i perspektivy primeneniya / Z.R. Khismatullina et al. // *Kreativnaya khirurgiya i onkologiya*. – 2021. – No. 1. – P. 76–84.
7. Durnova, A. O. Konfokalnaya lazernaya skaniruyushchaya mikroskopiya – primeneniye v patomorfologicheskikh issledovaniyakh / A.O. Durnova, Yu.S. Krylova, L.N. Pantelev, S.F. Musikhin // *Biotehnosfera*. – 2014. – No. 5 (35). – URL:... (data obrashcheniya: 04.02.2025).
8. Spiridonov, V. E. Diagnostika eritrodermii kozhi: sovremennyy podkhod i perspektivy / V.E. Spiridonov et al. // *Dostizheniya fundamentalnoi, klinicheskoi meditsiny i farmatsii*. – 2019. – P. 95–97.
9. Zakharov, V. P. Povisheniye informativnosti opticheskoi kogherentnoi tomografii pri diagnostirovaniy kozhnykh patologii / V.P. Zakharov, K. Larin, I.A. Bratchenko // *Vestnik SGAU*. – 2011. – No. 2. – URL:... (data obrashcheniya: 04.02.2025).
10. Bratchenko, I. A. Giperspektralnaya vizualizatsiya patologii kozhi v vidimoi oblasti / I.A. Bratchenko, M.V. Alonova, O.O. Myakinin, A.A. Moryatov, S.V. Kozlov, V.P. Zakharov // *Klinicheskaya oftalmologiya*. – 2016. – No. 2. – URL:... (data obrashcheniya: 04.02.2025).
11. Belashenkov, N. R. Mikroskop-spektrofotometr s matrichnym fotopriemnikom / N.R. Belashenkov, I.P. Gurov, A.I. Lopatin, A.V. Melnikov // *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. – 2007. – No. 43. – URL:... (data obrashcheniya: 31.01.2025).
12. COMSOL Multiphysics. Rukovodstvo polzatelya. – Stokholm: COMSOL AB, 2023. – Versiya 6.1. – 1490 s.
13. Zakharov, N. P. Optiko-elektronnye uzly elektronno-vychislitelnykh sredstv, izmeritelnykh priborov i ustroystv avtomatiki: uchebnoye posobie / N.P. Zakharov, S.P. Timoshenkov, Yu.A. Krupnov. – M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2018. – 335 s.
14. Freitas, C. J. Standards and Methods for Verification, Validation, and Uncertainty Assessments in Modeling and Simulation / C. J. Freitas // *Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification*. – 2020. – Vol. 5, No. 2. – P. 021001-1–021001-9.

Zhidkov Aleksey Vladimirovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev»,
Candidate of Technical Sciences, Department of Instrument Engineering, Metrology and Certification
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: epipro@rambler.ru

Nemov Vitaliy Pavlovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev»,
Student of the Department of Instrument Engineering, Metrology and Certification
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: VP.Nemov@yandex.ru

Podmaster'ev Konstantin Valentinovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev»,
Doctor of Technical Sciences, Department of Instrument Engineering, Metrology and Certification
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
E-mail: asms-orel@mail.ru

ТАГАЕВ А.И., КОРШУНОВА Е.Д.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОЛУСТАЦИОНАРНОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА (ППАК) МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В ИНДУСТРИИ 4.0

Аннотация. В статье представлен детальный анализ структуры полустационарного программно-аппаратного комплекса (ППАК) мониторинга состояния оборудования, используемого в современных производственных системах. Особое внимание уделено взаимодействию программной и аппаратной частей комплекса, включая сенсорные, логические и коммуникационные модули, а также их роли в обработке данных. Рассмотрены основные фреймворки и потоки данных, такие как телеметрия, уведомления и управленческие команды, которые обеспечивают выполнение ключевых функций мониторинга. Кроме того, проанализированы ограничения применения ППАК, включая вопросы точности, автономности и влияния внешней среды, что позволяет оценить применимость комплекса в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, Интернет вещей, мониторинг, полустационарные датчики, программно-аппаратный комплекс.

Эволюция современных производственных систем предъявляет всё более жёсткие требования к непрерывности работы, качеству выпускаемой продукции и сокращению времени простоя. В этих условиях особую роль имеет мониторинг ключевых параметров оборудования – от выявления вибрационных аномалий до контроля температуры, давления, расхода и других критических показателей [1]. Эффективный мониторинг позволяет предсказывать возможные сбои, своевременно выполнять техобслуживание и поддерживать стабильное функционирование производственного процесса [1].

Одним из подходов к организации мониторинговых решений является разработанный **программно-аппаратный комплекс (ПАК)**, который, в соответствии с национальными (ГОСТ Р 17359) и международными (ISO) стандартами, может реализовываться в трёх основных форматах [2]:

1. **Стационарный (постоянный), permanent:** датчики и блоки сбора данных устанавливаются на оборудовании на длительный срок, обеспечивая непрерывный сбор информации. Отличается высокой точностью, однако может быть затруднён в оперативной перестройке при смене требований.

2. **Полустационарный (смешанный), semi-permanent:** датчики могут быть установлены на объекте в течение нужного периода, но при необходимости сравнительно легко снимаются или перемещаются. Сочетает преимущества стационарного мониторинга (долгосрочность измерений) и гибкость портативных решений.

3. **Портативный, portable:** мобильные устройства, часто работающие от батареи и перемещаемые оператором от одной точки к другой.

В данной статье будет рассмотрен разработанный **полустационарный (semi-permanent) программно-аппаратный комплекс мониторинга (ППАК)**, как эффективное решение, сочетающее гибкость переустановки и достаточно высокую точность измерений. Кроме того, проанализируем, каким образом организуются информационные потоки (от сенсорного уровня до систем аналитики и принятия решений), а также зоны ответственности между компонентами ППАК. Особое внимание будет уделено вопросам взаимодействия аппаратных модулей (датчиков, хабов, шлюзов) и программных подсистем (микросервисов для сбора и предобработки данных, облачной аналитики, средств визуализации). Такой комплексный подход позволит сформировать целостное представление о том, как выстроить структуру полустационарного решения для мониторинга состояния оборудования в современных условиях цифровизации и непрерывного совершенствования производственных процессов (см. рисунок 1).

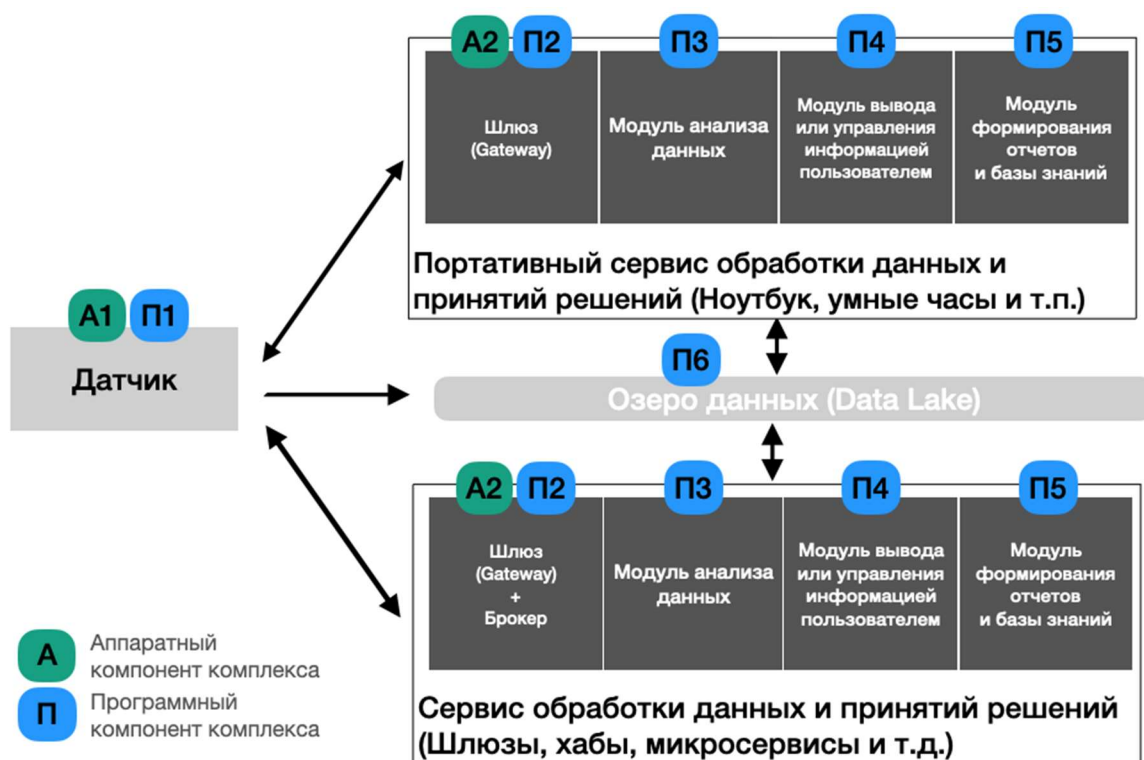


Рисунок 1 - Концептуальная схема разработанного полустационарного комплекса мониторинга состояния оборудования

На рисунке выше изображена схема полустационарного комплекса мониторинга производственных систем, основным отличием которой является совмещение двух подходов работы: стационарного и портативного. Портативные свойства добавляют гибкости в работе, а стационарные бесшовность внедрения, и некоторые упрощённые сервисы, используемые только в их среде.

Типовыми представителями на рынке данного подхода к мониторингу, являются комплексы от Bosch (Bosch xdk110) [3] и ABB (Ability™ Smart Sensor) [4] (см. рисунок 2).

Bosch xdk110 применяется как портативный набор для экспериментов, со своим уникальным программным обеспечением и инструментальным набором насадок.

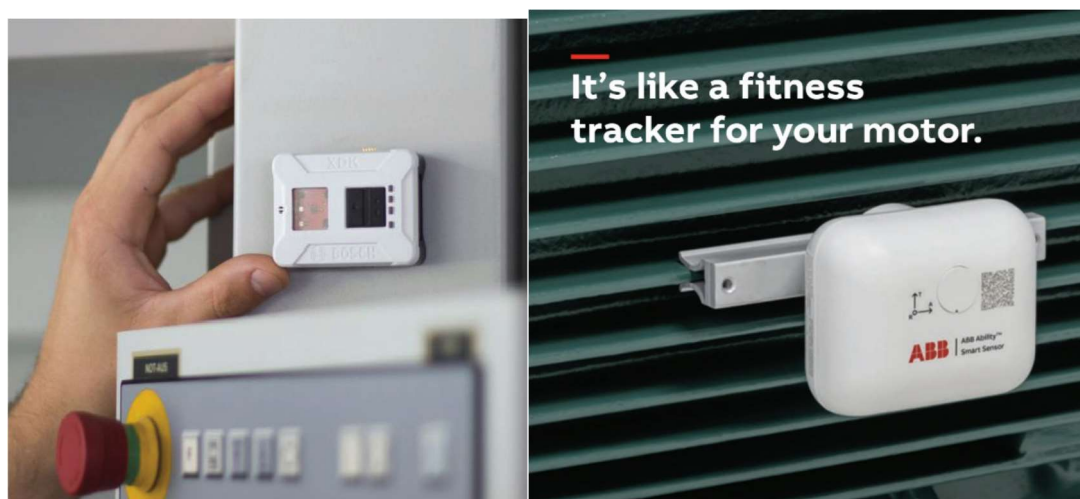


Рисунок 2 - Слева Bosch xdk110, справа ABB Ability™ Smart Sensor

Комплекс использует проприетарную аппаратную часть и программное обеспечение, что усложняет их потенциальную бесшовную интеграцию в существующие системы, также для его работы необходимо использовать только однобрендовые инструменты.

В то же время комплекс АВВ был разработан для мониторинга электродвигателей со специальным креплением к нему. Имеет менее развитую программную составляющую, которая ограничивает использование измерением параметров электродвигателей.

В связи со сложной внешнеэкономической ситуацией существует ограниченный доступ к данным видам комплексов. Следовательно, становится актуальной, разработка отечественного программно-аппаратного комплекса, который использует открытое программное обеспечение и доступен на российском рынке.

ППАК был разработан для обеспечения проведения экспериментов (начальных уровней готовности технологии) и обслуживания работы производственных систем, а также с целью импортозамещения (см. рисунок 3).

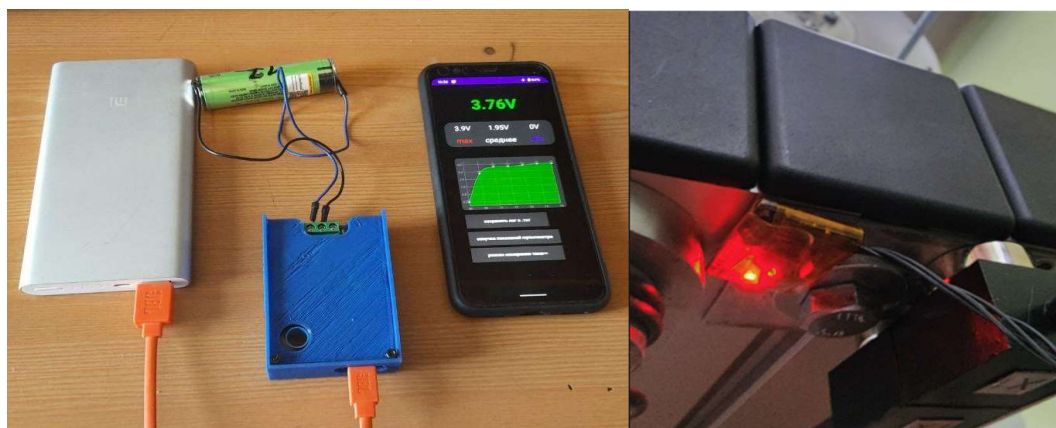


Рисунок 3 - Способы применения разрабатываемого ППАК 1-й версии (Слева: Измерение постоянного тока с помощью разработанного прототипа, справа: Измерение вибрации станины оборудования, с помощью акселерометра с магнитом)

Согласно рисунку 4, ППАК содержит программную и аппаратную часть, которые при параллельной работе дают синергетический эффект [5]. Например, датчик может прошиваться и использовать оригинальное программное обеспечение, которое позволяет эффективно работать с поступающими данными из внешнего мира, с помощью аппаратных компонентов [6]. Рассмотрим более подробно компоненты ППАК.

