

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Научно-исследовательский центр
«МашиноСтроение»**



Крымский научно-исследовательский центр виноградарства и виноделия
"Магарач" Курчатовского комплекса виноградарства и виноделия НИЦ
"Курчатовский институт"

Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина

Азербайджанский технический университет

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова

ISSN 2587-7577

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ПРОЦЕССЫ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СОЗДАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ:

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№9

Санкт-Петербург, 2026

УДК 62-1 : 001.8
ББК 30.9
М38

М38 Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2026. – № 9. – 109 с. – DOI: 10.26160/2587-7577-2026-9.

Представлены материалы IX международной научно-практической конференции «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация» (29 января 2026г.). Направления работы конференции: 1) Машиностроение и металлообработка; 2) Роботы, мехатроника и робототехнические промышленные системы; 3) Горные машины и оборудование для добычи и переработки полезных ископаемых; 4) Metallургическое производство; 5) Химическая промышленность и нефтегазовая отрасль; 6) Строительство и ЖКХ; 7) Сельскохозяйственное машиностроение и агропромышленный комплекс; 8) Легкая промышленность; 9) Пищевая промышленность.

Материалы могут быть полезными для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов и студентов, занятых исследованием машин и процессов различного технологического назначения.

Учредитель: *Жукова Елена Валерьевна.*

Ответственный редактор:

Жуков Иван Алексеевич – директор НИЦ «МашиноСтроение», заведующий кафедрой машиностроения Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, д.т.н., доцент.

Редакционная коллегия:

Горобей Василий Петрович – заведующий сектором разработки и исследований макетных и экспериментальных технологических установок, Институт «Магарач», д.т.н., в.н.с.;

Кугаевский Сергей Семенович – доцент кафедры "Технологии машиностроения, станки и инструменты" УрФУ, к.т.н., доцент;

Логинов Геннадий Иванович – профессор кафедры водных ресурсов и инженерных дисциплин КРСУ, д.т.н., доцент;

Мамедов Ариф Тандыг оглы – профессор-советник кафедры «Metallургия и технология материалов» АзТУ, д.т.н., профессор;

Шифрин Борис Маркович – доцент кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах СПбГЛТУ, к.т.н., доцент.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/maippsim.html>
<https://doi.org/10.26160/2587-7577-2026-9>

ISSN 2587-7577

© Авторы, 2026
© НИЦ МС, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и металлообработка

Сысоева Л.П., Левко В.А. Структура поверхностного слоя образцов из алюминиевого сплава после обработки абразивным потоком и обработки потоком шариков	5
Литовка О.П., Левко В.А. Обоснование необходимости разработки рабочей среды с комплексным пластификатором для обработки абразивным потоком заготовок из труднообрабатываемых материалов	8
Федоров А.А., Беспалов А.В., Лепешкин Г.И. Новая технология изготовления осесимметричных штамповок из высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов	11
Михеев Р.С., Быков П.А., Калашников И.Е. Исследование устойчивости расходуемого материала в процессе фрикционного нанесения при повышенной температуре	15
Бирюков В.П., Горюнов Я.А. Оценка результатов испытаний по определению коэффициента трения полиацетата и полиэтилентерефталата	18
Чечуга А.О., Маликов А.А. Определение материала червячных фрез для изготовления зубчатых колёс из римамида	22
Пищов М.Н., Бельский С.Е. Анализ процесса развития усталостного разрушения конструкционных сталей	25
Бирюков В.П., Якубовский А.А. Определения трибологических свойств полимеров с использованием консистентной смазки	29
Чалаби И.Г. Сравнительный анализ показателей надежности червячной передачи по различным критериям.....	32
Кабилов И.Ф., Подгайный Я.А. Проектирование модели генератора низких частот.....	37

Роботы, мехатроника и робототехнические промышленные системы

Лицин К.В., Басков С.Н., Крячков Р.А., Аксёнов А.А., Быстров А.А. Разработка робототехнического комплекса с мультимодальным адаптивным алгоритмом для процесса производства фланцев	40
Чалаби И.Г., Оруджаде Р.А. Анализ функциональных параметров мобильного робота-манипулятора	43
Богданов И.В., Мещерякова А.А., Грибанов А.А. Обзор мобильных многофункциональных роботов для уборки придомовых территорий	48

Металлургическое производство

Джафаров Ф.Ф. Алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей: механизм-ориентированный подход	54
Джафарова А.А., Рустамова С.М. Многомасштабное моделирование процесса холодного прессования порошковых материалов.....	61
Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Егоров Е.Н. Оценка стабильности механических свойств поковок псевдо β -титанового сплава в зависимости от химического состава и промышленных режимов термической обработки	66

Химическая промышленность и нефтегазовая отрасль

Тотанов А.С. Концепция стабилизации давления на приеме электроцентробежного насоса в системе ОРЭ «ЭЦН-ЭЦН»	69
Тотанов А.С. Развитие методологии подбора режимов работы систем одновременно-раздельной эксплуатации систем ЭЦН-ЭЦН	74
Харисов Э.Т. Повышение точности гидродинамического моделирования в рамках исследований осевых ступеней в составе установок электроприводных лопастных насосов.....	79
Чашилов Д.В., Чашилова В.Д., Павлова К.И., Павлов И.Н. Установка аэромеханического дезинтегрирования листовых целлюлозных материалов при подготовке растительных волокон для армирования органоминеральных композитов	82
Лукманова И.Ф., Наумова Д.С., Иванчина Е.А., Рольник Л.З., Тептерева Г.А. Способ количественного определения уоновых кислот в лигносульфонатах в присутствии паратолюидина.....	85
Данильчук В.С., Веригин А.Н. Метод расчета распределения времени пребывания с использованием статистических испытаний	89

Сельскохозяйственное машиностроение и агропромышленный комплекс

Петухов Д.А., Ревенко В.Ю., Белик М.А. Конструктивные особенности ручных селекционных сеялок (хлопушек)	92
Бураева Г.М., Бураев М.К. К обоснованию производственной мощности ремонтного участка предприятия мелкосерийного производства.....	99
Мерчалов С.В., Прядкин В.И. Оптимизация процесса измельчения зерновых культур посредством интеграции сепарационного оборудования в систему пневматической транспортировки дробилки	103

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ И ОБРАБОТКИ ПОТОКОМ ШАРИКОВ

Сысоева Л.П., Левко В.А.

*Сибирский государственный университет науки и технологии
имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск*

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, алюминиевый сплав, поверхностный слой, рабочая среда, упрочнение потоком шариков, микротвердость.

Аннотация. Предложено использование обработки абразивным потоком (обработки потоком шариков) для уменьшения шероховатости и увеличения микротвердости поверхности образцов из алюминиевых сплавов. Рассмотрена структура поверхностного слоя образцов до и после обработки. Установлено, что в результате обработки в поверхностном слое формируется мелкозернистая структура материала, увеличивается микротвердость, уменьшается величина и изменяется направление шероховатости.

STRUCTURE OF THE SURFACE LAYER OF ALUMINUM ALLOY SAMPLES AFTER ABRASIVE FLOW MACHINING AND BALL FLOW PEENING

Sysoeva L.P., Levko V.A.

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

Keywords: abrasive flow machining, aluminum alloy, surface layer, media, ball flow peening, microhardness.

Abstract. The use of abrasive flow machining (ball flow machining) to reduce roughness and increase microhardness on the surface of aluminum alloy specimens is proposed. The surface layer structure of the specimens before and after machining is examined. It is found that the machining results in the formation of a fine-grained structure in the surface layer, an increase in microhardness, and a decrease in the magnitude and direction of roughness.

В современном производстве все больше используются алюминиевые сплавы, в частности группы АМг, так как их относительно малый удельный вес способствует снижению общей массы изделия и повышению мощности. Однако невысокие по сравнению со стальными материалами механические характеристики не всегда обеспечивают надежность конструкции при эксплуатации [1]. Для термически неупрочняемых сплавов группы АМг проблема упрочнения внутренних поверхностей деталей в настоящее время полностью не решена. Перспективной для их упрочнения считается обработка абразивным потоком (Abrasive Flow Machining (AFM)). В традиционных способах АФМ в качестве наполнителя используют абразивные или алмазные зерна, которые находятся в потоке рабочей среды и при обработке контактируют с микронеровностями внутренней поверхности [2]. Чтобы исключить микрорезание при удалении снимаемого слоя материала в ходе отделки, предложено заменить абразивный наполнитель рабочей среды на стальные шарики [3, 4]. Это

обеспечивает процесс отделочно-упрочняющей обработки внутренних поверхностей деталей с минимальным удаляемым припуском.

В результате обработки потоком шариков 20 циклами с давлением сдвига 10 МПа структура поверхностного слоя образца из алюминиевого сплава АМг6 изменилась (рис. 1). Продольная шероховатость Ra уменьшилась с 3,1...3,3 мкм до 0,19...0,22 мкм. Микротвердость НВ поверхности увеличилась с 65 до 127...130 МПа [5].

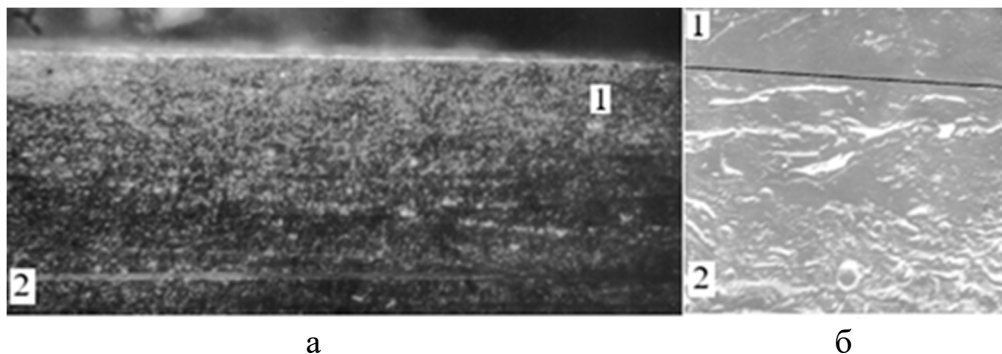


Рис. 1. Микроструктура шлифа образца из сплава АМг6 с зоной упрочненного слоя (1) и зоной основной структуры материала (2): а) при увеличении ($\times 450$); б) при увеличении ($\times 1500$)

В структуре поверхностного слоя в зоне 1 (рис. 1, а) наблюдается существенное повышение плотности дислокаций по сравнению со структурой основного материала в зоне 2, что свидетельствует о формировании субмикрокристаллической структуры с увеличением микроискажений. Ближе к поверхности плотность дислокаций увеличивается и формируется ячеистая структура. В зоне, лежащей сразу под обрабатываемой поверхностью, степень пластической деформации такая, что соседние фрагменты сливаются, образуя мелкозернистую структуру.

В структуре образца в зоне 1 рядом с обрабатываемой поверхностью (рис. 1, б) наблюдаются зерна, вытянутые в одном направлении. В зоне 2 наблюдается переход от структуры с вытянутыми зернами к структуре с пластически не деформированными зернами.

Для проведения сравнительного анализа проведена обработка абразивным потоком 10 циклами с давлением сдвига 10 МПа рабочей средой, в состав которой в качестве наполнителя применены зерна черного карбида кремния 40 (величина зерна 40 мкм). Структура поверхностного слоя образцов также изменилась (рис. 2). Продольная шероховатость Ra уменьшилась с 2,5...2,8 мкм до 0,22...0,46 мкм. Микротвердость НВ поверхности увеличилась с 65 до 74...77 МПа.

В структуре поверхностного слоя после обработки в зоне (рис. 2, б) также наблюдается повышение плотности дислокаций по сравнению со структурой основного материала, но оно не так выражено, как в случае обработки потоком шариков. Это связано с разным количеством циклов обработки. При этом величина удаленного (уплотненного) материала поверхностного слоя составила 30...40 мкм как для обработки абразивным потоком, так и для обработки потоком шариков.

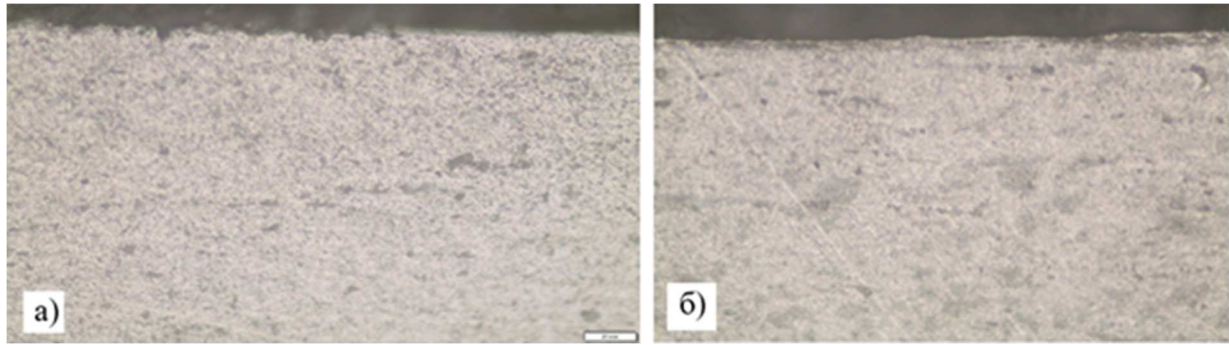


Рис. 2. Шлиф образца из алюминиевого сплава (увеличение 500х) (изображение на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA3): а) до обработки абразивным потоком; б) после обработки абразивным потоком

Таким образом после обработки абразивным потоком или обработки потоком шариков существенно изменяется структура поверхностного слоя образцов из алюминиевого сплава: увеличивается микротвердость, уменьшается величина и изменяется направление шероховатости.

Список литературы

1. Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В. Моделирование волнового деформационного нагружения алюминиево-магниевых сплавов // Вестник Брянского ГТУ. – 2018. – №11(72). – С. 73-80. – DOI: 10.30987/article_5be14a37776568.49924300.
2. Левко В.А., Сысоева Л.П., Иванов П.А., Сысоев А.С., Литовка О.В. Повышение качества поверхности деталей из термически неупрочняемого алюминиевого сплава обработкой потоком шариков // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104, №6. – С. 506-512. – DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-6-506-512.
3. А.с. №1379063 СССР. Способ чистовой обработки сквозных отверстий деталей / С.К. Сысоев. – Заявка №3962544 от 03.10.1985; опубл. 07.03.1988.
4. Sahin B., Gov I., Kalak M., Gov K. Surface quality enhancement of cold work tool steel by GOV (flow peening) process versus abrasive flow machining // Sādhanā. 2024, vol. 49, p. 24. doi.org/10.1007/s12046-023-02350-6.
5. Levko V.A., Sysoeva L.P., Ivanov P.A., Sysoev A.S., Litovka O.V. Improving the Surface Quality of Parts Made of Thermally Non-Hardenable Aluminum Alloy by Ball Flow Machining // Russian Engineering Research. 2025, vol. 45, no. 8, pp. 1117-1123. DOI: 10.3103/S1068798X25701825.

Сведения об авторах:

Сысоева Любовь Петровна – старший преподаватель кафедры ТМС;

Левко Валерий Анатольевич – д.т.н., профессор кафедры ТМС.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ С КОМПЛЕКСНЫМ ПЛАСТИФИКАТОРОМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ЗАГОТОВОК ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Литовка О.П., Левко В.А.

*Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск*

Ключевые слова: рабочая среда, комплексный пластификатор, обработка абразивным потоком, труднообрабатываемые материалы, импортозамещение.

Аннотация. Рассмотрены основные проблемы обработки абразивным потоком заготовок из труднообрабатываемых материалов. Приведены составы зарубежных и российских рабочих сред. Обоснована необходимость использования комплексного пластификатора. В качестве такого пластификатора предложено использовать алмазную мазеобразную пасту. Определен состав рабочей среды с комплексным пластификатором, позволившим существенно повысить производительность обработки. Предложено использовать такую рабочую среду взамен коммерческих рабочих сред.

JUSTIFICATION OF THE NEED TO DEVELOP THE MEDIA WITH A COMPLEX PLASTICIZER FOR ABRASIVE FLOW MACHINING OF WORKPIECES FROM HARD-TO-MACHINE MATERIALS

Litovka O.P., Levko V.A.

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

Keywords: media, complex plasticizer, abrasive flow machining, hard-to-machine materials, import substitution.

Abstract. The main challenges of abrasive flow machining of hard-to-machine materials are discussed. The compositions of foreign and Russian media are presented. The need for a complex plasticizer is substantiated. A diamond paste is proposed as such a plasticizer. The composition of a medium containing a complex plasticizer has been determined, which significantly improves machining productivity. It is proposed to use this medium instead of commercial working media.

Обработка абразивным потоком благодаря возникающим в потоке рабочей среды значительных касательных и нормальных напряжений позволяет такие усилия (силы) резания, которые могут реализовывать обработку заготовок из любых материалов, в том числе труднообрабатываемых. Однако при течении потока взад-вперед под большим давлением вдоль обрабатываемой поверхности, при контакте абразивных зерен с микронеровностями поверхностного слоя из труднообрабатываемых материалов выделяется значительное количество теплоты трения. Это приводит быстрому нагреву рабочей среды и резкому снижению ее вязкости, а следовательно, и производительности обработки. Нагрев рабочей среды до определенной температуры может привести к ее термической деструкции и потери целостности структуры.

Именно состав рабочей среды является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность обработки абразивным потоком. При этом вязкость

полимерной основы, размер, тип и весовое содержание абразивного зерна варьируется для достижения конкретных результатов окончательной обработки [1]. За рубежом вязкоупругой основой рабочей среды, в основном в коммерческом использовании, является полибороксан [2, 3], а также натуральный каучук [4] и ксантановая камедь [5]. В нашей стране эту роль играют полидиметилсилоксановые каучуки, в частности синтетический кремнийорганический каучук СКТ [6].

Коммерческие зарубежные рабочие среды на основе полибороксана имеют высокую стоимость и, в настоящее время, недоступны. Поэтому возникла необходимость совершенствования имеющихся составов российских рабочей среды для обработки абразивным потоком.

Каучук СКТ относится к неньютоновским жидкостям, представляет собой маловязкую прозрачную массу, легко поддающуюся формованию, не токсичен. Плотность каучука СКТ при 20° 960-980 кг/м³, вязкость 0,5...80 Па, условная прочность на растяжение не менее 4,9 МПа, относительное удлинение 275%.

В исходном состоянии каучук СКТ при достаточно высокой вязкости обладает значительной гибкостью макромолекул. Однако он обладает адгезионными свойствами, что обуславливает включения в состав рабочих сред антиадгезионных добавок [7].

Для повышения текучести в рабочие среды добавляют различные пластификаторы, например небольшие доли олеиновой кислоты [7], углеводородного масла (полибутен) [8] или металлическое мыло [9].

Более высокая вязкость рабочей среды увеличивает прочность связи между абразивными частицами и полимерной основой, вызывая большее удаление материала с заготовки и создавая однородную поверхность [8]. Наполнение полимерной основы абразивными частицами повышает ее вязкость за счет образования пространственной структуры, которая оказывает дополнительное сопротивление давлению сдвига. Антиадгезионные добавки также повышают вязкость рабочей среды, но эти частицы не участвуют в процессе абразивного изнашивания. Повышение вязкости уменьшает текучесть рабочей среды.

В связи с этим возникла необходимость использования такого пластификатора, который бы оказывал комплексное воздействие на свойства рабочей среды и условия обработки абразивным потоком.

В качестве такого пластификатора предложено использовать алмазную мазеобразную пасту (ГОСТ 25593-83). Эта паста хорошо смешивается с каучуком СКТ, в процессе обработки выступает в качестве охлаждающего и стабилизирующего поверхностно-активного вещества. При этом алмазные зерна, входящие в состав этой пасты, вместе с абразивными зернами наполнителя участвуют в контактных взаимодействиях с микронеровностями обрабатываемой поверхности.

Компоненты рабочей среды смешиваются и при их многократном возвратно-поступательном движении через специальное приспособление при определенных температурах, деформациях и напряжениях сдвига, а также последующей выдержке. В результате этого создается сетчатая структура потока рабочей среды с необходимой когезионной и температурной стойкостью.

В результате исследований определен состав рабочей среды для обработки абразивным потоком заготовок из труднообрабатываемых материалов при следующем соотношении компонентов, мас. %: каучук СКТ (ГОСТ 14680-79) – 40; алмазная мазеобразная паста (ГОСТ 25593-83) – 10; карбид кремния – 50.

Такая рабочая среда была применена для обработки абразивным потоком образцов из титанового сплава ОТ4, образцов из аустенитно-мартенситной стали 08Х14Н7МЛ и образцов из сплава порошкового молибдена, что позволило повысить производительность обработки по сравнению с известными аналогами на 160...240% [7], 100% [6] и 87,5% [10] соответственно.

Таким образом, использование рабочей среды на основе каучука СКТ с комплексным пластификатором позволит полностью заменить зарубежные рабочие среды. Обработка такой средой возможна как на российских установках, так и на установках для обработки абразивным потоком ведущих зарубежных производителей.

Список литературы

1. Rhoades L.J. Abrasive Flow Machining for Automatic Surface Finishing and Capacitance Technology for In-Process Surface and Dimensional Metrology // Meguid, S.A. (eds) Surface Engineering. Springer, Dordrecht. 1990. doi.org/10.1007/978-94-009-0773-7_46
2. Nitin Dixit, Varun Sharma, Pradeep Kumar. Research trends in abrasive flow machining: A systematic review // Journal of Manufacturing Processes. 2021, vol. 64, pp. 1434-1461. doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.009.
3. Dong Z., Ya G., Liu J. Study on machining mechanism of high viscoelastic abrasive flow machining for surface finishing // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2017, vol. 231(4), pp. 608-617. DOI: 10.1177/0954405415586967.
4. Fu Yuozni, Gao Hang, Yan Qiusheng, Wang Xuanping, Wang Xu. Rheological characterization of abrasive media and finishing behaviors in abrasive flow machining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020, vol. 107, pp. 3569-3580. doi.org/10.1007/s00170-020-05288-9.
5. Nitin Dixit, Varun Sharma, Pradeep Kumar. Development and characterization of xanthan gum-based abrasive media and performance analysis using abrasive flow machining // Journal of Manufacturing Processes. 2021, vol. 67, pp. 101-115. doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.053.
6. Левко В.А., Теряев Н.С., Литовка О.В., Иванов П.А. Обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей среды образцов литых заготовок из аустенитно-мартенситной стали // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, №3. – С. 122-132. – DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132.
7. А.с. №1673420 СССР. Масса для абразивной обработки / Г.И. Фомин, В.П. Лозицкий, Н.М. Мазур, Б.И. Иоктон. – Заявка №4680530 от 18.04.1989; опубл. 30.08.1991.
8. Petare A.C., Jain N.K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, vol. 97, pp. 741-782. doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7.
9. Patent No. 5203883 US. Honing media / Perry Winfield B. – Publ. 1991.
10. Левко В.А., Савин Д.И., Литовка О.В. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, №1(150). – С. 36-51. – DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-36-51.

Сведения об авторах:

Литовка Ольга Владимировна – старший преподаватель кафедры ТМС;

Левко Валерий Анатольевич – д.т.н., профессор кафедры ТМС.

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ШТАМПОВОК ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Федоров А.А., Беспалов А.В., Лепешкин Г.И.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Ключевые слова: горячее гидропрессование, высоколегированные жаропрочные никелевые сплавы, субмелкозернистая структура, эквикогезивная температура, всестороннее неравномерное сжатие, осадочные плиты, активное трение, сопротивление деформации, осесимметричные штамповки.

Аннотация. Представлена научно-обоснованная технология изготовления осесимметричных штамповок из высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов ЖС6-КП, ЭП7 – ИД, ВЖ175-ИД. Феноменологический подход к оценке экспериментальных исследований позволил установить параметры высокоскоростной сверхпластической деформации сплавов при штамповке круглых сплошных заготовок с осевым отверстием с регламентированной ультрамелкозернистой структурой, подготовленной предварительной термомеханической обработкой. Принципиально новое устройство для штамповки обеспечивает выполнение установленных параметров деформации до оформления требуемой конфигурации штамповки. Механические свойства материала штамповок превышают требования технических условий на соответствующие изделия, изготовленные в серийном производстве.

NEW TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING AXISYMMETRIC FORGINGS FROM HIGHLY ALLOYED HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS

Fedorov A.A., Bespalov A.V., Lepeshkin G.I.

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Keywords: hot hydroforming, highly alloyed heat-resistant nickel alloys, subfine-grained structure, equicohesive temperature, omnidirectional non-uniform compression, settling plates, active friction, deformation resistance, axisymmetric forgings.

Abstract. This paper presents a scientifically grounded technology for manufacturing axisymmetric forgings from highly alloyed heat-resistant nickel alloys such as ZhS6-KP, EP7-ID, and VZh175-ID. A phenomenological approach to evaluating experimental research allowed the establishment of parameters for high-speed superplastic deformation of alloys during the stamping of round solid blanks with axial holes, which have a regulated ultrafine-grained structure prepared by preliminary thermomechanical treatment. A fundamentally new device for stamping ensures the achievement of the established deformation parameters until the required configuration of the forging is formed. The mechanical properties of the forging material exceed the requirements of the technical specifications for the corresponding products manufactured in serial production.

Новейшие достижения в области материаловедения и обработки металлов давлением (ОМД) позволяют повысить эксплуатационные характеристики авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), их ресурс и надёжность. При этом только комплексный подход к совершенствованию операций по всей технологической цепочке обеспечивает наибольший эффект в повышении

качества деталей двигателя. В современную технологию изготовления ГТД должны быть заложены все существующие в настоящее время прогрессивные решения, способные обеспечить наивысшую надёжность авиационной техники. Так, одним из существенных достижений авиационного двигателестроения в настоящее время стало применение прогрессивного процесса формообразования в условиях сверхпластической (СП) деформации при изготовлении наиболее ответственных деталей ГТД. Развитию указанного направления в авиационной технологии посвящена данная публикация.

Отливки диаметром 320 мм, выплавленные в вакуумной индукционной печи и разрезанные на мерные заготовки длиной 320 мм подвергали термомеханической обработке путём двухциклового горячего гидропрессования (ГГП). Ранее нами установлено, что для преобразования литой структуры высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) в деформированную коэффициент вытяжки при ГГП должен быть не менее 1,5, а для сохранения пластичности сплава не более 4,5 [1]. Первый цикл ГГП при температуре $1,3 \div 1,4$ от эвктикогезивной температуры сплава обеспечивает формирование микрокристаллической структуры типа микродуплекс с размером зёрен γ - и γ' - фаз соответственно $4 \div 6$ мкм и $1,2 \div 1,7$ мкм, а непосредственное охлаждение после ГГП на воздухе предотвращает рост зерна заготовки. Затем круглый прутки диаметром 250 мм вновь нагревали до температуры $0,6 \div 0,8$ от эвктикогезивной температуры сплава и подвергали ГГП в направлении противоположном первоначальному с коэффициентом вытяжки 4,34 необходимым для получения заготовки диаметром 120 мм, требуемым для формообразования штамповки и вновь охлаждали после ГГП на воздухе. Затем в заготовке высверливали осевое отверстие диаметром 26 мм. Второй цикл горячего гидропрессования необходим для устранения текстуры деформации сплава и равномерного распределения γ' – фазы перед операцией штамповки. В результате такой термомеханической обработки в заготовке развивается динамическая рекристаллизация, формируется однородная в продольном и поперечном ее сечении, равноосная субмелкозернистая структура с зёрнами размером $0,08 \div 0,58$ мкм с высокоугловыми межфазными и межзёрнными границами. Известно, что такая субмелкозернистая структура обеспечивает эффект СП в высоколегированных ЖНС, при этом, сопротивление деформации снижается на порядок [2].

Формообразование осуществляли осадкой заготовки в устройстве, состоящем из верхней 2 и нижней 4 деформирующих плит, с рабочей стороны которых выполнены осесимметричные конические вогнутые поверхности с углами при вершинах $170^\circ \div 175^\circ$ (рис. 1).

Такая конструкция плит обеспечивает смену направления сил трения по поверхности контакта заготовки 1 и инструмента, делает его активным, направленным в сторону движения смещённого объёма металла заготовки, препятствует радиальному течению металла в периферийном направлении и обеспечивает, при наличии осевого отверстия в заготовке, равномерность деформации сжатием по всему объёму штамповки 3 [3]. При этом схема деформации препятствует развитию пористости – структурного дефекта, наблюдаемого во многих высоколегированных ЖНС, обеспечивает отсутствие остаточных зональных напряжений и позволяет получать высокие и стабильные

уровни механических свойств после стандартной термической обработки штамповок.

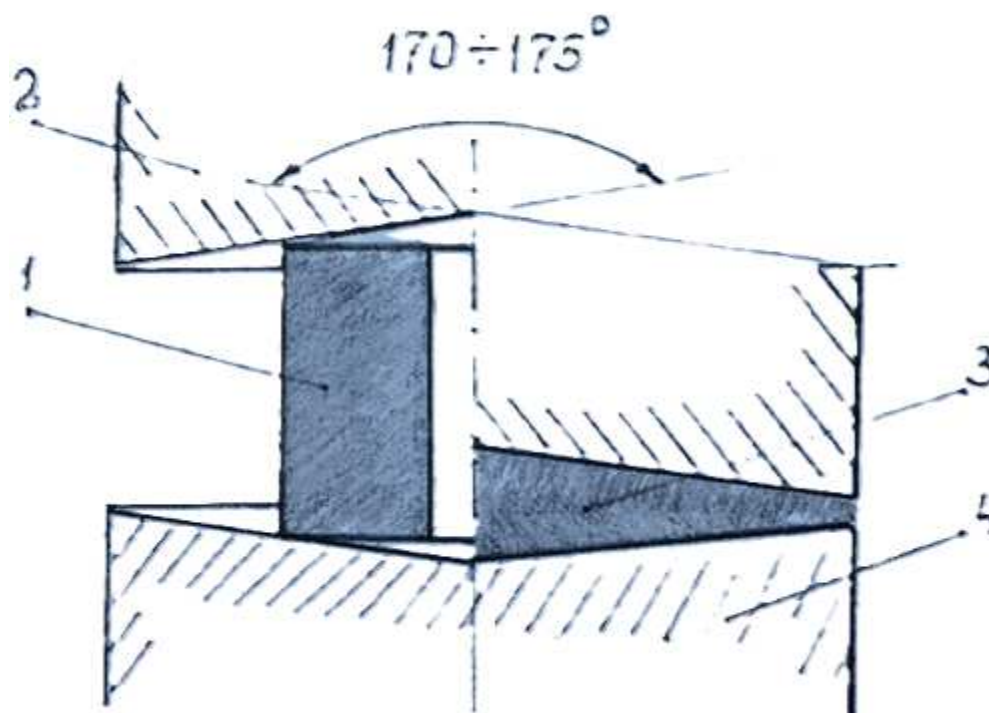


Рис. 1. Устройство для осадки заготовок ЖНС в условиях квазиоднородной деформации

В результате получены осесимметричные штамповки дисков турбины соответствующие требованиям предприятия. Последующая стандартная термическая обработка обеспечила стабильный уровень механических свойств материала штамповок при величине зерна, соответствующей 3÷4 номеру по шкале микроструктур ГОСТ 21073. 1-75.

ГПП обеспечило термомеханическую обработку с получением субмелкозернистой структуры непосредственно в процессе изготовления заготовки под штамповку без многочисленных и энергозатратных операций отжига и подпрессовки, что значительно снижает трудоёмкость и энергозатраты изготовления осесимметричных штамповок из высоколегированных ЖНС [4]. Все технические результаты достигнуты единой совокупностью приёмов, новыми из которых являются двухцикловое ГПП с регламентированными термомеханическими параметрами и формообразованием штамповки осадкой заготовки с осевым отверстием в принципиально новом устройстве.

Список литературы

1. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С. Сверхпластичность жаропрочного никелевого сплава ЖС6-КП при высоких гидростатических давлениях // Технология легких сплавов. – 2022. – №1. – С. 67-75.
2. Кайбышев О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры в обработке труднодеформируемых сплавов. – М.: Наука, 2002. – 438 с.
3. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С. Применение высоких гидростатических давлений для исследования сопротивления деформации металлов // Технология машиностроения. – 2017. – №8. – С. 11-15.

4. Федоров А.А., Беспалов А.В., Комаров Р.С., Хайрутдинова Р.Р. Сверхпластическая деформация титанового сплава ВТ6с в составе композиционного материала ВТ6с-1201 при высоких гидростатических давлениях // Технология легких сплавов. – 2023. – №1. – С. 70-79.

Сведения об авторах:

Федоров Анатолий Александрович – д.т.н., профессор;

Беспалов Александр Владимирович – к.т.н., доцент, директор института №11;

Лепешкин Георгий Игоревич – аспирант.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАСХОДУЕМОГО МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ФРИКЦИОННОГО НАНЕСЕНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Михеев Р.С.¹, Быков П.А.², Калашников И.Е.²

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва;*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Москва*

Ключевые слова: фрикционное нанесение, алюминиевые сплавы, рабочее покрытие, устойчивость расходного материала, повышенная температура.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния повышенной температуры нагрева на устойчивость расходного материала из модельного сплава алюминия марки ER1100 в процессе фрикционного нанесения функциональных покрытий на подложку из качественной стали 20. Определены области устойчивости расходных стержневых заготовок, представляющие собой графические зависимости значений осевой нагрузки от величины вылета, и показано влияние на них технологических параметров процесса фрикционного нанесения.

STUDY OF THE CONSUMABLE MATERIAL STABILITY DURING FRICTION SURFACING AT ELEVATED TEMPERATURE

Mikheev R.S.¹, Bykov P.A.², Kalashnikov I.E.²

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow;*

²*Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of Russian Academy of Sciences,
Moscow*

Keywords: friction surfacing, aluminum alloys, working coating, consumable material stability, elevated temperature.

Abstract. The paper presents the results of a study of the effect of elevated heating temperatures on the stability of consumable material made of ER1100 aluminum model alloy during the friction surfacing of functional coatings onto a substrate made of high-quality 20 steel. The stability regions of consumable rod blanks, which are graphical dependencies of the axial load values on the overhang value, are determined, and the influence of the technological parameters of the friction surfacing process on them is shown.

Материалы со слоистой структурой, например, биметаллические композиции системы сталь-алюминий, получили широкое распространение в конструкциях машин и агрегатов, работающих в разных отраслях промышленности: металлургия, машиностроение, химическая, нефтеперерабатывающая, транспорт и другие [1]. Для получения металлической (диффузионной) связи между исходными материалами на основе железа и алюминия, применяют различные методы алитирования, т.е. покрытия железа слоем алюминия. Одним из современных и весьма перспективных методов алитирования является простой и экономичный процесс фрикционного нанесения [2]. Подобная технология сопоставима с процессом сварки трением с

перемешиванием, в которой расходуемый материал в виде вращающейся стержневой заготовки, выполненной из алюминия или сплавов на его основе, обеспечивает формирование рабочего функционального слоя на поверхности стальной подложки. Локальный нагрев зоны соединения происходит за счет работы против сил трения, образующихся при физическом контакте вращающейся стержневой заготовки и подложки, прижатых друг к другу нормальным усилием. При этом температуры нагрева зоны соединения не превышает температуру плавления материала вращающейся стержневой заготовки. Данная особенность обеспечивает формирование узкой зоны термического влияния и ограничивает химическое взаимодействие на границе раздела подложка-покрытие [3]. Поэтому дополнительным резервом для повышения производительности и уменьшения требуемых значений технологических параметров процесса фрикционного нанесения является увеличение температуры нагрева зоны соединения. Однако, при этом устойчивость расходуемой стержневой заготовки из алюминия приобретает ключевое значение.