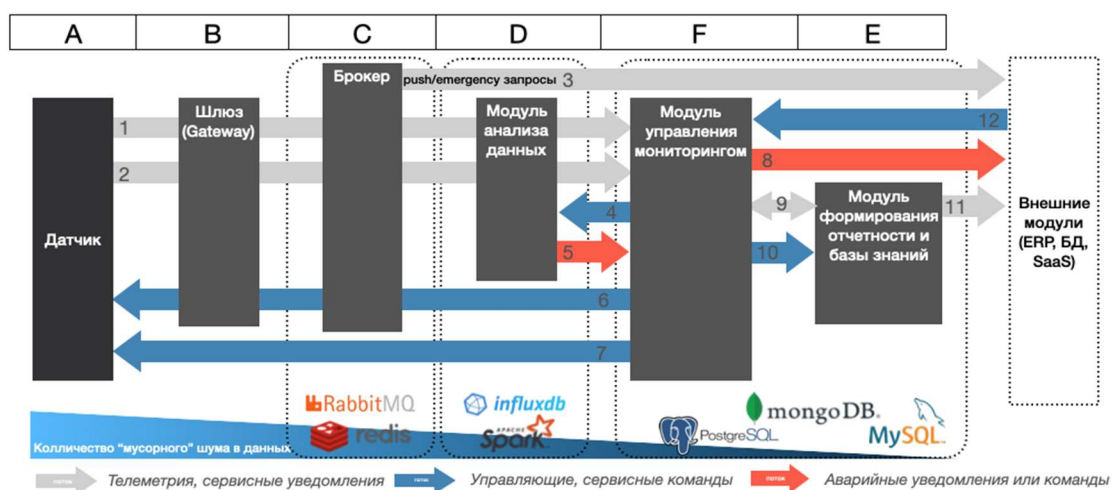


Рисунок 4 - Основные компоненты программной части ППАК и его основные потоки данных, телеметрии, управленческих команд и разного рода уведомлений

Программная часть

Как и большинство других существующих мониторинговых комплексов, разработанный ППАК задает основной принцип обработки данных, и предоставления

цифровых инструментов по его управлению. Программная часть ППАК включает в датчик, шлюз, брокер, модуль анализа данных и отчетности (см. рисунок 4) а также протоколы коммуникации между внутренними компонентами комплекса и внешними для обмена данными со сторонними сервисами и так далее.

Рассмотрим основные потоки данных и сервисных уведомлений ППАК [5-11].

Управляющие, сервисные команды могут включать в себя (см. таблицу 2) [5-11].

Таблица 1 – Без названия, просто таблица

1	Телеметрия с датчиков. <i>Состав потока:</i> «Сырые» показания датчиков (вибрация, температура, ток, давление, частота вращения, положение и т. д.). <i>Назначение:</i> Эти данные поступают, как правило, в шлюз (gateway), где могут частично обрабатываться или буферизоваться, а затем передаваться брокеру (Message Broker) и/или в облачные аналитические сервисы для дальнейшего анализа.
2	Статус работы датчиков, шлюзов и брокеров <i>Назначение:</i> Мониторинг доступности/исправности инфраструктуры, чтобы оператор или управляющая система видели, что все узлы функционируют корректно.
3	Push/Emergency запросы, уведомления во внешние системы <i>Состав потока:</i> Событийные сообщения о возникновении аварийной или критической ситуации (предельное превышение вибрации, аномальный рост температуры и т. п.), а также любые push-уведомления (SMS, e-mail, мессенджеры) [5]. <i>Назначение:</i> Срочное информирование операторов, инженеров или внешних систем управления при ненормальных условиях. Может вызывать триггер (event-based) для экстренной остановки оборудования или включения резервных систем.
9	Отправка обработанных данных на хранение или для отчетности <i>Состав потока:</i> уже агрегированные, фильтрованные или расчётные метрики (например, средние значения за интервал, данные о состоянии оборудования, диагностические показатели) после обработки в аналитическом модуле [8]. <i>Назначение:</i> Долговременное хранение в БД (Data Lake, реляционная СУБД, NoSQL)
11	Отправка обработанных данных во внешние системы <i>Состав потока:</i> Результаты анализа (диагностика, прогнозы, выводы ML-моделей), события, KPI и т. п. [8]. <i>Назначение:</i> Интеграция с системами верхнего уровня (ERP/MES), либо сторонними сервисами.

Опционально в ППАК может присутствовать возможность отправки экстренных оповещений со стороны сервисов по анализу данных (поток №5) (если наблюдается превышение заданных лимитов (thresholds) или обнаружен аномальный паттерн поведения характеристики) и со стороны управленческих модулей (поток №8), если в бизнес логику прописан определенный скрипт или конфигурация, когда необходимо оповещать об этом.

Также во время работы с данными в любой системе возникает потребность в их сохранении, буферизации (если поток данных слишком большой и гипотетический логический контроллер его не успевает обрабатывать) и дальнейшем эффективном чтении и использовании, за счет применения баз данных (см. рисунок 4). Базы данных могут быть различных видов и иметь соответственно разное предназначение, например [12]:

- в компонент С, брокера поступает большой объем первичных, малообработанных и неотфильтрованных данных, при этом хранить их в долговременной памяти не нужно (RabbitMQ).

- Компонент D, который включает в себя модуль анализа данных, уже работает с первично отфильтрованными данными и может составлять некоторые временные ряды логов, данных с датчиков в понятном для человека виде – эффективными для такого рода инструментами могут быть базы данных вида time-series: InfluxDB, Spark Apache.

• Компоненты F и E, которые управляют всеми процессами в течении мониторинга и определяют работу с базой знаний, ориентированы уже на более широкий масштаб планирования, анализа и работы мониторинга производственных систем, здесь могут объединяться данные разного рода с конечной целью их использования для увеличения эффективности работы всего ППАК. Тип данных в целом имеет универсальный вид, поэтому могут быть эффективно использованы различные виды БД, начиная от SQL-ориентированные, заканчивая документно-ориентированными.

Таблица 2 - Управляющие, сервисные команды

4	<p>Управление тактики анализа данных в комплексе</p> <p><i>Что передаётся:</i> инструкции и параметры для аналитических модулей (например, выбор алгоритмов машинного обучения, частота и глубина анализа временных рядов, пороги для детектирования аномалий).</p> <p><i>Цель:</i> динамически менять стратегию анализа (триггерный подход, непрерывный, смешанный), включая параметры предобработки, фильтрации шумов, учёт специфики оборудования.</p>
6	<p>Отправка конфигурации работы датчика, шлюза, брокера. Управление в режиме реального времени ими.</p> <p><i>Что передаётся:</i> набор команд</p> <p><i>Цель:</i> централизованно управлять всеми элементами системы (датчиками, gateway, брокером сообщений), чтобы быстро реагировать на изменения в производстве или корректировать настройки без ручной перенастройки на месте.</p>
7	<p>Отправка конфигурации и управление работы датчика, с помощью мобильного устройства, например если рядом отсутствуют шлюзы.</p> <p><i>Что передаётся:</i> локальные настройки датчика (калибровки, пороги оповещений, выбор BLE/Wi-Fi, обновление прошивки) [13].</p> <p><i>Цель:</i> обеспечить автономную настройку в ситуациях, где нет стационарного шлюза (например, при выездном обследовании, в экспериментальной установке в НИР).</p>
10	<p>Управление форматом отчетности и сохранения полезных данных в базе знаний</p> <p><i>Что передаётся:</i> настройки отчётов, шаблоны визуализации, правила отбора данных в «короткие» и «долгие» архивы, а также структурирование информации для базы знаний (графовые или документо-ориентированные форматы).</p> <p><i>Цель:</i> определять, какие метрики и агрегаты будут выводиться в регулярных отчётах, какой формат выгрузки (PDF, CSV, BI-дэшборд), правила заполнения справочников и запись новых кейсов в базу знаний [11].</p>
12	<p>Управленческие команды из внешних модулей, сервисов</p> <p><i>Что передаётся:</i> запросы и распоряжения от ERP/MES/CRM систем, либо от «умного» планировщика производства, включающие команды по повышению/понижению интенсивности мониторинга, активации предиктивных сценариев обслуживания и т. п.</p> <p><i>Цель:</i> контроль из внешних микросервисов.</p>

Аппаратная часть

Включает в себя 3 рабочих слоя, каждый из которых имеет свою программную и аппаратную часть в разной пропорции (см. рисунок 5).

Сенсорный модуль конвертирует физические параметры (вибрацию, Т, Р, хим. состав и др.) в цифровой сигнал, формируя первичную базу данных о состоянии оборудования.

Логический модуль (МК ARM, DSP) фильтрует, калибрует и нормализует поток, может выполнять экспресс-диагностику и формировать тревоги при выходе показателей за пределы, опираясь на правила или встроенный ИИ.

Коммуникационный модуль использует BLE как энергоэффективный канал короткого радиуса; при необходимости подключаются Wi-Fi, ZigBee или LoRaWAN для интеграции с MES/ERP-системами и IoT-облаком.

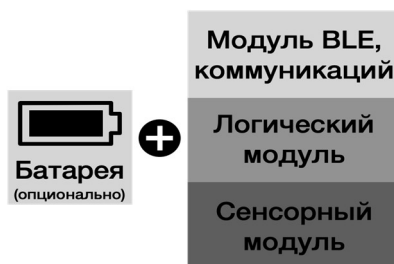


Рисунок 5 - Структура аппаратной части ППАК

Организация взаимодействия работы программной и аппаратной части.

При проектировании ППАК для промышленного мониторинга важно выстроить тесную связь между аппаратными и программными компонентами таким образом, чтобы они максимально дополняли друг друга и реагировали на события в режиме реального времени. С точки зрения архитектуры, можно выделить несколько ключевых этапов [6-8]:

Обмен данными и протоколы

Взаимодействие между аппаратной частью (датчики, микроконтроллеры, модули коммуникации) и программной инфраструктурой (сервера, базы данных, аналитические модули) строится на заранее определённых протоколах и спецификациях. Например, BLE или Wi-Fi-модуль передаёт «сырые» показания датчиков и служебные сигналы (heartbeat, оповещения) в брокер сообщений или напрямую в облако. В случае “edge” аналитики (edge computing) часть предобработки осуществляется локально (микроконтроллером), а остальная логика – на сервере или внутри облачной платформы.

Управление конфигурациями и обновления [13]

В программной части есть модули, отвечающие за конфигурацию сенсоров и логику их работы: периоды опроса, режимы энергосбережения, пороговые значения для детектирования аномалий. Эти параметры сохраняются в базе данных конфигураций (например, на шлюзе или в ERP-системе) и могут быть динамически переданы на аппаратные узлы по запросу оператора или в случае изменения производственных условий. Благодаря этому даже после развертывания на объекте датчики могут получать обновлённые прошивки (OTA) или обновлённые алгоритмы анализа без физического вмешательства.

Синхронизация в реальном времени и события

При возникновении критических изменений (пиковая вибрация, резкий скачок температуры), аппаратная часть может генерировать «событие» и немедленно отправлять его программному модулю (через брокера сообщений, REST API или прямой вызов), минуя периодические циклы опроса. Программная логика обрабатывает уведомление, обновляет текущее состояние в базе данных и может инициировать дополнительную диагностику, оповещение персонала или корректировку параметров работы датчиков.

Обработка и хранение данных

Сырые показания, собранные аппаратной частью, могут временно храниться в памяти микроконтроллера либо в кэше шлюза. По настроенным правилам они пересылаются в централизованную систему (например, TSDB – Time-Series Database или Data Lake) для дальнейшей агрегации и долгосрочного хранения. Одновременно программный аналитический блок (интегрированный в MES/ERP или облачную аналитику) формирует отчёты, дашборды, прогнозы, которые могут снова вернуть управляющие сигналы аппаратной части (например, снизить частоту опроса).

Адаптация и расширение [13]

В дальнейшем, если производственные задачи меняются, из программной части, возможно, доустановить модули машинного обучения или новые способы визуализации. Аппаратная часть при этом лишь получает дополнительную конфигурацию или загружает обновления. Такая модель позволяет легко модернизировать систему – добавлять новые датчики, менять методы анализа, не заменяя существующее оборудование.

Ограничения по использованию ППАК

В то же время существуют и ограничения на использование ППАК, основные границы его применения, где он может применяться наиболее эффективно, а где нет. Разберем основные характеристики [1]:

● **Точность.** Одной из ключевых особенностей ППАК является мобильность измерительных модулей, однако именно эта «гибкость» иногда сопровождается снижением точности по сравнению со стационарными системами. В ряде приложений (например, высокоточные метролого-диагностические задачи) погрешность, возникающая из-за временного крепления датчика или менее жёсткой фиксации, может стать критичной.

● **Автономность.** Важное преимущество полустационарных комплексов – возможность периодического или постоянного питания от аккумуляторов (если нет доступной сети). Однако время автономной работы может быть ограничено высокими требованиями к частоте опроса датчиков и передаче данных. В итоге приходится выбирать между коротким интервалом измерений и сохранением ёмкости батареи.

● **Требования к внешней среде.** В следствии того, что в ППАК датчики могут иметь аккумулятор – накладывается дополнительное условия на уровень ударных и температурных нагрузки.

Заключение

Полустационарный программно-аппаратный комплекс (ППАК) объединяет достоинства стационарных и портативных систем: датчики легко переустанавливаются, сохраняя при этом достаточную точность и непрерывность мониторинга, а использование мобильных устройств (смартфонов) позволит не только добавить гибкости в комплекс, но и увеличить интерактивность. При этом есть и ограничения по использованию – в следствии того, что измерения могут базироваться на датчиках с аккумуляторами - необходимо заранее спланировать их использование учитывая не только уровень заряда, но агрессивность внешней среды, насколько она может быть вредна батарее. Также при приеме данных с датчика посредством BLE может не хватать пропускной способности [14], для высокоточных измерений, но для отслеживания аномалий и общего мониторинга, тренда, такой точности может быть достаточно (ГОСТ Р 17359, пункт 8.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li, Z.; Fei, F.; Zhang, G. Edge-to-Cloud IIoT for Condition Monitoring in Manufacturing Systems with Ubiquitous Smart Sensors. *Sensors* 2022, 22, 5901. <https://doi.org/10.3390/s22155901>
2. ГОСТ Р 17359. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство. М., 2015. 27 с.
3. Establishing Trust in the Industrial IoT. Guide for Bosch xdk110 // xdk URL: <https://www.xdk.io/> (дата обращения: 04.04.2025).
4. ABB Ability™ Smart Sensor // ABB. URL: <https://new.abb.com/innovation/abb-ability-smart-sensor> (дата обращения: 04.04.2025).
5. Santo, Yuri, et al. "Fault detection on the edge and adaptive communication for state of alert in industrial internet of things." *Sensors* 23.7 (2023): 3544.
6. Hasselbring, Wilhelm, Maik Wojcieszak, and Schahram Dustdar. "Control flow versus data flow in distributed systems integration: Revival of flow-based programming for the industrial internet of things." *IEEE Internet Computing* 25.4 (2021): 5-12.
7. Bhardwaj, A., et al. "IIoT: Traffic Data Flow Analysis and Modeling Experiment for Smart IoT Devices. Sustainability. 2022, 14, 14645." 2022.
8. Wilhelm Hasselbring and Guido Steinacker. Microservice architectures for scalability, agility and reliability in E-Commerce. In Proceedings 2017 IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW), pages 243–246. IEEE, April 2017. doi:10.1109/ICSAW.2017.11.
9. Davide Neri, Jacopo Soldani, Olaf Zimmermann, and Antonio Brogi. Design principles, architectural smells and refactorings for microservices: a multivocal review. *SICS Software-Intensive Cyber-Physical Systems*, 35(1-2):3–15, August 2020. doi:10.1007/s00450-019-00407-8.
10. Vaclavova, A.; Strelec, P.; Horak, T.; Kebisek, M.; Tanuska, P.; Huraj, L. Proposal for an IIoT Device Solution According to Industry 4.0 Concept. *Sensors* 2022, 22, 325. <https://doi.org/10.3390/s22010325>.
11. Bhardwaj, A.; Kaushik, K.; Bharany, S.; Rehman, A.U.; Hu, Y.-C.; Eldin, E.T.; Ghamry, N.A. IIoT: Traffic Data Flow Analysis and Modeling Experiment for Smart IoT Devices. *Sustainability* 2022, 14, 14645. <https://doi.org/10.3390/su142114645>.
12. Akasiadis, C.; Pitsilis, V.; Spyropoulos, C.D. A Multi-Protocol IoT Platform Based on Open-Source Frameworks. *Sensors* 2019, 19, 4217. <https://doi.org/10.3390/s19194217>
13. Silicon Labs. BLE Specs // URL: <https://docs.silabs.com/bluetooth/latest/bluetooth-service-api/sl-firmware-update>.
14. Silicon Labs. BLE Fundamentals // URL: <https://docs.silabs.com/bluetooth/latest/bluetooth-fundamentals-system-performance/throughput>.

Тагаев Арсен Ильнурович
МГТУ СТАНКИН
аспирант Института социально-технического
менеджмента
Тел. +79778384401
E-mail: ion8@bk.ru

Коршунова Елена Дмитриевна
МГТУ СТАНКИН
профессор, д.э.н., директор Института социально-
технологического менеджмента,
Тел. +79167378194
E-mail: edkorshunova@yandex.ru

TAGAEV A.I., KORSHUNOVA E.D.

ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF A SEMI-STATIONARY HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX (HSSC) FOR MONITORING THE STATE OF PRODUCTION SYSTEMS IN INDUSTRY 4.0

Abstract. *The article presents a detailed analysis of the structure of a semi-stationary hardware and software complex (HSSC) for monitoring the condition of equipment used in modern production systems. Particular attention is paid to the interaction of the software and hardware parts of the complex, including sensor, logical and communication modules, as well as their role in data processing. The main frameworks and data flows, such as telemetry, notifications and management commands, that ensure the implementation of key monitoring functions are considered. In addition, the limitations of the HSSC application are analyzed, including issues of accuracy, autonomy and environmental influence, which allows us to assess the applicability of the complex in various operating conditions.*

Keywords: *Industry 4.0, Internet of Things, monitoring, semi-stationary sensors, software and hardware complex.*

BIBLIOGRAPHY

1. Li, Z.; Fei, F.; Zhang, G. Edge-to-Cloud IIoT for Condition Monitoring in Manufacturing Systems with Ubiquitous Smart Sensors. *Sensors* **2022**, *22*, 5901. <https://doi.org/10.3390/s22155901>
2. GOST R 17359. Condition control and machine diagnostic. General guide. M., 2015. 27 p.
3. Establishing Trust in the Industrial IoT. Guide for Bosch xdk110 // xdk URL: <https://www.xdk.io/> (дата обращения: 04.04.2025).
4. ABB Ability™ Smart Sensor // ABB. URL: <https://new.abb.com/innovation/abb-ability-smart-sensor> (дата обращения: 04.04.2025).
5. Santo, Yuri, et al. "Fault detection on the edge and adaptive communication for state of alert in industrial internet of things." *Sensors* **23.7** (2023): 3544.
6. Hasselbring, Wilhelm, Maik Wojcieszak, and Schahram Dustdar. "Control flow versus data flow in distributed systems integration: Revival of flow-based programming for the industrial internet of things." *IEEE Internet Computing* **25.4** (2021): 5-12.
7. Bhardwaj, A., et al. "IIoT: Traffic Data Flow Analysis and Modeling Experiment for Smart IoT Devices. Sustainability. 2022, *14*, 14645." 2022
8. Wilhelm Hasselbring and Guido Steinacker. Microservice architectures for scalability, agility and reliability in E-Commerce. In Proceedings 2017 IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW), pages 243–246. IEEE, April 2017. doi:10.1109/ICSAW.2017.11.
9. Davide Neri, Jacopo Soldani, Olaf Zimmermann, and Antonio Brogi. Design principles, architectural smells and refactorings for microservices: a multivocal review. *SICS Software-Intensive Cyber-Physical Systems*, 35(1-2):3–15, August 2020. doi:10.1007/s00450-019-00407-8.
10. Vaclavova, A.; Strelec, P.; Horak, T.; Kebisek, M.; Tanuska, P.; Huraj, L. Proposal for an IIoT Device Solution According to Industry 4.0 Concept. *Sensors* **2022**, *22*, 325. <https://doi.org/10.3390/s22010325>.
11. Bhardwaj, A.; Kaushik, K.; Bharany, S.; Rehman, A.U.; Hu, Y.-C.; Eldin, E.T.; Ghamry, N.A. IIoT: Traffic Data Flow Analysis and Modeling Experiment for Smart IoT Devices. *Sustainability* **2022**, *14*, 14645. <https://doi.org/10.3390/su142114645>.
12. Akasiadis, C.; Pitsilis, V.; Spyropoulos, C.D. A Multi-Protocol IoT Platform Based on Open-Source Frameworks. *Sensors* **2019**, *19*, 4217. <https://doi.org/10.3390/s19194217>.
13. Silicon Labs. BLE Specs // URL: <https://docs.silabs.com/bluetooth/latest/bluetooth-service-api/sl-firmware-update>.
14. Silicon Labs. BLE Fundamentals // URL: <https://docs.silabs.com/bluetooth/latest/bluetooth-fundamentals-system-performance/throughput>.

Tagaev Arsen Ilnurovich
MSTU STANKIN
Postgraduate student at the Institute of Socio-
Technical Management
Tel. +79778384401
E-mail: ion8@bk.ru

Korshunova Елена Дмитриевна
MSTU STANKIN
professor, Doctor of Economics, director of the
Institute of Social and Technological Management,
Tel. +79167378194
E-mail: edkorshunova@yandex.ru

ЕФРЕМОВА Е.С., СОЛДАТКИН В.В., СОЛДАТКИН В.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ФЮЗЕЛЯЖНЫМ ПРИЕМНИКОМ ПАРАМЕТРОВ НАБЕГАЮЩЕГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Аннотация. Обоснована актуальность применения на летательных аппаратах (ЛА) различного класса и назначения информационно-измерительной системы воздушных сигналов, построенной на основе вписанного в контур фюзеляжа одного интегрированного приемника параметров набегающего потока с аэродинамическим компенсатором погрешности восприятия статического давления.

Приведена методика построения моделей для определения инструментальных погрешностей измерительных каналов рассматриваемой системы при известных систематических и случайных погрешностях датчиков и преобразователей измеряемых параметров набегающего воздушного потока.

По предложенным ранее выражениям для вычисления воздушных сигналов по измеренным параметрам набегающего потока получены аналитические модели для определения инструментальных погрешностей измерения воздушных параметров движения ЛА относительно окружающей воздушной среды.

Указана причина и получены аналитические модели для расчета методических погрешностей каналов информационно-измерительной системы, обусловленных искажением статического давления невозмущенного набегающего воздушного потока при движении ЛА и обтекании фюзеляжа с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего потока.

Отмечено, что разработанные модели позволяют обоснованно проводить выбор датчиков и преобразователей параметров набегающего потока, решать задачи уменьшения инструментальных и методических погрешностей каналов рассматриваемой системы.

Ключевые слова: летательный аппарат, воздушные сигналы, информационно-измерительная система, фюзеляжный приемник набегающего потока, инструментальные и методические погрешности, модели, пути уменьшения.

Введение

Как показывает анализ, работа известных информационно-измерительных систем (ИИС) воздушных сигналов ЛА основана на восприятии, преобразовании и обработке информации о параметрах набегающего воздушного потока (НВП). Для определения параметров НВП в традиционных для самолетов и других ЛА используют установленные на фюзеляже и вынесенные в НВП приемники воздушных (полного и статического) давлений (ПВД), приемники температуры заторможенного НВП (ПТТ) и флюгерные датчики аэродинамических углов (ДАУ), регистрирующих углы направления вектора скорости НВП в месте расположения ДАУ, которые пневмопроводами и электрическими кабелями соединены с бортовым вычислителем, формирующим выходные сигналы системы воздушных сигналов (СВС) [1 – 3]. Однако при такой реализации СВС существенно усложняется конструкции, увеличивается масса и стоимость СВС, повышается заметность траектории движения ЛА в атмосфере, что ограничивает возможность применения СВС на сверхлегких самолетах, малоразмерных и дистанционно-пилотируемых ЛА. Указанные ограничения характерны и для СВС, построенных на основе вихревого [4], ионно-меточного [5], ультразвукового [6, 7] методов контроля параметров НВП. На указанных типах ЛА целесообразно использовать информационно-измерительную систему воздушных сигналов с одним интегрированным фюзеляжным приемником параметров НВП. Особенности построения и модели информативных сигналов, их обработки во встроенном вычислителе такой СВС приведены в работе [8], исследование инструментальных и методических погрешностей проводится ниже.

Методика формирования и модели инструментальных погрешностей ИИС воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником параметров НВП.

Используя подход, раскрываемый в [9], связь определяемого параметра Y_m m -го измерительного канала с контролируемыми параметрами x_1, x_2, \dots, x_n представляется в виде функции

$$Y_m = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Тогда при известных систематических инструментальных погрешностях $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ определения контролируемых параметров x_i используемых датчиков и преобразователей

систематическая инструментальная погрешность ΔY_m m -го измерительно-вычислительного канала можно определить как

$$\Delta Y_m = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n + \Delta_{\text{пр.обр.}}, \quad (2)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – функция влияния систематической инструментальной погрешности Δx_i на инструментальную погрешность ΔY_m m -го измерительного канала; $\Delta_{\text{пр.обр.}}$ – погрешность канала преобразования и обработки контролируемых параметров x_i .

Аналогично, дисперсия $\sigma_{\Delta Y_m}^2$ инструментальной погрешности ΔY_m m -го измерительного канала определяется соотношением вида

$$\sigma_{\Delta Y_m}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{\Delta x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{\Delta x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{\Delta x_n}^2 + \sigma_{\Delta_{\text{пр.обр.}}}^2, \quad (3)$$

где $\sigma_{\Delta_{\text{пр.обр.}}}^2$ – дисперсия погрешности канала преобразования, обработки параметров x_i и формирования выходного сигнала Y_m m -го измерительного канала.

Реализуя рассмотренный подход, представляя выходные сигналы измерительно-вычислительных каналов в функции варьируемых параметров:

- для канала местного аэродинамического угла α_m вида

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{\eta \Delta P_1 - \Delta P_2}{2 \Delta P_1 + \Delta P_2} \right] = f(\Delta P_1, \Delta P_2, \eta);$$

- для канала истинной воздушной скорости V_b вида

$$V_b = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| P_0 T_H}{\eta^2 \rho_0 T_0 P_H}} = f(\Delta P_1, \Delta P_2, \eta, T_H, P_H);$$

- для канала приборной скорости $V_{\text{пр}}$ вида

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{\eta^2 \rho_0}} = f(\Delta P_1, \Delta P_2, \eta);$$

- для канала числа Маха M вида

$$M = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| P_0}{\eta^2 k g R \rho_0 T_0 P_H}} = f(\Delta P_1, \Delta P_2, \eta, P_H);$$

- для канала абсолютной (барометрической) высоты в диапазоне высот от – 2000 м до 11000 м

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] = f(P_H);$$

в диапазоне высот от 11000 м до 20000 м

$$H = H_{11} + R T_{11} \ln \frac{P_{11}}{P_H} = f(P_H);$$

- для канала температуры наружного воздуха T_H на текущей высоте H вида

$$T_H = \frac{T_{\tau}}{1 + 0,2 \xi M^2} = f(T_{\tau}, M);$$

- для канала вертикальной скорости V_y

в диапазоне высот от – 2000 м до 11000 м

$$V_y = \frac{dH}{dt} = - \frac{T_0 R}{P_0 \tau R} P_H^{\tau R - 1} = f(P_H);$$

в диапазоне высот от 11000 м до 20000 м

$$V_y = \frac{dH}{dt} = -\frac{RT_{11}}{P_{11}P_H} = f(P_H) ;$$

- для канала плотности наружного воздуха ρ_H на текущей высоте H

$$\rho_H = \rho_0 \frac{T_0 P_H}{P_0 T_H} = f(P_H, T_H),$$

получены аналитические модели для определения систематических инструментальных погрешностей измерительных каналов рассматриваемой ИИС:

- для инструментальной погрешности $\Delta\alpha_{ми}$ канала местного аэродинамического угла

$$\Delta\alpha_{ми} = \frac{\eta}{4} \frac{1}{\sqrt{1-\alpha_m^2}} \left[\frac{1}{(\Delta P_1 + \Delta P_2)^2} \Delta(\Delta P_1) - \frac{\Delta P_1}{(\Delta P_1 + \Delta P_2)^2} \Delta(\Delta P_2) + \right. \\ \left. + \frac{1}{\eta} (\Delta P_1 - \Delta P_2) \Delta\eta \right] \Delta_{пр.обр.} ; \quad (4)$$

- для инструментальной погрешности $\Delta V_{ви}$ канала истинной воздушной скорости

$$\Delta V_{ви} = \frac{P_0}{2\sqrt{V_B} \rho_0 T_0} \left[\frac{T_H}{\eta^2 P_H} \Delta(\Delta P_1) + \frac{T_H}{\eta^2 P_H} \Delta(\Delta P_2) - \frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{\eta^2 P_H} \Delta T_H - \right. \\ \left. - \frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| T_H}{\eta^2 P_H^2} \Delta P_H - \frac{2|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{\eta^3 P_H} \Delta\eta \right] + \Delta_{пр.обр.} ; \quad (5)$$

- для инструментальной погрешности $\Delta V_{при}$ канала приборной скорости

$$\Delta V_{при} = \frac{1}{2\sqrt{V_{пр}} \rho_0 \eta^2} \left[\Delta(\Delta P_1) + \Delta(\Delta P_2) - \frac{2|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{\eta} \Delta\eta \right] + \Delta_{пр.обр.} ; \quad (6)$$