В настоящей работе фрикционное нанесение проводили на экспериментальной установке, изготовленной на основе вертикально-сверлильного станка, дополнительно оснащенного приспособлением для перемещения подложки. Расходуемыми заготовками служили прутки диаметром 4 мм из технически чистого алюминия марки ER 1100, выбранного в качестве модельного материала (AWS A5.10). Пластины размером 40x175x1 мм из стали 20 (ГОСТ 1050) применяли в качестве подложки. Область устойчивости расходуемой стержневой заготовки оценивали при постоянной частоте вращения 1000 об/мин и изменяемым значениям осевой нагрузки (F , Н) и вылета (L , мм). Оценочными критериями для определения области устойчивости являлись: нарушение вертикальной устойчивости расходуемой заготовки и отклонение ее от оси вращения за счет биения. Процесс фрикционного нанесения проводили при повышенной температуре $T = 473$ К, а также в нормальных условиях ($T = 298$ К), для возможности сопоставления полученных результатов.

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили определить максимальные значения вылета (L), представляющего собой расстояние между точкой фиксации и концом расходуемой заготовки. Кроме того, были построены области устойчивости в виде графических зависимостей между значениями осевой нагрузки (F) и вылетом расходуемых стержневых заготовок в процессе фрикционного нанесения (рис. 1). Видно, что при повышенной температуре нарушение устойчивости происходит при осевой нагрузке F более 30 Н или вылете L свыше 5 мм. С увеличением осевой нагрузки закономерно уменьшается допустимая величина вылета, что сокращает размер области устойчивости. При нормальных условиях область устойчивости ограничена максимальными значениями осевой нагрузки $F = 70$ Н или вылета $L = 8$ мм (рис. 1, б).

Таким образом, проведенные исследования показывают, что воздействие повышенной температуры (473 К) приводит к сужению области устойчивости расходуемой алюминиевого материала марки ER1100 (допустимые осевая нагрузка и вылет уменьшаются в 2,3 и 1,6 раза соответственно).

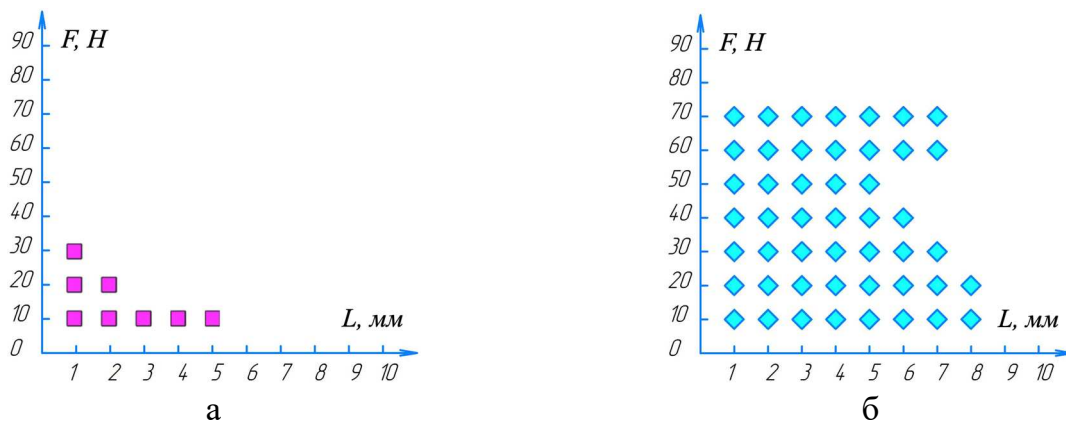


Рис. 1. Области устойчивости расходуемой стержневой заготовки при $T = 473 K$ (а) и $T = 298 K$ (б)

Полученные результаты могут способствовать рациональному выбору технологических параметров, обеспечивающих стабильность и эффективность процесса фрикционного нанесения при изготовлении слоистых биметаллических композиций системы сталь-алюминий для широкого применения в конструкции работающих в разных областях промышленности машин и агрегатов.

Список литературы

1. Dai G., Liu Y., Chen K., Liu W., Wang T., Huang Q. Effect of cumulative deformation and interlayer mechanical properties on bonding strength of corrugated interface steel/aluminum composite plate // Journal of Manufacturing Processes. 2023, vol. 103, pp. 78-89.
2. Sekhar S.R., Raju M., Govardhan D., Karthikeyan R., Sashank S.S. Optimization of friction surfaced deposits of aluminium alloy 6068 over low carbon steel // Materials Today: Proceedings. 2022, vol. 62, pp. 4480-4486.
3. Есипова А.Д., Слепов Д.В., Михеев Р.С., Калашников И.Е. Исследование условий процесса фрикционной наплавки при изготовлении функционально-организованных сталеалюминиевых слоистых композиций // Деформация и разрушение материалов. – 2023. – №10. – С. 19-24.

Сведения об авторах:

Михеев Роман Сергеевич – д.т.н., доцент, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника»;

Быков Павел Андреевич – научный сотрудник Лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов;

Калашников Игорь Евгеньевич – д.т.н., ведущий научный сотрудник Лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПОЛИАЦЕТАЛЯ И ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

Бирюков В.П., Горюнов Я.А.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва*

Ключевые слова: полиацеталь, полиэтилентерефталат, коэффициент трения, морфология поверхности, сталь 45, микрорезание, гидравлическое масло, абразивно-масляная суспензия.

Аннотация. В данной работе рассматриваются результаты испытаний по определению коэффициента трения и вида изнашивания образцов полиацетала и полиэтилентерефталата в паре со сталью. Трибологические испытания были проведены по схеме: «колодка (полимер) – ролик (сталь 45)» с дозированной подачей абразивно-масляной суспензии. Результаты показали, что образцы полиацетала имели коэффициент трения в 1.3 ниже, чем образцы полиэтилентерефталата. Основным механизмом изнашивания полимерных образцов было микрорезание.

EVALUATION OF TEST RESULTS TO DETERMINE THE COEFFICIENT OF FRICTION OF POLYACETAL AND POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

Biryukov V.P., Goryunov Ya.A.

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow*

Keywords: polyacetal, polyethylene terephthalate, coefficient of friction, surface morphology, steel 45, micro-cutting, hydraulic oil, abrasive oil suspension.

Abstract. This paper examines the results of tests to determine the friction coefficient and wear pattern of polyacetal and polyethylene terephthalate samples paired with steel. Tribological tests were conducted using a "block (polymer) – ring (45 steel)" configuration with a metered supply of an abrasive-oil suspension. The results showed that the polyacetal samples had a friction coefficient 1.3 times lower than the polyethylene terephthalate samples. The primary wear mechanism for the polymer samples was microcutting.

Полиацеталь (ПОМ) и полиэтилентерефталат (ПЭТ) являются термопластичными конструкционными полимерами, которые благодаря большой прочности, жесткости, стабильности размеров и устойчивости к механическим нагрузкам получили распространение в машиностроении для получения точных деталей – шестерней, крепежных деталей, частей насосов, лопастей вентиляторов и др. Низкий коэффициент трения позволяет использовать конструкционные полимеры в различных узлах трения. В настоящее время большое количество работ посвящено исследованию триботехнических свойств данных полимеров.

Для определения триботехнических характеристик были изготовлены образцы ПОМ [1], модифицированные 10 мас. % полиуретаном (ПУ) и наполненные 10 мас. % политетрафторэтиленом (ПТФЭ) (60 мкм) с размерами 30×6×7 мм. Триботехнические испытания проводились по схеме: «колодка

(полимер, композит) – ролик (полимер)» при нагрузке 50-200 Н и скорости скольжения 0,42-0,84 м/с в течение 10-30 минут. Перед испытаниями образцы ПОМ обрабатывались наждачной бумагой зернистостью Р600. Ролик, изготовленный из нейлона, имел внешний диаметр 40 мм и толщину 10 мм. По завершении испытаний установлено, что наименьший коэффициент трения 0,075 получен у образцов, модифицированных 10 мас. % ПУ, что в 1,2 и 1,3 раза ниже, чем у образцов, содержащих 10 мас. % ПТФЭ 0,09 и исходного ПОМ 0,1.

Образцы диаметром 6 и длиной 12 мм изготовленные из чистого ПОМ [2], ПЭТ, содержащего ПТФЭ, а также ненаполненных, маслonaполненных полиамидов (ПА-6) и полиамидов с магниевым катализатором (ПА-6/Mg) были для определения трибологических характеристик. Испытания на трение и износ были проведены на возвратно-поступательной машине трения по схеме: «образующая поверхность цилиндра – плоскость стальной пластины» при нагрузке 100-200 Н, скорости скольжения 0,27 м/с в течение 1-2 часов. Пластина, изготовленная из стали 40CrMnNiMo8, имела размеры 58×38×4 мм и шероховатость поверхности Ra 0,02-0,08 или 0,1-0,3 мм. Цилиндрический образец двигался с частотой 30 Гц. Длина хода составляла 4,62 мм. В результате найдено, что наименьший коэффициент трения 0,21 при шероховатости поверхности пластины Ra 0,1-0,3 мм имели образцы ПЭТ, содержавшие частицы ПТФЭ, что в 3,2 раза больше, чем у образцов ПА-6/Mg 0,68. Стоит отметить, что при шероховатости поверхности пластины Ra 0,02-0,08 мм наименьшим коэффициентом трения 0,29 обладали образцы ПОМ, что в 1,1 раз меньше, чем у образцов ПЭТ, содержавших частицы ПТФЭ 0,32. Самая низкая удельная интенсивность изнашивания $1,51 \times 10^{-7}$ мм³/Нм получена у образцов ПОМ, что в 8,9 раз меньше, чем у образцов ПА-6 $1,35 \times 10^{-6}$ мм³/Нм.

С целью изучения износостойкости были подготовлены пальчиковые образцы диаметром 25 мм из ПОМ, ПА-6 и ПА-66. Трибологические испытания проводились с применением схемы: «палец (полимер) – диск (сталь, HRB 67)» при нагрузке 60-100 Н и скорости скольжения 1,8-2,8 м/с. По завершении испытаний найдено, что наименьший коэффициент трения 0,572 замечен у образцов ПОМ, что в 1,2 и 1,4 раза ниже, чем у образцов ПА-6 0,691 и ПА-66 0,826. Минимальная скорость изнашивания 0,063 г/с также получена у образцов ПОМ, что в 1,7 и 2,8 раз меньше, чем у образцов ПА-66 0,106 г/с и ПА-6 0,179 г/с.

Целью работы являлось определение коэффициента трения полиацетала и полиэтилентерефталата при трении о стальной ролик с подачей в зону трения абразивно-масляной суспензии на основе гидравлического масла.

Полимерные образцы с размерами 20×10×10 мм были изготовлены из полиацетала (1) (INKUPOM C) и полиэтилентерефталата (2) (ZX-100K). Испытания для определения коэффициента трения были проведены по схеме: «колодка – ролик» с дозированной подачей абразивно-масляной суспензии при нагрузке 400 Н и скорости скольжения 0,785 м/с в течение 5 минут. Ролик диаметром 50 мм и толщиной 10 мм был изготовлен из стали 45 (145 HV_{0,1}). Путь трения, пройденный каждым образцом, составлял 235 м. Подача суспензии на основе гидравлического масла МГЕ-10А, содержавшей 3 мас. % порошок карбида кремния (М28) (20 мкм), осуществлялась со скоростью 40±5 капель/мин. Перед

каждым испытанием образующая поверхность ролика обрабатывалась наждачной бумагой зернистостью Р180.

На рисунке 1 представлена морфология поверхностей трения полимеров после испытаний. Исследование морфологии поверхностей трения полимерных образцов выявило, что основным механизмом изнашивания являлось микрорезание.



а



б

Рис. 1. Морфология поверхностей трения полимеров после испытаний:
а – INKUPOM C, б – ZX-100K

В таблице 1 приведены результаты испытаний по определению коэффициента трения полимеров. Анализ полученных результатов показал, что наименьшим средним коэффициентом трения 0,055 обладали образцы INKUPOM C. Отмечено, что образцы ПОМ имели в 1,3 раза меньший коэффициент трения, чем образцы ПЭТ.

Табл. 1. Результаты испытаний полимеров

№ образца	Материал	Коэффициент трения	Средний коэффициент трения
1.1	INKUPOM C (ПОМ)	0,067	0,055
1.2		0,042	
1.3		0,056	
2.1	ZX-100K (ПЭТ)	0,073	0,073
2.2		0,058	
2.3		0,089	

Выводы. По результатам испытаний установлено, что образцы INKUPOM C имели в 1,3 раза меньший коэффициент трения, чем образцы ZX-100K. Анализ морфологии поверхностей трения полимерных образцов показал, что основным механизмом изнашивания являлось микрорезание.

Финансирование. Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023.

Список литературы

1. Hu X., Tribological behaviour of modified polyacetal against MC nylon without lubrication // Tribology Letters. 1998, vol. 5, pp. 313-317.
2. Zsidai L., Baets P. D., Samyn P., Kalacska G., Van Peteghem A. P., Van Parys F., The tribological behaviour of engineering plastics during sliding friction investigated with small-scale specimens // Wear. 2002, vol. 253, pp. 673-688. DOI: 10.1016/s0043-1648(02)00149-7.
3. Prabu S.S., Prathiba S., Sharma A., Garg S., Manikandan G., Sriram C., Investigation on Adhesive Wear Behaviour of Industrial Crystalline and Semi-Crystalline Polymers against Steel Counterface // International Journal of ChemTech Research. 2014, vol. 6, pp. 3422-3430.

Сведения об авторах:

Бирюков Владимир Павлович – к.т.н., ведущий научный сотрудник;

Горюнов Ярослав Алексеевич – младший научный сотрудник.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС ИЗ РИМАМИДА

Чечуга А.О., Маликов А.А.

Тульский государственный университет, Тула

Ключевые слова: зубчатое колесо, римамид, червячная фреза, стойкость инструмента, шероховатость поверхности, скорость резания.

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты, влияющие на качество поверхности зубьев колёс, полученных путем применения червячных фрез. Проанализированы факторы, влияющие на стойкость инструмента при обработке полимерных материалов. Описаны достоинства и недостатки быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов, касающиеся процессов формирования зубчатого венца червячных колёс из римамида.

DETERMINATION OF THE MATERIAL OF HOB CUTTERS FOR MANUFACTURING GEARS FROM RIMAMIDE

Chechuga A.O., Malikov A.A.

Tula State University, Tula

Keywords: gear wheel, rimamide, hob cutter, tool life, surface roughness, cutting speed.

Abstract. This article examines the key aspects affecting the surface quality of gear teeth produced using hobs. Factors influencing tool life when machining polymeric materials are analyzed. The advantages and disadvantages of high-speed steels and hard alloys are described, as they relate to the processes of forming rim gears for rimamide worm gears.

Использование полимерных материалов для изготовления червячных колёс даёт возможность снижения коэффициента трения в зоне контакта поверхностей зубьев и червяка, что приводит к увеличению эффективности работы редуктора и его долговечности [1]. Таким материалом является римамид, физико-механические свойства которого (табл. 1) позволяют рассматривать его в качестве альтернативы цветным сплавам при изготовлении червячных колёс различной конфигурации.

Прочностные характеристики материала в сочетании с антифрикционными свойствами обеспечивают сохранение работоспособности зубчатого редуктора в интенсивных эксплуатационных условиях при широком диапазоне нагрузок.

Важным аспектом возможности быстрой интеграции римамида в производственный процесс является то, что применяемое для обработки оборудование и инструмент аналогичны задействованным в обработке металлов.

Низкое значение коэффициента трения обработанной поверхности заготовок из римамида позволяет, в большинстве случаев, исключить дополнительную обработку, что, в свою очередь, снижает экономические и временные издержки при изготовлении. Так же, низкая шероховатость поверхностей при работе снижает уровень шума и вибрационной нагрузки в редукторе.

Для достижения наименьшего трения по пятну контакта необходимо обеспечить высокий показатель качества поверхности зубьев колеса.

Табл. 1. Характеристики римамида

Параметр	Римамид-200	Римамид-200-У	Римамид-200-СТУ	Методы испытания
Плотность, кг/м³	1145-1150	1135-1145		ГОСТ 15139
Температура плавления, °С	220-225	218-223		ГОСТ 21553
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	80-85	≥30		ГОСТ 11262
Относительное удлинение при разрыве, %	25-30	25-40		ГОСТ 11262
Модуль упругости при растяжении, МПа	2800-3200	2200-2800		ГОСТ 9550
Коэффициент трения по стали без смазки	0,15-0,3	0,2-0,3		ГОСТ 11626
Коэффициент трение по стали со смазкой	0,04-0,08			ГОСТ 11629
Твёрдость по Шору D	80-85	75-80		ГОСТ 24621

Материалом для червячных фрез, осуществляющих нарезание зубьев колёс (рис. 1), может служить быстрорежущая сталь или твердый сплав. Быстрорежущий материал позволяет производить обработку в условиях высоких температур, сохраняя остроту и твердость, при этом заточка режущих кромок происходит быстрее и точнее, чем с твердосплавным инструментом.

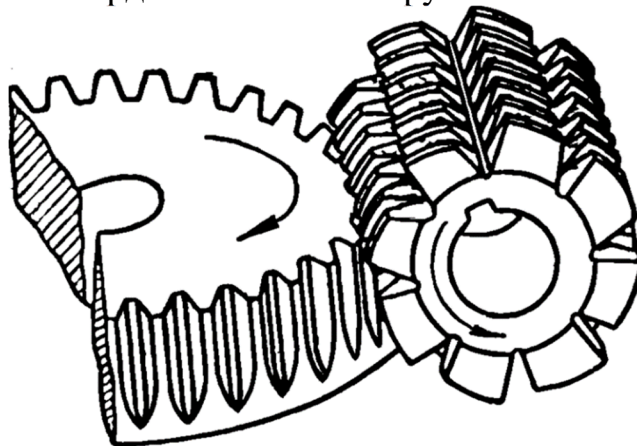


Рис. 1. Процесс нарезания зубьев колеса червячной фрезой

Главными достоинствами твердосплавного инструмента является возможность сохранения высокой износостойкости и твердости режущих кромок при высоких температурах, составляющих 900-1500°С. При этом данная группа материалов не склонна к образованию наростов на своей поверхности в процессе обработки, что снижает вероятность дефектов на поверхности изделия и увеличивает время эксплуатации фрезы [2].

Стоит отметить, что при обработке твердосплавными фрезами можно достигать скоростей резания вдвое больших, чем при использовании

быстрорежущих сталей [3]. Сочетание прочностных характеристик, температурной стойкости и высоких скоростей резания позволяет применять червячные твердосплавные фрезы для нарезания зубчатых колёс, как из цветных сплавов, так и из римамида.

Наибольшее влияние на стойкость инструмента при обработке полимерных материалов оказывает скорость резания. Поскольку полимерные материалы обладают меньшей температурой плавления, чем металлы, высокие температуры, возникающие в зоне контакта режущей кромки и поверхности заготовки, оказывают дестабилизирующее влияние на процесс резания. Следствием этого является снижение срока службы инструмента, а также повышение вероятности возникновения дефектов на поверхности изделия [4]. Низкие скорости резания, при обработке полимерных материалов, ведут к повышению температуры в зоне контакта, что приводит к образованию задиров на поверхности заготовки. Из этого следует, что для обеспечения наилучшей шероховатости необходимо производить обработку римамида при высоких скоростях резания.

Таким образом, можно заключить, что для нарезания зубьев червячного колеса на заготовке из римамида необходимо применять червячные фрезы, выполненные из твердосплавных материалов, поскольку они способны обеспечить требуемый уровень точности при высокой производительности и достаточной стойкости инструмента.

Список литературы

1. Чечуга А.О. Увеличение КПД зубчатых передач за счет использования современных полимерных материалов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – Вып. 9. – С. 38-40.
2. Мойсенко О.И., Павлов Л.Е., Диденко С.И. Твердосплавные зуборезные инструменты. – М.: Машиностроение, 1977. – 190 с.
3. Грязев М.В., Федоров Ю.Н., Артамонов В.Д. Анализ процессов зубонарезания цилиндрических зубчатых колес: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2009. – 384 с.
4. Чечуга А.О. Анализ процессов возникновения отклонений на поверхности зубьев червячных колёс // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – Вып. 12. – С.279-281.

Сведения об авторах:

Чечуга Антон Олегович – аспирант;

Маликов Андрей Андреевич – д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Пищов М.Н., Бельский С.Е.

*Белорусский государственный технологический университет, Минск,
Республика Беларусь*

Ключевые слова: конструкционные стали, испытания, усталостное разрушение, поверхностное упрочнение, микротвердость, дислокации, вакансии.

Аннотация. В статье изучены изменения ряда физико-механических характеристик конструкционной стали при проведении усталостных испытаний. Испытания проводились в условиях знакопеременного изгиба с использованием частот нагружения 0,3; 3,0; 9,0 и 18,0 кГц на образцах, прошедших поверхностное упрочнение боросилицированием. Показано, что микротвердость и плотность дислокаций исследованного материала на начальном этапе испытаний возрастают, что характеризует развитие процесса упрочнения материала, сменяющегося разупрочнением на заключительном этапе. Установлено, что поверхностное упрочнение принципиально не меняет особенности развития усталостной повреждаемости конструкционной стали в рассмотренном диапазоне частот испытаний.

ANALYSIS OF THE PROCESS OF DEVELOPMENT OF FATIGUE FAILURE OF STRUCTURAL STEELS

Pishchev M.N., Belsky S.E.

Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

Keywords: structural steels, testing, fatigue failure, surface hardening, microhardness, dislocations, vacancies.

Abstract. This article examines changes in a number of physical and mechanical properties of structural steel during fatigue testing. Tests were conducted under alternating bending conditions using loading frequencies of 0.3; 3.0; 9.0, and 18.0 kHz on specimens surface-hardened by borosiliconization. It is shown that the microhardness and dislocation density of the studied material increase at the initial stage of testing, indicating the development of material hardening, followed by softening at the final stage. It is established that surface hardening does not fundamentally alter the characteristics of fatigue damage development in structural steel in the considered test frequency range.

Для изготовления изделий, работающих в условиях циклических нагрузок, а также термосмен обычно используются конструкционные стали. Стойкость подобной оснастки во многом определяется комплексом механических свойств, особенно усталостными характеристиками материала. Определение таких характеристик необходимо также для выбора рациональных параметров термической и химико-термической обработки таких изделий. Однако используемые в настоящее время методики низкочастотных испытаний являются весьма длительными и энергоемкими, особенно при наработке большого числа циклов нагружения (10^6 - 10^7 циклов). Поэтому рассмотрена возможность использования высоких частот нагружения (18,0 кГц) для реализации усталостных испытаний штамповой стали.

Для определения влияния частоты нагружения на характеристики усталости материалов, а также характера изменений их физико-механических

свойств были использовано испытательное оборудование, позволяющее нагружать образцы для испытаний механическими колебаниями со следующими частотами: 0,15; 3; 9; 18 кГц [1, 2] Проведенные исследования кинетики физико-механических характеристик при проведении усталостных испытаний стали 5ХНМ [3] показали, что наиболее интенсивно изменения структурно-чувствительных характеристик для выбранных уровней переменных напряжений происходят при циклическом нагружении до 10^7 циклов. Так, например, увеличение микротвердости штамповой стали 5 ХНМ отмечалось уже после 10^5 циклов нагружения.

В трансформации физико-механических характеристик материалов просматриваются определенные закономерности. При циклическом деформировании происходит упрочнение материалов на начальных этапах нагружения, что находит свое отражение в повышении микротвердости, увеличении плотности дислокаций и микронапряжений. Затем наступает стадия насыщения, сменяемая на больших базах испытаний стадией разупрочнения, характеризующейся падением значений вышеперечисленных характеристик.

При достижении определенного числа циклов нагружения происходит насыщение материала вакансиями, которые эффективно взаимодействуя с движущимися дислокациями обуславливают их закрепление и исчезновение. При дальнейшем увеличении числа циклов нагружения происходит образование группы вакансий с большой энергией активации. Кроме того, повышение микротвердости связано с интенсивным пластическим деформированием микрообъемов материала. При этом в стенках дислокационных ячеек происходит зарождение и развитие субмикротрещин. По мере нарастания пластического деформирования материала развивается процесс разупрочнения, характеризующийся уменьшением плотности дислокаций, снижением уровня микронапряжений и микротвердости. Отсутствие существенных качественных различий в характере развития дислокационной структуры при высоких и низких частотах нагружения приводит к аналогии кинетики изменений рассматриваемых величин в исследованном диапазоне частот.

Очевидно, что с увеличением частоты происходит возрастание скорости деформации металлов при одном и том же числе циклов нагружения. Тем самым, релаксационные процессы, играющие существенную роль при статическом нагружении, с ростом частоты нагружения замедляются. Пропорционально частоте нагружения увеличивается и количество циклов до начала протекания процесса разупрочнения. Увеличение частоты, приводящее к повышению скорости упругой деформации, способствует и росту скорости движения дислокаций; при этом повышается эффективность их размножения. Кроме того, с повышением частоты увеличивается и количество вакансий, и возникает их исключительно высокая концентрация, в результате чего происходит конденсация их в диски, параллельные наиболее плотно упакованным плоскостям. При достижении некоторого критического размера диска его стороны сплюсчиваются и соединяются вместе, образуя дислокационную петлю. Все это приводит к упрочнению, в результате чего повышается плотность дислокаций и микротвердости.

Следует отметить, что подобные зависимости характерны и для повышенных температур испытаний штамповой стали 5ХНМ [3]. Повышение

температуры способствует более раннему протеканию процессов упрочнения-разупрочнения в связи с активацией взаимодействия дислокаций и точечных дефектов, а также передвижения дислокаций.

Результаты усталостных испытаний также показали, что форма кривых усталости с увеличением частоты не изменяется (рис. 1). Кривые усталости для разных частот располагаются практически эквидистантно. Можно отметить монотонное увеличение усталостной долговечности с ростом частоты нагружения.

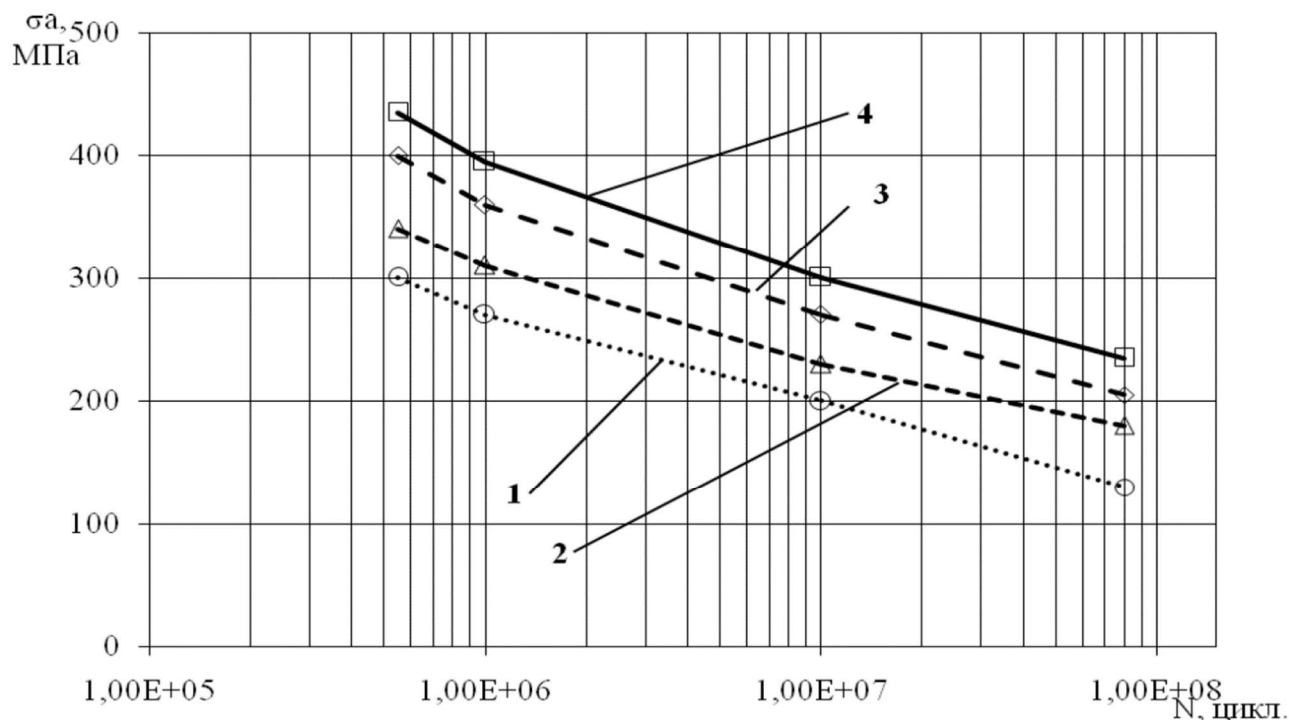


Рис. 1. Усталостные кривые для стали 5ХНМ при испытаниях на различных частотах нагружения: 1 – 0,3 кГц; 2 – 3,0 кГц; 3 – 9,0 кГц; 4 – 18 кГц

Приведенные исследования показали, что, несмотря на определенные количественные различия кинетики физико-механических характеристик рассматриваемых материалов, процесс усталостного разрушения у них развивается по одним и тем же закономерностям, характеризуясь сочетанием процессов упрочнения-разупрочнения. Это подтверждает единую физическую природу развития усталостной повреждаемости в рассмотренном диапазоне частот и температур и, следовательно, принципиальную возможность реализации ускоренных усталостных испытаний с использованием высоких частот нагружения.

Список литературы

1. Кузьменко В.А., Матохнюк Л.Е. Использование методики высокочастотного циклического нагружения для ускоренных испытаний усталостных характеристик материалов // Техническая мысль. – 1979. – Т. 16, №2. – С. 113-116.
2. Кузьменко В.А., Матохнюк Л.Е., Войналович А.В. Применение методов высокочастотного нагружения для ускоренного определения влияния технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов на сопротивление усталостному разрушению. Сообщение 2 // Проблемы прочности. – 1986. – №3. – С. 30-33.
3. Малашенков С.П., Бенгус Г.Ю. К вопросу оценки усталостной долговечности конструкционных материалов при варьировании частоты циклического нагружения //

Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения: доклады II Всесоюзного семинара. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 15-18.

Сведения об авторах:

Пицов Михаил Николаевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры Материаловедение и проектирование технических систем;

Бельский Сергей Евграфович – к.т.н., доцент, доцент кафедры Материаловедение и проектирование технических систем.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНСИСТЕНТНОЙ СМАЗКИ

Бирюков В.П., Якубовский А.А.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва*

Ключевые слова: полимеры, полиэфирэфиркетон, полиэфиримид, полифенилсульфид, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, коэффициент трения.

Аннотация. В данной работе рассматриваются результаты испытаний по определению коэффициентов трения и потери массы полиэфирэфиркетона, полиэфиримида, полифенилсульфида, и сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Трибологические испытания были проведены на возвратно-поступательной машине трения с использованием консистентной смазки. Установлено, что образцы сверхвысокомолекулярного полиэтилена имели в 1,7-2,5 раза меньший коэффициент трения и 1,2-2,3 раза меньшую потерю массы по сравнению с другими полимерами.

DETERMINATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMERS USING GREASE

Biryukov V.P., Yakubovsky A.A.

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow*

Keywords: polymers, polyetheretherketone, polyetherimide, polyphenylsulfide, ultra-high molecular weight polyethylene, coefficient of friction.

Abstract. This paper discusses the results of tests to determine the coefficients of friction and weight loss of polyesteretherketone, polyetherimide, polyphenyl sulfide, and ultra-high molecular weight polyethylene. Tribological tests were performed on a reciprocating friction machine using grease. It was found that the samples of ultrahigh molecular weight polyethylene had a 1.7-2.5 times lower coefficient of friction and 1.2-2.3 times lower mass loss compared to other polymers.

Применение полимеров в машиностроении нашло применение благодаря, снижению трудоемкости в процессе обработки и создания деталей нужных параметров, а по своим характеристикам некоторые из них не уступают сталям. Их преимущество перед сталями и цветными металлами не только в простоте обработки, а также и в том, что они значительно облегчают конструкцию, уменьшают коэффициенты трения, что снижает степень износа трибосопряжений, а также снижается уровень шума работающих машин.

В данном [1] исследовании образцы полиэфиримида были изготовлены в виде втулки с диаметром 40 мм и высотой 20 мм. Трибологические испытания по определению коэффициентов трения при комнатной температуре и при 200С°, были проведены на машине трения по схеме «штифт (сплав на основе кобальта НА188) – втулка (полиэфиримид)» при нагрузке 50 Н, частоте вращения 10 мин⁻¹ и времени цикла 6 мин. Трибологические испытания показали, что при увеличении температуры коэффициент трения снижался до 0,3, что в 1,5 раза ниже чем коэффициент трения полученный при комнатной температуре.

Образцы полиэфиримида и его композиты с добавлением углеродных волокон были изготовлены в виде штифтов с размерами 30×6×7 мм. Испытания по определению коэффициентов трения проводили на машине трения по схеме «штифт (образец-полимер)-диск (сталь)» при нагрузке 200 Н, скорости скольжения 2 м/с и временем испытания 210 с. Коэффициент трения чистого полиэфиримида составил 0,21 далее, с увеличением массовой доли углеродного волокна коэффициенты трения уменьшались до 0,16.

Для проведения экспериментов были изготовлены [3] образцы из чистого полифенилсульфида и композитов на его основе с добавлением углеродного волокна 25% и 35% в виде пластин с размерами 24×8×1 мм. Трибологические испытания проводили на машине трения по схеме «шарик (сталь, диаметр 10 мм) – пластина (полимер, композит)» при нагрузке 150, 300 Н, длине хода 3 мм, скорости скольжения 0,27, 0,55 м/с, в течение 10 мин. Коэффициент трения чистого полифенилсульфида был 0,18 и 0,25 при нагрузках 150 и 300 Н соответственно, с добавлением 35% углеродного волокна 0,12 и 0,26, с добавлением 25% углеродного волокна 0,1 и 0,23.

Целью работы являлось определение коэффициентов трения полимеров полиэфирэфиркетона, полиэфиримида, полифенилсульфида, сверхвысокомолекулярного полиэтилена на возвратно-поступательной машине трения при нанесении на поверхности образцов и контролобразцов консистентной смазки «Литол-24».

При проведении триботехнических и морфологических исследований были задействованы образцы полимеров фирмы Zedek полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) (1) – ZX324, полиэфиримида (ПЭИ) (2) – ZX410, полифенилсульфида (ПФС) (3) – ZX530, сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) (4) – INKULEN PE-9000. На рисунке 1 представлены фотографии образцов после испытаний. Испытания на трение и износ были проведены на машине возвратно-поступательного движения при нагрузке 200 Н, в течении 20 минут, длина хода ползуна составляла 2,5 мм. Контролобразец был изготовлен из стали 45 и имел поперечные канавки с шагом 4 мм для обеспечения гарантированного попадания смазки в зону трения. Для смазывания трущихся поверхностей использовали консистентную смазку «Литол-24».