- для инструментальной погрешности $\Delta M_{и}$ канала числа Маха

$$\Delta M_{и} = \frac{P_0}{2\sqrt{M} \rho_0 k g R} \left[\frac{1}{\eta^2 P_H} \Delta(\Delta P_1) + \frac{1}{\eta^2 P_H} \Delta(\Delta P_2) - \right. \\ \left. - \frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{P_H^2} \Delta P_H - \frac{2|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{P_H \eta^3} \Delta\eta \right] + \Delta_{пр.обр.} ; \quad (7)$$

- для инструментальной погрешности $\Delta H_{и}$ канала барометрической высоты в диапазоне высот от -2000 м до 11000 м

$$\Delta H_{и} = -\frac{T_0 R}{P_0^{\tau R}} \frac{1}{P_H^{1-\tau R}} \Delta P_H + \Delta_{пр.обр.} ; \quad (8)$$

- в диапазоне высот от 11000 м до 20000 м

$$\Delta H_{и} = \frac{RT_{11}}{P_{11}P_H} \Delta P_H + \Delta_{пр.обр.} ; \quad (9)$$

- для инструментальной погрешности $\Delta T_{Hи}$ канала температуры наружного воздуха на текущей высоте H

$$\Delta T_{Hи} = \frac{1}{1+0,2\xi M^2} \Delta T_T - \frac{0,4\xi M}{T_H(1+0,2\xi M^2)} \Delta M_{и} + \Delta_{пр.обр.} ; \quad (10)$$

- для инструментальной погрешности $\Delta V_{yи}$ канала вертикальной скорости в диапазоне высот от -2000 м до 11000 м

$$\Delta V_{yи} = -\frac{(\tau R - 1)T_0 R}{P_0^{\tau R}} P_H^{\tau R - 2} \Delta P_H + \Delta_{пр.обр.} ; \quad (11)$$

- в диапазоне высот от 11000 м до 20000 м

$$\Delta V_{yi} = -\frac{RT_{11}}{P_{11}P_H^2} \Delta P_H + \Delta_{\text{пр.обр.}}; \quad (12)$$

• для инструментальной погрешности $\Delta \rho_{Hи}$ канала плотности воздуха на текущей высоте H

$$\Delta \rho_{Hи} = \frac{\rho_0 T_0}{P_0 T_H} \Delta P_H - \frac{T_0 P_H}{P_0 T_H^2} \Delta T_H + \Delta_{\text{пр.обр.}}, \quad (13)$$

где $\Delta P_1 = P_1 - P_H$ и $\Delta P_2 = P_2 - P_H$; P_1 , P_2 и P_H – перепады давлений и давления, воспринимаемые на обтекаемой поверхности фюзеляжа приемника; $\eta = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2$ – отношение радиуса r_0 аэродинамического компенсатора к радиусу r от центра аэродинамического компенсатора до места расположения отверстий для восприятия давлений P_1 и P_2 ;

P_0 , T_0 и ρ_0 – абсолютное давление, температура, плотность воздуха на высоте $H = 0$; k , g и R – показатель адиабаты, ускорение свободного падения и газовая постоянная воздуха; τ – температурный градиент;

P_{11} и T_{11} – абсолютные давление и температура воздуха на высоте $H_{11} = 11000$ м;

$\Delta(\Delta P_1)$ и $\Delta(\Delta P_2)$ – инструментальные погрешности датчиков перепада давлений ΔP_1 и ΔP_2 ;

ΔT_H и ΔP_H – инструментальные погрешности измерения температуры T_H наружного воздуха и статического давления P_H ;

$\Delta \eta$ – изменение параметра η из-за технологических допусков на размеры r_0 и r при изготовлении фюзеляжного приемника;

ΔT_t – инструментальная погрешность измерения температуры T_t заторможенного набегающего воздушного потока.

При необходимости, в соответствии с (3) можно получить и дисперсию случайных составляющих измерительных каналов рассматриваемой ИИС.

Полученные аналитические модели (4) – (13) позволяют обоснованно решать задачу анализа инструментальных погрешностей рассматриваемой ИИС используемой на конкретном типе ЛА.

Как показывает анализ [10], при использовании в измерительных каналах рассматриваемой системы современных отечественных датчиков перепада давлений, датчика абсолютного давления и контроля температуры наружного воздуха, каналов преобразования и обработки инструментальные погрешности каналов, информационно-измерительной системы с интегрированным фюзеляжным приемником близки к инструментальной точности каналов традиционных систем воздушных сигналов с распределенными по фюзеляжу приемниками, широко используемыми на объектах авиационной техники. Это подтверждает перспективность применения рассматриваемой ИИС на летательных аппаратах различного класса и назначения.

Причины, источники, аналитические модели и технологии уменьшения аэродинамических методических погрешностей ИИС воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником набегающего потока.

Причинами методических погрешностей измерительных каналов рассматриваемой системы воздушных сигналов, как и других СВС, является неоднозначная связь между измеряемой физической величиной и величиной, воспринимаемой датчиком первичной информации данного измерительного канала. Как правило, в измерительных каналах рассматриваемой системы реализуются косвенные методы измерения, контролируемые параметры которых могут отличаться от расчетных в условиях реальной эксплуатации.

Как показывает анализ [9, 10], источником методических погрешностей измерения воздушных сигналов, как и других СВС, носят аэродинамический характер, так как обусловлены искажением набегающего воздушного потока при движении ЛА и обтекании его фюзеляжа с интегрированным приемником. В этом случае статическое давление P_M в месте

расположения фюзеляжного приемника будет отличаться от статического давления P_H невозмущенного статического давления. Это отличие можно представить в виде [3]

$$P_m = P_H + \Delta P_a, \quad (14)$$

где ΔP_a – аэродинамическое искажение статического давления P_H невозмущенного набегающего воздушного потока, которое принимается в виде [3]

$$\Delta P_a = K_p q = K_p \frac{\rho_H V^2}{2}, \quad (15)$$

где K_p – безразмерный коэффициент искажения статического давления, воспринимаемого интегрированным фюзеляжным приемником; q – скоростной напор, без учета сжимаемости воздуха равный динамическому давлению $P_{дин} = \frac{\rho_H V^2}{2}$.

Как показывает анализ, при разработке и проведении летных испытаний вариантов бортовых приемников статического давления величина их безразмерных коэффициентов статического давления K_p при установке на фюзеляже не должны превышать регламентированного Нормами летной годности гражданских самолетов и самолетов транспортной категории [11, 12] не должны превышать 5% от скоростного напора – $K_p \leq 0,05$. С этой целью место расположения приемников, в том числе интегрированного фюзеляжного приемника параметров НВП для конкретного типа ЛА определяются при летных испытаниях в ЛИИ им. М.М. Громова с применением комплекса бортовых траекторных измерений [13]. Возможные отклонения коэффициента K_p от регламентированного значения определяются для всех характерных режимов полета ЛА и учитываются при введении поправок.

Тогда аналитические модели методических погрешностей каналов ИИС воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником получены в виде канала барометрической высоты в виде:

- для канала барометрической высоты в диапазоне высот от –2000 м до 11000 м

$$\Delta H_m = \left(\frac{T_0}{\tau} \frac{K_p \rho_H V_B^2}{2} \right)^{\tau R}; \quad (16)$$

- для канала барометрической высоты в диапазоне высот от 11000 м до 20000 м

$$\Delta H_m = -RT_{11} \left[\ln \frac{P_{11}}{P_H + K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2}} - \ln \frac{P_{11}}{P_H} \right]; \quad (17)$$

- для канала истинной воздушной скорости

$$\Delta V_{BM} = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| P_0 T_H}{\eta^2 \rho_0 T_0}} \sqrt{\frac{1}{P_H + K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2}} - \frac{1}{P_H}}; \quad (18)$$

- для канала числа Маха

$$\Delta M_m = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| P_0}{\eta^2 kg R \rho_0 T_0}} \sqrt{\frac{1}{P_H + K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2}} - \frac{1}{P_H}}; \quad (19)$$

- для канала вертикальной скорости в диапазоне высот от –2000 м до 11000 м

$$\Delta V_{ym} = -\frac{RT_0}{P_0^{\tau R}} \left[\left(P_H + K_p \frac{\rho_H V_B^2}{2} \right)^{\tau R - 1} - P_H^{\tau R - 1} \right]; \quad (20)$$

- для канала вертикальной скорости в диапазоне высот от 11000 м до 20000 м

$$\Delta V_{y_m} = -\frac{RT_{11}}{P_H} \left(\frac{1}{P_H + k_P \frac{\rho_H V_B^2}{2}} - \frac{1}{P_H} \right); \quad (21)$$

- для канала плотности воздуха

$$\Delta \rho_{H_m} = \frac{\rho_0 T_0}{P_0 T_H} \frac{K_P \rho_H V_B^2}{2}. \quad (22)$$

Как показали исследования, методические аэродинамические погрешности каналов местных аэродинамических углов атаки и скольжения, а также канала температуры наружного воздуха – отсутствуют. Методическая аэродинамическая погрешность канала приборной скорости близка к методической аэродинамической погрешности канала истинной воздушной скорости.

При необходимости, уменьшение методических аэродинамических погрешностей каналов рассматриваемой ИИС возможно путем введения поправок, определяемых при летных испытаниях системы на конкретном типе ЛА для конкретного места установки интегрированного фюзеляжного приемника. Другими направлениями уменьшения методических аэродинамических погрешностей каналов системы являются реализация структурных методов повышения статической точности и принципов комплексирования [14, 15].

Заключение

В соответствии с общим подходом по полученным ранее моделям определения выходных сигналов получены аналитические модели инструментальных погрешностей параметров движения летательного аппарата относительно окружающей воздушной среды системы с интегрированным фюзеляжным приемником набегающего воздушного потока.

Показано, что методические погрешности измерения воздушных сигналов рассматриваемой ИИС носят аэродинамический характер и обусловлены отличием местного статического давления, воспринимаемого фюзеляжным приемником в месте установки на фюзеляже, от невозмущенного статического давления НВП при обтекании фюзеляжа с приемником движущимся летательным аппаратом.

Полученные результаты позволяют решать задачи анализа и синтеза измерительных каналов ИИС воздушных сигналов с интегрированным фюзеляжным приемником по критерию инструментальной и методической погрешности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремова Е.С. Методические погрешности электронного датчика параметров вектора воздушной скорости летательного аппарата / Е.С. Ефремова, Б.И. Мифтахов, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Приборостроение. – 2023. – Том 66. – № 6. – С. 457-463.
2. Мифтахов Б.И. Модели и анализ методических погрешностей панорамного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с неподвижным приемником и ультразвуковыми каналами / Б.И. Мифтахов, В.М. Солдаткин, Е.С. Ефремова, А.В. Никитин, В.В. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2023. – № 1. – С. 110-114.
3. Ключев Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов / Г.И. Ключев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов; под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ. – 2005. – 509с.
4. Ефремова Е.С. Методические и инструментальные погрешности вихревой системы контроля высотно-скоростных параметров полета / Е.С. Ефремова, Р.В. Солдаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 2(322). – С. 126-135.
5. Крылов Д.Л. Построение и оценка точности системы воздушных сигналов самолета с невыступающим приемником потока / Д.Л. Крылов, В.М. Солдаткин, Е.С. Солдаткина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 3(11). – С. 128-136.
6. Солдаткин В.М. Теоретические основы построения электронной системы пространственного измерения воздушных сигналов летательного аппарата с одним неподвижным приемником набегающего воздушного потока / В.М. Солдаткин, Б.И. Мифтахов, В.В. Солдаткин, Е.С. Ефремова, А.В. Никитин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Том 23. – № 7. – С. 384-390.
7. Ефремова Е.С. Трехкомпонентный датчик вектора воздушной скорости летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока / Е.С. Ефремова, Б.И. Мифтахов, В.С. Солдаткин // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2023. – Т. 79. – № 1. – С. 101-107.
8. Солдаткин В.М. Информационно-измерительная система воздушных сигналов летательного аппарата с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока / В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Е.С. Ефремова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и

технологии. – 2024. – № 5(367). – С. 52-59.

9. Браславский Д.А. Точность измерительных устройств / Д.А. Браславский, В.В. Петров. – М.: Машиностроение. – 1976. – 312с.

10. Системотехническое проектирование измерительно-вычислительных систем: Учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию / Под. ред. профессора В.М. Солдаткина. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2011. – 150с.

11. Нормы летной годности гражданских самолетов. НЛГС. М.: ЦАГИ. – 1985. – 470с.

12. Авиационные правила 4.25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. – М.: Издание Международного авиационного комитета. – 1994. – 321с.

13. Харин Е.Г. Технология летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений / Е.Г. Харин, И.А. Копылов. – М.: МАИ-ПРИНТ. – 2012. – 360с.

14. Иванов Ю.П. Комплексование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов / Ю.П. Иванов, А.Н. Синяков, И.В. Филатов. – Л.: Машиностроение. – 1984. – 208с.

15. Солдаткин В.В. Построение и методы исследования информационно-измерительных систем: Учебное пособие / В.В. Солдаткин; под ред. В.М. Солдаткина. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2008. – 198с.

Ефремова Елена Сергеевна

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,
Доцент кафедры электронного приборостроения и
менеджмента качества
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10
тел. 8(843)231-03-60
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

Солдаткин Вячеслав Владимирович

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,
Профессор кафедры электронного приборостроения
и менеджмента качества
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10
тел. 8(843)231-03-60
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Солдаткин Владимир Михайлович

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,
Профессор кафедры электронного приборостроения
и менеджмента качества
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10
тел. 8(843)231-03-60
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

EFREMOVA E.S., SOLDATKIN V.V., SOLDATKIN V.M.

INVESTIGATION OF ERRORS IN THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF AIR SIGNALS WITH AN INTEGRATED FUSELAGE RECEIVER OF INCOMING AIRFLOW PARAMETERS

Abstract. The relevance of using an air data information and measurement system on aircraft of various classes and purposes, built on the basis of one integrated receiver of incident air flow parameters with an aerodynamic compensator for the error in sensing the static pressure, inscribed in the fuselage contour, is substantiated.

A methodology for constructing models for determining the instrumental errors of the measuring channels of the system under consideration is presented with known systematic and random errors of the sensors and transducers of the measured parameters of the incident air flow.

According to the previously proposed expressions for calculating air signals based on the measured parameters of the incident air flow, analytical models are obtained for determining the instrumental errors in measuring the air parameters of the aircraft movement relative to the surrounding air environment.

The cause is indicated and analytical models are obtained for calculating the methodological errors of the channels of the air data information and measurement system caused by the distortion of the static pressure of the unperturbed incident air flow during the aircraft movement and flow around the fuselage with an integrated fuselage receiver of incident air flow parameters. It is noted that the developed models allow for a reasonable selection of sensors and converters for incident flow parameters, and to solve problems of reducing instrumental and methodological errors in the channels of the system under consideration.

Keywords: aircraft, air signals, information and measuring system, fuselage incident flow receiver, instrumental and methodological errors, models, ways of reduction.

BIBLIOGRAPHY

1. Efremova E.S. Metodicheskiye pogreshnosti elektronnoy datchiki parametrov vektora vozduшной скорости летательного аппарата / E.S. Efremova, B.I. Miftakhov, V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin // Izvestiya vuzov.

Priborostroyeniye. – 2023. – Tom 66. – № 6. – S. 457-463.

2. Miftchachov B.I. Modeli i analiz metodicheskikh pogrechnostey panoramnoy datchika aerodinamicheskogo ugla i vozduшной скорости s nepodviznim priemnikom i ultrazvukovymi kanalami / B.I. Miftchachov, V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, E.S. Efremova, A.V. Nikitin // Izvestia vyzov. Avionnaya tekhnika. – 2023. – № 1. – S. 110-114.

3. Klyuyev G.I. Izmeriteli aerodinamicheskikh parametrov letatelnykh apparatov / G.I. Klyuyev, N.N. Makarov, V.M. Soldatkin, I.P. Yefimov; pod red. V.A. Mishina. – Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU. – 2005. – 509s

4. Efremova E.S. Metodicheskiye i instrumentalnyye pogreshnosti vikhreвой системы контроля высотno-skorostnykh parametrov poleta / E.S. Efremova, R.V. Soldatkin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2017. – № 2(322). – S. 126-135.

5. Krylov D.L. Postroyeniye i otsenka tochnosti системы воздушных сигналов самолета с невystupayushchim priemnikom potoka / D.L. Krylov, V.M. Soldatkin, E.S. Soldatkina // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – № 3(11). – S. 128-136.

6. Soldatkin V.M. Teoreticheskiye osnovy postroyeniya elektronnoy системы пространственного измерения воздушных сигналов летательного аппарата с одним неподвижным приемником набегayushchego воздушного потока / V.M. Soldatkin, B.I. Miftakhov, V.V. Soldatkin, E.S. Efremova, A.V. Nikitin // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. – 2022. – Tom 23. – № 7. – S. 384-390.

7. Efremova E.S. Trekhkomponentnyy datchik vektora воздушной скорости летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегayushchego воздушного потока / E.S. Efremova, B.I. Miftakhov, V.S. Soldatkin // Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva. – 2023. – T. 79. – № 1. – S. 101-107.

8. Soldatkin V.M. Informatsionno-izmeritelnaya sistema воздушных сигналов летательного аппарата с интегрированным фюзеляжным приемником параметров набегayushchego воздушного потока / V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, E.S. Efremova // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2024. – № 5(367). – S. 52-59.

9. Braslavskiy D.A. Tochnost izmeritelnykh ustroystv / D.A. Braslavskiy, V.V. Petrov. – M.: Mashinostroyeniye. – 1976. – 312s.

10. Sistemotekhnicheskoye proyektirovaniye izmeritelno-vychislitelnykh sistem: Uchebnoye posobiye k kursovomu i diplomnomu proyektirovaniyu / Pod. red. professora V.M. Soldatkina. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta. – 2011. – 150s.

11. Normy letnoy godnosti grazhdanskikh samoletov. NLGS. M.: TSAGI. – 1985. – 470s.

12. Aviatsionnyye pravila 4.25. Normy letnoy godnosti samoletov transportnoy kategorii. – M.: Izdaniye Mezhdunarodnogo aviatsionnogo komiteta. – 1994. – 321s.

13. Kharin Ye.G. Tekhnologiya letnykh ispytaniy bortovogo oborudovaniya letatelnykh apparatov s primeneniye kompleksa bortovykh trayektornykh izmereniy / Ye.G. Kharin, I.A. Kopylov. – M.: MAI-PRINT. – 2012. – 360c.

14. Ivanov YU.P. Kompleksirovaniye informatsionno-izmeritelnykh ustroystv letatelnykh apparatov / YU.P. Ivanov, A.N. Sinyakov, I.V. Filatov. – L.: Mashinostroyeniye. – 1984. – 208s.

15. Soldatkin V.V. Postroyeniye i metody issledovaniya informatsionno-izmeritelnykh sistem: Uchebnoye posobiye / V.V. Soldatkin; pod red. V.M. Soldatkina. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta. – 2008. – 198s.

Efremova Elena Sergeevna

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan,
Associate Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management
420111, Kazan, K.Marksa str,10
Ph. 8(843)231-03-60
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan,
Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management
420111, Kazan, K.Marksa str,10
Ph. 8(843)231-03-60
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Soldatkin Vladimir Mikhailovich

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan,
Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management
420111, Kazan, K.Marksa str,10
Ph. 8(843)231-03-60
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

© Ефремова Е.С., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М., 2025

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 65.011.56:658.51:658.512.4:658.512.2

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-371-3-153-159

МАРТЫНЕЦ Е.Р., КОРНИЕНКО А.В., ЛЕВЕНЦОВ В.А.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ В СООТВЕТСТВИИ С ПРОЦЕССНОЙ МОДЕЛЬЮ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Аннотация. Современные промышленные предприятия вынуждены проводить множество дорогостоящих итераций в процессе проектирования, разработки и испытаний продукции. В связи с этим возникает необходимость в более эффективных инструментах и методологических подходах, применяемых на данных стадиях. Цифровой двойник изделия выступает таким инструментом – интегратором и драйвером передовых цифровых и производственных технологий при создании высокотехнологичной продукции. Внедрение цифровых двойников в промышленность – это логическое продолжение развития, эволюции методов компьютерного моделирования и цифрового инжиниринга. Использование цифровых двойников позволяет учитывать требования заказчиков и потребителей, ускорить вывод новых продуктов на рынок, а также минимизировать затраты и длительность разработки новой продукции. В работе предложен подход к технической подготовке производства, основанный на создании цифрового двойника изделия. Проведено детальное сопоставление традиционного и современного подходов к организации технической подготовки производства. Предложена процессная модель традиционного и современного подходов, а также математическая модель длительности процесса разработки. Реализация предложенного подхода на отечественных предприятиях повысит их конкурентоспособность, обеспечит эффективное выполнение программ по импортозамещению и достижению технологического лидерства.

Ключевые слова: Организация производства, техническая подготовка, конструкторско-технологическая подготовка, технология цифровых двойников, процессная модель, математическая модель.

Введение

Техническая подготовка производства является ключевым этапом создания наукоемкой конкурентоспособной продукции, что определяет необходимость внедрения в процесс разработки новых инструментов, направленных на повышение эффективности производства в существующих экономических и геополитических условиях [1–2]. Цель данного исследования – выявление потенциала повышения эффективности освоения новой продукции посредством внедрения технологии цифровых двойников.

К задачам исследования можно отнести анализ подходов к проведению технической подготовки производства в соответствии с процессным подходом; формирование процессной модели проведения технической подготовки производства (с фокусировкой на конструкторской и технологической подготовке), отличающейся внедрением технологии разработки цифрового двойника; сопоставление и разработку сравнительной модели описанных подходов к организации технической подготовки производства.

Основная часть

Техническая подготовка производства – один из ключевых этапов жизненного цикла изделия, поскольку именно он определяет успешность разработки и выпуска новой высокотехнологичной продукции [1–2]. Техническая подготовка объединяет комплекс взаимосвязанных мероприятий, в числе которых проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, разработка комплекта конструкторской и технологической документации в соответствии с серией стандартов ЕСКД и ЕСТД, разработка методик и регламентов обслуживания и эксплуатации готового изделия, то есть формирование эксплуатационных документов в соответствии с ГОСТ Р 2.601–2019.

Комплексный характер технической подготовки производства также определяется влиянием на все последующие стадии жизненного цикла изделия, стоимость и длительность разработки изделия, а также уровень качества производимой продукции и степень удовлетворения требованиям заказчика.

В проведенном авторами исследовании, результаты которого представлены в материалах [1–2], выполнено сопоставление ключевых процессов технической подготовки производства при традиционном и современном подходах и на основе анализа сформирована

сравнительная модель. Выявлено, что время, затрачиваемое на стадию разработки изделия, при современном подходе значительно сокращается в сравнении с традиционным подходом, что обозначено зеленой и красной линией соответственно. Показатель сокращения длительности может служить одним из наиболее значимых эффектов, достигаемых при внедрении технологии цифровых двойников, что объясняется сокращением количества проводимых натурных испытаний и ростом числа цифровых испытаний.

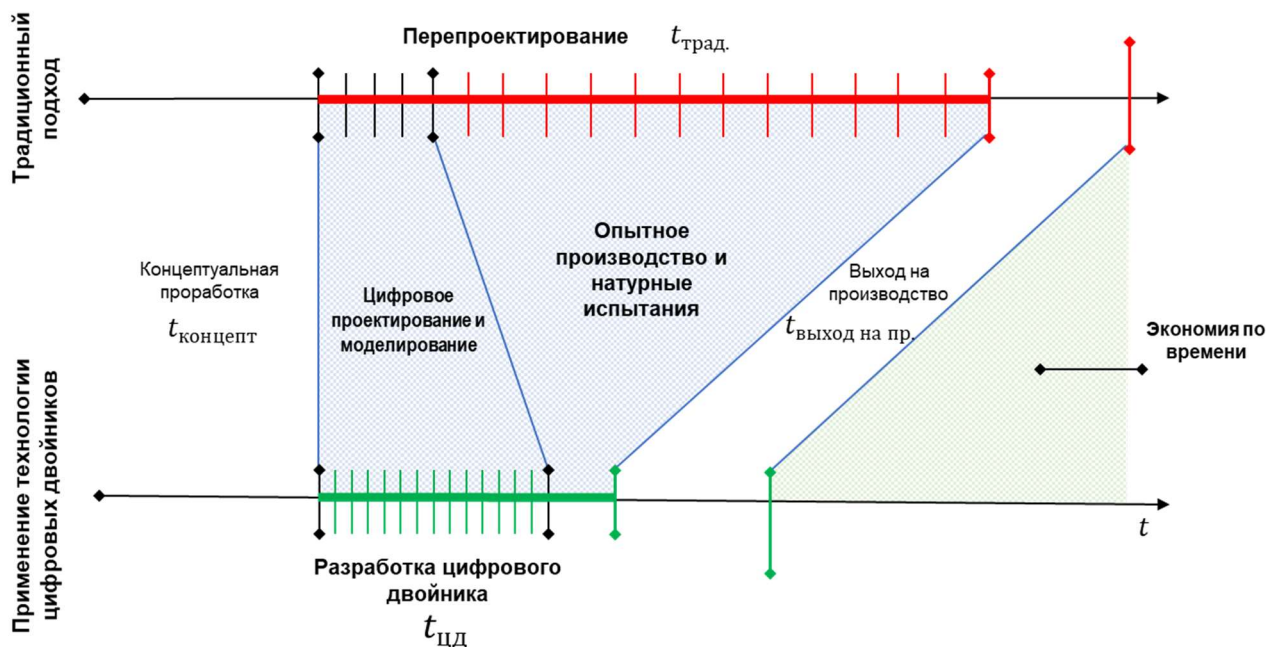


Рисунок 1 - Сравнительная модель традиционного и современного подходов к организации технической подготовки производства (Источник: разработано авторами [1])

Цифровой двойник изделия также позволяет моделировать технологические, производственные, физико-механические процессы промышленного предприятия, что способствует минимизации количества ошибок, связанных с обозначенными процессами, сокращения числа возникающих дефектов, организации оптимальной системы технологической подготовки производства [1–2]. Таким образом, на стадии производства с точки зрения управления качеством преимущества цифрового проектирования и моделирования могут обеспечить совершенствование производственных процессов.

Кроме того, применение технологии цифрового двойника позволяет обеспечить выполнение всех предъявляемых к изделию технических и тактико-технических требований, а также улучшение показателей проектируемого изделия, например, показателей технологичности, надежности, долговечности, ремонтпригодности [3] и т.п., что напрямую определяет остаточный ресурс изделия в процессе эксплуатации и качество изделия. При этом возможно формирование обратных связей между физическим и цифровым двойниками, что позволяет прогнозировать возможный выход изделия из строя и определять необходимость проведения технического обслуживания или ремонта. Таким образом, технология цифровых двойников на стадии эксплуатации может потенциально увеличить срок службы эксплуатируемого изделия и тем самым обеспечить управление и улучшение качества в соответствии с системой менеджмента качества.

Соответственно, в условиях расширения масштабов производства, стремления к экономии ресурсов при выпуске продукции, усложнения производимой продукции и повышения технологичности процессов производства возникает необходимость внедрения современных технологий, в том числе технологии цифровых двойников, которая позволяет учесть множество требований к изделию, параметрам процессов и проч., в том числе за счет балансировки матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений [1–2; 4–7]. При этом применение данной технологии обеспечит управление качеством на каждой стадии жизненного цикла изделия и потенциальное улучшение качества разрабатываемой, производимой и эксплуатируемой продукции за счет последовательного улучшения характеристик изделий.

Так, в Передовой инженерной школе СПбПУ «Цифровой инжиниринг» применяется подход к разработке цифровых двойников изделий, заложенный в основу национального стандарта ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [8]. Результаты деятельности ПИШ СПбПУ «Цифровой инжиниринг» в части выполнения проектов по разработке цифровых двойников и проведению цифровых (виртуальных) испытаний на цифровой платформе CML-Bench® представлены в публикации [9], что также демонстрирует эффективность подхода к разработке цифровых двойников, постепенное формирование Digital Brainware, снижение числа натурных испытаний при реализации проектов по созданию высокотехнологичных наукоемких изделий за счет проведения цифровых (виртуальных) испытаний. Так, в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 возможно снижение объемов испытаний за счет проведения достаточного количества цифровых (виртуальных) испытаний [8].

Представленная в работе сравнительная модель традиционного и современного подходов к организации технической подготовки производства [1–2] может быть описана в математическом виде в рамках двух моделей – при традиционном подходе и при современном подходе соответственно. Целевая функция современного подхода заключается в минимизации времени на разработку высокотехнологичного изделия.