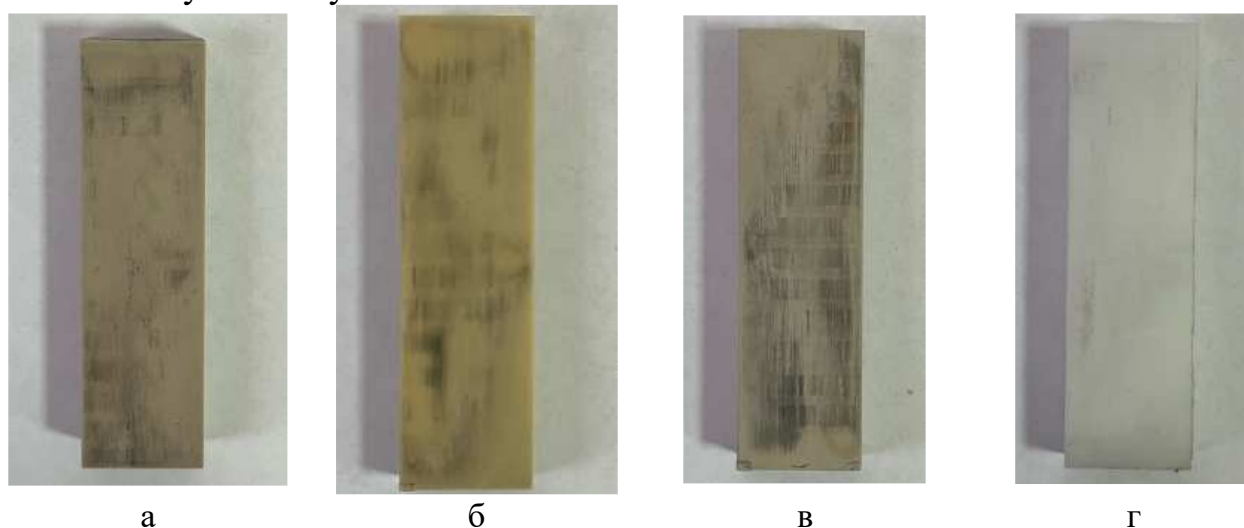


Рис. 1. Образцы полимеров после испытаний:
а – ПЭЭК, б – ПЭИ, в – ПФС, г – СВМПЭ

В таблице 1 представлены потери массы образцов после испытания на износ. Наибольший износ был у образца полифенилсульфида (3), за ним по мере уменьшения износа следовали полиэфиримид (4), полиэфирэфиркетон (1), и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (4). Наибольшее значение коэффициента трения был у образца полифенилсульфида (3) – 0,091, за ним следовал полиэфиримид (4) – 0,085 и полиэфирэфиркетон (1) – 0,013, а самый низкий коэффициент трения был у образца сверхвысокомолекулярного полиэтилена (4) – 0,036.

Табл. 1. Результаты испытаний полимеров

Образец	Масса до испытаний, г	Масса после испытания, г	Потеря массы, г	Средняя потеря массы образца, г
1	18,6472	18,6454	0,0018	0,0013
	18,6454	18,6444	0,001	
	18,6244	18,6232	0,0012	
2	18,4682	18,4666	0,0016	0,002
	18,4666	18,4642	0,0024	
	18,4342	18,4321	0,0021	
3	22,4989	22,4961	0,0028	0,0025
	22,4959	22,4936	0,0023	
	22,4636	22,4612	22,4912	
4	13,2256	13,2243	0,0013	0,0011
	13,2243	13,2233	0,001	
	13,2033	13,2021	0,0012	

Выводы. По результатам испытаний установлено, что образцы INKULEN PE-9000 имели в 1,7-2,5 раза меньший коэффициент трения, чем образцы ZX-324, ZX-410, ZX-530 и 1,2-2,3 раза меньший износ по сравнению с другими образцами.

Финансирование. Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023.

Список литературы

1. Zou Y., Cheng B., Luo Q., Zheng Y., Shao T. High-temperature reciprocating torsional tribometer for pin-bushing friction pairs // Tribology International. 2026, vol. 214, pp. 111372. DOI: 10.1016/j.triboint.2025.111372.
2. Li J.X., Liang M., Zhao X.W., Zhou S.T., Zou H.W. Fabrication of mechanically robust self-lubricating polyphenylene sulfide composites for high PV (pressure× velocity) applications // Chinese Journal of Polymer Science. 2026, vol. 44, pp. 140-153. DOI: 10.1007/s10118-025-3486-4.
3. Roshan R., Ganapathi A., Bheemappa S. Friction and wear behavior of short carbon fibers milled polyphenylene sulfide composites // Jurnal Tribologi. 2024, vol. 40, pp. 61-77.

Сведения об авторах:

Бирюков Владимир Павлович – к.т.н., ведущий научный сотрудник;
Якубовский Антон Алексеевич – младший научный сотрудник.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЧЕРВЯЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ

Чалаби И.Г.

Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Ключевые слова: червячная передача, анализ отказов, износ, питтинг, поломка зубьев, вероятность безотказной работы.

Аннотация. В работе был проведен сравнительный анализ надежности червячных передач по критериям отказа - поломке зубьев и износу, которые имеют взаимное влияние. На основе этого анализа был разработан метод выбора модуля, от которого зависит напряжение в корне зуба. Исследования показали, что повышение прочности зубьев на изгиб имеет большое практическое значение как при односторонних, так и при двусторонних нагрузках. Это также позволяет значительно увеличить срок службы червячных передач, нагруженных односторонне, за счет замены их рабочих поверхностей на нерабочие.

COMPARATIVE ANALYSIS OF WORM GEAR RELIABILITY INDICATORS ACCORDING TO VARIOUS CRITERIA

Chalabi I.G.

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Keywords: worm gear, failure analysis, wear, pitting, tooth breakage, survival probability.

Abstract. In this work, a comparative reliability analysis of worm gears according to failure criteria tooth breakage and wear, which have mutual interactions, was carried out. Based on this analysis, a method for selecting the module on which the tooth root stress depends was developed. Studies have shown that increasing the bending strength of teeth is of great practical importance both with one-sided and with two-sided loads. This also makes it possible to significantly increase the service life of worm gears loaded on one side by replacing their working flanks with non-working ones.

Червячные передачи обладают рядом преимуществ по сравнению с другими передачами, как, большое передаточное отношение, компактность, высокая кинематическая точность, плавная и малошумная работа, возможность самоторможения и т.д. Благодаря этим качествам червячные передачи широко применяются в приводах различных оборудования, например, в подъемно-транспортных машинах, станках, сельскохозяйственных устройствах.

В червячных передачах колесо является обычно самым слабым элементом, поэтому в большинстве случаев его повреждение влияет на надежность и срок службы всей передачи. Типы повреждений, возникающих на червячном колесе (рис. 1), можно разделить на две группы. Первая группа включает повреждения рабочих поверхностей, такие как образование питтинга, износ и заедание, которые в основном возникают на переднем профиле зубьев червячного колеса в результате контактного напряжения σ_H . Ко второй группе относятся поломка зубов, возникающие в результате напряжений изгиба σ_F на ножке зуба.

Исследования показывают, что частые повреждения зубьев червячного колеса, такие как питтинг, износ и поломка зубьев, имеют взаимное взаимодействие [1]. При достижении критического размера питтинга, с одной

стороны, увеличивается износ, с другой стороны, повышенный износ может привести к остановке образования дальнейшего питтинга. Из-за постепенного износа во многих случаях следы питтинга могут даже исчезнуть. А из-за повышенного износа постепенно уменьшается толщина зубьев червячного колеса, что значительно увеличивает вероятность поломки зубьев.

В [2, 3] был проведен сравнительный анализ срока службы различных цилиндрических передач в соответствии с различными критериями отказов. На основе этого анализа был разработан метод правильного выбора материалов шестерни, модуля и коэффициента ширины шестерни, чтобы повысить прочность зубьев на изгиб.

Поломка зубьев более опасен, чем износ или питтинг поверхности зуба. Эти поверхностные повреждения не всегда приводят к полному разрушению червячного колеса, и в некоторых случаях их можно предотвратить несколькими способами. Например, активация нерабочей обратной поверхности червячного колеса после определенного периода работы может значительно увеличить срок службы редуктора, если вероятность поломки зубьев мала. Таким образом, сравнительный анализ надежности червячных колес по критериям питтинга, износа и поломки зубьев может иметь большое практическое значение.

Как уже отмечалось, надежность червячной передачи в значительной степени зависит от уменьшения толщины зубьев в результате износа зубьев червячной передачи. Но в большинстве случаев поломка зубов происходит в результате уменьшения толщины зуба из-за износа. Схема определения вероятности безотказной работы червячного колеса по критерию поломка зубьев с учетом уменьшения толщины зубьев в результате износа показана на рисунке 2. Как видно из рисунка, на первом этапе эксплуатации вероятность безотказной работы червячного колеса из-за поломки зубьев очень высока, поскольку износ боковых поверхностей зубьев очень мал. С уменьшением толщины зуба в результате износа увеличивается нагрузка на стопу и, следовательно, вероятность поломки зуба. При достижении максимального значения нагрузки на стопу зуба t_{Fmax} происходит поломка зуба.

Однако в большинстве практических случаев превышение допустимого износа может произойти до момента поломки зуба. Поэтому большое значение имеет определение вероятности безотказной работы по напряжениям изгиба в момент возникновения допустимого износа – $R(t_{ДИ})$. Поскольку существующая нагрузка и несущая способность зависят от множества влияющих факторов, в общем случае можно предположить, что они приблизительно нормально распределены в соответствии с центральной предельной теоремой. Для этого случая надежность может быть определена соответствующим образом [4]:

$$R(t_{ДИ}) = \Phi \left(\frac{\bar{\sigma}_{FG}^Z - \bar{\sigma}_F^Z}{\sqrt{(V_{\sigma FG} \cdot \bar{\sigma}_{FG}^Z)^2 + (V_{\sigma F} \cdot \bar{\sigma}_F^Z)^2}} \right) \quad (1)$$

где $\Phi(x)$ представляет функцию стандартного нормального распределения [5]. $V_{\sigma FG}$, $V_{\sigma F}$ – коэффициенты вариации несущей способности и нагрузки; $\bar{\sigma}_F^Z$ – среднее значение напряжения изгиба на ножке в момент возникновения

допустимого износа; σ_{FG}^Z – среднее значение предельного номинального напряжения изгиба на ножке в момент возникновения допустимого износа.

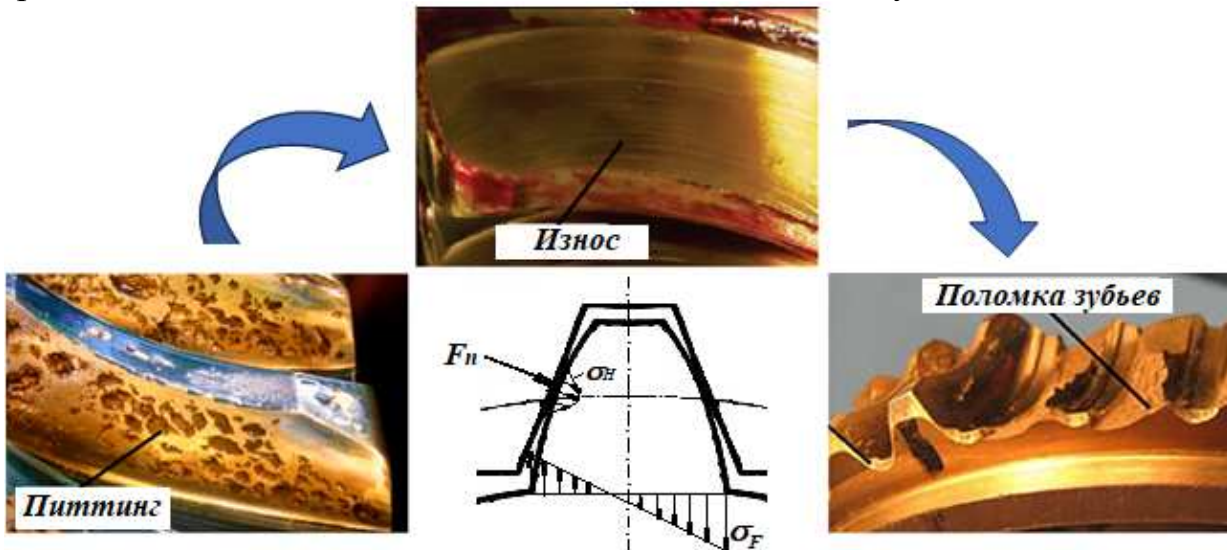


Рис. 1. Основные виды повреждения зуба червячного колеса

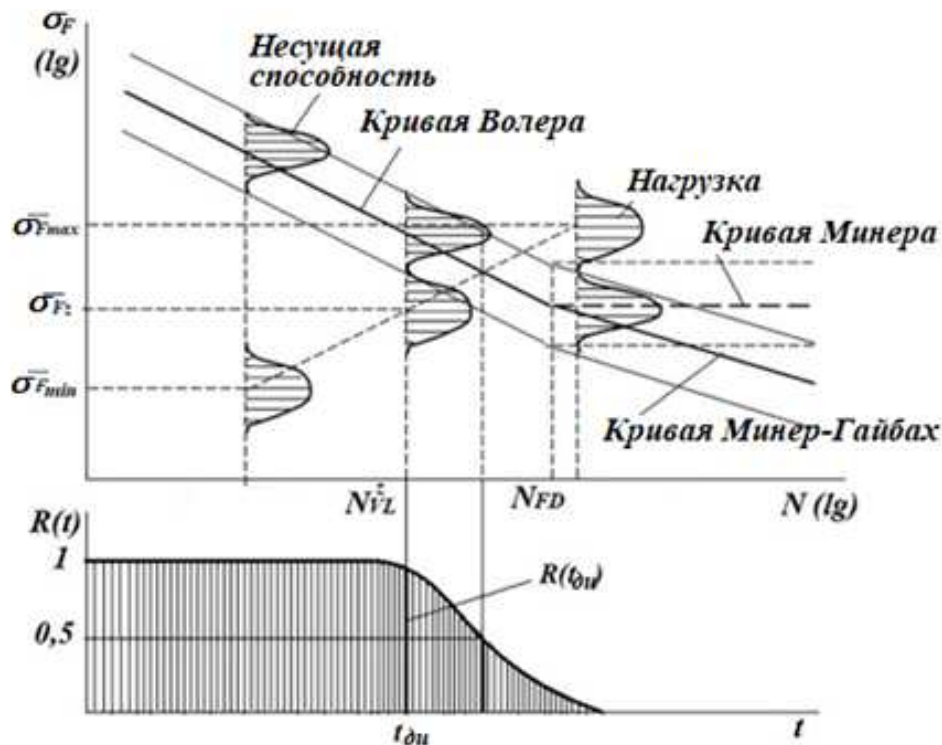


Рис. 2. Схема определения вероятности безотказной работы червячного колеса при поломке зуба с учетом уменьшения толщины зуба в результате износа

Здесь σ_{FG}^Z можно определить следующим образом [4]:

$$\bar{\sigma}_{FG}^Z = \bar{\sigma}_{Film} \cdot \left(\frac{N_{FD}}{N_{VL}^Z} \right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{при } \bar{\sigma}_F^Z \geq \sigma_{Film}, \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_{FG}^Z = \bar{\sigma}_{Film} \cdot \left(\frac{N_{FD}}{N_{VL}^Z} \right)^{\frac{1}{2k-1}} \quad \text{при } \bar{\sigma}_F^Z < \sigma_{Film}. \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_{Film}$ – среднее значение предела выносливости по напряжениям изгиба; N_{FD} – число циклов нагружения, соответственно пределу выносливости; N_{VL}^Z – число циклов нагружения, соответственно моменту возникновения допустимого износа; k – степень кривой усталости.

На рисунке 3 показаны функции плотности нагрузки и несущей способности червячного колеса при межосевом расстоянии $a = 100$ мм, передаточном отношении $u = 20,5$, модуле зацепления $m = 4$ мм и вращательном моменте ведомого вала $T_2 = 1200$ Нм в момент возникновения допустимого износа $\Delta s_{lim} = 1,2$ мм. Расчет по уравнению (1) показал, что вероятность безотказной работы в этом случае составляет $R(t_{ou}) = 0,869$. При этом предполагалось, что коэффициенты вариации несущей способности и нагрузки равны $V_{\sigma F} = 0,05$ и $V_{\sigma F} = 0,03$.

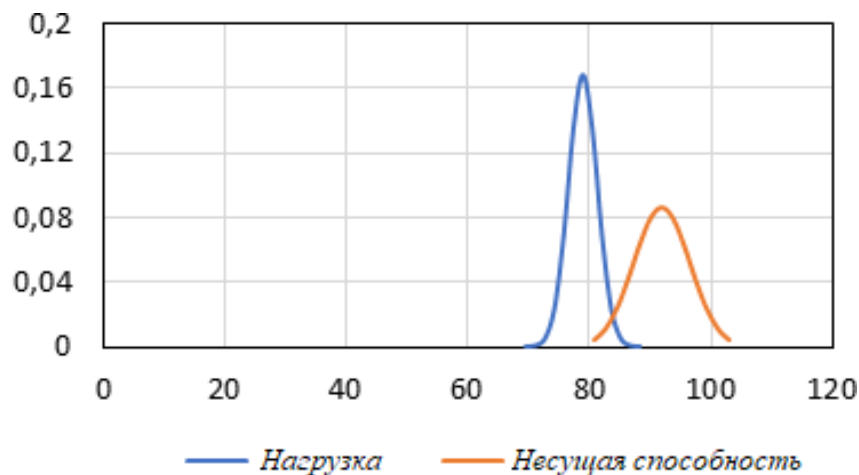


Рис. 3. Нормальная плотность нагрузки и несущей способности для червячных колес с $a = 100$ мм, $u = 20,5$, $m = 4$ мм и $T_2 = 1200$ Нм в момент возникновения допустимого износа $\Delta s_{lim} = 1,2$ мм

Соответствующие расчеты также были выполнены для различных размеров и нагрузок. Результаты этих расчетов были показаны графически на рисунке 4.

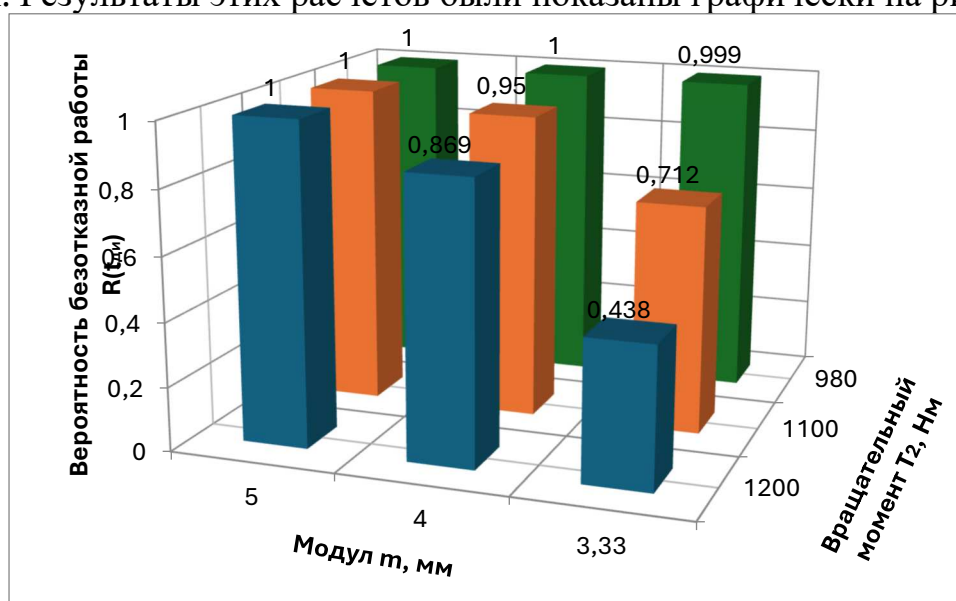


Рис. 4. Вероятность безотказной работы червячного колеса по критерию поломки зубьев в момент возникновения допустимого износа для различных модулей и выходного крутящего момента ($a = 100$ мм, $n_1 = 500$ мин-1)

Такие расчеты позволяют проводить сравнительный анализ срока службы и надежности в соответствии с различными критериями отказов. При правильном выборе геометрических и кинематических параметров, а также материалов для червячного колеса прочность зубьев может быть увеличена.

Таким образом, по проведенным исследованиям можно сделать следующие **выводы**.

1. Соотношение срока службы червячных колес в соответствии с критериями поломки зубьев и износа зависит от геометрических и кинематических параметров передачи, механических свойств материалов. Увеличивая модуль, можно увеличить надежность.

2. Активируя нерабочую поверхность зубьев червячного колеса после определенного периода работы, если направление вращения зубчатого колеса не изменяется в течение всего срока службы, срок службы червячной передачи может быть увеличен.

Список литературы

1. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: Учебник. – М.: Высшая школа, 2008. – 408 с.
2. Chalabi I. Comparative Service Life Analysis for Gears According to Different Failure Criteria // Journal of Failure Analysis Prevention. 2020, vol. 20, pp. 2137-2144. doi.org/10.1007/s11668-020-01029-y.
3. Iftikhar Chalabi, Beyali Ahmedov, Shahin Charkasov, Shahid Yusubov. Comparative service life analysis for Novikov gears of mechanical drives of sucker-rod pumps // Journal SOCAR Proceedings. 2022, special iss. 2, pp. 53-59. DOI: 10.5510/OGP2022SI200776.
4. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин: Учебное пособие. – М.: «Высшая школа», 1988. – 240 с.
5. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

Сведения об авторе:

Чалаби Ифтихар Гурбанали оглы – д.т.н., доцент кафедры «Дизайн машин, мехатроника и промышленные технологии».

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА НИЗКИХ ЧАСТОТ

Кабилов И.Ф., Подгайный Я.А.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Ключевые слова: генератор низких частот, ударные волны, проницаемость, призабойная зона пласта, увеличения нефтеотдачи, проектирование нефтегазового оборудования.

Аннотация. На снижение притока нефти и газа к забою скважины оказывают влияние множество факторов, одним из которых являются загрязнение порового пространства призабойной зоны пласта. Данная проблема решается проведением капитального ремонта на скважине. В зависимости от характера загрязнения выбираются способы воздействия, который не всегда эффективен с точки зрения затрат и получаемого эффекта. В данной работе предлагается проект модель устройства для генерирования ударных волн низкой частоты с целью проведения щадящего воздействия на призабойную зону пласта.

DESIGN OF A LOW-FREQUENCY GENERATOR MODEL

Kabirov I.F., Podgayny Y.A.

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

Keywords: low-frequency generator, shock waves, permeability, near-wellbore zone, enhanced oil recovery, design of oil and gas equipment.

Abstract. There are many factors that can affect the flow of oil and gas to the wellbore, one of which is the contamination of the pore space in the near-wellbore zone. This problem can be solved by performing major repairs on the well. Depending on the nature of the contamination, different methods of treatment can be used, but these methods may not always be cost-effective or effective. In this paper, we propose a design for a device that generates low-frequency shock waves to provide a gentle treatment of the near-wellbore zone.

В качестве исходных данных для проектирования генератора волн возьмём вертикальную скважину. Ствол забоя не обсажен, диаметром по долоту 216 мм, располагается на глубине 3200-3225 м. Мощность обрабатываемого пласта составляет примерно 1,5 м. проницаемость коллектора составляет 954 мДа. Проницаемость призабойной зоны пласта (ПЗП) ухудшена на 70%, радиусе до 4 м. Кольматация порового пространства частицами песка, цементированными смолистыми отложениями.

Для определения энергетических параметров установки необходимо рассчитать давление, которое будет вызывать разрушение кольматирующей корки в поровом пространстве. В литературе подобные исследования встречаются достаточно редко. Многие авторы [1-6] исходят из того, что микрочастицы породы слабо цементированы и для сдвига достаточно создать направленное течение флюида. Также можно выделить авторов [7], которые считают, что такие частицы застревают в поровом пространстве и обрастают коркой из смолистых отложений. В любом случае необходимо решить уравнение пьезопроводности для данных условий [8]. В таблице 1 приведены результаты расчета изменения абсолютного давления от стенки скважины требуемое для разрушения кольматационной корки.

Табл. 1. Результаты расчета

Наименование	Варианты расчета							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Координата от стенки скважины, мм	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
Абсолютное давление атм.	0,43	0,35	0,25	0,22	0,16	0,12	0,1	0,04

Расчеты выполнены для указанной выше проницаемости и диаметра скважины при пластовом давлении 80 атм. Считаем, что кольматационная корка слабо сцементирована.

На рисунке 1 изображена схема компоновки устройства создающие периодические волны давления, разрушающие кольматационную корку на внутренней поверхности скважины.

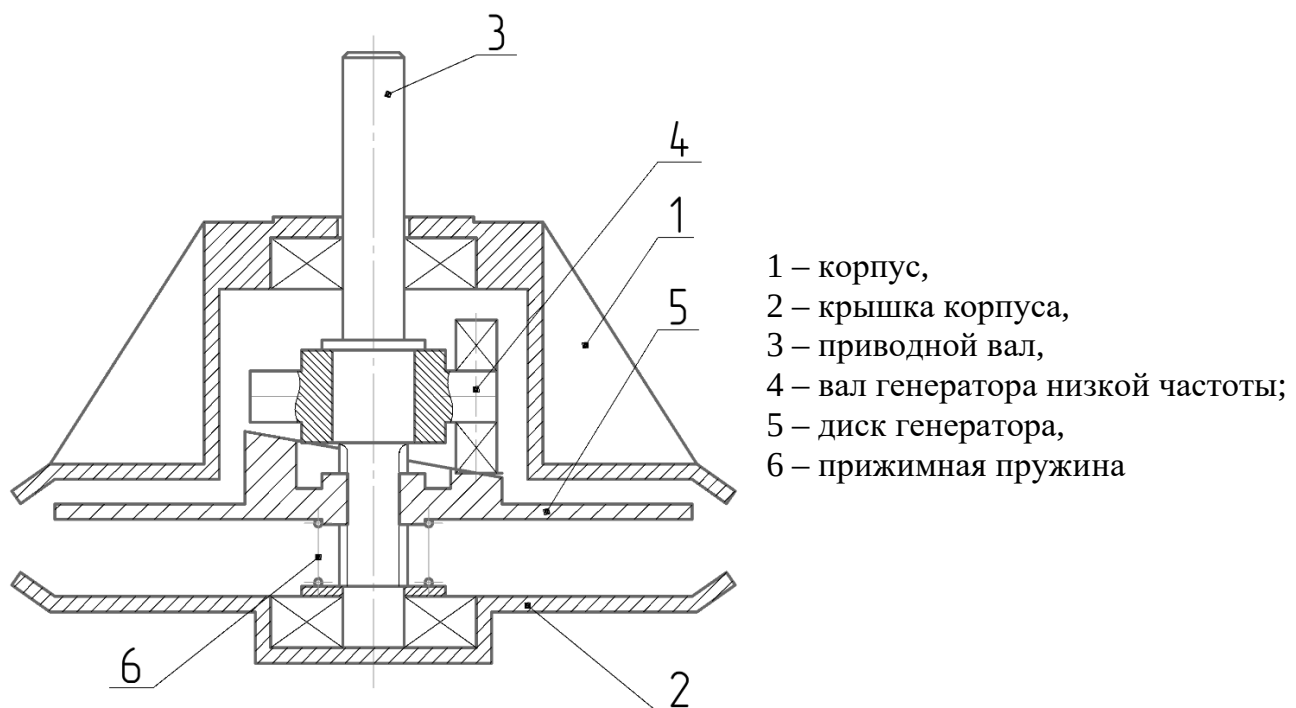


Рис. 1. Устройство генератора низкой частоты

В качестве элемента, генерирующего волны в жидкой среде, рассмотрим пластину дисковой формы, которая совершает возвратно поступательные движения, с заданной частотой.

Исходя из этого на диск должны действовать две силы, первая перемещает и создает амплитуду, вторая возвращает в исходное положение. Причем, следует отметить, что первая сила должна действовать в первой фазе движения, а вторая сила во второй. Тогда получаем, что сила F_1 действует короткий промежуток временно. Сила F_2 будет действовать постоянно, при условии $F_1 > F_2$. Конструктивно сила F_1 будет возникать при накатывании ролика на кулачок толкая диск вниз (рис. 2, а), а сила F_2 – при сжатии пружины (рис. 2, б) [1].

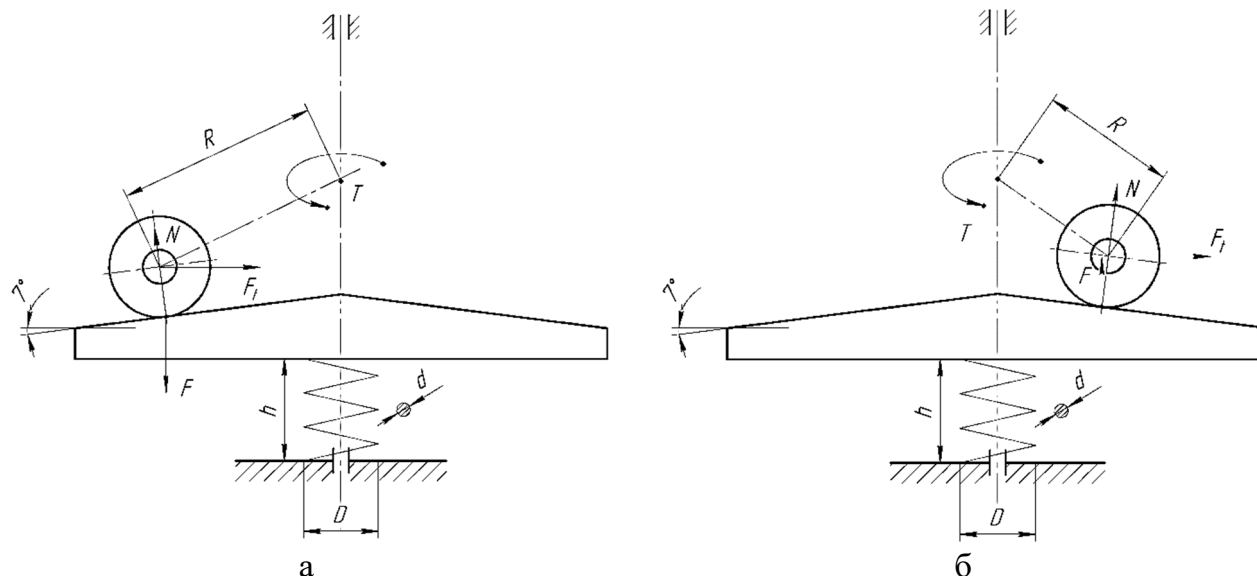


Рис. 2. Расчетные схема работы генератора НЧ, фаза сжатия и растяжения пружины

Таким образом, предложена модель генератора волн давления для разрушения кольматационной корки. Дальнейшее развитие проекта – это создание действующей модели.

Список литературы

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1975. – 640 с.
2. Глущенко В.Н., Силин М.А. Нефтепромысловая химия. В 5-ти томах / Под ред. проф. И.Т. Мищенко. – М.: Интерконтакт Наука, 2009.
3. Демяненко Н.А., Минеев Б.П. Эффективность применения метода переменных давлений при вызове притока из пласта // Нефтегазовая геология, геофизика и бурение. – 1985. – №6. – С. 51-55.
4. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 465 с.
5. Дудова А.О. Оценка эффективности воздействия кислот и других химических реагентов, применяемых с целью интенсификации притока // Бурение и нефть. – 2009. – №6. – С. 30-31.
6. Есипенко А.И., Петров Н.А., Калашнев В.В. Комплексный подход к решению проблем кислотных обработок на месторождении западной Сибири // Нефтепромысловое дело: научно-технический журнал. – 1995. – №7. – С. 28-32.
7. Зайцев М.В., Михайлов Н.Н. Влияние околоскважинной зоны на продуктивность скважин // Нефтяное хозяйство. – 2004. – №1. – С. 64-66.
8. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Заманова Г.Ф. Эффект низкочастотного торможения фильтрационной волны в слоисто-неоднородных проницаемых пластах // Прикладная механика и техническая физика. – 2018. – Т. 59, №3. – С. 103-110.

Сведения об авторах:

Кабилов Ильшат Файзелькавичевич – к.ф.-м.н., доцент;
Подгайный Ярослав Андреевич – студент.

РАЗРАБОТКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С МУЛЬТИМОДАЛЬНЫМ АДАПТИВНЫМ АЛГОРИТМОМ ДЛЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ФЛАНЦЕВ

Лицин К.В., Басков С.Н., Крячков Р.А., Аксёнов А.А., Быстров А.А.

*Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский институт), Челябинск*

Ключевые слова: робототехнический комплекс, машинное зрение, автоматизация, импортозамещение, цифровой двойник, алгоритм управления, промышленный робот.

Аннотация. В статье представлена разработка отечественного робототехнического комплекса на базе машинного зрения для полной автоматизации операций с фланцами: контроля геометрии и дефектов, маркировки, консервации и упаковки. Научная новизна заключается в создании интегрированного алгоритма управления, обеспечивающего синхронизацию промышленного робота с технологическим оборудованием и параллельное выполнение операций. Для оптимизации и верификации системы был создан её цифровой двойник. Внедрение робототехнического комплекса обеспечивает рост производительности на 30–40%, стабилизацию качества и соответствует задачам импортозамещения.

DEVELOPMENT OF A ROBOTIC COMPLEX WITH A MULTIMODAL ADAPTIVE ALGORITHM FOR THE FLANGE MANUFACTURING PROCESS

Litsin K.V., Baskov S.N., Kryachkov R.A., Aksenov A.A., Bystrov A.A.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk

Keywords: robot-technical complex, machine vision, automation, import substitution, digital twin, control algorithm, industrial robot.

Abstract. The article presents the development of a domestic robot-technical complex based on machine vision for the full automation of operations with flanges: geometry and defect inspection, marking, preservation, and packaging. The scientific novelty lies in the creation of an integrated control algorithm that ensures synchronization of an industrial robot with technological equipment and parallel execution of operations. For system optimization and verification, its digital twin was created. The implementation of the robot-technical complex provides a productivity increase of 30-40%, stabilizes quality, and corresponds to the tasks of import substitution.

Введение

Современные экономические требования подчеркивают необходимость роботизации производства для повышения динамичности и конкурентоспособности, что подтверждается растущим уровнем внедрения промышленных роботов в России [1]. Особую актуальность этому придает задача импортозамещения в условиях ухода с рынка иностранных поставщиков [2].

Целью работы являлась разработка робототехнического комплекса (РТК) на базе машинного зрения для автоматизации операций с фланцами. Комплекс выполняет контроль габаритов и дефектов поверхности, маркировку по топологии, консервацию в масле К-17 и упаковку. Для достижения цели решались задачи: выбор и оптимальное размещение компонентов РТК, разработка стендов для контроля, консервации и упаковки, а также создание алгоритма работы всего

На рисунке 1 представлена схема расположения оборудования РТК в программной среде Visual Components.



Заключение

Разработанный робототехнический комплекс для автоматизации операций контроля, маркировки, консервации и упаковки фланцев позволяет увеличить эффективность на 30-40% по сравнению с ручным трудом.