Математическая модель длительности жизненного цикла изделия при традиционном подходе к организации технической подготовки производства может быть представлена следующим образом (1–2):

$$t_{\text{ТПП}} = t_{\text{концепт}} + t_{\text{трад.}} + t_{\text{выход на пр.}} + t_{\text{производство}} + t_{\text{эксплуатация}} \quad (1)$$

$$t_{\text{трад.}} = X(t_{1\text{трад.}} + t_{2\text{трад.}} + t_{3\text{трад.}} + t_{4\text{трад.}}) \quad (2)$$

где $t_{\text{ТПП}}$ – длительность жизненного цикла изделия при традиционном подходе к организации технической подготовки производства;

$t_{\text{концепт}}$ – длительность этапов концептуальной проработки изделия на стадии разработки;

$t_{\text{выход на пр.}}$ – длительность этапов, связанных с выходом изделия на стадию производства;

$t_{\text{производство}}$ – длительность стадии производства изделия;

$t_{\text{эксплуатация}}$ – длительность стадии эксплуатации изделия;

$t_{\text{трад.}}$ – длительность этапов, связанных с проектированием, производством и испытаниями опытных образцов, при традиционном подходе к организации технической подготовки производства;

X – количество итераций, связанных с проектированием, производством и испытаниями опытных образцов, при традиционном подходе к организации технической подготовки производства;

$t_{1\text{трад.}}...t_{4\text{трад.}}$ – длительность этапов, относящихся к проектированию, производству и испытаниям опытных образцов, при традиционном подходе к организации технической подготовки производства в соответствии с процессной моделью [1–2].

В рамках совершенствования процессов организации технической подготовки производства возможно применение математической модели длительности жизненного цикла изделия при современном подходе к организации технической подготовки производства, то есть с фокусировкой на применении технологии цифровых двойников (3–4):

$$t_{\text{ТППЦД}} = t_{\text{концепт}} + t_{\text{цд}} + t_{\text{выход на пр.}} + t_{\text{производство}} + t_{\text{эксплуатация}} \quad (3)$$

$$t_{\text{цд}} = M_{\text{sim}}(t_{1\text{цд}} + t_{2\text{цд}} + t_{3\text{цд}} + \dots + t_{7\text{цд}}) + M_{\text{test}}(t_{8\text{цд}} + t_{9\text{цд}}) \rightarrow \min \quad (4)$$

где $t_{\text{ТППЦД}}$ – длительность жизненного цикла изделия при современном подходе к организации технической подготовки производства;

$t_{\text{цд}}$ – длительность этапов, связанных с разработкой цифрового двойника изделия, проектированием, производством и испытаниями опытных образцов, при современном подходе к организации технической подготовки производства;

M_{sim} – количество итераций, связанных с разработкой моделей и проведением цифровых испытаний изделия при современном подходе к организации технической подготовки производства;

$t_{1\text{цд}}...t_{7\text{цд}}$ – длительность этапов, относящихся к разработке моделей и проведению цифровых испытаний изделия при современном подходе к организации технической подготовки производства в соответствии с процессной моделью [1–2];

$t_{8\text{ид}} \dots t_{9\text{ид}}$ – длительность этапов, относящихся к производству и испытаниям опытных образцов при современном подходе к организации технической подготовки производства в соответствии с процессной моделью [1–2];

M_{test} – количество итераций, связанных с производством и испытаниями опытных образцов при современном подходе к организации технической подготовки производства.

В рамках данной работы $t_{\text{концепт}}$, $t_{\text{выход_на_пр.}}$, $t_{\text{производство}}$, $t_{\text{эксплуатация}}$ приняты равными для традиционного и современного подходов к организации технической подготовки производства.

Кроме того, в качестве допущений приведенные этапы длительности рассчитаны как последовательные (линейные), а не параллельные или перекрывающиеся процессы; каждый цикл моделирования расценивается как усредненный и не зависящий от сложности проводимых испытаний и длительности анализа результатов; целевая функция стремления к минимальному значению не подразумевает уменьшение всей длительности жизненного цикла, а подразумевает воздействие на количество итераций по проведению испытаний;

Важно отметить, что длительность отдельных этапов принимается как фактические усредненные значения в соответствии с практикой применения технологии цифровых двойников при разработке изделий, в связи с чем в математической модели приведены показатели M_{sim} и M_{test} , являющиеся уникальными для каждого разрабатываемого изделия и на которые возможно оказать воздействие в целях достижения целевой функции.

Кроме того, к целевым функциям технологии разработки изделия можно отнести снижение себестоимости разработки изделия (5) [10].

Как отмечает ряд авторов, внедрение передовых цифровых и производственных технологий на этап технической подготовки производства не только обеспечивает снижение временных и финансовых затрат, но также формирует эффективную организационно-техническую систему, в рамках которой возможно создание высококонкурентной продукции машиностроения [11–23].

Заключение

Перед современным производством стоит масштабная задача минимизировать затрачиваемые на разработку и производство изделий ресурсы. В связи с этим возникает необходимость грамотного подхода к организации производственных процессов предприятия, что позволит повысить эффективность производственной деятельности и улучшить взаимодействие участников процесса разработки и изготовления продукции. Устойчивое функционирование современного производства достигается путем внедрения цифровых производственных технологий в ключевые процессы предприятия, в том числе в процессы организации технической подготовки производства.

Зачастую промышленные предприятия обращаются к традиционным методам организации производства, что приводит к многократному увеличению числа дорогостоящих испытаний, прежде чем получить конструкцию изделия, соответствующую требованиям, в том числе в разрезе качества и технологичности, а также требованиям в части длительности и стоимости разработки [1–2].

Для повышения эффективности производственных процессов предлагается подход к организации технической подготовки, основанный на применении технологии цифровых двойников. Применение цифровых двойников при проектировании изделий позволяет улучшить характеристики продукции, обеспечить соответствие всем заявленным требованиям и повысить результативность цифровых (виртуальных) испытаний изделия [5].

С прикладной точки зрения актуальность решения поставленной в исследовании задачи соответствует необходимости повышения уровня технологической оснащенности предприятий. С научно-теоретической точки зрения актуальность решения поставленной в исследовании задачи соответствует необходимости разработки новых научно-методологических принципов теории организации производственных систем.

Реализация предложенного подхода на отечественных предприятиях повысит их конкурентоспособность, обеспечит эффективное выполнение программ по импортозамещению и достижению технологического лидерства [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынец Е.Р. Процессная модель технической подготовки производства с фокусировкой на технологии цифровых двойников / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Управление качеством

продукции на основе передовых производственных технологий: Сборник тезисов докладов V Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии». – 2023. – С. 38–44.

2. Мартынец Е.Р. Процессная модель технической подготовки производства с фокусировкой на технологии цифровых двойников / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2024. – № 1. – С. 72–78.

3. Мартынец Е.Р. Факторы повышения качества наукоемкой продукции с применением передовых производственных технологий / Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: сборник тезисов докладов IV Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии». – 2023. – С. 12–17.

4. Корниенко А.В. Математическая модель уравнивания матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений при использовании технологии «цифровых двойников» на наукоемких производствах / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2021. – С. 63–69.

5. Мартынец Е.Р. Универсальная матрица требований, целевых показателей и ресурсных ограничений при проектировании наукоемкого производства / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2022. – С. 111–119.

6. Корниенко А.В. Совершенствование наукоемкого производства с использованием системы комплексных технологических решений / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2022. – С. 22–29.

7. Мартынец Е.Р. Система комплексных технологических решений с применением цифровых двойников производства / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Горизонты экономики. – 2022. – № 6 (72). – С. 68–74.

8. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 16 с.

9. Боровков А.И. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 2 / А.И. Боровков, В.В. Бураков // САПР и графика. – 2023. – № 9. – С. 54–64.

10. Мартынец Е.Р. Разработка наукоемкой продукции с применением технологии цифровых двойников / Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Устойчивое развитие цифровой экономики, промышленности и инновационных систем. – 2020. – С. 631–634.

11. Селиванов С.Г. Стратегическое планирование научно-технологической и технической подготовки авиадвигателестроительного производства в условиях цифровизации АСНИ и АСТПП / С.Г. Селиванов, А.Ф. Шайхулова, О.А. Гаврилова // Инновации. – 2020. – № 12 (266). – С. 48–54.

12. Соколов В.П. Моделирование технической подготовки производства / В.П. Соколов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2019. – № 2 (49). – С. 47–51.

13. Бурдо Г.Б. Повышение эффективности технической подготовки производства в многономенклатурном машиностроении / Г.Б. Бурдо // Вестник машиностроения. – 2018. – № 8. – С. 78–86.

14. Болдырев А.А. Техническая подготовка машиностроительного производства / А.А. Болдырев, А.И. Болдырев // Современные технологии производства в машиностроении. – 2017. – № 11. – С. 130–134.

15. Левштанова Ю.Ю. Сетевая модель комплекса работ по технической подготовке производства нового изделия как способ повышения качества / Ю.Ю. Левштанова, И.И. Хафизов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2017. – Т. 79. – № 2 (72). – С. 372–379.

16. Кульга К.С. Автоматизация технической подготовки и управления по заказным машиностроительным производством / К.С. Кульга // СТИН. – 2016. – № 3. – С. 2–7.

17. Дмитриевский Б.С. Модель технической подготовки производства в машиностроении / Б.С. Дмитриевский, А.Е. Филина, И.О. Савцова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21. – № 1. – С. 174–184.

18. Горбунов И.В. Использование САЕ-систем для технической и технологической подготовки производства / И.В. Горбунов // Техника и технология: новые перспективы развития. – 2014. – № XV. – С. 58–60.

19. Дмитриевский Б.С. Моделирование технической подготовки производства в мелкосерийной инновационно-производственной системе / Б.С. Дмитриевский, И.О. Савцова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2013. – № 2 (46). – С. 54–59.

20. Кульга К.С. Методология создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления авиационным производством / К.С. Кульга // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 1–27.

21. Ширялкин А.Ф. Об одном аспекте повышения эффективности технической подготовки производства / А.Ф. Ширялкин, В.П. Махитко, С.А. Кобелев // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2010. – № 3 (51). – С. 70–74.

22. Деев К.А. Бизнес-процесс технической подготовки автоматизированного производства (проблемные зоны) / К.А. Деев // Контроллинг. – 2010. – № 35. – С. 62–69.

23. Бакановская Л.Н. Компьютерные технологии при решении задач технической подготовки производства / Л.Н. Бакановская, Н.С. Мокеева // Дизайн. Материалы. Технология. – 2010. – № 2 (13). – С. 90–93.

Мартынец Екатерина Романовна

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург
Ведущий специалист отдела технологического и промышленного форсайта Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг», аспирант Института передовых производственных технологий
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б
E-mail: katya_martinets@inbox.ru

Корниенко Александр Владимирович

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург
Инженер лаборатории «Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования», аспирант Института передовых производственных технологий
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б
E-mail: kornienkoav1997@mail.ru

Левенцов Валерий Александрович

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург
К.э.н., доцент, директор Института передовых производственных технологий
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б
E-mail: vlevenctsov@spbstu.ru

MARTYNETS E.R., KORNIENKO A.V., LEVENTSOV V.A.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE DURATION
OF THE DEVELOPMENT PROCESS IN ACCORDANCE
WITH THE PROCESS MODEL OF TECHNICAL PRE-PRODUCTION
USING DIGITAL TWIN TECHNOLOGY**

Abstract. *Modern industrial enterprises are forced to carry out many expensive iterations in the process of product design, development and testing. In this regard, there is a need for more effective tools and methodological approaches used at these stages. The digital twin of the product acts as such an integrator tool and driver of advanced digital and manufacturing technologies in the creation of high-tech products. The introduction of digital twins into industry is a logical continuation of the development and evolution of computer modeling and digital engineering methods. The use of digital twins allows us to take into account the requirements of customers and consumers, accelerate the launch of new products to the market, and minimize the cost and duration of new product development. The paper proposes an approach to the technical preparation of manufacturing based on the creation of a digital twin of the product. A detailed comparison of traditional and modern approaches to the organization of technical preparation of manufacturing has been carried out. A process model of traditional and modern approaches is proposed, as well as a mathematical model of the duration of the development process. The implementation of the proposed approach at domestic enterprises will increase their competitiveness, ensure effective implementation of import substitution programs and achieve technological leadership.*

Keywords: *Organization of manufacturing, product design and engineering, design and technological preparation, digital twin technology, process model, mathematical model.*

BIBLIOGRAPHY

1. Martynets E.R. Process model of technical production preparation with a focus on digital twin technology / E.R. Martynets, A.V. Kornienko, V.A. Leventsov // Product quality management based on advanced manufacturing technologies: a collection of abstracts of the V International Forum "Advanced Digital and Manufacturing Technologies". – 2023. – pp. 38-44.
2. Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. Process model of technical manufacturing preparation with a focus on digital twin technology // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial technologies. – 2024. – No. 1. – pp. 72-78.
3. Martynets E.R. Factors of improving the quality of high-tech products using advanced production technologies / E.R. Martynets, V.A. Leventsov // Product quality management based on advanced manufacturing technologies: a collection of abstracts of the IV International Forum "Advanced Digital and Manufacturing Technologies". – 2023. – pp. 12-17.
4. Kornienko A.V. Mathematical model of balancing the matrix of targets and resource constraints when using the technology of "digital twins" in high-tech industries / A.V. Kornienko, V.A. Leventsov // Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries: A collection of abstracts of the National Scientific and Practical Conference with international participation. – 2021. – pp. 63-69.
5. Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. Universal matrix of requirements, targets and resource constraints in the design of high-tech production // Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries: A collection of abstracts of the National Scientific and Practical Conference with international participation. – 2022. – pp. 111-119.
6. Kornienko A.V. Improvement of high-tech manufacturing using a system of integrated technological solutions / A.V. Kornienko, E.R. Martynets, V.A. Leventsov // Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer)

technologies and the organization of high-tech industries: A collection of abstracts of the National Scientific and Practical Conference with international participation. – 2022. – pp. 22-29.

7. Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. A system of integrated technological solutions using digital twins of manufacturing // Horizons of Economics. – 2022. – № 6 (72). – Pp. 68-74.

8. GOST R 57700.37–2021. Computer models and modeling. Digital twins of products. General provisions. – Moscow : Standartinform, 2021. – 16 p.

9. Borovkov A.I. Digital platform for the development and application of digital twins "Digital Twins" CML-Bench®. Part 2 / A.I. Borovkov, V.V. Burakov // CAD and graphics. - 2023. – No. 9. – pp. 54-64.

10. Martynets E.R. Development of high-tech products using digital twin technology / E.R. Martynets, V.A. Leventsov // Sustainable development of the digital economy, industry and innovative systems. - 2020. – pp. 631-634.

11. Selivanov S.G. Strategic planning of scientific, technological and technical training of aircraft engine manufacturing in the context of digitalization of ASNI and ASTPP / S.G. Selivanov, A.F. Shaikhulova, O.A. Gavrilova // Innovation. – 2020. – № 12 (266). – Pp. 48-54.

12. Sokolov V.P. Modeling of technical preparation of manufacturing / V.P. Sokolov // Bulletin of MSTU "STANKIN". – 2019. – № 2 (49). – Pp. 47-51.

13. Burdo G.B. Improving the efficiency of technical preparation of manufacturing in multi-nomenclature engineering / G.B. Burdo // Bulletin of Mechanical Engineering. - 2018. – No. 8. – pp. 78-86.

14. Boldyrev A.A. Technical preparation of machine-building manufacturing / A.A. Boldyrev, A.I. Boldyrev // Modern production technologies in mechanical engineering. – 2017. – No. 11. - pp. 130-134.

15. Levshatanova Yu.Y. Network model of a complex of works on technical preparation of manufacturing of a new product as a way to improve quality / Yu.Y. Levshatanova, I.I. Khafizov // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2017. – T. 79. – № 2 (72). – Pp. 372-379.

16. Kulga K.S. Automation of technical training and management for custom engineering manufacturing / K.S. Kulga // STIN. – 2016. – No. 3. – pp. 2-7.

17. Dmitrievsky B.S. Model of technical preparation of manufacturing in mechanical engineering / B.S. Dmitrievsky, A.E. Filina, I.O. Savtsova // Bulletin of Tambov State Technical University. 2015. Vol. 21. No. 1. pp. 174-184.

18. Gorbunov I.V. The use of SAE systems for technical and technological preparation of manufacturing / I.V. Gorbunov // Engineering and technology: new development prospects. - 2014. – № XV. – pp. 58-60.

19. Dmitrievsky B.S. Modeling of technical preparation of manufacturing in a small-scale innovative manufacturing system / B.S. Dmitrievsky, I.O. Savtsova // Issues of modern science and practice. V.I. Vernadsky University. – 2013. – № 2 (46). – Pp. 54-59.

20. Kulga K.S. Methodology of creating an integrated information system for automation of technical training and management of aviation manufacturing / K.S. Kulga // Modern problems of science and education. - 2012. – No. 6. – pp. 1-27.

21. Shiryalkin A.F. On one aspect of improving the efficiency of technical preparation of manufacturing / A.F. Shiryalkin, V.P. Makhitko, S.A. Kobelev // Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University. – 2010. – № 3 (51). – Pp. 70-74.

22. Deev K.A. Business process of technical preparation of automated manufacturing (problem areas) / K.A. Deev // Controlling. - 2010. – № 35. – pp. 62-69.

23. Bakanovskaya L.N. Computer technologies in solving problems technical preparation of manufacturing / L.N. Bakanovskaya, N.S. Mokeeva // Design. Materials. Technology. – 2010. – № 2 (13). – Pp. 90-93.

Martynets Ekaterina Romanovna

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
St.Petersburg
Leading specialist of Technological and Industrial
Foresight Department of the SPbPU School of Advanced
Engineering Studies in Digital Engineering, post-graduate
student of the SPbPU Institute of Advanced Manufacturing
Technologies
195251, St.Petersburg, 29 Politechnicheskaya str., litera B
E-mail: katya_martynets@inbox.ru

Kornienko Alexandr Vladimirovich

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
St.Petersburg
Engineer of Modeling of technological processes and
design of power equipment laboratory, post-graduate
student of the SPbPU Institute of Advanced
Manufacturing Technologies
195251, St.Petersburg, 29 Politechnicheskaya str.,
litera B
E-mail: kornienkoav1997@mail.ru

Leventsov Valery Alexandrovich

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,
St.Petersburg
PhD (Economics), Associate Professor, Director of the
SPbPU Institute of Advanced Manufacturing Technologies
195251, St.Petersburg, 29 Politechnicheskaya str., litera B
E-mail: vleventsov@spbstu.ru

© Мартынец Е.Р., Корниенко А.В., Левенцов В.А., 2025

КОРНИЕНКО А.В.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА И ВЛИЯНИЯ НА КАЧЕСТВО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Аннотация. *Качество производственного процесса напрямую зависит от ряда показателей, одним из которых выступает технологическое оборудование как инструмент реализации производственного процесса. В работе рассмотрено влияние состояния технологического оборудования на протекание производственных процессов. Представлена математическая модель качества производственного процесса, ключевой характеристикой которой выступает добавление весового коэффициента каждому показателю системы показателей и каждой группе системы показателей, а также коэффициента «вето». Определена возможность обеспечения качества производственного процесса посредством применения компьютерных методов, в том числе за счет проведения цифровых испытаний и создания цифровых двойников, с целью снижения вероятности возникновения отказов в работе технологического оборудования и возможного влияния последствий отказа на качество производственного процесса. Выявлены ресурсы и воздействия при процессном подходе к обеспечению надежности оборудования с учетом применения технологии цифровых двойников, которая позволит минимизировать количество отказов и увеличить межремонтный период. Внедрение описанных в работе моделей позволит усовершенствовать процесс производства и обеспечить бездефектное производство в условиях формирования технологического лидерства.*

Ключевые слова: *Математическая модель качества, показатели качества, производственный процесс, надежность, технологическое оборудование, цифровое проектирование и моделирование.*

Введение

В условиях цифровой трансформации одной из задач руководства является эффективная организация производственной системы. Решением этой задачи может стать использование инструментов цифрового проектирования и моделирования, позволяющих эффективно управлять системой на протяжении всего ее жизненного цикла и оперативно реагировать на изменения рыночной конъюнктуры [1–4].

В ходе данного исследования уточнена математическая модель качества производственного процесса на основе системы показателей, выделен уровень надежности оборудования как критически важный показатель и сформирована модель ресурсов и воздействий в процессе обеспечения надежности.

Для достижения задач исследования применены общенаучные методы исследования, включая методы сравнения, систематизации, математического анализа, а также процессный подход. В рамках данной статьи представлены результаты проведенного исследования, основанные на представленных ранее материалах.

Основная часть

Качество производственных процессов, обеспечивающих выпуск продукции, в значительной степени определяется множеством факторов, среди которых особое значение имеет состояние оборудования. Это связано с тем, что любое отклонение работы оборудования от заданных режимов и диапазонов допустимых значений является критическим явлением и может привести к отказу оборудования, а также возникновению аварийно-опасных ситуаций. В условиях формирования технологического лидерства страны внеплановые отказы оборудования являются недопустимым явлением, поскольку для достижения поставленной государством задачи необходим надежный технологический процесс и высокий уровень технологической оснащенности производства.

В целях систематизации факторов, оказывающих влияние на надежность производственных процессов, проведено предварительное исследование, в ходе которого были определены основные показатели качества производственного процесса (результаты исследования представлены в материалах [5]). Среди основных показателей качества выделены 3 группы показателей, связанных с оборудованием (имеет обозначение Е), персоналом (обозначение Р), технологиями и ресурсами (обозначение R) [5]. Источником для

формирования перечня показателей послужили материалы научно-исследовательской литературы [6–23]. Для определения степени взаимного влияния выявленных показателей сформирована математическая модель качества производственного процесса, кратко представленная в работе [24] и основанная на системе показателей качества производственного процесса [5].

Данная математическая модель качества производственного процесса может быть описана следующим образом:

$$f(Q) = V_E k_E \frac{\sum_{e=1}^E k_{1E} Q_{1E} V_{1E}}{E} + V_P k_P \frac{\sum_{p=1}^P k_{2P} Q_{2P} V_{2P}}{P} + V_R k_R \frac{\sum_{r=1}^R k_{3R} Q_{3R} V_{3R}}{R} \quad (1)$$

где $f(Q)$ – функция качества производственного процесса;

k – весовые коэффициенты показателей качества и групп показателей соответственно;

Q – значение отдельно взятого показателя [24].

При этом дополнительно введен коэффициент V – коэффициент вето, который принимает только 2 значения – 0 и 1 [25–26]. Введение данного показателя целесообразно в связи с тем, что компенсация (недопустимое перекрытие) низких значений важных показателей высокими значениями многочисленных маловажных показателей ведет к нивелированию величины и искажению итогового значения [25–26]. Значение 0 вводится в случае, когда значение любого показателя Q становится хуже допустимого значения $Q_{\text{допуст}}$, и 1 – в остальных случаях [25–26].

Важно отметить также ряд допущений, принятых при формировании математической модели. Так, математическая модель предполагает, что общий результат $f(Q)$ является суммой вкладов групп показателей (E, P, R), при этом значение отдельно взятых показателей может быть связано со значениями других показателей, в то время как функция носит линейный характер, когда увеличение значения одного показателя пропорционально увеличивает общий уровень качества, и не отражает возможный эффект синергии или, наоборот, конфликтной взаимосвязи между показателями и группами показателей. Также приведенные в модели коэффициенты значимости k групп показателей и отдельных показателей постоянны во времени и не зависят от других факторов, что позволяет определить важность каждого отдельного показателя или группы для предприятия в целом. Также предполагается достаточность оцениваемых показателей для получения адекватного значения качества, в то время как система показателей применительно к отдельному предприятию может быть уточнена и дополнена.

Кроме того, допущением является предположение, что данные, полученные в результате оценки значений отдельных показателей Q , являются достоверно точными, стабильными на протяжении некоторого оцениваемого периода времени, имеют одинаковую природу и могут быть усреднены. В то же время показатели, оцениваемые в математической модели согласно системе показателей, имеют разные единицы измерения, в связи с чем следует провести нормирование показателя, например, по формуле:

$$Q_i^{\text{norm}} = \frac{Q_i - Q_i^{\min}}{Q_i^{\max} - Q_i^{\min}} \quad (2)$$

где Q_i^{norm} – нормированное значение показателя,

Q_i – исходное значение показателя,

Q_i^{\min} и Q_i^{\max} – минимальное и максимальное значение показателя соответственно.

В качестве примера для проведения оценки адекватности математической модели качества производственного процесса возьмем слесарно-сборочный участок на производстве горноспасательного оборудования. Ниже приведена оценка отдельных показателей качества производственного процесса на данном участке (см. таблицу 1), которая проводилась с применением методов экспертной оценки, а также математического расчета отдельных показателей.

На основе разработанной математической модели качества производственного процесса может быть построена классификация приемлемого уровня качества с группой критериев, позволяющих определить диапазон значений приемлемого, удовлетворительного и

неприемлемого уровня качества для каждого отдельного показателя, рассмотренного в системе. Пример данной классификации на основе уровня надежности оборудования приведен в работе [27].

Таблица 1 – Значения показателей математической модели качества производственного процесса на слесарно-сборочном участке

Показатель Q	Обозначение	Значение	Весовой коэффициент k	Коэффициент вето V
Уровень надежности при выполнении основного функционала	Q_{11}	0,6	0,2	1
Уровень точности выполнения операций	Q_{12}	1	0,17	1
Уровень воспроизводимости операций разного типа	Q_{13}	0,87	0,1	1
Уровень безопасности при эксплуатации	Q_{14}	0,96	0,17	1
Стабильность выполнения операций	Q_{15}	0,98	0,1	1
Уровень бесперебойности электротехнической системы	Q_{16}	0,98	0,16	1
Уровень выполнения узкоспециализированных функций	Q_{17}	0,97	0,1	1
Показатель группы "оборудование"	–	0,89200	–	–
Весовой коэффициент k_E	0,45			1
Комплексный показатель "оборудование"	0,05734			
Максимальное значение комплексного показателя "оборудование"	0,06429			
Уровень компетенций в выполнении производственных операций	Q_{21}	0,87	0,2	1
Уровень владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта имеющегося оборудования	Q_{22}	0,84	0,2	1
Уровень владения нормативно-технической документацией	Q_{23}	0,74	0,1	1
Производительность труда	Q_{24}	0,92	0,2	1
Уровень владения инженерным программным обеспечением	Q_{25}	0,6	0,1	1
Уровень владения принципами бережливого производства	Q_{26}	0,71	0,2	1
Показатель группы "персонал"	–	0,80200	–	–
Весовой коэффициент k_P	0,3			1
Комплексный показатель "персонал"	0,04010			
Максимальное значение комплексного показателя "персонал"	0,05000			
Уровень ресурсного обеспечения производства	Q_{31}	0,7	0,3	1
Уровень применения цифровых платформенных решений и цифровых двойников	Q_{32}	0,2	0,05	0
Уровень автоматизации производства и применения комплексно-механизированных технологий	Q_{33}	0,76	0,2	1
Уровень внедрения принципов бережливого производства в производственную систему	Q_{34}	0,65	0,1	1
Уровень качества продукции	Q_{35}	0,94	0,2	1
Уровень проведения приемочного контроля	Q_{36}	0,9	0,15	1
Показатель группы "технологии и ресурсы"	–	0,76000	–	–

Показатель Q	Обозначение	Значение	Весовой коэффициент k	Коэффициент вето V
Весовой коэффициент k_R		0,25		1
Комплексный показатель "технологии и ресурсы"		0,03167		
Максимальное значение комплексного показателя "технологии и ресурсы"		0,04167		
Функция качества производственного процесса $f(Q)$		0,12911		
Максимальное значение функции качества производственного процесса $f(Q)$		0,15595		

Источник: составлено автором по материалам компании

Сфокусируемся на одном из показателей качества, выделенных в материалах [5] – уровне надежности оборудования, которая имеет критическое значение для производства. Значимость объясняется отрицательным влиянием простоев оборудования (возникающим в том числе по причине отказов) на эффективность и стабильность работы, объем выпуска продукции, в том числе бездефектной продукции, финансовые показатели, безопасность производственного процесса и другое, что в конечном итоге определяет конкурентоспособность предприятия.

Итак, уровень надежности оборудования – показатель, который требует тщательного подхода к его оценке, обеспечению и повышению. Применим процессный подход к обеспечению надежности оборудования и рассмотрим процесс в разрезе ресурсов, воздействий, входных и выходных элементов в соответствии с подходом, представленным в ГОСТ Р 27.015–2019 (МЭК 60300-3-15:2009).

Модель, приведенная на рисунке 1, описывает взаимовлияние используемых ресурсов и технологий, внешних и внутренних воздействий предприятия на процесс обеспечения надежности оборудования. Данный процесс является ключевым элементом, формирующим качество производственного процесса. Это связано с тем, что другие показатели качества не оказывают никакого влияния на протекание производственного процесса в том случае, если критически важное оборудование находится в неработоспособном состоянии – производственный процесс остановлен и не может быть начат до тех пор, пока оборудование не будет возвращено в работоспособное исправное состояние. При этом рассмотрены особенности реализации процесса обеспечения надежности при применении технологии цифровых двойников как эффективного инструмента, обеспечивающего своевременный контроль процесса, прогнозирование состояния оборудования, оптимизации технического обслуживания и проч. [27–28]

В соответствии с приведенной моделью потоки данных и ресурсов могут в общем виде включать технологию цифровых двойников, платформу, необходимую для реализации технологии, систему управления данными и другие материально-технические средства.

В качестве воздействий на систему и процесс можно выделить имеющуюся систему мониторинга за оборудованием, технические средства мониторинга, накопленную информацию, условия эксплуатации оборудования и другие факторы.

В качестве элемента на входе выступает первоначальное значение показателя качества производственного процесса, на выходе – обновленное значение, а также усовершенствованная система технического обслуживания оборудования на основе результатов применения технологии цифровых двойников. Выделенные на модели элементы являются ключевыми элементами, которые трансформируются в результате внедрения технологии.