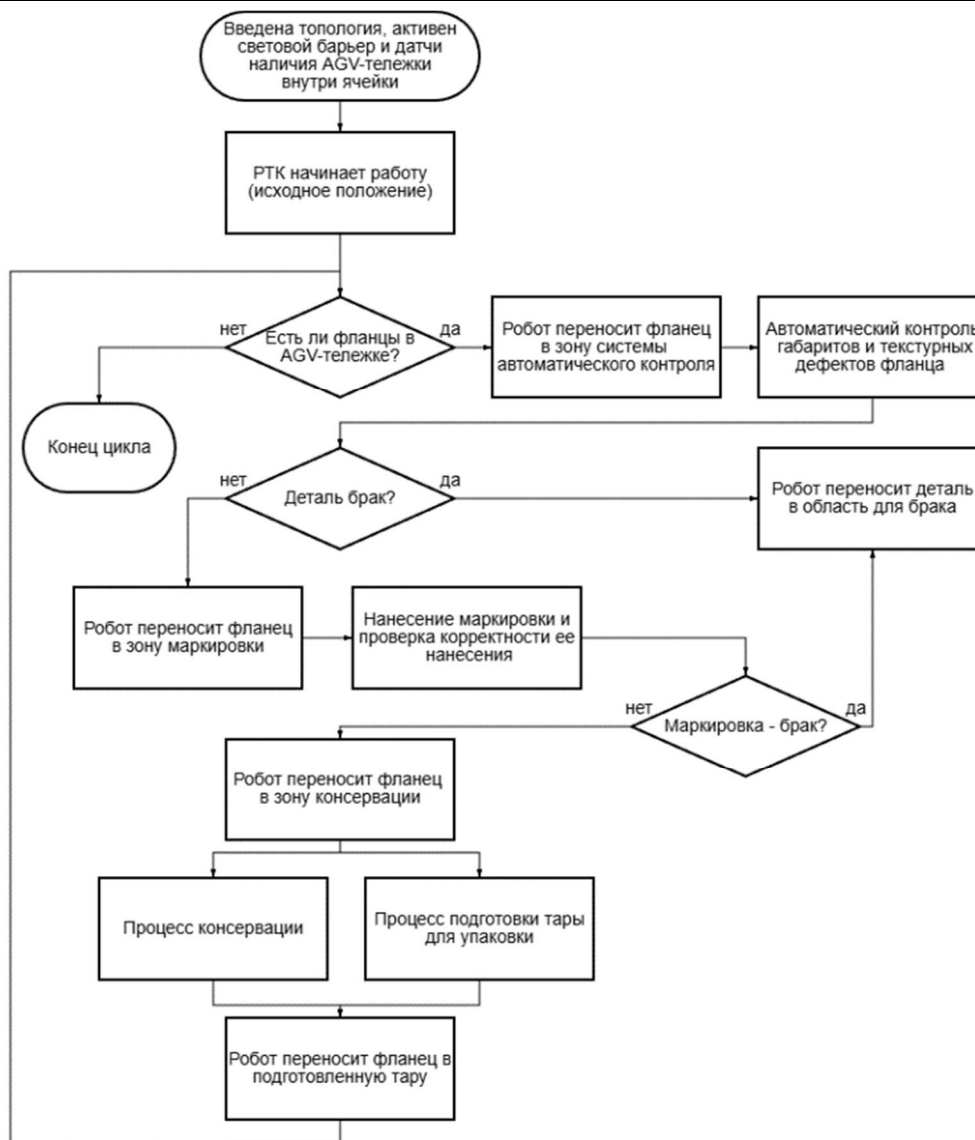


Рис. 2. Алгоритм работы разработанного комплекса

Финансирование. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-79-10376.

Список литературы

1. Фоменко Е.В., Лунева Т.В., Никитин Э.В. Реализация политики цифровой трансформации в обрабатывающей промышленности России // Индустриальная экономика. – 2022. – №5. – С. 614-620.
2. Елемесов Б.А., Картамышева А.А., Шахновский А.Н., Лицин К.В. Разработка системы параллельного переноса на базе программируемого промышленного робота // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – №8. – С. 297-301.
3. Коровин Г.Б. Возможности применения цифровых двойников в промышленности // Вестник ЗабГУ. – 2021. – №8. – С. 124-133.

Сведения об авторах:

Лицин Константин Владимирович – к.т.н., доцент;

Басков Сергей Николаевич – к.т.н., доцент;

Кряков Роман Артёмович – студент;

Аксёнов Александр Андреевич – студент;

Быстров Алексей Александрович – студент.

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОБИЛЬНОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

Чалаби И.Г., Оруджаде Р.А.

Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Ключевые слова: мобильный робот, манипулятор, поисковые роботы, рука манипулятора, рабочая зона, степень свободы.

Аннотация. Мобильные роботы могут самостоятельно передвигаться и ориентироваться на определенной местности. Эти роботы, в отличие от стационарных роботов, физически не находятся в определенном месте и действуют независимо для выполнения определенных функций. Мобильные роботы используются в вооруженных силах, в поиске и разведке, в космосе, в сельском хозяйстве, в сервисной и исследовательской работе. В большинстве случаев мобильные роботы служат не только для передвижения, но и для выполнения определенных задач. Для этого на них необходимо установить один или несколько манипуляторов. Поисковые роботы (например, робот-сапер) используют специальный манипулятор, установленный на корпусе робота. Для того чтобы эти роботы могли выполнять свои функции, необходимо согласовать параметры движения мобильного робота и установленного на них манипулятора. В данной работе исследуется перемещение мобильного робота в зависимости от размера рабочей зоны. Полученные результаты могут быть распространены на другие мобильные роботы, выполняющие аналогичные функции (колесные, гусеничные и т.д.).

ANALYSIS OF THE FUNCTIONAL PARAMETERS OF A MOBILE ROBOT ARM

Chalabi I.G., Oruczade R.A.

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Keywords: mobile robot, manipulator, search robots, manipulator arm, work area, degree of freedom.

Abstract. Mobile robots can move independently and navigate certain terrain. These robots, unlike stationary robots, are not physically located in a specific location and act independently to perform certain functions. Mobile robots are used in the armed forces, in search and reconnaissance, in space, in agriculture, in service and research work. In most cases, mobile robots serve not only for movement, but also for performing certain tasks. To do this, one or more manipulators must be installed on them. Search robots (for example, a sapper robot) use a special manipulator mounted on the robot body. In order for these robots to perform their functions, it is necessary to coordinate the motion parameters of the mobile robot and the manipulator mounted on them. In this paper, the movement of a mobile robot is investigated depending on the size of the work area. The results obtained can be extended to other mobile robots performing similar functions (wheeled, tracked, etc.).

Мобильные роботы – это роботы, которые могут двигаться независимо и могут перемещаться по определенной местности. В отличие от стационарных роботов они физически не остаются в определенном месте и действуют независимо с целью выполнения определенных функций. Мобильные роботы взаимодействуют с окружающей средой, используя различные технологии, и действуют в соответствии с окружающей средой в зависимости от поставленной задачи. Они выбирают направление и избегают препятствий, анализируя окружающую среду, преследуя определенную цель. Этот процесс обычно выполняется с помощью датчиков (лидаров, ультразвуковых датчиков, камер и т.

д.) и обеспечивается системами управления. Некоторые мобильные роботы могут двигаться автономно для выполнения определенной задачи. Для передвижения мобильных роботов используются различные типы двигателей и аккумуляторов. По принципу создания движения и форме элемента движения мобильных роботов можно разделить на наземные, летающие, плавающие, ползающие и другие группы. Наземных роботов, в свою очередь, можно разделить на колесные, гусеничные, шагающие, ползучие. В зависимости от выполняемой роботами функции на них устанавливаются различные механизмы-манипуляторы (рис.1). Эти роботы, как правило, состоят из мобильной базы и манипулятора. Такие роботы широко используются в военной сфере, в поисково-разведывательных работах, в космосе, в сельском хозяйстве, на транспорте, в логистике и складских работах, в промышленности и автоматизации [1].

Для выполнения поставленной задачи в зависимости от места назначения мобильные роботы-манипуляторы должны выполнять следующие три функции [2].

1. Мобильность: робот должен иметь платформу, оснащенную современными навигационными системами, датчиками и камерами, позволяющими ему самостоятельно двигаться по заданному маршруту.

2. Манипуляция: манипулятор, установленный на роботе, должен уметь выполнять действия, присущие человеку: поднимать, транспортировать, сортировать или собирать предметы.

3. Интеллектуальность: современные мобильные роботы-манипуляторы должны уметь использовать искусственный интеллект и машинное зрение для распознавания объектов, определения оптимальных стратегий и адаптации к окружающей среде.

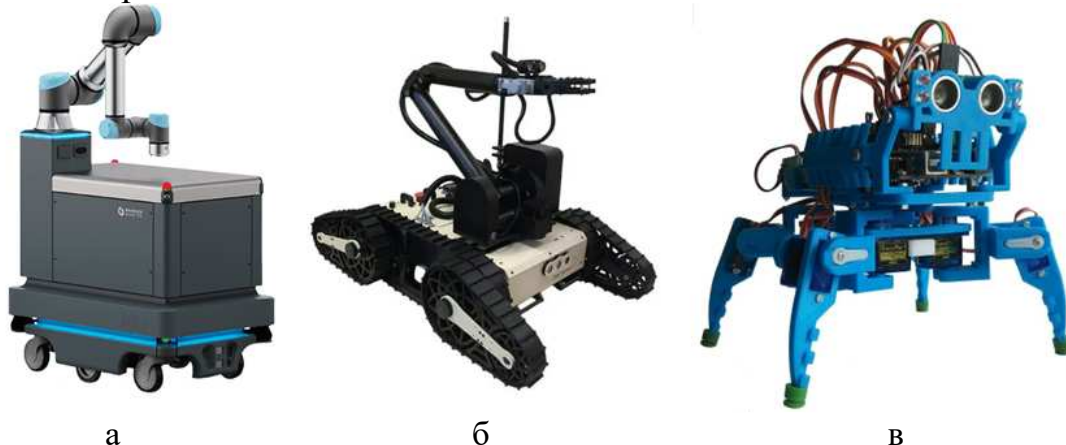


Рис. 1. Гусеничные (а), колёсные (б) и шагающие (в) мобильные роботы с установленным на них манипулятором

Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что для того, чтобы мобильный робот-манипулятор выполнял поставленную задачу, его движение и манипулятивная деятельность должны управляться на основе искусственного интеллекта. Во многих случаях мобильные роботы выполняют определенные задачи, перемещаясь по определенной зоне. К таким роботам можно отнести поисковые роботы, роботов, используемых в сельском хозяйстве. Для того чтобы роботы этого типа выполняли свои функции, возникает необходимость согласования параметров движения установленного на них манипулятора с

собственным движением робота. Это связано с тем, что доступ захвата манипулятора к каждой точке рабочей зоны зависит от параметров движения самого робота (скорости, смещения и т. д.). В представленной статье предлагается перемещать мобильного робота через определенные промежутки времени, чтобы решить проблему. Здесь предлагается смещение мобильного робота и определение скорости его движения в зависимости от размеров рабочей зоны. Правильный выбор скорости движения мобильного робота также серьезно влияет на работу манипулятора.

Управление движением мобильных роботов на самом деле является транспортным вопросом, который не имеет прямого отношения к робототехнике. Однако рассмотренные выше адаптивные и интеллектуальные системы управления в равной степени относятся к управлению механизмами движения и движениями как манипуляторов, так и мобильных роботов. Но обязательно нужно учитывать, что управление движением мобильных роботов имеет отличительные особенности. В частности, по сравнению с рабочей зоной манипулятора зона движения мобильного робота имеет разные характеристики. А при движении на больших расстояниях по заранее неизвестной, безлюдной дороге или местности решить вопрос становится еще сложнее. В этом случае модель данной среды, помимо априорных данных, представляет собой карту местности, составленную и уточненную во время движения на основе данных датчиков (радиотехнических, лазерных, ультразвуковых локаторов, систем технического зрения). Эта модель должна иметь как минимум два уровня в зависимости от масштаба: первый предназначен для покрытия сенсорных систем, а второй – для области перед роботом. Первая модель местности служит для определения маршрута движения в соответствии с поставленной целью. Вариантами целей могут быть: а) поиск определенных объектов по заданным признакам; б) достижение определенной точки на местности с заданными координатами; в) перемещение по заданному маршруту, например, для выполнения определенной технологической операции (контроль, нанесение покрытия, уборка и т.д.). Вторая, более подробная модель местности необходима для уточнения маршрута непосредственно перед движением робота, в том числе для преодоления небольших и скрытых препятствий, не отмеченных на общей карте местности первого уровня, и обеспечения безопасности дорожного движения. Однако этого может быть недостаточно для надежного решения последней проблемы, и может возникнуть необходимость в использовании специальной системы безопасности. Эта система контролирует угол наклона шасси робота, не позволяет ему достигать заданного предельного положения из-за условия опрокидывания, защищает робота от выступающих ям и оврагов, проверяет состояние поверхности почвы, позволяющее двигаться, и, наконец, при возможности появления движущихся препятствий обеспечивает аварийную остановку робота по сигналу дистанционного или контактного датчика препятствий [3].

Многие параметры манипулятора, установленного на мобильном роботе, должны определяться в зависимости от выполняемых им операций. К таким параметрам можно отнести рабочее пространство манипулятора, его маневренность, угол обслуживания и т.д. [4]. При многих операциях обязательно должна быть обеспечена возможность нахождения захвата в каждой точке

рабочего пространства. Например, для захвата поискового робота должна быть доступна любая точка обслуживаемой территории. Но когда манипуляторы этого типа устанавливаются на мобильного робота, а робот одновременно находится в движении, решение вопроса усложняется. Так как при движении робота вместе с ним движется и манипулятор, то для захвата становится невозможным подойти ко всем точкам зоны обслуживания. Даже если робот движется с очень малой скоростью, большая часть зоны движения останется вне контроля. Поэтому проблему можно решить, перемещая робота через определенные промежутки времени. Но для этого продолжительность этих перерывов и последующее смещение робота после каждого перерыва должны быть выбраны в соответствии с рабочими параметрами манипулятора.

На рисунке 2 изображен колесный мобильный робот-манипулятор со степенью свободы $W = 4$. А на рисунке 3 изображены зоны обслуживания манипулятора при прерывистом движении. Во время каждого дискретного движения робота его зона обслуживания будет иметь форму сектора кольца. А толщина зоны в виде сектора кольца будет равна смещению робота (L).

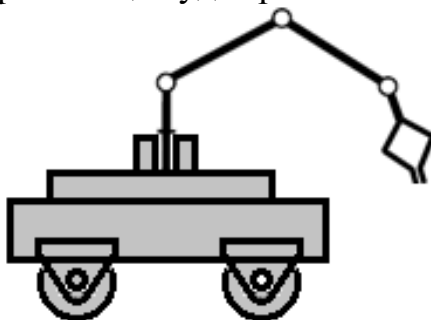


Рис. 2. Мобильный робот-манипулятор со степенью свободы $W = 4$

Как видно из рисунка 3, даже если захват перемещается в более широкой области, часть этой зоны будет неконтролируемой. С другой стороны, полностью контролируемой областью будет меньшая зона шириной, равной A . Ширина полностью контролируемой зоны A зависит от дискретного смещения робота L . Но слишком большое уменьшение L заставляет робота делать более частые паузы. Поэтому важно выбрать наиболее оптимальные значения параметров L и A .

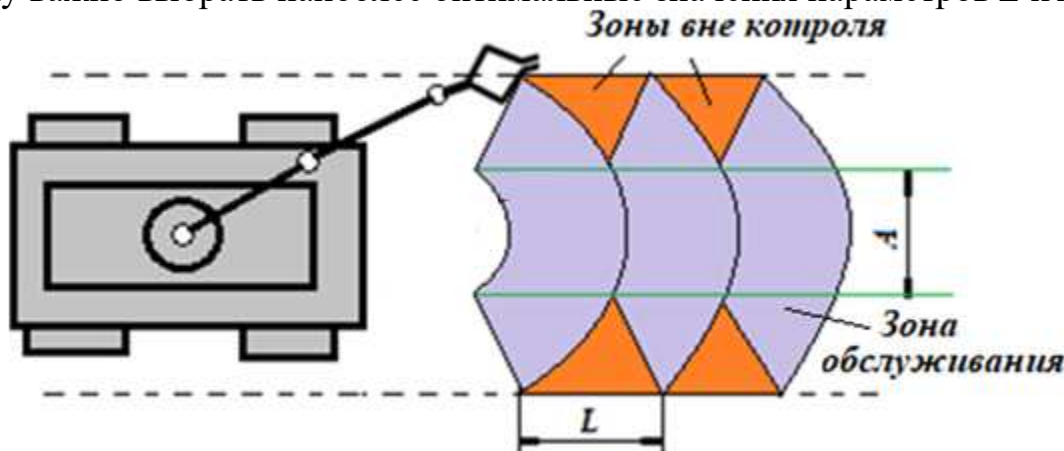


Рис. 3. Зона обслуживания манипулятора и неконтролируемые зоны

Хотя зона обслуживания робот-манипулятора теоретически охватывает большую площадь, однако движение делает невозможным приближение захвата к

некоторой части этой зоны. Некоторой степени эту проблему можно решить, перемещая робота через определенные промежутки времени, определенная часть зоны движения по-прежнему остается вне контроля. Для увеличения контролируемой зоны необходим выбор оптимального значения дискретных перемещений робота.

Список литературы

1. Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot modeling and control. – New York-Chichester-Weinheim-Brisbane-Singapore-Toronto: John Wiley & Sons. 2020. – 608 p.
2. Maier H. Grundlagen der Robotik. – Berlin: VDE Verlag. 2019. – 301 p.
3. Курышкин Н.П. Основы робототехники: Учебное пособие. – Кемерово: КузГТУ. 2012. – 168 с.
4. Горбенко Т.И., Горбенко М.В. Основы мехатроники и робототехники: Учебное пособие. – Томск: ТГУ, 2012. –126 с.

Сведения об авторах:

Чалаби Ифтихар Гурбанали оглы – д.т.н., доцент кафедры «Дизайн машин, мехатроника и промышленные технологии»;

Оруджзаде Рагим Агшин оглы – докторант.

ОБЗОР МОБИЛЬНЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ УБОРКИ ПРИДОМОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Богданов И.В., Мещерякова А.А., Грибанов А.А.

*Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.
Морозова, Воронеж*

Ключевые слова: многофункциональный робот, автоматизация, классификация роботов, автономные мобильные платформы, снегоуборочный механизм, электрический привод, степень автономности, модульная конструкция.

Аннотация. В статье рассматривается проблема эффективной уборки снега на территориях различного назначения в условиях обильных зимних осадков, характерных для многих регионов России. Обосновывается актуальность автоматизации снегоуборочных работ как способа снижения трудозатрат, повышения оперативности очистки и минимизации влияния человеческого фактора. Представлена систематизированная классификация многофункциональных роботов по пяти ключевым параметрам: типу привода, степени автономности, типу снегоуборочного механизма, назначению и конструктивным особенностям. На основе анализа классификационных признаков выявлены закономерности соответствия технических характеристик условиям эксплуатации: электрические приводы предпочтительны для экологически чувствительных зон, высокая автономность востребована в коммунальном секторе, а комбинированные механизмы обеспечивают универсальность в переменных погодных условиях. Сделан вывод о перспективности развития гибридных, модульных и высокоавтономных решений с комбинированными снегоуборочными системами, обеспечивающих адаптивность к разнообразию убираемых территорий и климатических условий. Предложенная классификация может служить основой для выбора оптимальной конфигурации робота при проектировании систем автоматизированной уборки придомовых территорий.

REVIEW OF MOBILE MULTIFUNCTIONAL ROBOTS FOR CLEANING NEIGHBORHOOD TERRITORIES

Bogdanov I.V., Meshcheryakova A.A., Gribanov A.A.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh*

Keywords: multifunctional robot, automation, robot classification, autonomous mobile platforms, snow removal mechanism, electric drive, degree of autonomy, and modular design.

Abstract. The article discusses the problem of effective snow removal in areas of various purposes in conditions of abundant winter precipitation, which is typical for many regions of Russia. The relevance of automating snow removal operations as a way to reduce labor costs, increase the efficiency of cleaning, and minimize the impact of the human factor is substantiated. A systematic classification of multifunctional robots based on five key parameters is presented: the type of drive, the degree of autonomy, the type of snow removal mechanism, the purpose, and the design features. Based on the analysis of classification features, the patterns of compliance of technical characteristics with operating conditions have been identified: electric drives are preferable for environmentally sensitive areas, high autonomy is in demand in the public sector, and combined mechanisms provide versatility in variable weather conditions. The conclusion is made about the prospects for the development of hybrid, modular and highly autonomous solutions with combined snow removal systems that ensure adaptability to a variety of harvested areas and climatic conditions. The proposed classification can serve as a basis for choosing the optimal configuration of the robot when designing automated cleaning systems for adjacent territories.

Многие области России ежегодно сталкиваются с проблемой обильных снегопадов в зимний период. Снежные заносы существенно затрудняют передвижение транспорта, создают помехи для пешеходов и приводят к перебоям в работе различных организаций. Традиционные методы уборки снега, такие как ручной труд и использование специализированной техники с ручным управлением, зачастую оказываются недостаточно эффективными и ресурсозатратными для оперативной и качественной очистки территорий, особенно в условиях переменчивой погоды характерной для зимнего периода в регионе [1-3].

Актуальность разработки и внедрения роботизированных снегоуборочных машин обусловлена несколькими факторами. Во-первых, автоматизация процесса уборки снега позволяет значительно сократить трудозатраты и снизить зависимость от человеческого фактора, особенно в условиях нехватки рабочей силы. Во-вторых, использование роботов позволяет повысить эффективность и скорость уборки, обеспечивая бесперебойное функционирование транспортной инфраструктуры и комфортное передвижение граждан. В-третьих, роботизированные системы могут быть запрограммированы на работу в ночное время или в сложных погодных условиях.

Экономическая целесообразность перехода к роботизированным решениям подтверждается расчётами технико-экономических показателей. На примере уборки территории площадью 500 м² (типичный размер придомовой зоны многоквартирного дома) сравнение методов представлено в таблице 1.

Табл. 1. Техничко-экономическое сравнение методов уборки снега на территории 500 м²

Параметр	Ручной труд (2 рабочих)	Мини-техника (самоходный снегоуборщик)	Роботизированная система (автономный робот)
Время уборки, мин	45-60	15-20	25-35
Трудозатраты, чел.·ч	1,5-2,0	0,3-0,4	0,1-0,2
Стоимость уборки за сезон (10 циклов), тыс. руб.	15-20	8-12	5-7
Экологический фактор (уровень шума, дБ)	65-70	85-95	55-65
Зависимость от погодных условий	Высокая	Средняя	Низкая

Многофункциональных роботов для уборки придомовых территорий (далее – многофункциональные роботы) можно классифицировать по различным параметрам, отражающим их функциональность, размер, автономность и особенности применения. Основных классификаций роботизированных снегоуборочных машин представлена на рисунке 1.

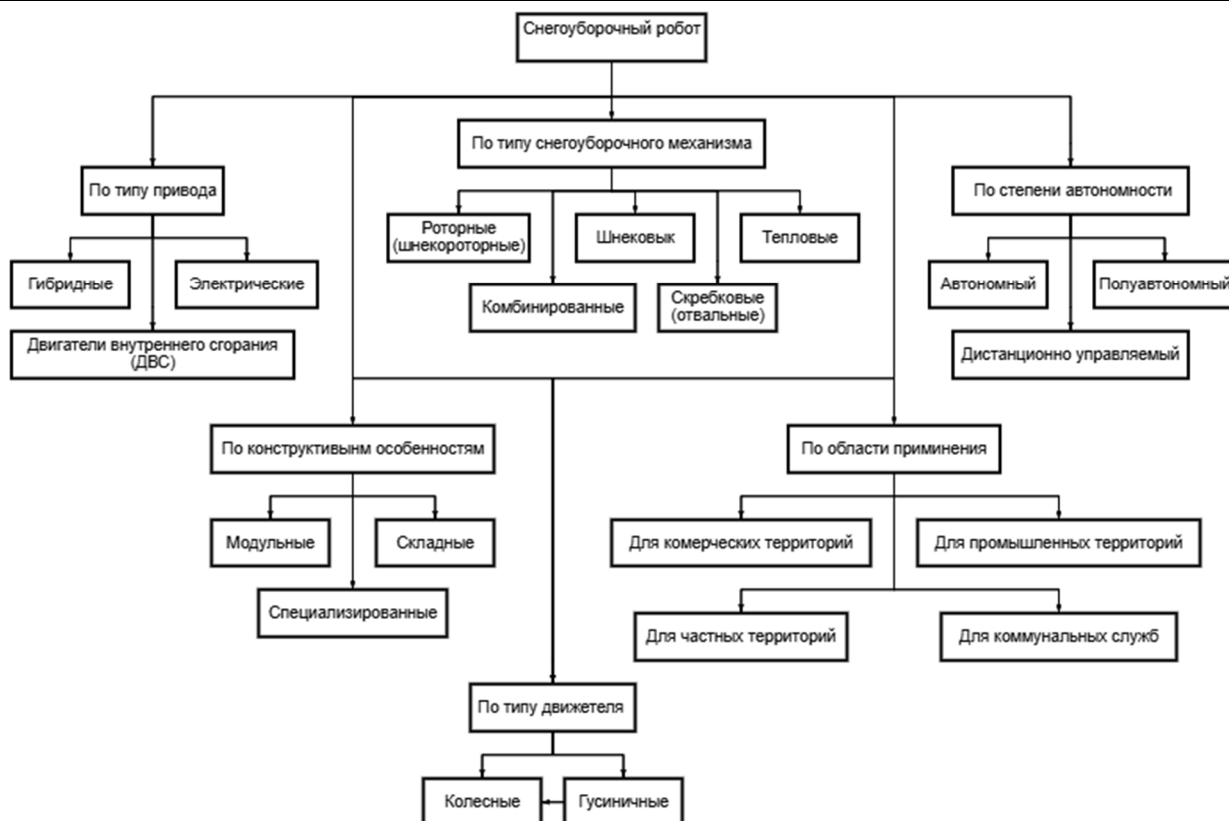


Рис. 1. Классификация многофункциональных роботов для уборки придомовых территорий

Различают многофункциональные роботы по типу привода.

– Электрические. Используют электродвигатели, работающие от аккумуляторов. Обеспечивают низкий уровень шума и экологичность, но требуют периодической подзарядки.

– Роботы с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Используют бензиновые или дизельные двигатели. Обладают большей мощностью и временем работы, но производят больше шума и выбросов.

– Гибридные. Сочетают электрический и ДВС привод, позволяя оптимизировать энергопотребление и производительность.

Многофункциональные роботы по степени автономности классифицируются на следующие.

– Автономные роботы. Полностью самостоятельно перемещаются и убирают снег, используя датчики, камеры и алгоритмы для навигации и обнаружения препятствий. Требуют предварительного программирования карты местности или обучения.

– Полуавтономные роботы. Требуют некоторого участия человека, например, для начала работы, выбора режима уборки или контроля сложных участков. Могут иметь элементы автономной работы, такие как автоматическое избегание препятствий.

– Дистанционно управляемые роботы. Роботы, которые управляются оператором с помощью пульта дистанционного управления. Могут иметь некоторые элементы автоматизации (например, систему обнаружения препятствий), но основное управление осуществляется человеком.

По типу снегоуборочного механизма многофункциональные роботы бывают следующие.

- Роторные (шнекороторные) снегоуборщики. Эти роботы используют вращающийся шнек (винтовой конвейер) для захвата снега и подачи его к ротору (крыльчатке). Ротор, в свою очередь, выбрасывает снег через желоб в нужном направлении.

- Шнековые снегоуборщики. В этих роботах используется только шнек, который вращаясь, захватывает и отбрасывает снег в сторону. У них отсутствует ротор для дальнего выброса.

- Скребковые (отвальные) снегоуборщики. Эти роботы оснащены отвалом (широким ножом или лопатой), который толкает снег перед собой, перемещая его в нужное место или сбрасывая с края убираемой поверхности.

- Тепловые снегоуборщики. Используют тепловую энергию для растапливания снега. Могут работать на электричестве, газе или другом топливе.

- Комбинированные снегоуборщики. Сочетают в себе несколько типов снегоуборочных механизмов для повышения эффективности и универсальности.

По назначению многофункциональные роботы:

- Для частных территорий. Небольшие и относительно недорогие модели для уборки снега с дорожек, подъездов и других небольших участков.

- Для коммерческих территорий. Более мощные и производительные модели для уборки снега с парковок, тротуаров, проезжей части и других коммерческих площадей.

- Для коммунальных служб. Крупные и мощные модели для уборки снега с дорог, улиц и других общественных территорий.

- Для промышленных территорий. Специализированные модели для работы на промышленных объектах, таких как аэропорты, склады и т. д.

Классификация многофункциональных роботов по конструктивным особенностям:

- Модульные. Роботы, конструкция которых позволяет быстро менять снегоуборочные механизмы или другие компоненты для адаптации к различным задачам.

- Складные. Роботы, которые можно складывать для удобства хранения и транспортировки.

- Специализированные. Роботы, разработанные для выполнения конкретных задач, таких как уборка снега с солнечных панелей или очистка железнодорожных путей.

Представленная классификация демонстрирует многомерный характер современных многофункциональных роботов, где выбор оптимальной конфигурации определяется совокупностью технических, эксплуатационных и экономических факторов.

Ключевые закономерности классификации:

1. Тип привода определяет базовые эксплуатационные характеристики: электрические роботы предпочтительны для экологически чувствительных зон (придомовые территории, парки), тогда как ДВС- и гибридные решения оправданы при необходимости длительной автономной работы на крупных объектах.

2. Степень автономности напрямую коррелирует с назначением робота: для частных территорий достаточно полуавтономных или дистанционно управляемых моделей, в то время как коммунальные и промышленные применения требуют высокой степени автономности для минимизации участия оператора.

3. Тип снегоуборочного механизма должен соответствовать условиям эксплуатации: шнековые и скребковые системы эффективны для тонкого слоя снега на ровных поверхностях (тротуары, дорожки), роторные – для интенсивных снегопадов и крупных территорий, а комбинированные решения обеспечивают универсальность в переменных условиях.

4. Назначение и конструктивные особенности взаимосвязаны: модульность особенно востребована в коммерческом и коммунальном секторах, где требуется адаптация под разные задачи в течение сезона, тогда как для частного применения важнее компактность (складные конструкции) и простота эксплуатации.

Практическая реализация выявленных закономерностей для условий Российской Федерации представлена в таблице 2, где сопоставлены климатические и эксплуатационные особенности регионов с рекомендуемыми конфигурациями роботов.

Табл. 2. Рекомендуемые конфигурации роботов в зависимости от условий эксплуатации в РФ

Условия эксплуатации	Рекомендуемый тип привода	Степень автономности	Снегоуборочный механизм	Пример региона РФ
Придомовые территории (до 300 м ²), экозоны	Электрический	Полу-автономный	Шнековый / скребковый	ЦФО, СЗФО
Коммерческие парковки (300-2000 м ²)	Гибридный	Автономный	Роторный / комбинированный	УрФО, ПФО
Городские тротуары и проезды	ДВС / гибридный	Автономный	Комбинированный (ротор + отвал)	Сибирь, ДВФО
Промышленные объекты (более 2000 м ²)	ДВС	Автономный с удаленным мониторингом	Роторный высокой мощности	Арктические регионы

Таким образом, современные тенденции развития указывают на переход к гибридным по приводу, модульным по конструкции и высокой автономности решениям с комбинированными снегоуборочными механизмами. Такие системы обеспечивают максимальную адаптивность к изменяющимся погодным условиям и разнообразию убираемых территорий, что особенно актуально для многофункциональных роботов, предназначенных для комплексной уборки придомовых пространств в условиях переменного климата. Выбор конкретной конфигурации должен осуществляться на основе анализа площади обслуживания, интенсивности снегопадов, требований к экологичности и экономической целесообразности эксплуатации.

Список литература

1. Богданов И.В., Мещерякова А.А. Разработка системы управления движением роботизированных машин в городских условиях // Актуальные проблемы автоматизации,

роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах. Материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛУ», 2025. – С. 21-25.

2. Мещерякова А.А., Боровинский Д.Д., Ещенко С.Е. Применение промышленных роботов в современном производстве в разных странах // Автоматизация и управление в технических, организационных и экономических системах: материалы Национальной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Воронеж, 21 марта 2022 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛУ», 2022. – С. 94-99.
3. Кузнецов К.Д., Мещерякова А.А., Грибанов А.А. Перспективы развития робототехнических систем // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2024. – №13. – С. 39-42.

Сведения об авторах:

Богданов Илья Васильевич – магистр;

Мещерякова Анна Анатольевна – к.т.н., доцент кафедры автоматизации производственных процессов;

Грибанов Андрей Анатольевич – к.т.н., доцент кафедры автоматизации производственных процессов.

АЛЮМИНИЕВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ: МЕХАНИЗМ-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД

Джафаров Ф.Ф.

Азербайджанский университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Ключевые слова: алюминиевые композиционные материалы, жесткость, прочность, коррозионная стойкость, термомеханическое напряжение, межфазная стабильность.

Аннотация. В статье рассмотрены алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей как высокоэффективные инженерные материалы, перспективные для авиационной, автомобильной, космической и энергетической отраслей. Показано, что сочетание низкой плотности алюминиевой матрицы и высокой жесткости армирующих фаз (SiC, Al₂O₃, углеродные волокна) обеспечивает формирование повышенных удельных механических характеристик по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами. Проанализированы основные механизмы упрочнения, включая передачу нагрузки между матрицей и армирующими компонентами, дисперсионное упрочнение, а также влияние термомеханического несоответствия коэффициентов теплового расширения и остаточных напряжений. Установлено, что межфазное сцепление и микроструктурная организация существенно влияют на предел текучести, модуль упругости, усталостную долговечность и износостойкость композитов. Отмечено, что термическое несоответствие может способствовать дополнительному упрочнению за счет повышения плотности дислокаций, однако при избыточных напряжениях приводит к микротрещинообразованию. Сделан вывод о ключевой роли межфазной инженерии и микроструктурного контроля при проектировании алюминиевых композиционных материалов для высоконагруженных и долговечных инженерных систем.

ALUMINUM COMPOSITE MATERIALS WITH A METAL MATRIX: A MECHANISM-ORIENTED APPROACH

Jafarov F.F.

Azerbaijan University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

Keywords: aluminum composite materials, stiffness, strength, corrosion resistance.

Abstract. This article examines aluminum-matrix composites as high-performance engineering materials with potential for applications in the aerospace, automotive, space, and energy industries. It is shown that the combination of low-density aluminum matrix and high-rigidity reinforcing phases (SiC, Al₂O₃, carbon fibers) provides enhanced specific mechanical properties compared to traditional aluminum alloys. The main strengthening mechanisms are analyzed, including load transfer between the matrix and reinforcing components, precipitation hardening, and the influence of thermomechanical mismatches in thermal expansion coefficients and residual stresses. It was established that interfacial adhesion and microstructural organization significantly affect the yield strength, elastic modulus, fatigue life, and wear resistance of composites. It was noted that thermal mismatch can promote additional strengthening by increasing dislocation density, but under excessive stress, it leads to microcracking. It was concluded that interfacial engineering and microstructural control play a key role in the design of aluminum composite materials for highly loaded and durable engineering systems.

Введение. Спрос на алюминиевые композиционные материалы (АКМ) неуклонно растет в ведущих отраслях промышленности благодаря их способности удовлетворять современные требования к легкости конструкций, высокой эксплуатационной эффективности, надежности и устойчивости. По мере того, как

промышленность стремится к повышению энергоэффективности, снижению выбросов и улучшению механической надежности, АКМ становятся стратегически важным выбором для авиационной, автомобильной, космической и энергетической отраслей.

В отличие от монолитных сплавов, свойства алюминиевых композиционных материалов с металлической матрицей определяются не только химическим составом матрицы, но и многоуровневыми механизмами взаимодействия между матрицей и армирующими фазами. Ключевыми факторами, определяющими поведение данных материалов, являются механизмы передачи нагрузки, характер межфазного сцепления, термомеханические напряжения, а также дисперсионное и субструктурное упрочнение.

Целью данной работы является анализ механизмов упрочнения и межфазных взаимодействий в алюминиевых композиционных материалах с металлической матрицей, а также оценка их влияния на эксплуатационные характеристики и перспективы применения в высоконагруженных инженерных системах.

Механизмы формирования свойств алюминиевых композиционных материалов. Усталостные и трибологические характеристики

Известно, что одним из фундаментальных преимуществ алюминиевых композиционных материалов с металлической матрицей является высокая удельная прочность, обусловленная низкой плотностью алюминиевой матрицы ($\approx 2,7$ г/см³) в сочетании с высокой жесткостью и прочностью армирующих фаз. Повышение прочностно-жесткостных характеристик реализуется за счет нескольких взаимосвязанных механизмов упрочнения [1].

Алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей представляют собой класс высокоэффективных инженерных материалов, в которых алюминиевая матрица упрочняется керамическими или углеродными армирующими фазами, включая частицы карбида кремния (SiC), оксида алюминия (Al₂O₃), а также короткие и непрерывные волокна. Разработка алюминиевых композиционных материалов с металлической матрицей направлена на формирование материалов с заданным комплексом механических, термических и эксплуатационных свойств, которые невозможно достичь в рамках традиционных алюминиевых сплавов [2].

На рисунке 1 представлена микроструктура алюминиевого композиционного материала с металлической матрицей, армированного частицами карбида кремния, где наглядно видно, что светло-серая область, т.е. алюминиевая матрица выполняет роль непрерывной фазы, обеспечивающей пластичность, вязкость разрушения и перераспределение напряжений. Видно, что частицы карбида кремния более темные, угловатые включения, которые являются жесткой армирующей фазой, повышающей прочность, жесткость, износостойкость и термическую стабильность материала. Обобщенно можно сказать, что данный рисунок иллюстрирует равномерное распределение частиц карбида кремния в алюминиевой матрице, обеспечивающее эффективную передачу нагрузки и формирование повышенных прочностных и трибологических характеристик алюминиевого композиционного материала [3].

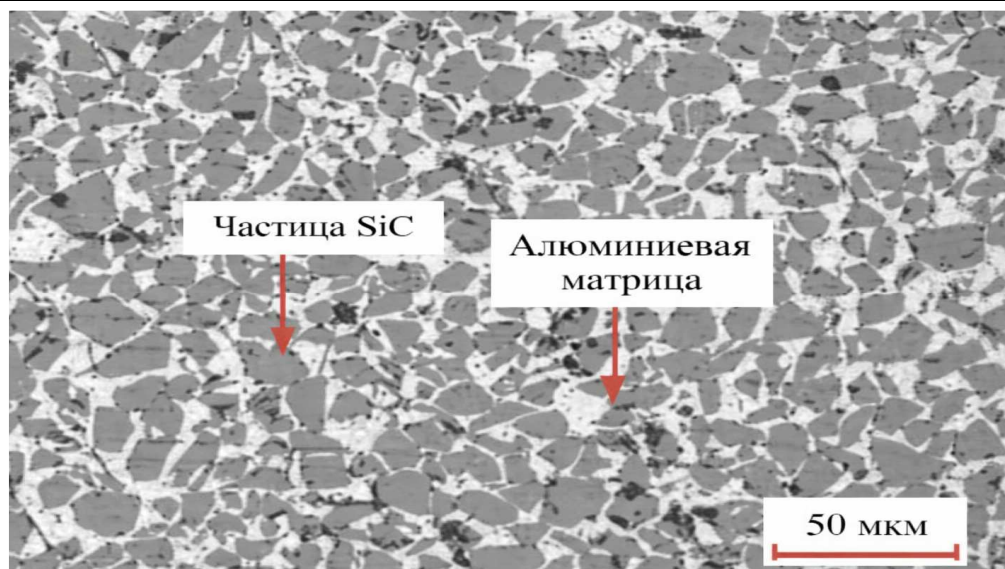


Рис. 1. Микроструктура композиции на основе алюминия

Доминирующим механизмом является передача нагрузки, при которой внешние напряжения перераспределяются от пластичной алюминиевой матрицы к более жестким армирующим компонентам. Эффективность данного механизма определяется качеством межфазной адгезии, геометрией частиц, их объемной долей и равномерностью распределения. При оптимальной микроструктуре армирующие элементы препятствуют локализации пластической деформации и способствуют повышению предела текучести и модуля упругости композита [4].

Дополнительный вклад в упрочнение вносит ограничение подвижности дислокаций, обусловленное наличием дисперсных армирующих частиц. Они выступают в роли эффективных препятствий для дислокационного скольжения, что приводит к росту сопротивления пластической деформации. Совокупное действие этих механизмов формирует повышенные значения удельной прочности и жесткости, критически важные для высоконагруженных конструкций.

Существенное влияние на механическое поведение алюминиевых композиционных материалов с металлической матрицей оказывает различие коэффициентов теплового расширения между алюминиевой матрицей и керамическими армирующими фазами. В процессе охлаждения после изготовления в материале формируются остаточные термомеханические напряжения, которые оказывают значительное влияние на прочностные и усталостные характеристики [5, 6].

Термическое несоответствие коэффициентов теплового расширения приводит к генерации повышенной плотности дислокаций вблизи межфазных границ, что способствует дополнительному упрочнению матрицы. Данный эффект особенно выражен в материалах с мелкодисперсным армированием. Вместе с тем, избыточные остаточные напряжения могут инициировать микротрещинообразование, что требует оптимизации параметров технологии получения и последующей термообработки.

Коррозионная стойкость алюминиевых композиционных материалов с металлической матрицей в значительной степени обусловлена способностью алюминиевой матрицы к формированию плотной пассивной оксидной пленки Al_2O_3 , эффективно защищающей материал от электрохимического разрушения.

Однако коррозионное поведение композитов определяется не только свойствами матрицы, но и характером межфазных взаимодействий [7].

Керамические армирующие фазы, как правило, являются химически инертными и не подвержены коррозионному разрушению. Это способствует повышению долговечности материала в агрессивных средах. В то же время дефекты межфазного сцепления могут выступать концентраторами напряжений и локальными зонами коррозионной активности, что подчеркивает критическую роль межфазной инженерии в проектировании алюминиевых композиционных материалов с металлической матрицей [8, 9].

Алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей демонстрируют улучшенные усталостные характеристики по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами. Армирующие фазы эффективно препятствуют зарождению и распространению усталостных трещин, выполняя роль механических барьеров. Это приводит к увеличению числа циклов до разрушения и расширяет область применения данных материалов в условиях переменных нагрузок.

В трибологических условиях композиты, армированные твердыми частицами, характеризуются высокой износостойкостью и стабильностью коэффициента трения. Армирующие элементы снижают интенсивность абразивного и адгезионного износа, что делает алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей перспективными для применения в узлах трения и высоконагруженных механических системах [10-12].

Рисунок 2 комплексно иллюстрирует ключевые механизмы формирования свойств алюминиевых композиционных материалов с металлической матрицей. Он связывает микроструктуру, механизмы упрочнения, термомеханическое поведение, долговечность и износ, показывая, почему такие материалы превосходят традиционные алюминиевые сплавы.

На рисунке 2, а показано наличие жесткой армирующей фазы, внедренной в пластичную алюминиевую матрицу. Межфазная граница играет ключевую роль, поскольку именно через нее осуществляется передача механической нагрузки. Таким образом, можно понять, что свойства композита определяются не только фазами, но и качеством их взаимодействия на межфазной границе.

Как видно из рисунка 2, б при приложении нагрузки алюминиевая матрица начинает деформироваться первой. Благодаря прочной межфазной адгезии часть напряжений передается на жесткие армирующие частицы. Вблизи них возникает скопление дислокаций, что затрудняет дальнейшую пластическую деформацию. В результате повышается прочность и жесткость композита по сравнению с чистым алюминием.

Из рисунка 2, в наглядно видно, что после изготовления и охлаждения алюминиевая матрица и керамические частицы сокращаются по-разному, что вызывает термомеханические остаточные напряжения вблизи межфазной границы. Это важно так как остаточные напряжения создают дополнительное упрочнение, далее повышается сопротивление пластической деформации и возрастает стабильность при высоких температурах.

Рисунок 2, г показывает, что армирующие частицы препятствуют прямолинейному росту усталостной трещины, заставляя ее отклоняться или

останавливаться. Это существенно повышает усталостную долговечность материала. Видно, что в условиях трения твердые частицы снижают глубину износа, стабилизируют коэффициент трения, уменьшают адгезионный и абразивный износ. В итоге улучшаются долговечность и надежность при циклических и трибологических нагрузках.

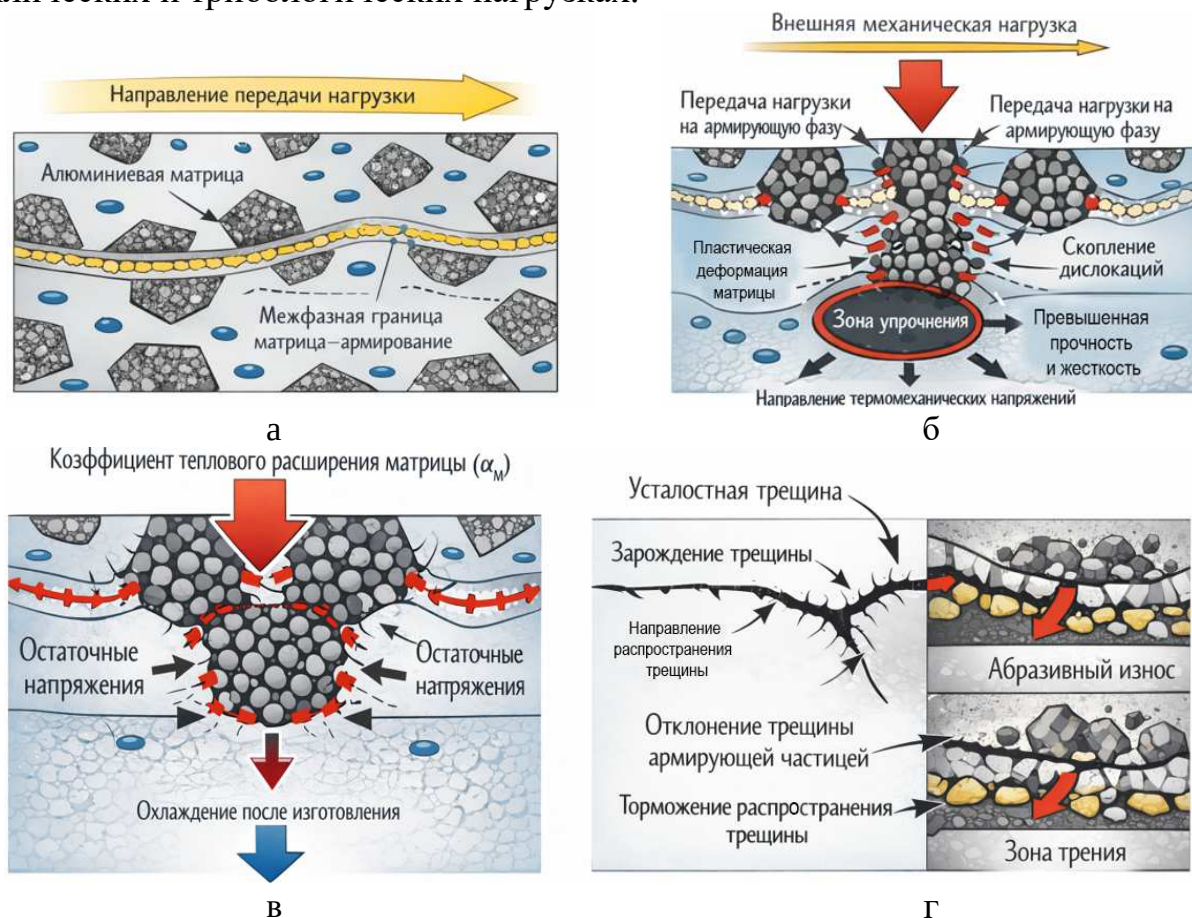


Рис. 2. Механизмы в алюминиевых матрицах: а – микроструктурная архитектура композита; б – механизм передачи нагрузки и дислокационного упрочнения; в – термическое несоответствие и остаточные напряжения; г – усталостное разрушение и трибологическое поведение

Области применения и инженерные перспективы

В авиационной отрасли ключевым фактором внедрения алюминиевых композиционных материалов с металлической матрицей является необходимость снижения массы конструкций при сохранении высокой прочности и усталостной долговечности. Высокое отношение прочности к массе позволяет снизить расход топлива и эксплуатационные затраты на протяжении всего жизненного цикла летательного аппарата. Алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей находят применение в элементах фюзеляжа, крыльевых конструкциях, силовых балках и внутренних компонентах.

В автомобильном секторе рост применения алюминиевых композиционных материалов с металлической матрицей обусловлен ужесточением экологических требований и переходом к электрическим транспортным средствам. Использование композитов позволяет снизить массу автомобилей, улучшить энергоэффективность и повысить надежность узлов, работающих в условиях

высоких механических и термических нагрузок, включая тормозные системы, элементы подвески и корпуса аккумуляторов.

Снижение массы транспортного средства улучшает динамические характеристики, эффективность торможения и топливную экономичность, а также способствует сокращению выбросов CO₂.

Легкие конструкционные элементы также имеют большое значение для робототехники и систем промышленной автоматизации. Уменьшение массы снижает инерционные нагрузки, обеспечивает более высокую скорость перемещения, повышает точность позиционирования и уменьшает износ приводов и соединений, что в конечном итоге повышает производительность и увеличивает срок службы оборудования.

Космическая отрасль предъявляет экстремальные требования к материалам, где каждый килограмм массы существенно влияет на стоимость запуска. Алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей обеспечивают необходимую жесткость и размерную стабильность при минимальной массе, а также демонстрируют устойчивость к термоциклированию и радиационному воздействию, что делает их перспективными для применения в конструкциях спутников и космических аппаратов [13].

В энергетической отрасли алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей находят применение в системах генерации и передачи энергии благодаря высокой коррозионной стойкости и термомеханической стабильности. Особенно перспективно их использование в ветроэнергетике и морских энергетических установках, где снижение массы и повышение долговечности являются критически важными факторами.

Вывод

Алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей представляют собой многоуровневые инженерные системы, свойства которых определяются сложным взаимодействием микроструктурных, межфазных и термомеханических механизмов. Возможность целенаправленного управления этими механизмами делает алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей стратегически важными материалами для высоконагруженных, энергоэффективных и долговечных инженерных приложений.

Список источников

1. Miracle D.B. Metal matrix composites – From science to technological significance // *Composites Science and Technology*. 2005, vol. 65(15-16), pp. 2526-2540.
2. Шишкин А.А., Лазарев А.Н. Остаточные напряжения в алюминиевых композиционных материалах, армированных SiC // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2012. – №5. – С. 32-38.
3. Surappa M.K. Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities // *Sadhana*. 2003, vol. 28(1-2), pp. 319-334.
4. Lloyd D.J. Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites // *International Materials Reviews*. 1994, vol. 39(1), pp. 1-23. doi.org/10.1179/imr.1994.39.1.1.
5. Tjong S.C. Novel nanoparticle-reinforced metal matrix composites with enhanced mechanical properties // *Advanced Engineering Materials*. 2007, vol. 9(8), pp. 639-652. doi.org/10.1002/adem.200700106.

6. Zhang Z., Chen D.L. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites // Materials Science and Engineering A. 2008, vol. 483-484, pp. 148-152. doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.184.
7. Гуревич М.А., Фролов В.А. Коррозионная стойкость алюминиевых композиционных материалов // Защита металлов. – 2008. – №44(2). – С. 180-187.
8. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Деревянко В.А. Многоуровневые механизмы деформации и разрушения в металлических композиционных материалах // Физическая мезомеханика. – 2004. – №7(4). – С. 5-18.
9. Torralba J.M., da Costa C.E., Velasco F. P/M aluminum matrix composites: An overview // Journal of Materials Processing Technology. 2003, vol. 133(1-2), pp. 203-206. doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00234-0.
10. Романов В.А., Петров Ю.А. Усталостное разрушение алюминиевых композиционных материалов // Проблемы прочности. – 2008. – №1. – С. 45-53.
11. Сухов А.В., Кудрявцев П.В. Трибологические свойства алюминиевых композиционных материалов // Трение и износ. – 2010. – №31(3). – С. 241-248.
12. Prasad S.V., Asthana R. Aluminum metal-matrix composites for automotive applications: tribological considerations // Tribology Letters. 2004, vol. 17(3), pp. 445-453.
13. Коломеец А.Г., Дьяконов Г.С. Применение алюминиевых композиционных материалов в авиационной технике // Авиационная промышленность. – 2015. – №3. – С. 17-23.

Сведение об авторе:

Джафаров Фарид Фархад оглы – докторант.

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Джафарова А.А., Рустамова С.М.

Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Ключевые слова: пластическая деформация, холодное прессование, порошковое тело, коэффициент трения, эксцентриситет по, метод конечных элементов.

Аннотация. Исследованы моделирование прессования порошков методами конечных элементов, а также явления напряженно-деформированного состояния при холодном прессовании порошковых материалов. Изучены подходы макроскопического и микроскопического уровней описывающих деформацию заготовки в целом а также деформации представительных ячеек, включающих отдельные частицы и их контакты. Следует отметить, что связь между этими уровнями осуществляется через предположение о подобии деформации макроэлемента и соответствующей ему представительной ячейки. Таким образом, макроскопические скорости деформации определяют граничные условия для расчета микроструктурной задачи. использование данного подхода сопровождается повышенными вычислительными затратами по сравнению с традиционными макроскопическими моделями, поскольку расчёт включает решение совокупности взаимосвязанных задач для множества представительных объемных элементов. В то же время в случаях, когда физические параметры, не ограничивающиеся только пористостью, оказывают существенное влияние на процесс компактирования, применение многомасштабного моделирования является обоснованным и обеспечивает более высокую точность и достоверность получаемых результатов.

MULTISCALE SIMULATION OF THE COLD PRESSING PROCESS OF POWDER MATERIALS

Jafarova A.A., Rustamova S.M.

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Keywords: plastic deformation, cold pressing, powder body, friction coefficient, pore eccentricity, finite element method.

Abstract. Finite element modeling of powder compaction processes, as well as the stress-strain behavior during cold pressing of powder materials, has been investigated. Both macroscopic and microscopic approaches describing deformation of the billet as a whole and deformation of representative volume elements, including individual particles and their contacts, were studied. It should be noted that the coupling between these scales is established through the assumption of similarity between the deformation of a macroscopic element and that of its corresponding representative volume element. Thus, macroscopic strain rates define the boundary conditions for solving the microstructural problem. The application of this approach is associated with increased computational costs compared to conventional macroscopic models, since the analysis requires solving a set of coupled problems for multiple representative volume elements. At the same time, in cases where physical parameters beyond porosity alone significantly affect the compaction process, the use of multiscale modeling is justified and provides higher accuracy and reliability of the obtained results.

Введение. Процессы холодного прессования порошковых материалов широко применяются в порошковой металлургии, керамике, композиционных материалах и аддитивных технологиях. Качество и эксплуатационные характеристики получаемых изделий в значительной степени определяются

закономерностями уплотнения порошкового тела, развитием межчастичных контактов, перераспределением пористости и формированием внутренней структуры в процессе деформирования. Несмотря на кажущуюся простоту технологической операции, прессование порошков представляет собой сложный нелинейный процесс, характеризующийся неоднородным напряженно-деформированным состоянием, эволюцией контактных зон и изменением геометрии пор [1].

Традиционные макроскопические модели, основанные на эмпирических реологических зависимостях, часто оказываются недостаточно точными при анализе реальных технологических процессов, особенно в условиях сложной геометрии заготовок и неоднородного распределения плотности. В связи с этим все большую актуальность приобретают микромеханические и многомасштабные подходы, позволяющие учитывать влияние микроструктуры на макроскопическое поведение материала.

Целью данной работы является рассмотрение теоретических основ моделирования прессования порошков с использованием представительных ячеек и многомасштабного метода конечных элементов, а также анализ численной реализации и области применимости данного подхода.

Теоретические основы многомасштабного моделирования прессования порошков. Механическое поведение порошкового тела при холодном прессовании принципиально отличается от поведения сплошных материалов. На начальных стадиях деформации основную роль играют процессы переупаковки частиц, перераспределение пористости и формирование первичных контактов. По мере увеличения давления начинают доминировать пластическая деформация частиц, рост контактных площадок и развитие связности структуры [2].

С точки зрения механики сплошных сред порошковое тело можно рассматривать как пористую среду с изменяющимися во времени параметрами структуры. Однако классические модели пористых материалов, основанные на теории пластичности, не всегда адекватно описывают реальное поведение порошков, поскольку не учитывают дискретную природу среды и особенности межчастичного взаимодействия.

Экспериментальные исследования показывают, что такие параметры, как форма частиц, распределение размеров, шероховатость поверхности, коэффициент трения и эксцентриситет пор, оказывают существенное влияние на кинетику уплотнения и конечную плотность заготовки. Это обуславливает необходимость перехода от чисто макроскопических моделей к микромеханическим описаниям, в которых учитывается структура материала на уровне отдельных частиц.

Ключевым элементом микромеханического моделирования является представительная ячейка, которая должна отражать характерные особенности микроструктуры порошкового тела. Представительная ячейка включает в себя определенное количество частиц, пор и контактных зон и рассматривается как минимальный объем, статистически эквивалентный всему материалу [3].

Выбор представительной ячейки не является однозначным и зависит от поставленной задачи, требуемой точности и степени неоднородности структуры. В простейших моделях предполагается, что пластические свойства порошкового тела зависят только от пористости, и в этом случае геометрия ячейки может быть

существенно упрощена. Однако такие «однопараметрические» модели не учитывают влияние формы пор, распределения контактов и анизотропии структуры.

Более точные микромеханические модели рассматривают представительную ячейку как совокупность деформируемых частиц с заданными законами пластичности и трения. В этом случае поведение материала выводится непосредственно из анализа взаимодействия частиц, без введения эмпирических поправочных коэффициентов. Такой подход позволяет учитывать эволюцию структуры, рост контактных площадок и локализацию деформаций [4].

Многомасштабный подход объединяет макроскопическое описание деформации заготовки и микроскопическое описание поведения представительных ячеек. Основная идея заключается в том, что макроскопическое напряженно-деформированное состояние формируется как результат коллективного поведения микроструктурных элементов.

На рисунке 1 показана двухуровневая схема многомасштабного моделирования процесса компактирования порошков, в которой макроскопическая задача метода конечных элементов связана с микромеханическим анализом представительных объемных элементов, описывающих деформацию частиц, развитие контактов и эволюцию пористой структуры. На данном рисунке слева изображен макроскопический конечный элемент, где F – приложенная нагрузка; V_{macro} – макроскопическая скорость деформации, занимаемый порошковой частицей и порами, а ϵ_{macro} – оценивает макроскопическую деформацию порошковой смеси. В правой части рисунка показана представительная ячейка, в которой внутренние стрелки показывают локальные перемещения частиц, а V_{micro} – микроскопические скорости деформации.

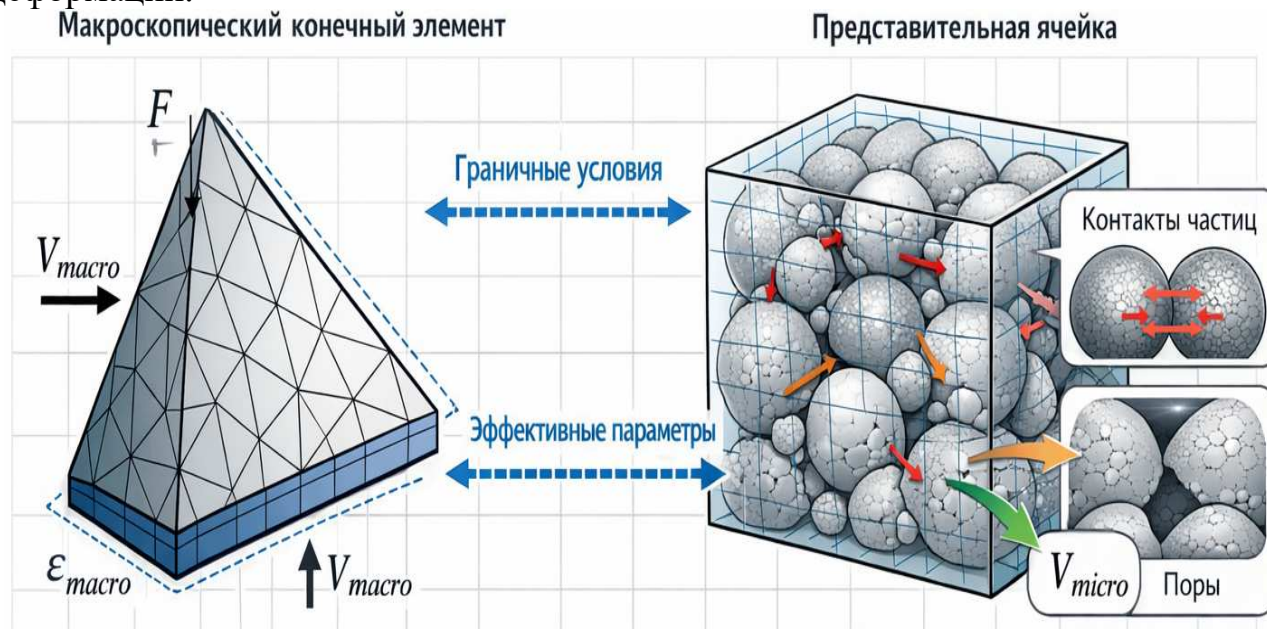


Рис. 1. Схема многомасштабного моделирования процесса прессования порошков

В рамках данного подхода макроскопический объем заготовки разбивается на конечные элементы, и каждому элементу ставится в соответствие собственная представительная ячейка. Деформации макроэлемента задают граничные условия

для микроструктурной задачи, а результаты расчета ячейки используются для определения эффективных свойств материала в данном элементе [5].

Таким образом, реологические характеристики, поверхности текучести и законы упрочнения не задаются априорно, а формируются автоматически в процессе численного моделирования на основе анализа деформации микроструктуры. Это позволяет учитывать сложные нелинейные эффекты, анизотропию и локальные неоднородности.

Численная реализация многомасштабного моделирования осуществляется на основе метода конечных элементов. На макроскопическом уровне решается задача деформирования заготовки с учетом контактных условий, трения и граничных ограничений. Внутри каждого конечного элемента определяется тензор скоростей деформации, который передается на микроскопический уровень.

На уровне представительной ячейки решается задача деформации совокупности частиц с учетом контактного взаимодействия, пластичности материала частиц и трения. По результатам расчета определяется средняя плотность энергии диссипации, напряжения и другие эффективные параметры, которые затем используются в макроскопической задаче.

Алгоритм расчета имеет итерационный характер и включает последовательное решение макро- и микрозадач до достижения сходимости. Несмотря на высокую вычислительную сложность, такой подход обеспечивает принципиально более высокую точность по сравнению с традиционными макроскопическими моделями.

Обсуждение процессов моделирования. Применение многомасштабного моделирования позволяет детально анализировать процессы уплотнения порошков, включая развитие контактных зон, локализацию деформаций и формирование неоднородностей плотности. Это особенно важно при проектировании ответственных деталей, где внутренние дефекты могут существенно снизить механические характеристики изделия [6].

Следует отметить, что вычислительные затраты при использовании данного подхода значительно возрастают, особенно при трёхмерном моделировании и большом числе представительных ячеек. Тем не менее, с развитием вычислительных технологий и параллельных алгоритмов данный метод становится всё более практичным для инженерных расчётов.

Кроме того, многомасштабное моделирование открывает возможности для оптимизации технологических режимов прессования, подбора гранулометрического состава порошков и проектирования структуры материалов с заданными свойствами.

Выводы

1. Показано, что традиционные макроскопические модели прессования порошков имеют ограниченную применимость из-за игнорирования микроструктурных факторов.

2. Представительные ячейки и микромеханический подход позволяют учитывать реальную структуру порошкового тела и эволюцию межчастичных контактов.

3. Многомасштабное моделирование на основе метода конечных элементов обеспечивает автоматическое формирование реологических характеристик материала без введения эмпирических зависимостей.

4. Несмотря на высокую вычислительную сложность, данный подход является наиболее перспективным для анализа и оптимизации процессов холодного прессования порошков.

Финансирование. Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Науки Азербайджана – Грант № AEF – MGC – 2024 -2(50) – 16/01/1 – М – 01.

Список литературы

1. Мамедов А.Т., Мамедов В.А. Свойства высокоплотных порошковых материалов на основе железа, спрессованных без стеарата цинка // Порошковая металлургия. – 2003. – №5/6(431). – С. 32-36.
2. Джафарова А.А. Температурная аналогия распределения плотности и течения порошка при прессовании уплотнителей сложной конфигурации // Черные металлы. – 2025. – №3(1119). – С. 93-99. – DOI: 10.17580/chm. 2025.03.14.
3. Хечумов Р.А., Кепплер Х., Прокопьев В.И. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций: учебное пособие для технических вузов / под общ. ред. Р.А. Хечумова. – М.: Изд-во АСВ, 1994. – 353 с.
4. Shereen Magdy Mohamed. Simulation for elastoplastic powder materials in rigid matrix// AzTU, Machine Science. 2012, no. 8, p.76-83.
5. Скориков Е.А., Антонов Б.А., Скориков В.А., Ламков К.К. Динамическое горячее прессование металлокерамических изделий в вакууме // Исследования в области металлургии. – 1992. – Т. 265. – С.106-115.
6. Колесников В.И., Беляк О.А. Математические модели и экспериментальные исследования – основа проектирования гетерогенных антифрикционных материалов. – М.: Физматлит, 2021. – 216 с.

Сведения об авторах:

Джафарова Афет Ариф кызы – к.т.н., доцент кафедры "Химическая технология, переработка и экология";

Рустамова Севиль Меси кызы – к.т.н., старший преподаватель кафедры "Химическая технология, переработка и экология".

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКОВОК ПСЕВДО В-ТИТАНОВОГО СПЛАВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Егорова Ю.Б.¹, Давыденко Л.В.², Егоров Е.Н.¹

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва;*

²*Московский политехнический университет, Москва*

Ключевые слова: химический состав, механические свойства, термическая обработка, титановый сплав Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr, статистический анализ, корреляционно-регрессионный анализ.

Аннотация. Приведены результаты статистических исследований химического состава и механических свойств поковок из титанового сплава Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr с использованием производственных данных. На основе корреляционно-регрессионного анализа изучены зависимости механических свойств от эквивалентов по алюминию и молибдену и режимов упрочняющей термической обработки. Проведена оценка стабильности механических свойств от химического состава и промышленных режимов закалки и старения.

EVALUATION OF THE STABILITY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF PSEUDO B-TITANIUM ALLOY FORGINGS, DEPENDING ON THE CHEMICAL COMPOSITION AND INDUSTRIAL HEAT TREATMENT MODES

Egorova Yu.B.¹, Davydenko L.V.², Egorov E.N.¹

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow;*

²*Moscow Polytechnic University, Moscow*

Keywords: chemical composition, mechanical properties, heat treatment, titanium alloy Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr, statistical analysis, correlation and regression analysis.

Abstract. The results of statistical studies of the chemical composition and mechanical properties of forgings made of titanium alloy Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr using production data are presented. Based on correlation-regression analysis, the dependences of mechanical properties on aluminum and molybdenum equivalents and modes of strengthening heat treatment were studied. The stability of mechanical properties was assessed depending on the chemical composition and industrial modes of hardening and aging.

Псевдо β -титановые сплавы обладают высоким потенциалом как конструкционные материалы благодаря хорошему сочетанию прочности, ударной вязкости и сопротивления усталостному разрушению [1]. В последнее время расширяется сфера их применения. В частности, разработка новых и усовершенствование существующих технологий термической обработки для повышения прочностных характеристик полуфабрикатов позволяет считать их перспективными материалами не только авиационного назначения, но и для изготовления высоконагруженных деталей, работающих в условиях трения, например, подшипников [1-3]. К таким сплавам можно отнести высокопрочный,

высоколегированный титановый сплав псевдо- β класса Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr (VST5553), разработанный ОАО “Корпорация ВСПО-АВИСМА” и предназначенный для изготовления крупногабаритных поковок, штамповок, массивных плит, биллетов, деталей крепежа, силовых деталей конструкции планера, крупногабаритных ответственных деталей типа шасси для современных самолётов [4].

Цель данной работы состояла в оценке стабильности механических свойств поковок из сплава VST5553 с учетом колебаний химического состава и промышленных режимов упрочняющей термической обработки.

Объектами исследования являлись штампованные поковки одного типоразмера (71 плавка). Поковки были подвергнуты термической обработке: закалка (обработка на твердый раствор из $\alpha+\beta$ -области) 790-830°C, 4 ч, охлаждение на воздухе и старение при 600-620°C, 8-10 ч, охлаждение на воздухе. Статистические исследования проводили с помощью пакетов прикладных программ Stadia и Statistica, Оценку стабильности химического состава и механических свойств проводили с помощью гистограмм, дисперсии, стандартного отклонения, коэффициента вариации, корреляции R и детерминации R^2 , трехсигмового интервала. Определяли долю вариации свойств, обусловленную разными факторами: $\gamma_v = R^2 \cdot 100\%$. Результаты первичной статистической обработки химического состава всех плавок в перерасчете на эквиваленты и механических свойств поковок приведены в таблице 1. Химический состав и механические свойства поковок удовлетворяют нормативным требованиям.

Табл. 1. Статистические характеристики исследованных факторов

Статистические характеристики	$[Al]_{\text{экв}}^{\text{ср}}$, %	$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{ср}}$, %	$[Al]_{\text{экв}}^{\text{ср}} + [Mo]_{\text{экв}}^{\text{ср}}$, %	σ_6 , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Требования НД	-	-	-	1240-1410	≥ 1170	$\geq 4,0$	-
Диапазон по факту	6,5-7,5	13,5-15,5	20,5-23,0	1241-1363	1172-1303	4,0-10,4	3,2-32,9
Выборочное среднее	7,0	14,5	21,4	1292	1227	5,3	9,7
Стандартное отклонение	0,15	0,30	0,35	25	20	1,2	3,6
Коэффициент вариации, %	2,1	2,1	1,6	1,9	1,6	22,0	37,0

Коэффициент вариации предела прочности и условного предела текучести составляет 1,6-1,9%, что сопоставимо с другими сплавами. Коэффициент вариации характеристик пластичности намного больше и может достигать 22-37%. Колебания механических свойств могут быть обусловлены, прежде всего, влиянием химического состава, режимами деформации и термической обработки. Однако корреляционный анализ показал, что влияние промышленных режимов закалки и старения в исследованных пределах незначимо (коэффициенты парной

и множественной корреляции менее 0,2). Доля вариации свойств, обусловленная режимами термической обработки, составляет менее 5%.

Коэффициенты парной корреляции механических свойств с химическим составом равны 0,65 для эквивалента по алюминию, -0,35 для эквивалента по молибдену. С увеличением эквивалента по алюминию на 1,0% (по массе) предел прочности возрастает на 45 МПа, а с ростом эквивалента по молибдену уменьшается на 9 МПа. Коэффициент множественной корреляции прочностных свойств с химическим составом составляет $R = 0,67$, а доля вариации равна 45%. Остальная доля вариации обусловлена технологическими факторами, которые сложно учесть. Для снижения доли вариации прочности, обусловленной колебаниями химического состава, целесообразно сузить диапазон легирования (трехсигмовый интервал) основными легирующими элементами, а также контролировать суммарные колебания примесей внедрения (кислорода, азота, углерода).

Список литературы

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. – М.: ВИЛС-МАТИ. 2009. – 520 с.
2. Скворцова С.В., Зайнетдинова Г.Т., Гуртовая Г.В., Федорова Л.В., Чупикова А.Р. Влияние изотермической обработки на изменение структуры и твердости псевдо β -титановых сплавов // Электromеталлургия. – 2023. – №11. – С.10-20.
3. Скворцова С.В., Зайнетдинова Г.Т., Сарычев С.М., Афолина М.Б., Шаронов А.А. Влияние вакуумного ионно-плазменного азотирования на структуру и свойства титанового сплава Ti-5553 // Электromеталлургия. – 2023. – №12. – С. 15-24.
4. Тетюхин В.В., Левин И.В., Шибанов А.С., Винокуров Д.В. Опыт промышленного производства крупногабаритных сложноконтурных штампованных поковок из нового высокопрочного титанового сплава VST5553 // Сборник трудов “Международной конференции Ti-2008 в СНГ”. – Киев: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова, 2008. – С. 66-70.

Сведения об авторах:

Егорова Юлия Борисовна – д.т.н., профессор, заместитель директора по учебной работе;
Давыденко Людмила Васильевна – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Материаловедение»;
Егоров Евгений Николаевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры ТПАД.

КОНЦЕПЦИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ НА ПРИЕМЕ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА В СИСТЕМЕ ОРЭ «ЭЦН-ЭЦН»

Тотанов А.С.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Ключевые слова: электроцентробежный насос, забойное давление, стабилизация параметров, одновременная раздельная эксплуатация, нефтегазовый комплекс, контроль давления, автоматизация добычи, регулирование режимов.

Аннотация. В статье исследуется проблема поддержания стабильного динамического уровня жидкости на приеме электроцентробежного насоса при нерегулярном притоке. Представлена разработанная система контроля давления на входе насосного оборудования, адаптированная для применений в установках одновременной раздельной эксплуатации пластов. Рассмотрены конструктивные и функциональные особенности предлагаемого решения, а также предложен инновационный метод обеспечения заданных значений уровня жидкости и входного давления. Полученные результаты представляют практический интерес для специалистов нефтегазовой отрасли, предоставляя методическую основу для создания эффективных систем управления технологическими параметрами в многопластовых скважинах с электроцентробежными насосами.

CONCEPT OF INTAKE PRESSURE STABILIZATION FOR AN ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP IN A DUAL ESP "ESP-ESP" SYSTEM

Totanolov A.S.

Ufa State Petroleum Technological University Ufa

Keywords: electric centrifugal pump, bottomhole pressure, parameter stabilization, simultaneous separate operation, oil and gas complex, pressure monitoring, production automation, mode regulation.

Abstract. The article investigates the problem of maintaining a stable dynamic fluid level at the intake of an electric centrifugal pump under irregular inflow conditions. A developed pressure control system at the pump equipment inlet is presented, adapted for applications in simultaneous separate production installations. The design and functional features of the proposed solution are considered, and an innovative method for ensuring specified fluid level and intake pressure values is proposed. The obtained results are of practical interest for oil and gas industry specialists, providing a methodological basis for creating effective control systems for technological parameters in multi-layer wells with electric centrifugal pumps.

Актуальность исследования обусловлена широким использованием систем одновременной раздельной эксплуатации (ОРЭ) с электроцентробежными насосами при разработке двухпластовых залежей. Эксплуатационные условия, характеризующиеся изменчивыми пластовыми параметрами, порождают комплекс технических проблем, требующих разрешения. Ключевой из них выступает необходимость стабилизации давления на приеме насоса (и, соответственно, забойного давления), подверженного колебаниям вследствие динамики пластовых характеристик (пластовое давление, коэффициент продуктивности и др.). Падение давления на приеме ниже критического порога провоцирует осложнения в работе установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Последствиями могут стать срыв подачи, деградация напорной

характеристики, интенсификация износа с потерей эффективности или полный выход оборудования из строя. В компоновках ОРЭ с общим приводом возможности регулирования производительности посредством изменения частоты вращения ограничены, поскольку двигатель приводит оба насоса синхронно. В этой связи разработано техническое решение, предполагающее установку байпасного устройства выше зоны подвески УЭЦН для обеспечения стабильного динамического уровня жидкости в стволе и предотвращения эксплуатационных осложнений [1, 2].

Цель исследования: разработать оборудование для стабилизации давления на приеме ЭЦН и математическую модель его функционирования; исследовать динамику изменения уровня жидкости над насосом и давления на его приеме в скважине, оснащенной предложенной системой (в частности, для компоновки ОРЭ типа ЭЦН-ПЭД-ЭЦН). Оборудование и технология эксплуатации должны отличаться низкой стоимостью и ремонтпригодностью в условиях сервисных баз.

Объекты исследования: установка электроцентробежного насоса в составе компоновки ОРЭ, интегрированная с системой стабилизации динамического уровня. Особое внимание уделяется изучению влияния параметров управляющего электроклапана на процесс стабилизации, что необходимо для последующей автоматизации и интеграции с контроллером управляющей станции.

Методология исследования основана на численном решении системы дифференциальных, линейных и нелинейных уравнений, описывающих:

- параметры подачи и давления на выходе УЭЦН в установившемся режиме;
- истечение жидкости через электроклапан с учетом гидравлических сопротивлений;

- гидродинамические процессы в затрубном пространстве при работе системы стабилизации, а именно изменение уровня жидкости над насосом в зависимости от скважинных условий и конструктивных характеристик клапана [3].

Особенности эксплуатации скважин с системами ОРЭ [4, 5]:

1. Сложность вывода на режим из-за неравномерного изменения продуктивности пластов. Частотное регулирование привода не позволяет независимо корректировать работу верхнего и нижнего насосов.

2. Трудности предотвращения отказов ЭЦН, вызванных падением забойного давления и срывом подачи при нестабильном притоке. Алгоритмы защиты управляющей станции (по току или активной мощности) неэффективны при одновременном приводе двух насосов.

3. Высокая стоимость ремонтов. Риск отказа оборудования из-за перегрева и заклинивания насоса влечет за собой дорогостоящий ремонт технологической системы с затратами свыше 1,7 млн руб.

4. Снижение энергоэффективности. Частичный срыв подачи ведет к износу насоса и падению его КПД, что увеличивает энергопотребление, снижает энергоэффективность эксплуатации и повышает себестоимость добычи.

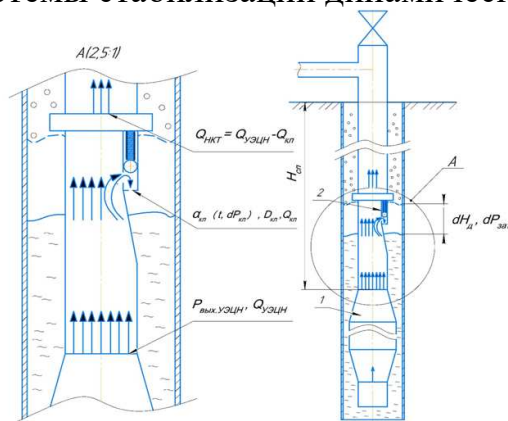
Описание технического решения: система стабилизации давления на приеме ЭЦН включает:

- Наземную станцию управления УЭЦН с контроллером электроклапана.
- ЭЦН в составе ОРЭ (как частный случай системы регулирования), оснащенный термоманометрической системой (ТМС) для регистрации

температуры и давления с целью управления клапаном.

Принцип работы. Датчик давления ТМС фиксирует давление на приеме насоса и его динамику. Альтернативно система может настраиваться по температуре: при падении давления, снижении производительности и КПД происходит нагрев ЭЦН, регистрируемый датчиком температуры ТМС. При снижении давления ниже критического порога управляемый электроклапан активируется, постепенно открывая проходное сечение и перепуская часть потока из НКТ в затрубное пространство. Это повышает и стабилизирует динамический уровень жидкости, предотвращая срыв подачи и отказ оборудования. При восстановлении давления до заданного значения клапан закрывается. Процесс может осуществляться циклически для поддержания требуемого давления на приеме [6].

На рисунке 1 представлена схема устройства с указанием направлений потоков в НКТ и электроклапане, а также ключевых параметров, входящих в математическую модель системы стабилизации динамического уровня.



1 – установка электроцентробежного насоса, 2 – электроклапан

Рис. 1. Расчетная схема системы стабилизации давления на приеме ЭЦН

Математическое описание работы электроклапана системы стабилизации основано на зависимости для расхода жидкости через электроклапан как функции перепада давления на клапане [7, 8]:

$$Q_{кл} = \lambda_{кл} \alpha_{кл} S_{кл} \sqrt{\frac{2}{\rho_{ж}} (dP_{кл})} \cdot \text{sign}(dP_{кл}), \quad (1)$$

где $dP_{кл} = P_{НКТ} - P_{затр}$, перепад давления на клапане (между НКТ и затрубным пространством), Па; $P_{затр}$ – давление в затрубном пространстве на глубине

установки электроклапана, Па; $\lambda_{кл} = \frac{0,05}{\sqrt{1 + \frac{L_{кл} 0,316}{D_{кл}^4 \sqrt{Re}}}}$ – коэффициент

гидравлического сопротивления; $\alpha_{кл}$ – коэффициент степени открытия проходного сечения клапана; $L_{кл}$ – длина электроклапана, м; $D_{кл}$ – внутренний диаметр электроклапана, м; Re – число Рейнольдса; $S_{кл}$ – площадь поперечного сечения клапана, м².

На рисунке 2 представлен пример численного моделирования гипотетической скважины, в которой вследствие нестабильного притока жидкости

из пласта уровень жидкости над насосом снизился со 335 до 135 м, при этом давление на приеме насоса снизилось до значения 1,5 МПа (жидкость в затрубном пространстве нефть плотностью 800 кг/м^3 , давление газа в затрубном пространстве принято 0,4 МПа). После открытия электроуправляемого клапана уровень жидкости над насосом увеличивается на 200 м, а давление на приеме в 2 раза, до 3,1 МПа, при этом газ, находящийся выше уровня жидкости, постепенно сжимается. Диаметр отверстия электроклапана варьировался от 6 до 15 мм, а его длина принята 50 мм. Исходя из полученных результатов моделирования видно, что интенсивность восстановления уровня жидкости над насосом зависит от диаметра проходного сечения электроклапана. При значении диаметра 6 мм время восстановления уровня жидкости составляет более 200 мин, или 3,5 ч, при диаметре 9 мм время стабилизации 100 мин, или 1,7 ч, при диаметре 12 мм время стабилизации 55 мин, или 0,9 ч, а при диаметре 15 мм время стабилизации составляет около 40 мин, или 0,7 ч.

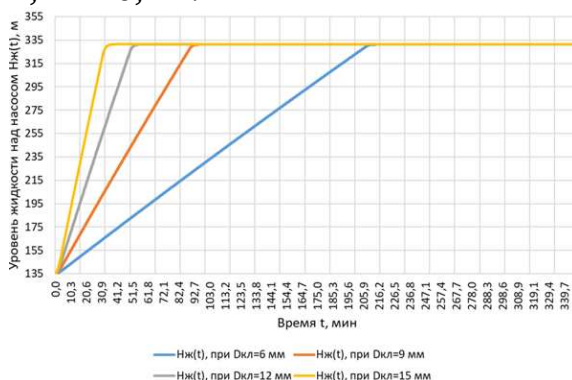


Рис. 2. Моделирование восстановления уровня жидкости над насосом $H_{ж}(t)$ в скважине

Ниже на рисунках 3, 4 аналогично представлено численное моделирование изменения расхода жидкости при ее прохождении через электроклапан при различных значениях диаметра и длины клапана.

Максимальная производительность системы при расширении проходного сечения электроклапана с 6 до 15 мм возрастает с 6 до 38 $\text{м}^3/\text{сут}$. (рис. 3). Динамика изменения расхода во времени определяется перепадом давления на клапане, при этом увеличенное проходное сечение обеспечивает более интенсивное восстановление динамического уровня жидкости. Коэффициент расхода демонстрирует обратную зависимость от длины клапана: при увеличении длины с 50 до 600 мм его значение снижается с 0,047 до 0,03 (рис. 4), что свидетельствует о возрастании гидравлических сопротивлений в системе.

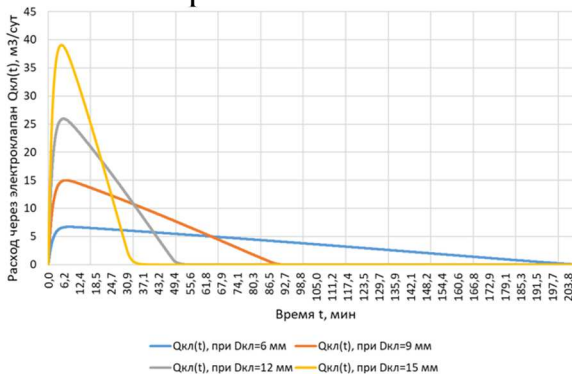


Рис. 3. Зависимость расхода жидкости через электроклапан по времени при различных значениях диаметра проходного сечения электроклапана

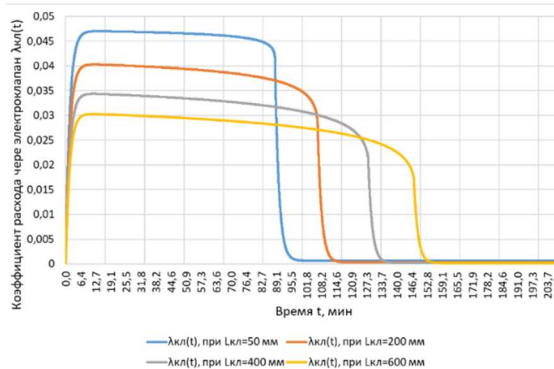


Рис. 4. Зависимость коэффициента расхода жидкости через электроклапан по времени при различных значениях длины электроклапана

Таким образом, разработана математическая модель, описывающая функционирование системы стабилизации динамического уровня в скважине, оснащенной установкой электроцентробежного насоса. Проведено исследование влияния ключевых регулируемых параметров электроклапана – диаметра проходного отверстия и длины – на процесс стабилизации. На разработанное техническое решение получен патент на изобретение.

Ожидается, что внедрение предлагаемого устройства для регулирования давления на приеме насоса в системах одновременной раздельной добычи позволит повысить их эксплуатационную надежность, предотвратить отказы оборудования и расширить область применения таких систем в нефтедобыче, что в конечном итоге приведет к снижению операционных затрат добывающих предприятий.

Список литературы

1. Вахитова Р.И., Сарачева Д.А., Уразаков К.Р., Думлер Е.Б. Повышение эффективности работы электроцентробежных установок при добыче нефти с высоким газосодержанием // АГНИ, Альметьевск. – 2019.
2. Лугуманов Т.Т., Кулешов В.С. К моделированию динамики системы флюид–дисперсная среда // Труды Института механики имени Р.Р. Мавлютова Уфимского Научного центра Российской Академии Наук. – 2014. – №10. – С.66-72.
3. Николаев О.В., Соколов В.А. Методика расчета технологических параметров вертикальных газовых скважин, продукция которых содержит жидкость // Вести газовой науки. – 2016. – №2 (26). – С. 84-90.
4. Уразаков К.Р., Тимашев Э.О., Молчанова В.А., Волков М.Г. Справочник по добыче нефти. – Пермь: Астер Плюс, 2020. – 600 с.
5. Репин Н.Н., Еникеев В.Р., Юсупов О.М., Валишин Ю.Г., Марков-Осоргин А.В. Эксплуатация глубинно-насосных скважин. – М.: Недра, 1971. – 168 с.
6. Репин Н.Н., Девликамов В.В., Юсупов О.М., Дьячук А.И. Технология механизированной добычи нефти. – М.: Недра, 1976. – 176 с.
7. Тимашев Э.О., Уразаков К.Р. Гидродинамика газожидкостного потока в насосных трубах штанговых установок // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18, №4. – С. 125-133.
8. Takacs G. Electrical Submersible Pumps Manual. Houston, – Texas: Gulf Professional Publishing, 2017. – 578 p.

Сведения об авторе:

Тотанов Александр Сергеевич – аспирант.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ПОДБОРА РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ОДНОВРЕМЕННО-РАЗДЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ЭЦН-ЭЦН

Тотанов А.С.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Ключевые слова: одновременная раздельная эксплуатация, электроцентробежный насос, многопластовая скважина, математическое моделирование, оптимизация режима, методология подбора оборудования.

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы совершенствования методологии подбора технологических режимов работы систем одновременной раздельной эксплуатации многопластовых скважин. Особое внимание уделяется анализу взаимодействия насосных ступеней через общий привод. Исследуются явления гидродинамической блокировки пластов при некорректном выборе параметров оборудования. Анализируются существующие подходы к расчету систем ЭЦН-ЭЦН. Обосновывается необходимость учета динамических процессов в системе. На основе проведенного исследования разработана математическая модель, учитывающая упругие свойства флюида и взаимосвязь параметров насосов. Автор делает выводы о возможности оптимизации режимов работы путем частотного регулирования привода. Научная новизна заключается в разработке комплексной методики подбора оборудования. Практическая значимость заключается в снижении аварийных отключений и повышении эффективности разработки. Материалы могут быть полезны для проектирования систем одновременной раздельной эксплуатации.

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR SELECTING OPERATING MODES OF SIMULTANEOUS SEPARATE PRODUCTION ESP-ESP SYSTEMS

Totanolov A.S.

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

Keywords: simultaneous separate operation, electric centrifugal pump, multi-layer well, mathematical modeling, mode optimization, equipment selection methodology.

Abstract. The paper discusses the issues of improving the methodology for selecting technological operating modes of simultaneous separate production systems for multi-layer wells. Particular attention is paid to the analysis of the interaction of pump stages through a common drive. The phenomena of hydrodynamic blocking of formations with incorrect selection of equipment parameters are investigated. Existing approaches to the calculation of ESP-ESP systems are analyzed. The necessity of taking into account dynamic processes in the system is substantiated. Based on the conducted research, a mathematical model has been developed that takes into account the elastic properties of the fluid and the relationship of pump parameters. The author concludes that it is possible to optimize operating modes through frequency control of the drive. The scientific novelty lies in the development of a comprehensive equipment selection methodology. The practical significance lies in reducing emergency shutdowns and increasing development efficiency. The materials can be useful for designing simultaneous separate production systems.

Введение

Разработка нефтяных месторождений со сложным многослойным строением требует применения специальных технологических решений [3]. Одним из наиболее перспективных направлений является технология одновременной

раздельной эксплуатации (ОРЭ), позволяющая вести независимый отбор из нескольких горизонтов в рамках одной скважины [1].

Технической реализацией данной технологии являются компоновки, включающие два электроцентробежных насоса (ЭЦН), приводимые в движение общим погружным электродвигателем (ПЭД) [2]. Однако эксплуатация таких систем сопряжена с технологическими сложностями, связанными с корректным определением параметров насосного оборудования.

Целью настоящего исследования является разработка усовершенствованной методологии подбора режимов работы систем ОРЭ на основе математического моделирования и создание практического инструментария для оптимизации технологических режимов.

Математическая модель системы ОРЭ

Для анализа работы системы разработана математическая модель, описывающая динамику работы двух ЭЦН с общим приводом.

Основные уравнения

Приток жидкости из пластов описывается линейными зависимостями:

$$Q_n = K_n (p_{пл.н} - p_{заб.н}), \quad (1)$$

где Q_n – дебит нижнего пласта, м³/сут.; K_n – коэффициент продуктивности нижнего пласта, м³/(сут.·МПа); $p_{пл.н}$ – пластовое давление нижнего пласта, МПа; $p_{заб.н}$ – забойное давление нижнего пласта, МПа.

Для верхнего пласта аналогично:

$$Q_v = K_v (p_{пл.в} - p_{заб.в}). \quad (2)$$

Динамические уравнения

Изменение забойного давления в системе:

$$\frac{dP_{заб}}{dt} = \frac{E}{V_0} (K_v (p_{пл.н} - p_{заб.н}) - Q_{эцн1}), \quad (3)$$

где E – модуль упругости жидкости, МПа⁻¹; V_0 – начальный объем жидкости, м³; $Q_{эцн1}$ – подача нижнего ЭЦН, м³/сут.

Связь через общий привод

Характеристики насосов связаны через общую частоту вращения:

$$Q_{эцн1} = Q_{ном1} \frac{f}{f_{ном}}, \quad (4)$$

$$Q_{эцн2} = Q_{ном2} \frac{f}{f_{ном}}, \quad (4)$$

где f – текущая частота вращения ПЭД, Гц; $f_{ном}$ – номинальная частота, Гц.

Результаты исследования

Проведено моделирование системы с варьированием параметров оборудования. На рисунке 1 представлена схема компоновки системы.

В таблице 1 представлены исходные данные для моделирования.

Результаты сравнения расчетных и фактических параметров представлены в таблице 2.

Средняя погрешность расчета составила 5-7%, что свидетельствует о достаточной точности разработанной модели.

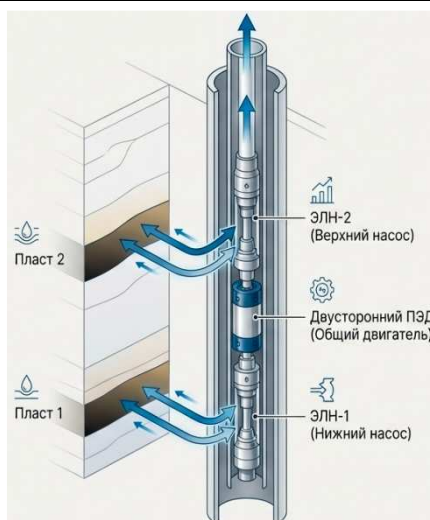


Рис. 1. Схема компоновки системы ЭЦН-ЭЦН

Табл. 1. Исходные параметры для моделирования

Параметр	Скважина №1	Скважина №2	Скважина №3
$p_{пл.в}$, МПа	16,8	17,3	16,5
$p_{пл.н}$, МПа	18,3	18,1	17,3
$K_{пл.в}$, мЗ/(сут·МПа)	1,2	7,0	3,42
$K_{пл.н}$, мЗ/(сут·МПа)	2,9	2,48	2,75

Табл. 2. Сравнение расчетных и фактических параметров

Скв. №	$P_{пр2}$, МПа		$Q_{эцн2}$, м³/сут	
	расч.	факт.	расч.	факт.
1	5,7	5,4	50,3	53,0
2	4,1	3,8	135,1	140,0
3	6,4	6,1	75,2	71,0

Анализ влияния компоновок насосов

На рисунке 2 представлено распределение притока жидкости из нижнего и верхнего пластов при различных компоновках нижнего ЭЦН. Как видно из графика, с увеличением производительности нижнего насоса наблюдается рост притока из нижнего пласта, однако при этом происходит снижение притока из верхнего пласта.

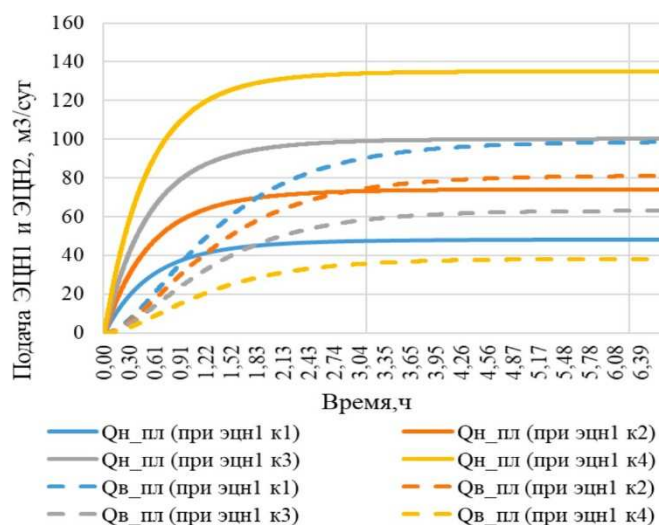


Рис. 2. Распределение притока жидкости из нижнего и верхнего пластов при различных компоновках нижнего ЭЦН

Влияние частоты вращения

На рисунке 3 показано влияние частоты вращения ПЭД на подачи верхнего и нижнего ЭЦН. Увеличение частоты вращения позволяет повысить подачу насосов при обеспечении необходимой депрессии на пласты.

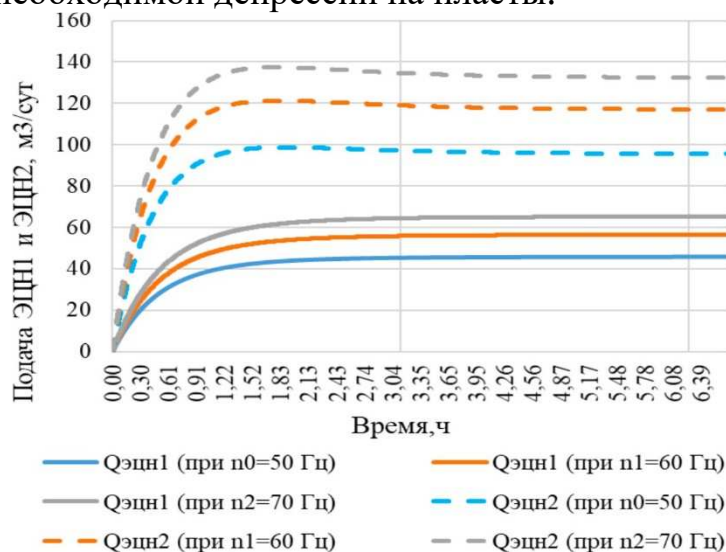


Рис. 3. Влияние частоты вращения ПЭД на подачи верхнего и нижнего ЭЦН

Динамика давлений

На рисунке 4 представлена динамика давлений на приеме ЭЦН-1 и ЭЦН-2 при различных частотах вращения ПЭД. Результаты моделирования свидетельствуют об увеличении развиваемой депрессии на верхний пласт при регулировании частоты вращения.

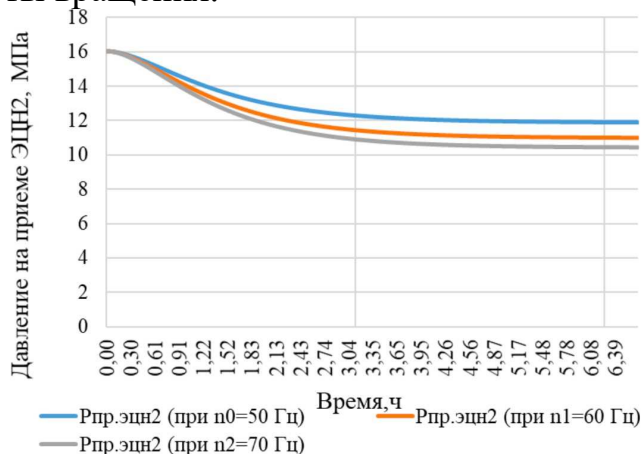


Рис. 4. Динамика давлений на приеме ЭЦН-1 и ЭЦН-2 при различных

Анализ результатов показал, что с увеличением производительности нижнего насоса наблюдается рост притока из нижнего пласта, однако при этом может происходить снижение притока из верхнего пласта из-за роста противодавления.

Практическая методика подбора режимов

На основе результатов исследования разработана практическая методика подбора оптимальных режимов работы, включающая следующие этапы:

- 1) определение целевых дебитов по каждому пласту;
- 2) расчет требуемых забойных давлений;
- 3) выбор типоразмеров ЭЦН;

- 4) моделирование совместной работы насосов;
- 5) определение оптимальной частоты вращения;
- 6) анализ устойчивости выбранного режима;
- 7) формирование рекомендаций по настройке.

Важным инструментом оптимизации является частотное регулирование привода. Увеличение частоты вращения позволяет повысить подачи насосов при обеспечении необходимой депрессии на пласты.

Заключение

Разработанная методология позволяет повысить эффективность проектирования и эксплуатации систем одновременной раздельной эксплуатации. Основные результаты включают:

- 1) разработку математической модели системы ОРЭ;
- 2) верификацию модели на промысловых данных;
- 3) создание практической методики подбора режимов;
- 4) формирование рекомендаций по оптимизации работы.

Внедрение предложенных решений позволит сократить количество аварийных отключений оборудования и повысить эффективность разработки многопластовых месторождений.

Список литературы

1. Галяветдинов И.И., Агафонов А.А., Насыров В.А. Опыт эксплуатации различных компоновок ОРЭ // Инженерная практика. – 2015. – №3. – С. 45-52.
2. Уразаков К.Р., Мухин И.А., Вахитова Р.И. Исследование характеристик струйного насоса численным моделированием // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13, №14. – С. 149-154.
3. Smith J.D., Johnson R.W. Simultaneous separate production: technological challenges and solutions // Journal of Petroleum Technology. 2021, vol. 73, no. 5, pp. 45-52.

Сведения об авторе:

Тотанов Александр Сергеевич – аспирант.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РАМКАХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСЕВЫХ СТУПЕНЕЙ В СОСТАВЕ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ

Харисов Э.Т.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, установка электроприводного центробежного насоса, стендовые испытания, осевая ступень.

Аннотация. В рамках проводимых исследований в области конструирования осевых ступеней была выполнена серия расчетов в программном пакете, в котором имеется возможность моделировать течение однофазного потока. Исследуемая осевая ступень состоит из рабочего колеса и направляющего аппарата. По результату численных исследований удалось определить характер течения потока в проточных каналах исследуемых конструкций. Достигнута высокая сходимость и низкая погрешность относительно стендовых испытаний.

IMPROVING THE ACCURACY OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN RESEARCH ON AXIAL STAGES IN ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP

Kharisov E.T.

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow

Keywords: hydrodynamic modeling, installation of an electric centrifugal pump, bench tests, axial stage.

Abstract. As part of ongoing research in the field of axial stage design, a series of calculations was performed using software that can simulate single-phase flow. The axial stage under study consists of an impeller and a guide apparatus. Based on the results of numerical studies, it was possible to determine the nature of the flow in the flow channels of the structures under study. High convergence and low error relative to bench tests were achieved.

На сегодняшний день одним из важных составляющих современных исследований и производства в областях насосостроения является использование всех необходимых инструментов систем автоматизированного проектирования. Одним из таких инструментов является вычислительная гидродинамика. На рисунке 1 представлена расчетная модель исследуемой конструкции осевого насоса [1].

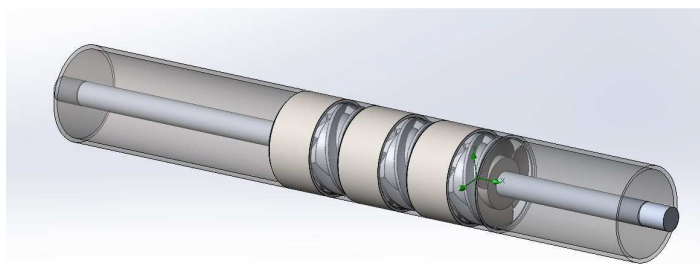


Рис. 1. Исследуемая конструкция осевого насоса

В ходе расчета задается характер течения потока. Исследуя данную конструкцию, применяется турбулентное течение. Модельная жидкость: вода.

Задается расчетная область, ограниченная внутренним объемом модели. Вращающимися областями являются рабочие колеса. Число оборотов вала 2917 об/мин, при данном числе оборотов происходит снятие напорно-расходных характеристик установок электроприводных лопастных насосов. На внутренних стенках патрубков задаются граничные условия: давление (300000 Па) и объемный расход жидкости (от 0 до 550 м³/сут). Для построения характеристики задаются серия расчетов с изменением расхода жидкости. Исключаются из проточной части вспомогательные элементы (область вращения и датчики). Цели расчета – это численные значения, которые считываются и сравниваются каждую итерацию. Для повышения точности задано: 8 поверхностных целей; 1 глобальная цель; 3 цели в виде формул.

Поверхностные цели:

- среднее значения давления на входе и выходе;
- массовый расход на входе и выходе;
- объемный расход на входе и выходе;
- момент (вращающиеся объекты: рабочие колеса, вал)
- плотность на входе.

Глобальная цель:

- максимальная глобальная скорость.

Цели в виде формул:

- мощность:

$$P = N \cdot n \quad (1)$$

где N – мощность (поверхностная цель), Н·м; n – частота вращения, рад/с;

- напор:

$$H = \frac{P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}}{\rho \cdot g} \quad (2)$$

где $P_{\text{вых}}$ – давление на выходе (поверхностная цель), Па; $P_{\text{вх}}$ – давление на входе (поверхностная цель), Па; ρ – плотность среды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

- КПД:

$$\eta = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{P} \cdot 100, \quad (3)$$

где Q – объемный расход (поверхностная цель), м³/с; H – напор, м; ρ – плотность среды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; P – мощность, Вт.

Одним из важных элементов в ходе численного моделирования движения потока в проточных канала осевого насоса является сетка. Для построения стеки выбранных прототипов используется автоматический режим, так как последние версии «SolidWorks Flow Simulation 2025» имеют достаточно точный механизм для оценки особенностей модели. Сетка становится грубее в местах расположения направляющих аппаратов и рабочих колес. Малые значения принимаются непосредственно рядом с поверхностями проточных каналов. Среднее число ячеек в расчетных моделях составляет 1009188 [2, 3].

Исходя из полученных значений основных характеристик насосного оборудования (напор, мощность, КПД) было выявлено, что значения наиболее приближенные к реальным получаются при анализе второй ступени из трех.

Связано это в первую очередь, что датчики считывают значения непосредственно перед входом в рабочее колесо и после выхода из направляющего аппарата, что уменьшает потери давления и снижения расходных параметров, если рассматривать эти значений на границах патрубков. Приближение численного моделирования к реальным достигается в том числе при использовании кольцевых патрубков. В таблице 1 представлено сравнение полученных результатов с данными стендовых испытаний данной конструкции при подаче 300 м³/сут.

Табл. 1. Сравнение значений считываемых параметров при разных местах считывания параметров и конструкциях патрубков

Место считывания показателей давления в системе	Форма патрубков	Н, м	КПД, %	Напор, м (стенд)	КПД, % (стенд)	Относительная погрешность, %	
						Напор	КПД
Датчики между входом и выходом второй ступени	Кольцевая	3	44	3,4	52,5	10,4	16,2
	Окружность	2,4	37			28,4	29,5
Датчики между входом в первое рабочее колесо и выходом из последнего направляющего аппарата	Кольцевая	1,3	25			61,2	52,4
	Окружность	2,6	39			22,4	25,7

В ходе проведенного гидродинамического моделирования достигнута удовлетворительная сходимость. Выявлено, что снятие показателей со второй ступени осевого насоса повышает точность гидродинамических исследований.

Список литературы

1. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
2. Сазонов Ю.А., Муленко В.В., Балака А.Ю. Насосы и гидравлические двигатели объемно-динамического типа для нефтяной промышленности // Территория Нефтегаз. – 2011. – №12. – С. 36-39.
3. Сазонов Ю.А., Долов Т.Р., Муленко В.В. Использование CFD и аддитивных технологий в рамках развития газодинамических исследований и гидродинамических процессов в газовых сепараторах // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2025. – №4(148). – С. 21-27.

Сведения об авторе:

Харисов Эмиль Тимурович – аспирант.

УСТАНОВКА АЭРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЗИНТЕГРИРОВАНИЯ ЛИСТОВЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

Чащилов Д.В.¹, Чащилова В.Д.², Павлова К.И.,³ Павлов И.Н.²

¹*Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения
Российской академии наук, Бийск;*

²*Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск;*

³*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Новосибирск*

Ключевые слова: листовой материал, дезинтегрирование, техническая целлюлоза, растительные волокна, армирующий наполнитель, композиционный материал.

Аннотация. Используют установку на основе молотковой мельницы с решетной декой, валкового питателя и всасывающего пневмотранспорта для дезинтегрирования листовых материалов. Листы на основе растительных волокон или технической целлюлозы питателем подаются в мельницу, продукты обработки удаляются пневмотранспортом. Обработанные таким образом растительные волокна могут быть использованы в качестве армирующего наполнителя органоминеральных композиционных материалов.

INSTALLATION FOR AEROMECHANICAL DISINTEGRATION OF SHEET CELLULOSE MATERIALS IN THE PREPARATION OF PLANT FIBERS FOR REINFORCING ORGANOMINERAL COMPOSITES

Chashchilov D.V.¹, Chashchilova V.D.², Pavlova K.I.³, Pavlov I.N.²

¹*Institute of Problems of Chemical and Energy Technologies of the Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences, Biysk;*

²*Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University
named after I.I. Polzunov, Biysk;*

³*Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk*

Keywords: sheet material, disintegration, technical cellulose, plant fibers, reinforcing filler, composite material.