Заключение

Приведенная математическая модель описывает взаимовлияние показателей качества производственного процесса друг на друга, а также отражает текущее состояние и выявляет узкие места в производственном процессе. Одним из ключевых показателей производственного процесса выступает уровень надежности оборудования, обеспечение

которого – сложный и многогранный процесс, который требует учета различных факторов, ресурсов и данных. Ключевая роль в этом процессе отводится реализуемым процессам мониторинга состояния и обслуживания оборудования, которое более эффективно может протекать при внедрении технологии цифровых двойников. Надежность является динамичным параметром, который изменяется под воздействием различных факторов и требует постоянного контроля и управления.



*Рисунок 1 - Модель ресурсов и воздействий в процессе обеспечения надежности оборудования
(Источник: разработано авторами)*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынец Е.Р. Факторы повышения качества наукоемкой продукции с применением передовых производственных технологий / Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: сборник тезисов докладов IV Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии». – 2023. – С. 12–17.
2. Корниенко А.В. Математическая модель уравнивания матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений при использовании технологии «цифровых двойников» на наукоемких производствах / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2021. – С. 63–69.
3. Мартынец Е.Р. Универсальная матрица требований, целевых показателей и ресурсных ограничений при проектировании наукоемкого производства / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2022. – С. 111–119.
4. Мартынец Е.Р. Система комплексных технологических решений с применением цифровых двойников производства / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Горизонты экономики. – 2022. – № 6 (72). – С. 68–74.
5. Корниенко А.В. Система качества производственного процесса и надежность технологического оборудования / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2024. – № 3. – С. 38–43.
6. Антипов Д.В. Комплексный показатель оценки устойчивости систем менеджмента качества / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 4(108). – С. 5–15.

7. Антипов Д.В. Процессный подход в определении модели учета и анализа затрат на качество / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26. – № 3. – С. 41–52.
8. Антипов Д.В. Оценка устойчивости систем менеджмента качества / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Избранные научные труды двадцать первой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». – 2022. – С. 24–29.
9. Антипов Д.В. Комплексная оценка развития системы менеджмента качества организации машиностроительного производства / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Избранные научные труды двадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». – 2021. – С. 41–45.
10. Антипов Д.В. Совершенствование требований Системы менеджмента качества к производственным процессам / Д.В. Антипов, Д.А. Горохова, А.В. Артюхов, А.С. Клентак // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 4(108). – С. 137–147.
11. Антипов Д.В. Подходы к повышению производительности и качества производственных процессов предприятий машиностроения / Д.В. Антипов, А.В. Иващенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19. – № 4-2. – С. 300–309.
12. Анцев В.Ю. Оценка качества производственного процесса с использованием системы единичных и комплексных показателей / В.Ю. Анцев, Н.А. Витчук // Страна живет, пока работают заводы: Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. – 2015. – С. 39–42.
13. Анцев В.Ю. Применение методов квалиметрии в оценке качества производственных процессов / В.Ю. Анцев, Н.А. Витчук, Н.Н. Трушин // Проблемы машиноведения: Материалы III Международной научно-технической конференции. – 2019. – Т. 2. – С. 162–167.
14. Афонин А.Н. Управление качеством производственных и технологических процессов изготовления лопаточных машин газотурбинных двигателей. – Москва: МАТИ, 2005. – 312 с.
15. Васильева Н.В. Формирование системы качества производственных процессов / Н.В. Васильева // Социально-экономическое развитие России и Монголии: проблемы и перспективы: материалы IV Международной научно-практической конференции. – 2015. – Т. 1. – С. 81–83.
16. Гореленков А.Л. Автоматизация управления процессом контроля качества продукции на производственном предприятии / А.Л. Гореленков, О.В. Ростова // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Инженерно-экономический институт. – 2015. – Т. 2. – С. 187–190.
17. Панюков Д.И. Эффективное управление качеством проектирования новых производственных процессов на основе ISO/TS 16949 / Д.И. Панюков // International Scientific and Practical Conference World science. – 2015. – Т. 1. – № 3(3). – С. 42–49.
18. Петров Д.В. Применение цифровых технологий как метод повышения надежности и качества производственных процессов / Д.В. Петров, И.К. Андрончев, А.И. Новоселов // Форум молодых ученых. – 2022. – № 1(65). – С. 167–174.
19. Петров А.С. Повышение качества процесса оперативно-производственного планирования при изготовлении продукции машиностроительным предприятием / А.С. Петров, М.И. Седлер // Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. – 2014. – Т. 1. – С. 309–312.
20. Потапова С.В. Совершенствование качества производственного процесса / С.В. Потапова // Архитектура, строительство, транспорт: материалы Международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»). – 2015. – С. 1578–1582.
21. Усольцев Д.А. Инженерный подход управления качеством производственных процессов / Д.А. Усольцев, В.И. Пашкевич, И.С. Кравчук // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – 2019. – С. 388–390.
22. Чупин А.Л. Исследование и оптимизация качества производственных процессов на предприятиях внешнеэкономической деятельности методом имитационного моделирования / А.Л. Чупин, Ж.С. Чупина // Маркетинг и логистика. – 2022. – № 2(40). – С. 65–74.
23. Шарафутдинова Е.Н. Анализ практики обеспечения качества производственного процесса на предприятии / Е.Н. Шарафутдинова // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 86-2. – С. 59–61.
24. Корниенко А.В. Математическая модель качества производственного процесса / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: Сборник тезисов докладов V Международного форума. – 2023. – С. 14–21.
25. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров: основы квалиметрии / Г.Г. Азгальдов. – Москва: Издательство "Экономика", 1982. – 256 с.
26. Квалиметрия: учеб. пособие / В. Н. Романов [и др.]; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2017. – 135 с.
27. Корниенко А.В. Обзор подходов к определению «надежность оборудования». Классификация технологического оборудования в зависимости от уровня надежности / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 1 (369). – С. 98–111.
28. Корниенко А.В. Надежность технологического оборудования как фактор эффективности производственного процесса / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Петербургский экономический журнал. – 2025. – № 1. – С. 42–53.

Корниенко Александр Владимирович

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Инженер лаборатории «Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования», аспирант Института передовых производственных технологий 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б

E-mail: kornienkoav1997@mail.ru

KORNIENKO A.V.

ENSURING THE RELIABILITY OF EQUIPMENT IN TERMS OF THE PROCESS APPROACH AND THE IMPACT ON THE QUALITY OF THE MANUFACTURING PROCESS

Abstract. *The quality of the manufacturing process directly depends on a number of indicators, one of which is technological equipment as a tool for implementing the manufacturing process. The paper considers the influence of the state of technological equipment on the flow of manufacturing processes. A mathematical model of the quality of the manufacturing process is presented, the key characteristic of which is the addition of a weighting coefficient to each indicator of the system of indicators and each group of the system of indicators, as well as the "veto" coefficient. The possibility of ensuring the quality of the manufacturing process through the use of computer methods, including through digital testing and the creation of digital twins, has been determined in order to reduce the likelihood of failures in the operation of technological equipment and the possible impact of the consequences of failure on the quality of the manufacturing process. The resources and impacts of the process approach to ensuring the reliability of equipment, taking into account the use of digital twin technology, have been identified, which will minimize the number of failures and increase the inter-repair period. The implementation of the models described in the work will improve the manufacturing process and ensure defect-free manufacturing in the context of the formation of technological leadership.*

Keywords: *Mathematical model of quality, the quality indicators, manufacturing process, dependability, engineering equipment, digital twin of product.*

BIBLIOGRAPHY

1. Martynets E.R. Factors of improving the quality of high-tech products using advanced production technologies / E.R. Martynets, V.A. Leventsov // Product quality management based on advanced production technologies: a collection of abstracts of the IV International Forum "Advanced Digital and Production Technologies". - 2023. - pp. 12-17.
2. Kornienko A.V. Mathematical model of balancing the matrix of targets and resource constraints when using the technology of "digital twins" in high-tech industries / A.V. Kornienko, V.A. Leventsov // Advanced production technologies: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries: A collection of abstracts of the National Scientific and Practical Conference with international participation. - 2021. - pp. 63-69.
3. Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. Universal matrix of requirements, targets and resource constraints in the design of high-tech production // Advanced production technologies: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries: A collection of abstracts of the National Scientific and Practical Conference with international participation. - 2022. - pp. 111-119.
4. Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. A system of integrated technological solutions using digital production doubles. Horizons of Economics. - 2022. - № 6 (72). - Pp. 68-74.
5. Kornienko A.V. The quality system of the production process and the reliability of technological equipment / A.V. Kornienko, E.R. Martynets, V.A. Leventsov // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial technologies. - 2024. - No. 3. - pp. 38-43.
6. Antipov D.V., Gubanova O.G. Complex indicator for assessing the sustainability of quality management systems // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. - 2022. - Vol. 24. - № 4(108). - Pp. 5-15.
7. Antipov D.V. Process approach in determining the model of accounting and analysis of quality costs / D.V. Antipov, O.G. Gubanova // Bulletin of IzHSTU named after M.T. Kalashnikov. - 2023. - Vol. 26. - No. 3. - pp. 41-52.
8. Antipov D.V. Assessment of the sustainability of quality management systems / D.V. Antipov, O.G. Gubanova // Selected scientific papers of the twenty-first International Scientific and Practical Conference "Quality Management". - 2022. - pp. 24-29.
9. Antipov D.V. Comprehensive assessment of the development of the quality management system of the organization of machine-building production / D.V. Antipov, O.G. Gubanova // Selected scientific papers of the Twentieth International Scientific and Practical Conference "Quality Management". - 2021. - pp. 41-45.

10. Antipov D.V. Improving the requirements of the Quality management System for production processes / D.V. Antipov, D.A. Gorokhova, A.V. Artyukhov, A.S. Klentak // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2022. – Vol. 24. – № 4(108). – Pp. 137-147.
11. Antipov D.V. Antipov, A.V. Ivashchenko Approaches to improving productivity and quality of production processes in machine-building enterprises // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017, vol. 19, No. 4-2, pp. 300-309.
12. Antsev V.Yu. Assessment of the quality of the production process using a system of single and complex indicators / V.Yu. Antsev, N.A. Vitchuk // The country lives while factories are operating: Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Conference. – 2015. – pp. 39-42.
13. Antsev V.Yu. Application of qualimetry methods in Antsev V.Yu., Vitchuk N.A., Trushin N.N. Evaluation of the quality of production processes // Problems of machine science: Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference. – 2019. – Vol. 2. – pp. 162-167.
14. Afonin A.N. Quality management of production and technological processes for manufacturing vane machines for gas turbine engines. Moscow: MATI Publ., 2005. 312 p.
15. Vasilyeva N.V. Formation of a quality system for production processes / N.V. Vasilyeva // Socio-economic development of Russia and Mongolia: problems and prospects: proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference. – 2015. – Vol. 1. – pp. 81-83.
16. Gorelenkov A.L. Automation of product quality control process at a manufacturing enterprise / A.L. Gorelenkov, O.V. Rostova // SPbPU Science Week: proceedings of a scientific forum with international participation. Institute of Engineering and Economics. 2015. Vol. 2. pp. 187-190.
17. Panyukov D.I. Effective quality management of designing new production processes based on ISO/TS 16949 / D.I. Panyukov // International Scientific and Practical Conference World science. – 2015. – Vol. 1. – № 3(3). – Pp. 42-49.
18. Petrov D.V. Application of digital technologies as a method improving the reliability and quality of production processes / D.V. Petrov, I.K. Andronchev, A.I. Novoselov // Forum of Young Scientists. – 2022. – № 1(65). – Pp. 167-174.
19. Petrov A.S. Improving the quality of the operational and production planning process in the manufacture of products by a machine-building enterprise / A.S. Petrov, M.I. Sedler // SPbGPU Science Week: proceedings of a scientific and practical conference with international participation. 2014. Vol. 1. pp. 309-312.
20. Potapova S.V. Improving the quality of the production process / S.V. Potapova // Architecture, construction, transport: materials of the International Scientific and Practical Conference (on the 85th anniversary of SibADI). – 2015. – pp. 1578-1582.
21. Usoltsev D.A. Engineering approach to quality management of production processes / D.A. Usoltsev, V.I. Pashkevich, I.S. Kravchuk // Current state, problems and prospects of development of branch science: Proceedings of the All-Russian conference with international participation. 2019. pp. 388-390.
22. Chupin A.L. Research and optimization of the quality of production processes at enterprises of foreign economic activity by the method of simulation modeling / A.L. Chupin, J.S. Chupina // Marketing and Logistics. – 2022. – № 2(40). – Pp. 65-74.
23. Sharafutdinova E.N. Analysis of the practice of ensuring the quality of the production process at the enterprise / E.N. Sharafutdinova // Trends in the development of science and education. – 2022. – No. 86-2. – pp. 59-61.
24. Kornienko A.V. Mathematical model of the quality of the manufacturing process / A.V. Kornienko, E.R. Martynets, V.A. Leventsov // Product quality management based on advanced manufacturing technologies: A collection of abstracts of the V International Forum. – 2023. – pp. 14-21.
25. Azgaldov G.G. Theory and practice of assessing the quality of goods: fundamentals of qualimetry / G.G. Azgaldov. Moscow: Ekonomika Publishing House, 1982. – 256 p.
26. Qualimetry: textbook / V.N. Romanov [et al.]; Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov. Vladimir: Publishing House of the All-Russian State University, 2017. – 135 p.
27. Kornienko A.V. Review of approaches to the definition of "equipment reliability". Classification of technological equipment depending on the level of reliability / A.V. Kornienko, E.R. Martynets, V.A. Leventsov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2025. – № 1 (369). – Pp. 98-111.
28. Kornienko A.V. Reliability of technological equipment as a factor of manufacturing process efficiency / A.V. Kornienko, E.R. Martynets, V.A. Leventsov // St. Petersburg Economic Journal. – 2025. – No. 1. – pp. 42-53.

Kornienko Alexandr Vladimirovich

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg

Engineer of Modeling of technological processes and design of power equipment laboratory, post-graduate student of the SPbPU Institute of Advanced Manufacturing Technologies

195251, St.Petersburg, 29 Politechnicheskaya str., litera B

E-mail: kornienkoav1997@mail.ru

Адрес издателя:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95
Тел. (4862) 75–13–18
<http://oreluniver.ru>
E–mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, Орловская область, г. Орёл, ул. Московская, 34
+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fipptt>
E–mail: radsu@rambler.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 23.08.2027 г.
Дата выхода в свет 19.09.2027 г.
Формат 70x108/16. Усл. печ. л. 12,5
Цена свободная. Тираж 1000 экз.
Заказ № 135

Отпечатано с готового оригинал–макета
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95