Abstract. An installation based on a hammer mill with a sieve deck, a roller feeder and a suction pneumatic conveyor is used for disintegrating sheet materials. Sheets based on vegetable fibers or industrial cellulose are fed into the mill by a feeder, and the processed products are removed by a pneumatic conveyor. The plant fibers processed in this way can be used as a reinforcing filler for organomineral composite materials.

Органоминеральные композиты, армированные натуральными волокнами, являются перспективным видом конструкционных и функциональных материалов [1]. Проблемами являются ограниченность сведений по влиянию механической пневмомеханической обработки на качество растительных волокон, при получении органоминеральных композитов, и высокая энергоемкость такой обработки [2-4]. Актуальность проблемы обусловлена расширением области

применения растительных волокон, как армирующего наполнителя композитов, и необходимостью снижения энергозатрат на обработку волокнистых материалов [5].

Лист – тонкий и плоский прямоугольный кусок. Листы, как правило, складываются в пачку, располагаясь в несколько десятков ярусов или слоев по высоте. Лист получают путем разрезания непрерывной ленты на фрагменты мерной длины. Форма листа наиболее универсальна по возможностям использования. Лист – это плотная форма целлюлозы, которую используют, как правило, для уменьшения объема материала. Это позволяет сократить издержки на хранение и перевозку целлюлозного сырья.

Цель данной работы – проведение дополнительной аэромеханической обработки листов из растительных волокон при армировании органоминеральных композитов.

Для проведения исследований была вновь разработана специальная установка [6]. В ее основе лежит использование комплекса технологического измельчительно-классифицирующего и транспортного оборудования. Валковый питатель используется для регулируемой подачи листов волокнистого сырья. Молотковая мельница предназначена непосредственно для технологической обработки сырья – дезинтеграции и измельчения, посредством удара и истирания. Съемная решетчатая дека служит для механической классификации продуктов обработки. Пневмотранспорт всасывающего типа служит для направленного движения обработанного сырья, как через классифицирующую поверхность в мельнице, так и по каналам непосредственно пневмотранспорта. При этом волокнистый материал движется в составе аэросмеси, вместе с воздухом. Наряду с мельницей и классификатором, пневмотранспорт обеспечивает комплексную аэромеханическую обработку сырья.

Листовую целлюлозу пропускали через данную установку. При этом окружная скорость ротора составляла 45 м/с, удельная производительность классификатора по проходу $6,3 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{с}$, коэффициент расхода пневмотранспорта $0,015 \text{ кг/кг}$ воздуха. Кратность циркуляции отработанного воздуха достигала величины 1:9.

Обработанные растительные волокна использовали для армирования гипсоволокнистых образцов. Также готовили контрольные образцы – с армированием на основе необработанных растительных волокон. Образцы в виде кубиков с длиной стороны 40 мм испытывали на сжатие. По результатам испытаний определяли механические характеристики материала образцов – прочность при разрушении, модуль продольной упругости, предельную относительную деформацию. Также определяли кажущуюся плотность образцов.

По итогам проведенных исследований установили, что испытанная установки позволяет существенно сократить выброс отработанного воздуха в атмосферу. Обработанный волокнистый материал позволяет получить гипсоволокнистые с различной кажущейся плотностью – от 500 до 1200 кг/м^3 . Для примера, приведены характеристики образцов с армированием обработанными растительными волокнами с кажущейся плотностью 650 кг/м^3 .

Предельное нормальное напряжение при сжатии составило $4,2 \pm 0,9 \text{ МПа}$. Модуль продольной упругости при сжатии составил $3,5 \pm 0,3 \text{ МПа}$. Предельная

относительная деформация при разрушении составила $5,4 \pm 0,2\%$. При этом, по сравнению с гипсоволокнистыми образцами с такой же кажущейся плотностью, армированными необработанными растительными волокнами, прочность при сжатии возросла на 17% (статистически значимая величина). Остальные механические характеристики практически не изменились – изменения в пределах статистической погрешности.

Полученные результаты могут быть использованы при получении дезинтегрированных растительных волокон, для армирования органоминеральных композитов.

Работа выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Список литературы

1. Keijsers E.R.P., Yilmaz G., Van Dam J.E.G. The cellulose resource matrix // Carbohydrate Polymers. 2013, vol. 93(1), pp. 9-21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.08.110.
2. Podgorbunskikh E.M., Bychkov A.L., Bulina N.V., Lomovskii O.I. Disordering of the crystal structure of cellulose under mechanical activation // Journal of Structural Chemistry. 2018, vol. 59(1), pp. 201-208.
3. Chashchilov D.V. First effort of research in the process of garnetting of cellulosic materials and analysis of equipment operation: from the laboratory bench to the industrial installation // From Chemistry Towards Technology Step-By-Step. 2021, vol. 2, no. 1. pp. 116-125. DOI: 10.52957/27821900_2021_01_116.
4. Huang L., Wu Q., Wang Q., Wolkott M. Mechanical activation and characterization of micronized cellulose particles from pulp fiber // Industrial Crops and Products. 2019, vol. 141, p. 111750. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111750.
5. Lee H., Mani S. Mechanical pretreatment of cellulose pulp to produce cellulose nanofibrils using a dry grinding method // Industrial Crops and Products. 2017, vol. 104, pp. 179-187. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.04.044.
6. Патент №2814436 РФ. Устройство для распушивания целлюлозы и материалов на основе целлюлозы / Д.В. Чащилов. – Заявка №2022133392 от 16.12.2022; опублик. 28.02.2024, Бюл. №7.

Сведения об авторах:

Чащилов Дмитрий Викторович – к.т.н., ведущий инженер лаборатории материаловедения минерального сырья;

Чащилова Виктория Дмитриевна – студентка;

Павлова Кристина Игоревна – студентка;

Павлов Игорь Николаевич – к.т.н., доцент кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств.

СПОСОБ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОНОВЫХ КИСЛОТ В ЛИГНОСУЛЬФОНАТАХ В ПРИСУТСТВИИ ПАРАТОЛУИДИНА

*Лукманова И.Ф., Наумова Д.С., Иванчина Е.А., Рольник Л.З., Тептерева Г.А.
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

Ключевые слова: уроновые кислоты, лигносульфонаты, пентозы, гексозы, глюкуроновая кислота, галактуриновая кислота, ортотолуидин, паратолуидин.

Анотация. Уроновые кислоты представляют собой кислые полисахариды, содержащиеся в древесине различных пород деревьев. Их содержание варьируется в пределах 3,5-6,0% в лиственной древесине и 1,8-3,9% в хвойной. Пектины, образующиеся при гидролизе, включают глюкуроновую и галактуриновую кислоты, участвуя в образовании желатинообразующих свойств лигносульфонатов. Глюкурониды находят широкое применение в медицине, экологическом контроле и агропромышленности. Цель исследования заключается в разработке метода определения количества уроновых кислот в лигносульфонатах путем замены токсичного ортотолуидинового реагента на менее опасный паратолуидиновый. Метод основан на спектрофотометрии и обеспечивает высокую точность анализа, подтвержденную результатами эксперимента. Полученные данные подтверждают эффективность предложенного подхода и открывают перспективы его дальнейшего применения в медицине, экологии и сельском хозяйстве.

METHOD FOR QUANTITATIVE DETERMINATION OF URONIC ACIDS IN LIGNOSULFONATES IN THE PRESENCE OF PARATOLUIDINE

*Lukmanova I.F., Naumova D.S., Ivanchina E.A., Rolnik L.Z., Teptereva G.A.
Ufa State Petroleum Technological University, Russia, Ufa*

Keywords: uronic acids, lignosulfonates, pentoses, hexoses, glucuronic acid, galacturonic acid, orthotoluene, and paratoluene.

Abstract. Uronic acids are acidic polysaccharides found in the wood of various tree species. Their content ranges from 3.5% to 6.0% in deciduous wood and 1.8% to 3.9% in coniferous wood. The pectins produced during hydrolysis include glucuronic and galacturonic acids, which contribute to the gelatinizing properties of lignosulfonates. Glucuronides have widespread applications in medicine, environmental control, and the agricultural industry. The purpose of the study is to develop a method for determining the amount of uronic acids in lignosulfonates by replacing the toxic orthotoluidine reagent with a less hazardous paratoluidine reagent. The method is based on spectrophotometry and provides high-precision analysis, which is confirmed by the experimental results. The obtained data demonstrate the effectiveness of the proposed approach and open up opportunities for its further application in medicine, ecology, and agriculture.

Уроновые кислоты – это кислые полисахариды, присутствующие во всех породах древесины. Содержание уроновых кислот в породах древесины составляет: в древесине лиственных пород – 3,5-6,0%, в древесине хвойных пород – 1,8-3,9%.

С количественным содержанием уроновых кислот связана способность лигносульфонатов к явлению желирования, обусловленного наличием пектиновых веществ. В собственно древесине хвойных и лиственных пород в среднем обнаружено 0,5%-1,5% пектиновых веществ, причем в хвойных содержание их несколько ниже, чем в лиственных породах. При кислотном гидролизе пектинов

образуются пентозы (ксилозы, рибозы). Эти условия необходимы для расщепления гликозидных связей в боковых цепях пектиновых полисахаридов (арабиногалактанов), где и содержатся остатки гексоз. Основная цепь пектина при этом распадается до галактурановой кислоты [3].

Глюкуроновая и галактурановая кислоты являются структурными эписимерами (один из пары диастериоизомеров имеет несколько хиральных центров, но отличаются конфигурацией одного из них). Циклическая форма образуется за счет внутримолекулярной реакции альдегидной (C1) и гидроксильной (C5) групп. Циклическая форма находится в равновесии с линейной в идентичных условиях (рис. 1) [4].

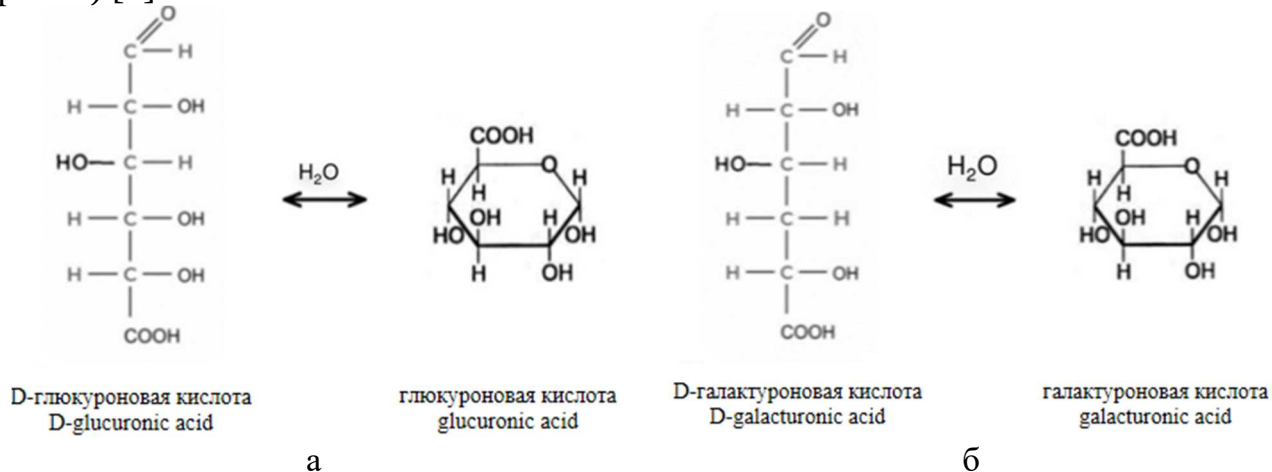


Рис. 1. Таутомерные формы уроновых кислот: а – глюкуроновой, б – галактурановой

Галактурановая кислота широко распространена в природе, являясь структурным компонентом ряда высших полисахаридов: пектинов и камедей [1].

Пектиновые вещества представляют собой сложные эфиры высокомолекулярной полигалактурановой кислоты, участвуют в процессах детоксикации вредных веществ.

Глюкурониды имеют практическое применение в разных сферах: медицине, экологии и сельском хозяйстве. Например, глюкурониды (глауконит) используется как кормовая добавка в животноводстве и птицеводстве, которая улучшает обменные процессы. Этилглюкуронид (этил-β-D-6-глюкуронид) – прямой метаболит этанола, который используется в скрининге, диагностике и мониторинге лечения [2].

Целью данного исследования является разработка методического подхода к определению количественного содержания уроновых кислот, как основы пектинов в составе лигносульфонатов. Разработаны основы методики определения количественного содержания пектинов спектрофотометрическим методом с заменой ортотолуидинового реагента, на менее токсичный паратолуидиновый с последующим расчетом суммарного содержания уроновых кислот как основы пектиновых веществ.

Известно, что при гидролизе углеводной части природных соединений образуется кислые моносахариды, в число которых входят и производные уроновых кислот.

Для построения калибровочного графика зависимости оптической плотности от концентрации нами использовался моносахарид – рибоза.

Зависимость оптической плотности калибровочного графика от концентрации уроновых кислот приведена на рисунке 2.

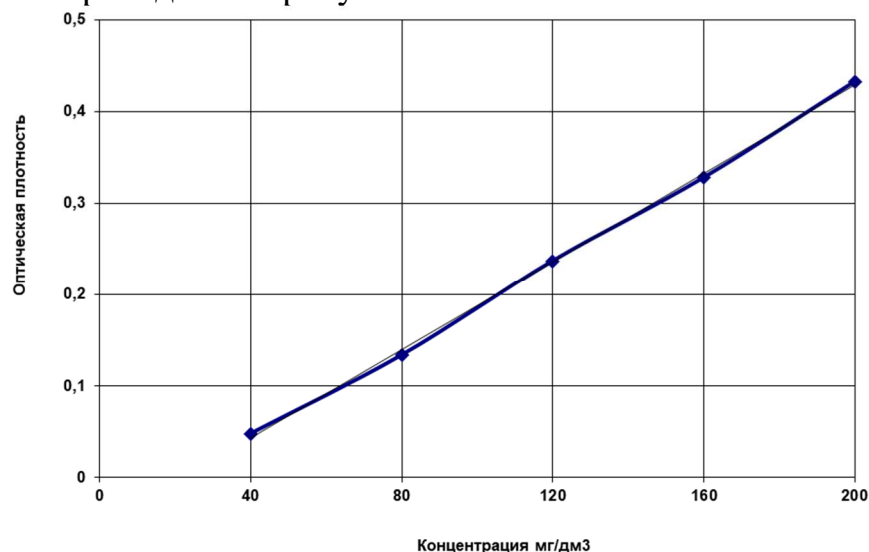


Рис. 2. Зависимость оптической плотности от концентрации пектиновых соединений

Необходимо отметить, что согласно закону Бугера-Ламберта-Бера график должен иметь угол наклона порядка 45 градусов, а численные значения оптической плотности стандартных растворов должны находиться в численном выражении в зоне достоверности величин оптической плотности, что достигается применением микроконцентраций стандартного вещества, что объясняет причины в результате чего пересечения отсечения участка на оси абсцисс происходит с отсечением участка.

Результаты определения количественного содержания уроновых кислот в лигносульфонатах при нейтральном и сульфитном способе делигнификации приведены в таблице 1.

Табл. 1. Содержание уроновых кислот в лигносульфонатах при различных способах делигнификации

Название образца лигносульфоната	Содержание уроновых кислот, мг/дм³	
	Метод с ортотолуидином	Метод с паратолуидином
Нейтральный	81,2	73,6
Сульфитный	<40	<40

Таким образом, разработаны основы методики определения суммарного содержания уроновых кислот в составе углеводной части лигносульфонатов. Предлагаемый метод определения количественного содержания уроновых кислот в углеводной части лигносульфонатов при нейтральном и сульфитном способах делигнификации обладает высокой точностью.

Список литературы

1. Тептерева Г.А. Становление и развитие производства и применения лигносульфонатов и их модифицированных производных: монография. – Уфа: УНПЦ «Нефтегазовое дело», 2023. – 275 с.
2. Дудкин М.С., Громов В.С., Ведерников Н.А. и др. Гемицеллюлозы. – Рига: Зинатне, 1991. – 488 с.

3. Никитин В.М., Оболенская А.В., Щеголев В.П. Химия древесины и целлюлозы. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 368 с.
4. Пацак Й. Органическая химия. – М.: Мир, 1986. – 366 с.

Сведения об авторах:

Тептерева Галина Алексеевна – д.т.н., профессор кафедры общей, аналитической и прикладной химии;

Рольник Любовь Зелиховна – д.х.н., профессор кафедры общей, аналитической и прикладной химии;

Лукманова Ирина Фаниловна – аспирант;

Иванчина Екатерина Алексеевна – аспирант;

Дарья Сергеевна Наумова – аспирант.

МЕТОД РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Данильчук В.С., Веригин А.Н.

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург*

Ключевые слова: структура потоков, кривая отклика, распределение времени пребывания, статистические испытания, случайные числа, метод Монте-Карло.

Аннотация. В схемах с регулярной структурой, таких как ячеечная каскадная модель или циркуляционный контур с ячейками полного перемешивания, для получения теоретических зависимостей распределения времени пребывания используют системы дифференциальных уравнений баланса массы индикатора по ячейкам, либо математический аппарат цепей Маркова. Для нерегулярных структур (произвольно связанных между собой ячеек полного перемешивания и полного вытеснения разного объема) использование данных методов затруднено. В работе предлагается универсальный метод расчета распределения времени пребывания в нерегулярных структурах, основанный на статистических испытаниях с использованием случайных чисел (Метод Монте-Карло).

METHOD FOR CALCULATING THE DISTRIBUTION OF TIME SPENT USING STATISTICAL TESTS

Danilchuk V.S., Verigin A.N.

Saint-Petersburg State Technological institute (technical university), Saint-Petersburg

Keywords: flow structure, response curve, time-of-stay distribution, statistical tests, random numbers, Monte Carlo method.

Abstract. In schemes with a regular structure, such as a cell cascade model or a circulation loop with fully mixed cells, systems of differential equations of the indicator mass balance by cells are used to obtain theoretical dependences of the residence time distribution, or the mathematical apparatus of Markov chains. For irregular structures (arbitrarily interconnected fully mixed and fully displaced cells of different volumes), the use of these methods is difficult. The paper proposes a universal method for calculating the residence time distribution in irregular structures based on statistical tests using random numbers (Monte Carlo method).

Исследование структуры потоков с использованием экспериментальных методов предполагает использование трассеров с подачей на вход импульсного или ступенчатого сигналов и регистрацией отклика системы - изменения концентрации трассера во времени на выходе из аппарата.

Для простейших случаев в схемах с регулярной структурой (ячеечная каскадная модель, циркуляционный контур) теоретические кривые отклика, которые в зависимости от вида сигнала имеют смысл плотности или функции распределения времени пребывания, могут быть получены путем записи и решения дифференциальных уравнений баланса массы индикатора в ячейках от времени. Решение уравнений для ячеечной модели [1] упрощается благодаря простой связи между ячейками - последовательному расположению ячеек полного перемешивания одинакового объема.

Для циркуляционных моделей структуры потоков эффективно использование математического аппарата цепей Маркова [2]. В этом случае циркуляционный контур аппарата аппроксимируется ячейками полного перемешивания одинакового объема связанными между собой потоками. При имитации импульсного ввода индикатора концентрация индикатора в ячейках придается вероятностный физический смысл и устанавливается связь концентраций с характеристиками времени пребывания.

При наличии в схемах ячеек разного объема с разным режимом течения (например, ячеек полного перемешивания и полного вытеснения) связанных друг с другом произвольным образом решение дифференциальных уравнений или применение аппарата цепей Маркова затруднительно. В этом случае для получения функции распределения времени пребывания может быть использован метод статистических испытаний (Монте-Карло) [3].

Универсальность метода статистических испытаний позволяет проводить расчет для сложных ветвящихся схем, включающих ячейки с разным режимом течения, таких, как, например, схема на рисунке 1.

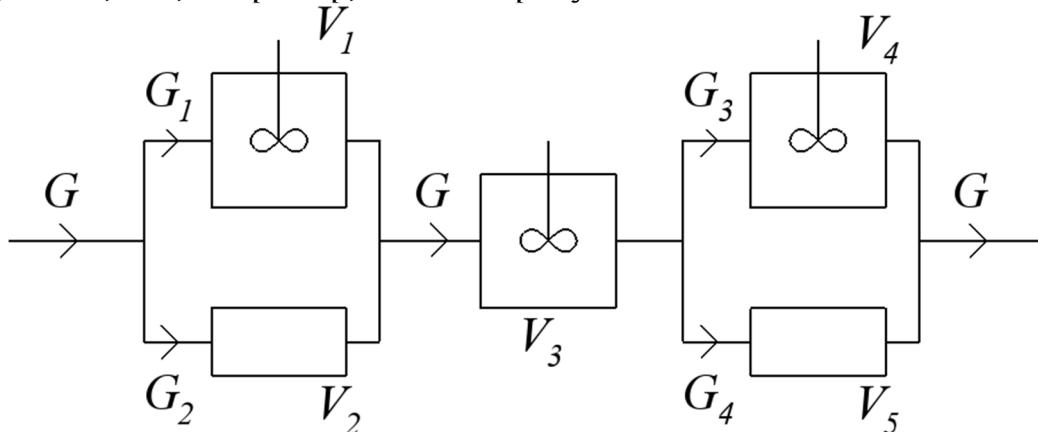


Рис 1. Схема с ветвящимися потоками и ячейками с разным режимом течения;
 V – объем ячейки, G – объемный расход потока

Схема расчета предполагает определение случайного маршрута меченой частицы с использованием случайных чисел и определение времени пребывания в каждом аппарате на этом маршруте. Для ветвящихся схем с разделением потока записываются логические выражения для разыгрывания случайного события - поворота меченой частицы с той или иной частью ветвящегося потока. Для этого используется сравнение вероятности поворота частицы с потоком со стандартной распределенной равномерно на отрезке $0...1$ случайной величиной.

После определения маршрута меченой частицы производится расчет ее случайного времени пребывания в системе. Время пребывания конкретной меченой частицы составляет сумму времен пребывания в отдельных аппаратах.

Для ячеек полного вытеснения время пребывания в ячейке является детерминированной величиной и равно отношению объема ячейки к объемному расходу через нее.

В ячейках полного перемешивания и ячейках с диффузионным режимом течения время пребывания является случайной величиной. Для расчета случайного времени пребывания в таких ячейках используются стандартные случайные числа (равномерно распределенные на отрезке $0...1$), которые преобразуются в

физическое время в соответствии с видом распределения времени пребывания в конкретной ячейке. Для расчета времени пребывания в ячейках полного перемешивания используется экспоненциальное распределение.

Результатом расчета с применением описанного алгоритма является таблица с N значениями случайного времени пребывания элементов потока. В качестве проверки правильности разыгранных случайных величин используется сравнение среднего времени пребывания по рассчитанной таблице с отношением суммы объемов аппаратов схемы к расходу потока жидкости. Для совпадения указанных величин до 3-4 значащей цифры можно увеличить число испытаний N . Табличные значения времени пребывания отдельных частиц используются для построения графических представлений распределения времени пребывания.

Приведенный алгоритм расчета распределения времени пребывания является универсальным и позволяет проводить расчет для схем с нерегулярной структурой произвольной сложности.

Список литературы

1. Веригин А.Н., Федоров В.Н., Данильчук В.С. Химико-технологические агрегаты. Имитационное моделирование. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1998. – 220 с.
2. Клипиницер В.А., Дудоров А.А., Кафаров В.В. Применение циркуляционных моделей для исследования гидродинамики неидеальных смесителей // Анилиноокрасочная промышленность. НИОПИК. – 1968. – Вып. 3. – С. 31-38.
3. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. – М.: Изд-во Юрайт, 2026. – 325 с.

Сведения об авторах:

Данильчук Виталий Сергеевич – к.т.н., доцент;

Веригин Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РУЧНЫХ СЕЛЕКЦИОННЫХ СЕЯЛОК (ХЛОПУШЕК)

Петухов Д.А., Ревенко В.Ю., Белик М.А.

Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, Новокубанск

Ключевые слова: ручная селекционная сеялка, хлопوشка, конструктивные особенности, высевной аппарат, селекция, семеноводство.

Аннотация. Статья посвящена специализированным ручным сеялкам, так называемым «хлопушкам», которые предназначены для штучного посева семян зерновых, зернобобовых и масличных культур как по пару, так и непаровым предшественникам, а также для размножения гибридов F1-F2 и линий с малым количеством семян. В статье рассмотрены конструктивные особенности отечественных и зарубежных ручных сеялок и представлены результаты экспериментальных исследований опытного образца хлопوشки с пневматическим высевным аппаратом.

DESIGN FEATURES OF MANUAL SEEDERS (CRACKERS)

Petukhov D.A., Revenko V.Yu., Belik M.A.

Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support for the Agro-Industrial Complex, Novokubansk

Keywords: manual selection seeder, cracker, design features, seeding apparatus, selection, seed production.

Abstract. This article focuses on specialized manual seeders, also known as «crackers», which are designed for individual sowing of grain, legume, and oilseed crops, both after fallow and after non-fallow preceding crops, as well as for propagating F1-F2 hybrids and lines with low seed production. The article examines the design features of domestic and foreign manual seeders and presents the results of experimental studies of a prototype cracker with a pneumatic seeding unit.

Введение. В настоящее время обеспеченность селекционно-семеноводческих учреждений страны специализированными техническими средствами находится не на должном уровне, т.к. материально-техническая и технологическая база селекции и семеноводства морально и физически устарела, что не позволяет эффективно вести селекционный процесс и обеспечивать производство высококачественных сортовых семян [1].

При этом, вновь создаваемые селекционные машины должны быть удобны в эксплуатации на небольших делянках, обеспечивать высокую точность высева, не допускать сортосмешения, исключать механические повреждения и потери селекционного материала, устойчиво выполнять технологические процессы посева, а также соответствовать параметрам опытного поля по этапам работ [2]. Поэтому разработка пневматической ручной сеялки точного высева «хлопушки» для штучного посева семян в первичных селекционных питомниках своевременна и актуальна.

Цель исследования – систематизированный анализ конструктивных особенностей отечественных и зарубежных образцов ручных селекционных

сеялок «хлопушек» и разработка опытного образца пневматической сеялки для штучного посева семян.

Материалы и методы исследования. Исследования выполнены на основе системного анализа конструктивных особенностей отечественных и зарубежных ручных сеялок для селекции и семеноводства. Функциональные возможности разработанного опытного образца «хлопушки» определены в соответствии с методами, изложенными в ГОСТ 24055-2016 и ГОСТ 31345-2017.

Результаты исследований и обсуждение.

Обзорный анализ показал, что существует множество различных моделей сеялок ручного типа от разных производителей. Однако их принципы работы схожи. Хлопушки имеют конструктивное исполнение с одной рукояткой, или с двумя. Как правило, оборудуются либо одним бункером для семян, либо отдельными бункерами для семян и удобрений (табл. 1) [3].

Несмотря на кажущуюся простоту, данный вид техники должен соответствовать специфическим требованиям, обусловленным особенностями технологии селекционных работ. В частности, хлопушки должны быть легкими и эргономичными, обеспечивать высокую точность высева и предотвращать сортосмешение [4]. Для выполнения данных требований в Новокубанском филиале ФГБНУ «Росинформагротех» (КубНИИТиМ), а также на основании системного анализа существующих образцов отечественного и зарубежного посевного оборудования, был разработан опытный образец ручной пневматической селекционной сеялки (рис. 1) [5, 6].

Табл. 1. Конструктивные особенности отечественных и зарубежных образцов ручных селекционных сеялок

Марка сеялки, параметры, производитель	Достоинства	Недостатки
Сеялка Kгирр 13A Jab, Бразилия, предназначена для посева кукурузы, подсолнечника, сои, сорго и др. культур. Масса сеялки – 3 кг. Габаритные размеры: 100×45×10 см. 	Наличие семенного бункера в конструкции избавляет оператора от необходимости бросать семена в воронку при каждом цикле работы; норма высева семян регулируется в зависимости от количества отверстий в пластине дозатора, также предусмотрена простая регулировка дозы внесения твердых минеральных удобрений.	Чтобы понять уровень и наличие семян и удобрений в бункерах, оператору приходится самостоятельно оценивать их вес, т.к. они выполнены из непрозрачных материалов; перед посевом необходимо откалибровать сеялку для конкретного семени, путем подбора размеров отверстий высевающих пластин; после каждой эксплуатации сеялку необходимо тщательно очищать и высушивать, особенно бункер для удобрений и его дозатор. Также расположение рукояток сеялки предполагает неудобный хват руками с вывернутыми кистями, что сказывается на работоспособности оператора с невысоким ростом и на его дальнейших «ортопедических» проблемах с запястьем.

Табл. 1. Продолжение

Марка сеялки, параметры, производитель	Достоинства	Недостатки
Сеялка Almaso Hand Jab Standard-Style, «Almaso», США, предназначена для посева в хорошо подготовленную почву или на песчаных почвах. Высота сеялки – 84 см, размер отверстия для засыпки семян составляет 6,5×7,6 см. Масса сеялки – 1,8 кг. 	Возможна посадка небольших саженцев деревьев. Более широкая труба и насадка просты в использовании.	Технология посева заключается в том, что сеялку необходимо перемещать от лунки к лунке одной рукой. Поэтому, несмотря на легкость орудия, данный процесс требует наличия определенных физических навыков у оператора.
Прессовая сеялка Naudin Jab Planter, КНР, оснащена регулируемым высевальным роликом, который может сажать широкий спектр семян среднего размера, включая арахис, горох и фасоль. Ролик подбирается для посадки 1 семени, 2 или 3 семян в лунку. 	На посеве кукурузы производительность сеялки получена выше на 20%, чем у традиционной однотрубной сажалки (10,36 часов на посев одного га, против 12,39 ч на 1 га).	Сложность конструкции, невысокая надежность корпуса, все остальные детали и сочленения сеялки (кроме клюва) изготовлены из полимера, который постоянно подвергается механическому воздействию, необходимому для внедрения наконечника в почву, также – относительно высокая стоимость. При высадке 2-х семян в одну лунку, случаются огрехи – в лунку высевается только одно семя.

Табл. 1. Продолжение

Марка сеялки, параметры, производитель	Достоинства	Недостатки
Опытный образец ручной пневматической сеялки НФ ФГБНУ «Росинформагротех», Новокубанск, предназначен для ручного штучного посева семян зерновых, зернобобовых и масличных культур. Габаритные размеры: 110×40×12 см. Масса – 1,9 кг. 	Наличие пневматического высевающего аппарата, позволяет производить точное дозирование семян, что полностью исключает травмирование посевного материала.	Отсутствует бункер для внесения удобрений.

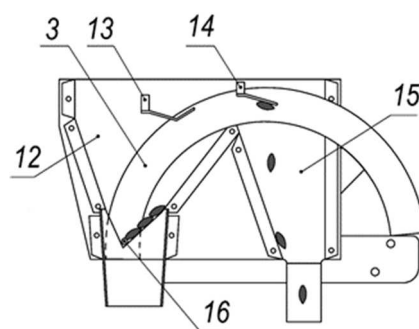
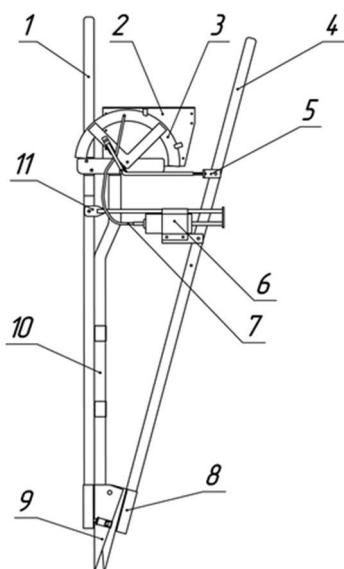


Рис. 1. Конструктивная схема пневматической «хлопушки»

Ручная пневматическая селекционная сеялка состоит из шарнирно соединенных между собой рукояток 1 и 4, на которых смонтированы, бункер для семян 2 с захватывающим сегментом 3, тяга привода захватывающего сегмента 5, вакуумный насос 6 с вакуумной трубкой 7 и тягой привода штока насоса 11, семяпровод 10 и клиновидный сошник 9 с ограничителем глубины заделки семян

8. Бункер для семян с высевальным аппаратом, содержит отсек для семян 12, захватывающий сегмент 3 с однозерновым отверстием для присасывания семян 16, высевальный отсек 15 для подачи семян в семяпровод, а также сбрасыватель двойников 13, который скидывает излишне присосавшиеся семена (двойники, тройники) обратно в семенной отсек 12 и отсекающий сегмент 14, направляющий семена в высевальный отсек 15.

Выполнение посева ручной пневматической селекционной сеялкой производится следующим образом. Перед началом работы на делянке бункер заполняют посевным материалом. Оператор заглубляет клиновидный сошник 9 сеялки в почву до поверхности ограничителя глубины заделки семян 8. Затем, сдвигая рукоятки 1 и 4 приводит в движение тягу привода штока вакуумного насоса 11 и тягу привода захватывающего сегмента 5. За счет разрежения, создаваемого вакуумным насосом 6 к отверстию захватывающего сегмента, присасывается одно семя.

Сегмент, поворачиваясь вокруг своей оси, транспортирует присосанное семя из отсека для семян 12 в высевальный отсек 15. При этом, если к всасывающему отверстию сегмента присосалось более одного семени, то лишние семена отсекаются специальным сбрасывателем 13, регулировка которого происходит перед началом работы с тем или иным видом посевного материала (видом семян сельскохозяйственных культур). При полностью сжатых рукоятках захватывающий сегмент с присосанным семенем доходит до отсекающего 14, который сбрасывает и направляет присосанное семя в высевальный отсек 15. Одновременно происходит сброс разрежения воздуха в пневматической системе, создаваемого вакуумным насосом. Семя из высевального отсека попадает в семяпровод 10, где происходит его осыпание самотеком во внутреннюю полость клиновидного сошника 9, а затем на дно лунки. При раздвигании рукояток 1 и 4 и последующем выеме сеялки из лунки, створки клиновидного сошника 9 сжимаются, а тяги привода захватывающего сегмента 5 и привода штока насоса 11 возвращают детали высевального аппарата в исходное состояние. При этом, заделка семени производится за счет самоосыпания стенок лунки при вынимании сеялки из почвы для проведения последующего цикла посева.

При такой последовательности выполнения технологического процесса обеспечивается достижение нужного результата – штучный посев семян в лунку, с их точным дозированием и исключением травмирования посевного материала.

Оценку работоспособности опытного образца ручной пневматической сеялки точного посева проводили в сравнении с традиционной ручной хлопущей на посеве селекционных делянок подсолнечника (табл. 2) [7].

Рабочая скорость перемещения оператора варьировалась от 0,68 до 1,15 км/ч. При этом, более низкий показатель – 0,68 км/ч, был получен при посеве однорядной ручной хлопущей, что обусловлено необходимостью оператора дозированно брать семена из бункера и по одному бросать их в воронку сеялки.

В противовес, опытный образец ручной сеялки, позволил увеличить рабочую скорость движения оператора в 1,7 раза.

Более высокая производительность за 1 ч основного времени – 0,08 га/ч, была отмечена у ручной пневматической сеялки, что выше на 68,7% в сравнении с

традиционной хлопущкой. Коэффициент использования сменного времени у ручных сеялок достаточно высокий и находится в пределах от 0,85 до 0,87.

Табл. 2. Результаты сравнительной оценки ручных селекционных сеялок на посеве подсолнечника

Наименование показателя	Ручная хлопущка	Ручная пневматическая сеялка
Рабочая скорость движения оператора, км/ч	0,68	1,15
Основная / сменная производительность, га/ч:	0,05 / 0,04	0,08 / 0,07
Коэффициент использования сменного времени	0,85	0,87
Установочная глубина заделки семян средняя, мм	50,0	50,0
Фактическая средняя глубина заделки семян, мм	50,2	51,4
Количественная доля семян, заделанных на заданную глубину ± 1 см, %	90,3	91,0
Заданная норма высева, шт./пог. м	5,0	5,0
Отклонение фактической нормы высева от заданной, %	0,1	0,2
Дробление семян, %	0	0,02
Ширина междурядий, см	70	70
Отклонение фактической ширины междурядий от установочной, см	$\pm 1,0$	$\pm 1,1$
Густота всходов, тыс. шт./га	65,18	65,14
Относительная полевая всхожесть, %	91,8	91,6

Фактическая средняя глубина заделки семян варьировала от 50,2 до 51,4 мм, при заданной глубине – 50,0 мм. При этом семена по глубине распределялись равномерно. Семян, заделанных в слое средней фактической глубины и двух соседних односантиметровых слоях, было 90,3-91,0%, семян на поверхности почвы не наблюдалось.

Дробление семян полностью отсутствовало у классической ручной сажалки, у ручной пневматической сеялки оно незначительное – 0,02%.

Ширина междурядий была практически стабильной, отклонение фактической ширины от установочной варьировало от 1,0 до 1,1 см. При густоте стояния растений после полных всходов подсолнечника 65,14-65,18 тыс. шт./га., относительная полевая всхожесть семян составила 91,6-91,8%.

Выводы

1. Основными преимуществами ручных селекционных сеялок «хлопушек» являются простота конструкции, низкая стоимость и высокая надежность.

2. По сравнению с другими типами селекционных сеялок точного высева, главными недостатками «хлопушек» являются низкая производительность труда и у некоторых образцов – низкая эргономика.

3. В результате экспериментальных исследований установлено, что ручная селекционная сеялка, оборудованная пневматическим высевающим аппаратом, обеспечивает более высокую производительность труда по сравнению с традиционной «хлопушкой», а также точное и качественное выполнение технологической операции посева зерновых, зернобобовых и масличных культур.

Список литературы

1. Буклагин Д.С., Гольдяпин В.Я., Мишуров Н.П., Ревенко В.Ю. Машины, оборудование и приборы для селекции и семеноводства масличных культур: каталог. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021 – 96 с.
2. Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Колчина Л.М., Мишуров Н.П., Гольдяпин В.Я., Кузьмина Т.Н. Машины для селекции, сортоиспытания и первичного семеноводства полевых культур. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 224 с.
3. Гольдяпин В.Я., Мишуров Н.П. Машинно-технологическое обеспечение селекции и семеноводства зерновых культур: аналит. обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 96 с.
4. Ревенко В.Ю., Петухов Д.А. «Современные сеялки ручного высева: преимущества и недостатки» // Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях аридизации климата: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции ФГБНУ РосНИИСК «Россорго», 20-21 марта 2025 года. – Саратов: ФГБНУ РосНИИСК «Россорго», 2025. – С. 226-234.
5. Петухов Д.А. Ручная пневматическая селекционная сеялка // Формирование эффективной системы менеджмента в условиях транзитивной экономики: Сборник статей по материалам II Международной научно-практической конференции, Мелитополь, 27-28 мая 2025 года. – Мелитополь: Мелитопольский государственный университет, 2025. – С. 638-645.
6. Патент №238894 РФ. Ручная пневматическая селекционная сеялка / В.Ю. Ревенко, Д.А. Петухов. – Заявка №2025111624 от 29.04.2025; опубл. 17.11.2025, Бюл. №32.
7. Петухов Д.А., Ревенко В.Ю., Фролов С.С. Экспериментальная оценка посевной техники для селекционных работ // Техника и оборудование для села. – 2025. – №11(341). – С. 8-12. – DOI: 10.33267/2072-9642-2025-11-8-12.

Сведения об авторах:

Петухов Дмитрий Анатольевич – к.т.н., ведущий научный сотрудник;

Ревенко Валерий Юрьевич – к.т.н., ведущий научный сотрудник;

Белик Мария Александровна – научный сотрудник.

К ОБОСНОВАНИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ РЕМОНТНОГО УЧАСТКА ПРЕДПРИЯТИЯ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Бураева Г.М., Бураев М.К.

*Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
Иркутск*

Ключевые слова: программа, ремонт, модель, работоспособность, затраты, мелкосерийное производство.

Аннотация. В условиях значительного износа основных фондов машинного производства сельскохозяйственной продукции и сырья (машины и оборудование) повышается роль ремонтно-обслуживающих предприятий в решении задачи обеспечения надежной непрерывной работы объектов инфраструктуры. В качестве одной из предпосылок решения данной проблемы в работе рассматривается экономико-математическое моделирование и построение метода решения задачи обеспечения рациональной организации технического сервиса на предприятиях с многономенклатурной программой ремонта производственных участков (ремонт не только типовых, но и других элементов машин и агрегатов). Предложено решение задачи определения оптимальной производственной программы (проекта ремонтных работ) при минимуме суммарных приведенных затрат на восстановление работоспособности объектов ремонта, технологической себестоимости, удельных капитальных вложений и транспортных расходов, связанных с восстановлением ремонтных объектов.

TOWARDS A PRODUCTION CAPACITY SUBSCRIPTION OF A REPAIR SECTION OF A SMALL-SERVICE PRODUCTION ENTERPRISE

Buraeva G.M., Buraev M.K.

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk

Keywords: program, repair, model, operability, costs, small-scale production.

Abstract. In the context of significant depreciation of fixed assets used in the machine production of agricultural products and raw materials (machinery and equipment), the role of repair and maintenance companies in ensuring the reliable, continuous operation of infrastructure facilities is increasing. As one of the prerequisites for solving this problem, this paper examines economic and mathematical modeling and the development of a solution method for ensuring the rational organization of technical service at enterprises with a multi-product repair program for production areas (repairing not only standard components but also other machine components and units). A solution is proposed for determining the optimal production program (repair project) while minimizing the total reduced costs of restoring the operability of repaired assets, process costs, specific capital investments, and transportation costs associated with restoring the repaired assets.

Исследованиями [1] установлено, что около 60% парка тракторов, 45,6% зерноуборочных комбайнов, 44,6% кормоуборочных комбайнов находятся за предельным сроком эксплуатации (10 лет). Этот так называемый резерв основных средств представляет собой большую номенклатуру дорогостоящей отечественной и импортной техники и их составных частей, которые возможно вернуть в строй [2]. Решением этого важного вопроса в последнее время занимаются небольшие сети предприятий агротехнического сервиса по ремонту и ТО машин и агрегатов с мелкосерийным типом производства [3]. В целях обеспечения рациональной

организации технического сервиса на этих предприятиях необходимо учитывать многономенклатурную программу ремонта производственных участков (ремонт не только типовых, но и других машин и агрегатов) [4].

Факторы, влияющие на величину оптимальных мощностей этих участков, рассматривают с точки зрения критерия минимума суммарных приведенных затрат, связанных с восстановлением ремонтных объектов [5]. Исследования [6], проведенные на базе нормативно-технической документации, рекомендованной для использования на ремонтных предприятиях, позволили разработать математическую модель оптимизации производственной мощности ремонтного участка. Модель состоит из взаимосвязанной совокупности математических зависимостей элементов суммарных приведенных затрат на восстановление работоспособности объектов ремонта; технологической себестоимости, удельных капитальных вложений и транспортных расходов [7]. Модель представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 P = \sum_{i=1}^m & \left\{ \left[C_{чzi} \cdot k_d (1 + k_u) + C_{чpi} + C_{чэi} + C_{чui} \right] \left(T_{ш} \cdot \overline{\gamma}_i + \frac{1,3 D_p \cdot z \cdot \psi \cdot t_{nz_i}}{N} \right) + \frac{1}{\eta_{0i}} (C_{чai} + C_{чсni}) \cdot \right. \\
 & \cdot \left. \left(T_{ш} \cdot \overline{\gamma}_i + \frac{1,3 D_p \cdot z \cdot \psi \cdot t_{nz_i}}{N} \right) \right\} + E_n \sum_{i=1}^m \frac{1}{\eta_{0i}} k_{чон} \left(T_{ш} \cdot \overline{\gamma}_i + \frac{1,3 D_p \cdot z \cdot \psi \cdot t_{nz_i}}{N} \right) + \\
 & + \left[0,2a \left(\sqrt{\frac{N}{N_k}} \right)^n + 0,1(C_{топ} + E_n K_{топ}) \right] g \rightarrow \min,
 \end{aligned}$$

где m – количество ремонтных операций технологического процесса; $C_{чzi}$ – часовая тарифная ставка рабочего на i -й операции, руб./ч.; k_d , k_u коэффициенты, учитывающие соответственно дополнительную заработную плату с премиями и отчисления в фонд социального страхования и прочие цеховые расходы; $C_{чai}$, $C_{чpi}$, $C_{чэi}$, $C_{чui}$, $C_{чсni}$ – часовые затраты на амортизацию, ремонт, эксплуатацию оборудования, инструмент и содержание помещений по i -й операции, руб./ч.; $T_{ш}$ – штучное время на ремонт и восстановление условной детали (принято 1 чел. ч.); $\overline{\gamma}_i$ – среднее относительное штучное время для i -й операции; η_{0i} – коэффициент загрузки оборудования на i -й операции (изменяется с увеличением мощности участка); D_p – число рабочих дней в году; z – число смен работы участка; ψ – коэффициент приведения к условной детали; t_{nz} – подготовительно-заключительное время по i -й операции, ч.; N – мощность участка (переменная величина); E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; $k_{чон}$ – часовые капитальные вложения по i -й операции, руб./ч.; a , n – коэффициенты уравнения для расчета транспортных расходов; N_k – плотность распределения ремонтного фонда объектов ремонта; $C_{топ}$, $K_{топ}$ – текущие и единовременные затраты на создание ТОП в расчете на единицу перерабатываемого груза, руб./кг; g – средняя масса ремонтных объектов, кг.

Исследование функции затрат показывает, что по характеру их зависимости от мощности участка они разделяются на две группы [8]. К первой группе относятся затраты, монотонно изменяющиеся при увеличении мощности участка (заработная плата, затраты на текущий ремонт и эксплуатацию оборудования,

электроэнергию и т. п.). Вторая группа затрат (удельные капитальные вложения, амортизация оборудования, расходы на содержание и эксплуатацию помещений) изменяется скачкообразно в зависимости от мощности участка. Скачкообразность вызывается необходимостью применения дополнительных единиц оборудования и оснастки с целью обеспечения производства возросшего объема ремонта объектов.

В результате расчетов были определены оптимальные мощности и производственная программа ремонтного участка гидромеханических трансмиссий (КПП) энергонасыщенных тракторов «Кировец» и «МТЗ» для ООО «Юник» г. Иркутск (рис. 1).

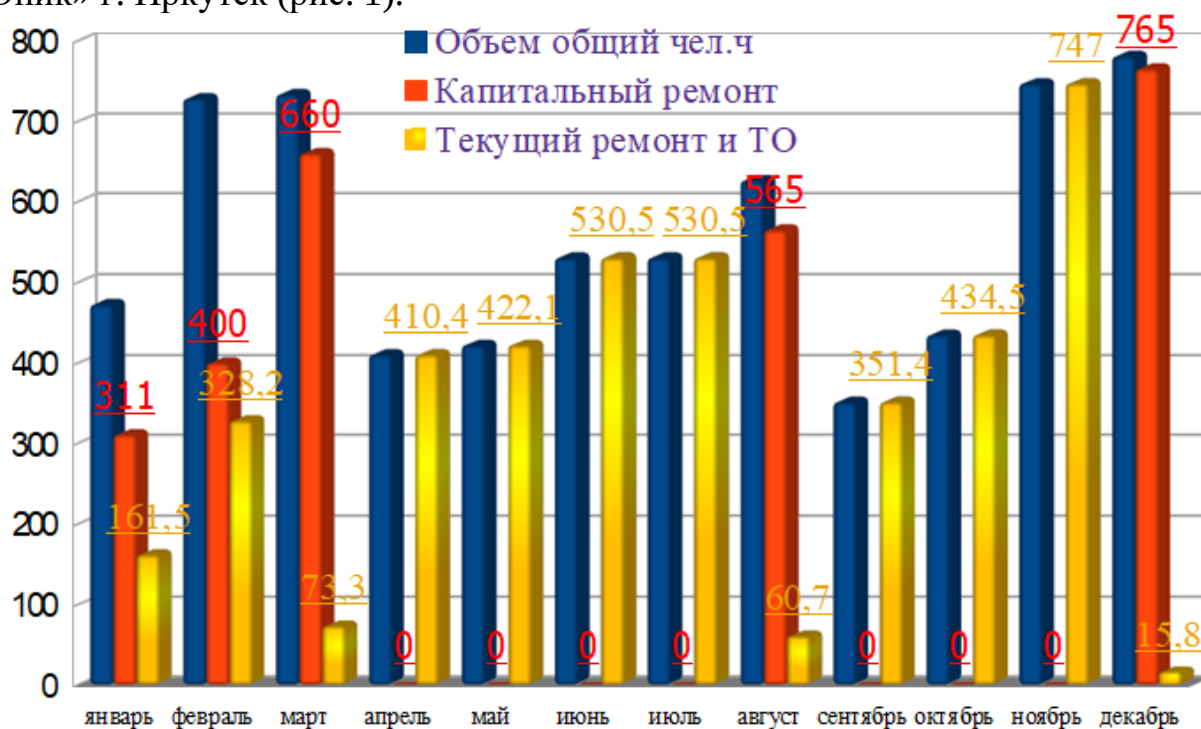


Рис. 1. Производственная мощность ремонтного участка ООО «ЮНИК»

Значения годовой мощности участка по критерию минимума приведенных затрат функции (1) составили по капитальному ремонту КПП 48 ремонтнообслуживаний, по текущему ремонту и ресурсному ТО – 153 ремонтнообслуживания. Производственная программа участка, в приведенных к средней трудоемкости капитального ремонта КПП К-701, составила 120 условных ремонтов.

Вывод. Математическая модель оптимизации производственной мощности ремонтного участка и методические положения позволяют определить мощности многономенклатурных цехов и участков предприятий технического сервиса с мелкосерийной формой производства. Сформулированные положения имеют непосредственное отношение лишь к изучаемому конкретному объекту. Вместе с тем полученные результаты можно рассматривать как ориентиры для выработки направлений дальнейшего анализа и расчета производственной программы предметно-замкнутых участков по восстановлению деталей типа «Валы шлицевые», «Валы гладкие и ступенчатые», «Стаканы, ступицы, втулки», «Маховики, шкивы, диски», «Рычаги, тяги», «Корпусы», «Вилки переключения».

Список литературы

1. Коняев Н.В., Коняева Н.И. Перспективы восстановления изношенных деталей сельскохозяйственной техники // Современные материалы, техника и технологии. – 2022. – №6(45). – С. 119-124.
2. Бураева Г.М., Белоусов И.В., Бураев М.К. Критерии капитального ремонта технических объектов // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне, п. Молодежный, 24-25 апреля 2025 года. – Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2025. – С. 204-208.
3. Хрусталева И.Н. Модель технологической подготовки производства в условиях единичного и мелкосерийного типов производства // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 13-19 ноября 2017 года. Часть 2. – СПб.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 312-314.
4. Бураева Г.М., Шистеев А.В., Бураев М.К. К организации ремонта машин на предприятии технического сервиса // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии : Материалы XIII Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского», п. Молодежный, 25-26 апреля 2024 года. – Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2024. – С. 173-179.
5. Исаков И.Н. Особенности оперативного планирования в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства, оснащенного многофункциональным оборудованием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – №8-2. – С. 291-298.
6. Аносова А.И., Бураев М.К. Показатели для оценки технологического уровня предприятия технического сервиса // Образование и наука: Материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной 80-й годовщине Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 годов и 100-летию со дня рождения первого ректора ВСГУТУ Д.Ш. Фролова, Улан-Удэ, 07-11 апреля 2025 года. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2025. – С. 12-16.
7. Шиловский В. Н., Гольштейн Г.Ю. Методические основы обоснования мощностей объекта технического сервиса // Resources and Technology. – 2020. – Т. 17, №4. – С. 95-106. – DOI: 10.15393/j2.art.2020.5462.
8. Сапожников С.А. Анализ точки безубыточности производства сельскохозяйственной продукции // Научно-методический электронный журнал "Концепт". – 2015. – № S5. – С. 66-70.

Сведения об авторах:

Бураева Галина Михайловна – старший преподаватель кафедры «Технический сервис и общинженерные дисциплины»;

Бураев Михаил Кондратьевич – д.т.н., профессор кафедры «Технический сервис и общинженерные дисциплины».

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПОСРЕДСТВОМ ИНТЕГРАЦИИ СЕПАРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В СИСТЕМУ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ДРОБИЛКИ

Мерчалов С.В., Прядкин В.И.

Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова, Воронеж

Ключевые слова: сепаратор, калибрующий канал, клиновидные щели, угол конуса, степень измельчения, затраты энергии.

Аннотация. В статье приведены испытания и отражены результаты оптимизация процесса измельчения зерновых культур посредством интеграции сепарационного оборудования в систему пневматической транспортировки дробилки. Испытания сепаратора, оснащённого усечёнными конусами с калибрующими каналами в виде клиновидных щелей на влияние угла конуса на удельное извлечение материала, определили оптимальный диапазон угла $56^{\circ}...54^{\circ}$. Отклонения от этого значения приводят к снижению удельного извлечения, что подтверждается экспериментальными данными. Интеграция предлагаемого сепаратора в пневмотранспортную систему молотковой дробилки КДМ позволяет сократить удельные затраты энергии на измельчение зерна до 18% по сравнению с обычным измельчением.

OPTIMIZATION OF THE GRAIN CRUSHING PROCESS BY INTEGRATING SEPARATION EQUIPMENT INTO THE PNEUMATIC CONVEYING SYSTEM OF THE HAMMER CRUSHER

Merchalov S.V., Pryadkin V.I.

Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh

Keywords: separator, calibration channel, wedge-shaped slits, cone angle, grinding stage, energy consumption.

Abstract. The article presents tests and reflects the results of optimizing the grain crushing process by integrating separation equipment into the crusher's pneumatic transportation system. Tests of a separator equipped with truncated cones with calibration channels in the form of wedge-shaped slits on the effect of the cone angle on specific material extraction determined the optimal angle range $56^{\circ}...54^{\circ}$. Deviations from this value lead to a decrease in specific extraction, which is confirmed by experimental data. The integration of the proposed separator into the pneumatic conveying system of the KDM hammer crusher makes it possible to reduce the specific energy consumption for grain crushing by up to 18% compared with conventional crushing.

Значимое направление в развитии современных технологий кормопроизводства, направлено на исследование инновационных схем подготовки зерновых кормов, которые включают в себя различные конструкции дробилок и их рабочих органов, а также сепарирующих устройств [1, 2]. Эти исследования направлены на оптимизацию технологических процессов, повышение эффективности переработки сырья и улучшение качества конечного продукта для повышения продуктивности животных [3].

В рамках данной работы предлагается способ разделения сыпучего материала по фракционному составу с использованием гравитационного сепаратора, оснащённого сепарирующими поверхностями, выполненными в

форме усечённых конусов с клиновидными щелями. [4]. Оптимальный гранулометрический состав конечного продукта достигается путём подбора соответствующей ширины (начальной и конечной) этих расширяющихся каналов, что позволяет эффективно контролировать процесс сепарирования и обеспечивать требуемую дисперсность материала.

Конструкция сепарирующих поверхностей каналов в сепараторе разработана таким образом, что частицы сыпучего материала подвергались постоянному воздействию их на проход, при их прохождении по длине канала. Энергозатраты в данном случае ограничиваются преимущественно подъемом обрабатываемого материала на необходимую технологическую высоту. Данный сепаратор может быть интегрирован в молотковые дробилки малой производительности (от 1 до 5 тонн в час), оснащенные пневмотранспортной системой для транспортировки измельченного материала из камеры дробления.

Такой способ калибровки сыпучего материала по крупности может найти применение для очистки и сортировки семян в сельском и лесном хозяйстве, в перерабатывающих отраслях АПК.

В работе [5] представлена схема силового воздействия на частицу при её движении на конусной поверхности и получено выражение, где вариабельность угла конусной поверхности Q , начальных скоростных параметров V_0 , а также физико-механических характеристик обрабатываемого материала f оказывают существенное влияние на динамику движения частицы в калибрующем канале.

Для выявления оптимального угла конусной поверхности данного сепаратора и его влияния на функционирование сепаратора были изготовлены поверхности с варьируемыми значениями угла конуса Q . Клиновидные щели выполняли лазерной высокоточной резкой (рис. 1).



Рис. 1. Прототип конической поверхности разделения, оснащенной клиновидными щелями

Фракции с размером частиц более 3 мм классифицировались как крупная (сходовая) категория. Фракции с размером частиц до 3 мм относились к мелкой проходной категории (готовый продукт). На основании этих критериев для клиновидных каналов были определены следующие конструктивные параметры: длина $L = 300$ мм; начальная ширина $a = 2; 2,5; 3$ мм; конечная ширина $b = 3, 4, 5$ мм. Процесс обработки исходного материала осуществлялся поэтапно на восьми конических поверхностях, которые последовательно расположены в сепараторе, согласно схеме, представленной на рисунке 2.

Описание технологической схемы гравитационного сепаратора.

Гравитационный сепаратор представляет собой устройство, предназначенное для разделения сыпучих материалов на фракции под действием силы тяжести. Его конструкция сочетает в себе простоту и надежность,

обеспечивая разделение частиц различного гранулометрического размера. На рисунке 3 изображена технологическая схема, иллюстрирующая ключевые элементы системы.

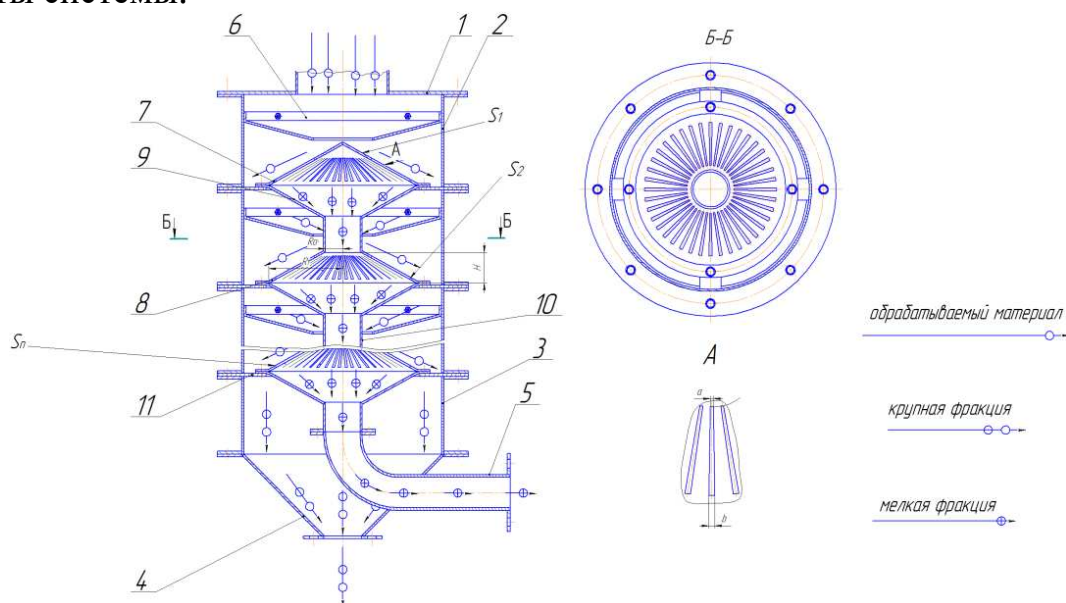


Рис. 2. Технологическая схема гравитационного сепаратора:

1 – патрубок ввода с крышкой; 2 – секция с сепарирующим конусом; 3 – секция для сбора крупных частиц; 4 – патрубок для вывода крупных частиц; 5 – патрубок для готового продукта; 6 – направляющий конус; 7, 8 – сепарирующие конусы с клиновидными щелями; 9 – сборник для готового продукта; 10 – патрубок для вывода для готового продукта; 11 – кольцо опорное; 12 – кольцо уплотнительное

Патрубок ввода с крышкой 1 служит верхним элементом корпуса, обеспечивая герметичность и доступ для загрузки материала. Ниже расположена первая секция 2, где происходит первичное распределение потока и разделение частиц по размерам, в соответствии с размерами клиновидных каналов. Вторая секция усиливает данный процесс и так далее, осуществляется циклический процесс движения обрабатываемого материала. Сборник сходовой фракции 4 собирает частицы, не выделенные клиновидными каналами сепарирующих конусов 7, 8.

Патрубок 5 выводит мелкую фракцию обрабатываемого материала. Направляющие конусы 6 корректирует траекторию потока на конусы 7 и 8. Сепарирующие конусы 7, 8 образуют коническую зону, где происходит основное разделение.

Сборники 9 собирают выделенные мелкие фракции с сепарирующих конусов 7, 8. Патрубок мелкой фракции 10 обеспечивает вывод этой фракции из системы. Опорное кольцо 11 фиксирует конструкцию, распределяя нагрузку, в то время как уплотнительное кольцо 12 предотвращает утечки воздуха и пыли.

Эта схема демонстрирует циклический процесс: материал поступает сверху, проходит через секции и конусы, где фракционируется, и выходит через патрубки в виде разделенных потоков.

Результаты исследований

На рисунке 3 представлена зависимость влияния угла конуса (Q) на величину удельного извлечения (C) готового продукта.

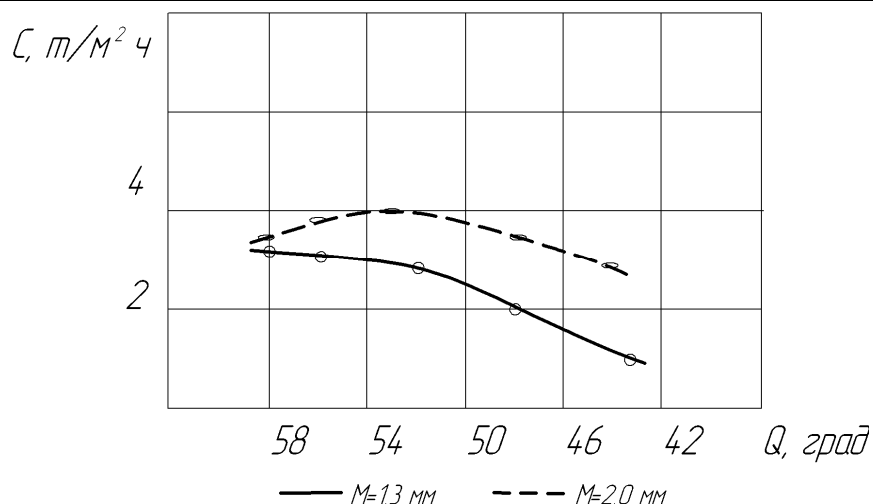


Рис. 3. Влияние угла конуса Q на удельное извлечение C готового продукта

Проведенные исследования выявили, что оптимальный диапазон углов для конусной поверхности находится в пределах от 56° до 54° . Выход за этот интервал приводит к снижению удельного извлечения.

Для оценки функциональной эффективности данного сепаратора в его интеграции в систему пневмотранспорта дробилки КДМ при измельчении зерна с отбором готового продукта были произведены лабораторные исследования. Испытания проведены по двум схемам:

- а) обычное измельчение – без сепаратора;
- б) с сепаратором.

Технологическая схема измельчения зернового сырья с использованием сепаратора представлена на рисунке 4.

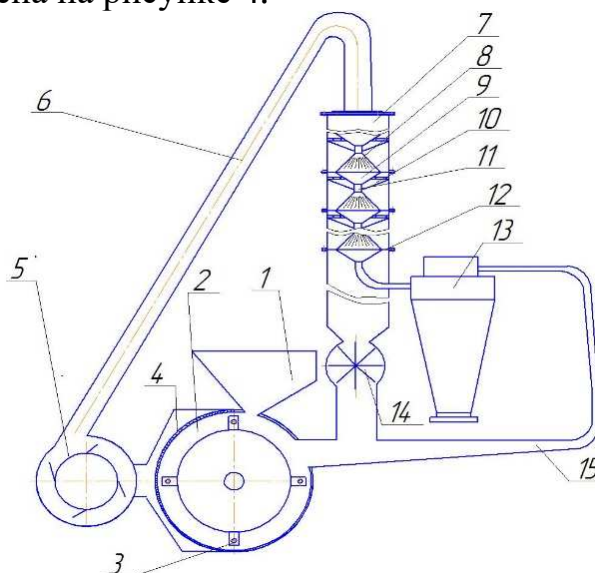


Рис. 4. Технологическая схема измельчения зернового сырья с использованием сепаратора: 1 – бункер загрузки; 2 – камера измельчения; 3 – молотки дробилки; 4 – решета сменные; 5 – вентилятор-швырялка; 6 – пневмотранспортная система дробилки; 7 – сепаратор с коническими поверхностями; 8 – сепарационная коническая поверхность с клиновидными каналами; 9 – сборник готового продукта; 10 – отводящий патрубок мелкой фракции; 11 – сборник крупной фракции; 12 – кольцевое крепление сепарационной поверхности; 13 – циклон для готового продукта; 14 – шиберная заслонка; 15 – пневматический патрубок возврата крупной фракции в камеру измельчения

Методология определения гранулометрического состава исходного и конечного продукта базировалась на стандартизированной методике [5]. В качестве аналитического критерия использовался остаток фракции на контрольном сите диаметром 3 мм.

Параметры конических сепарационных поверхностей были определены на основании предшествующих экспериментальных исследований. Угол конуса составлял $Q = 56^\circ$, а ширина клиновидных щелей варьировалась в диапазоне от 2 мм до 5 мм (обозначены как 2-3, 2-4 и 2-5 мм, первая цифра-начальная ширина канала, вторая-конечная ширина канала), длина щели $L = 300$ мм.

Результаты испытаний по влиянию модуля M готового продукта при разных способах измельчения на удельные затраты энергии $A_{y\partial}$ представлены на рисунке 5.

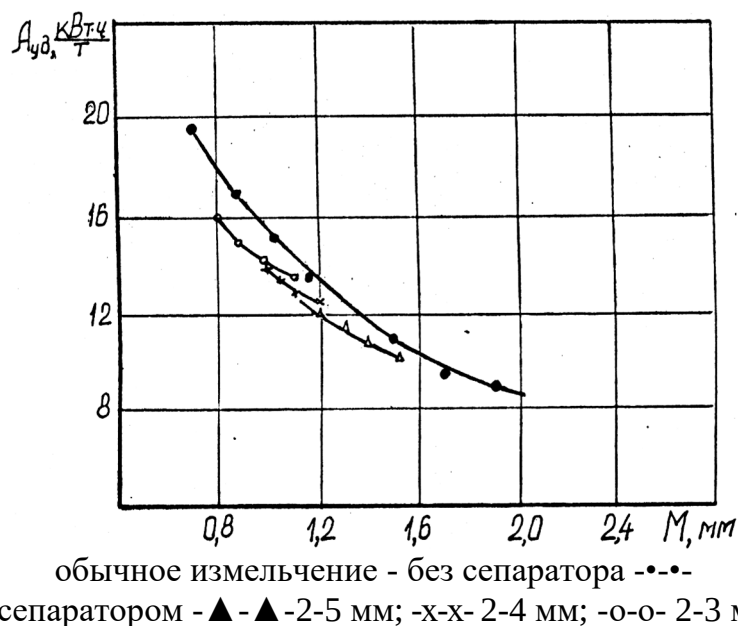


Рис. 5. Влияние модуля M готового продукта при разных способах измельчения на удельные затраты энергии $A_{y\partial}$

Результаты проведенных экспериментальных исследований на рисунке 5, отчетливо демонстрируют тенденцию к снижению удельных энергетических затрат при измельчении зерновых материалов с интегрированным в систему пневмотранспорта дробилки КДМ предложенным коническим сепаратором. Анализ данных, представленных на рисунке 5, подтверждает, что данное снижение энергетических затрат является устойчивым и наблюдается при использовании всех конусных сепарирующих поверхностей. Снижение удельных энергетических затрат составило от 18% до 10% соответственно, по сравнению с традиционным методом измельчения. Эти результаты свидетельствуют о высокой эффективности предложенного технического решения, которое позволяет существенно оптимизировать энергозатраты при обработке зерновых материалов в молотковой дробилке.

Выводы

1. Полученные результаты испытания сепаратора показали, что оптимальный угол конусной поверхности находится в диапазоне от 56° до 54° . Выход за пределы данного диапазона приводит к снижению удельного извлечения.

2. Результаты проведенных испытаний демонстрируют снижение удельных энергетических затрат при измельчении зерна с интеграцией в систему пневмотранспорта дробилки КДМ предлагаемого сепаратора.

3. Снижение удельных энергетических затрат составило от 18% до 10% соответственно, по сравнению с традиционным методом измельчения на всех исследуемых сепарирующих поверхностях.

4. Внедрение сепаратора с расширяющимися каналами в пневмосистему дробилки значительно улучшает технологические параметры и эффективность процесса измельчения, что обуславливает его высокую целесообразность для использования в коллективных хозяйствах, фермерских предприятиях и промышленном производстве комбикормов.

Список литературы

1. Федоренко И.Я., Золотарев С.В., Смышляев А.А. Предпосылки к разработке способа промежуточной сепарации продуктов измельчения в дезинтеграторе // Совершенствование технологий и технических средств в АПК: Юбилейный сборник. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2001. – С. 93-95.
2. Чехунов О.А., Воронин В.В., Ворохобин А.В. Определение основных конструктивно-режимных параметров молотковой зернодробилки для фуражного зерна // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021 №2 (30) – С. 45-56.
3. Садов В.В. Производство комбикормов в хозяйственных условиях: Учебное пособие. – Барнаул: АГАУ, 2009. – 96 с.
4. А.с. №1747152 СССР. Устройство для измельчения кормов / А.А. Сундеев, С.В. Мерчалов. – Заявка №4835727 от 07.06.1990, опубл. 15.07.92. Бюл. № 26.
5. Мерчалов С.В., Мерчалов А.С. Влияние конструктивных параметров сепаратора на выбор начальной скорости движения частицы по клиновидному каналу // Высокие технологии в экологии, труды 11-ой международной научно- практической конференции 14-16 мая 2008г: сборник. – Воронеж: Изд-во ВГАУ, 2008. – С. 182-186.
6. ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. – М.: Стандартинформ, 2011.

Сведения об авторах:

Мерчалов Сергей Васильевич – к.т.н., доцент;

Прядкин Владимир Ильич – д.т.н., профессор.

Научное периодическое издание

Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация:

**Материалы международной
научно-практической конференции**

№9

Верстка и корректура: ИП Жукова Е.В.

Формат издания 60x84 1/16. Усл. печ. л. 6,34.

Подписано в печать 29.01.2026г. Заказ №26-01.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/maippsim.html>
<https://doi.org/10.26160/2587-7577-2026-9>

Учредитель, издатель и распространитель: Жукова Елена Валерьевна
(ИП Жукова Е.В., ИНН 422802805198, ОГРНИП 318420500009778,
г. Санкт-Петербург).

Ответственный редактор: Жуков Иван Алексеевич.

Редакция: Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»,
197372, г. Санкт-Петербург, пр. Комендантский, д. 28, корп. 2, оф. 117.
<http://srcms.ru>

E-mail: spbf@srcms.ru