

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

ISSN:2618-8201

№ 2 (38)
2025

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«Севастопольский государственный университет»

№ 2(38)

2025

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2025

*Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»*

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2025 г. №2 (38)

*Сборник научных трудов. Издание основано в 2016 году. Периодичность - 4 номера в год.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.*

*Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
и размещается в научной электронной библиотеке (Elibrary.ru)*

*Свидетельство о регистрации в национальном центре ISSN и присвоение международного стандартного номера
серийного издания (International Standard Serial Number) 2618-8201 от 06.07.2018 г.*

*В сборнике научных трудов публикуются статьи по следующим научным специальностям:
2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки;
2.5.6. Технология машиностроения; 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы;
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;
2.6.17. Материаловедение; 4.3.3. Пищевые системы.*

Главный редактор:

д.т.н., проф. Братан С.М.

Зам. главного редактора:

д.т.н., проф. Покинтелица Н.И.

Научный редактор:

к.т.н., проф. Харченко А.О.

Отв. секретарь:

к.т.н., доцент Возжзов А.А.

Техн. секретарь:

к.т.н., Стадник Т.В.

Редакционная коллегия

Абдулгасис У.А., д.т.н., проф. (г. Симферополь); Бохонский А.И., д.т.н., проф. (г. Севастополь);

Гусев В.В., д.т.н., проф. (г. Донецк); Дуюн Т.А., д.т.н., доц. (г. Белгород);

Карлов А.Г., к.т.н., доц. (г. Севастополь); Козлов А.М., д.т.н., проф. (г. Липецк);

Куликов Д.А., к.т.н., доц. (г. Москва); Лебедев В.А., к.т.н., проф. (г. Ростов-на-Дону);

Леонов С.Л., д.т.н., проф. (г. Барнаул); Лобанов Д.В., д.т.н., доц. (г. Чебоксары);

Малышева Г.В., д.т.н., проф. (г. Москва); Михайлов А.Н., д.т.н., проф. (г. Донецк);

Носенко В.А., д.т.н., проф. (г. Волжский); Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф. (г. Севастополь);

Осипов К.Н., д.т.н., доц. (г. Севастополь); Полтавец В.В., д.т.н., проф. (г. Донецк);

Соколов С.А., д.т.н., проф. (г. Донецк); Суслов А.Г., д.т.н., проф. (г. Брянск);

Федонин О.Н., д.т.н., проф. (г. Брянск); Юшина Ю.К., д.т.н., проф. (г. Москва);

Якубов Ч.Ф., к.т.н., доц. (г. Симферополь); Ярошенко А.А., д.т.н., проф. (г. Севастополь);

Яшонков А.А., к.т.н., доц. (г. Керчь).

Мнение авторов статей, представленных в сборнике научных трудов, может не совпадать с мнением редакции.

Все статьи проходят обязательное рецензирование и проверку сервисом «Антиплагиат».

Издание осуществлено на средства авторов и распространяется бесплатно.

Дата выхода в свет: 20.12.2025 г.

Тираж: 25 экз.

Адрес редакции: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 222, <http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>;

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1362; e-mail: vst_sevsu@mail.ru

*Адрес издателей: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября,
д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация; ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация.*

Адрес типографии: г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Харченко А.О., Братан С.М., Харченко А.А., Владецкая Е.А.</i> Формирование основ новаторского инженерного мышления у студентов технических вузов для создания инновационных технологий и систем.....	4
<i>Тараховский А.Ю., Стреляная Ю.О.</i> Современные методы 3D-сканирования и их применение в машиностроении: точность, технологии и практические аспекты.....	11
<i>Карташов Л.Е., Казак А.С., Дробитько А.И.</i> Применение нечеткой логики для выбора типа линейного привода мехатронных систем.....	19
<i>Братан С.М., Часовитина А.С., Харченко А.О., Колесов А.Г.</i> Моделирование системы стабилизации поворотного стола резбонарезного станка с комбинированным МПС в заданном положении	29
<i>Богущий В.Б., Шрон Л.Б.</i> Оценка погрешности определения параметра шероховатости R_a от длины трассы измерения.....	34
<i>Лебедев В.А., Фоменко А.В.</i> Кинетическая сущность и критерий износа режущего инструмента.....	41

РАЗДЕЛ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Гавриш В.М., Шагова Ю.О., Гавриш О.П.</i> Влияния наночастиц оксида вольфрама на ударную прочность керамических изделий из каолиновой глины.....	47
---	----

УДК 658.512.2(075.8)

ФОРМИРОВАНИЕ ОСНОВ НОВАТОРСКОГО ИНЖЕНЕРНОГО МЫШЛЕНИЯ У СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ

*А.О. Харченко¹,
С.М. Братан¹,
А.А. Харченко¹,
Е.А. Владецкая²,*

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*²Морской институт им. вице-адмирала В.А. Корнилова – филиал ГМУ им. адм.
Ф.Ф. Ушакова, Севастополь, Россия*

АННОТАЦИЯ

Обоснована целесообразность системного методологического подхода к формированию основ новаторского инженерного мышления у студентов технических вузов для создания инновационных технологий и систем путем новаторства и изобретательства. Материал основан на базе опыта преподавания учебных дисциплин данной направленности и предусматривает выполнение ряда практических работ: правовые основы изобретательской деятельности; оформление и подача заявок на изобретение и полезную модель; Международная патентная классификация (МПК) и управление объектами интеллектуальной собственности; решение изобретательских задач методами проб и ошибок, мозгового штурма и морфологического анализа; использование законов развития технических систем; решение технических изобретательских задач с помощью вепольного анализа; с помощью преодоления технических противоречий; оформление материалов заявки на изобретение или полезную модель.

Ключевые слова: патентные исследования, изобретение, полезная модель, изобретательская задача, вепольный анализ, патент на изобретение.

FORMING THE FOUNDATIONS OF INNOVATIVE ENGINEERING THINKING IN STUDENTS OF TECHNICAL UNIVERSITIES FOR THE CREATION OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

*A.O. Kharchenko¹,
S.M. Bratan¹,
A.O. Kharchenko¹,
E.A. Vladetskaya²*

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

²Vice-Admiral V.A. Kornilov Maritime Institute – branch of Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The article substantiates the feasibility of a systematic methodological approach to developing the foundations of innovative engineering thinking in students of technical universities for the creation of innovative technologies and systems through innovation and invention. The material is based on the

experience of teaching academic disciplines in this area and provides for the implementation of a number of practical tasks: legal foundations of inventive activity; registration and filing of applications for an invention and utility model; International Patent Classification (IPC) and management of intellectual property; solving inventive problems by trial and error, brainstorming and morphological analysis; using the laws of development of technical systems; solving technical inventive problems using Su-Field analysis; by overcoming technical contradictions; registration of application materials for an invention or utility model.

Keywords: patent research, invention, utility model, inventive problem, Su-Field analysis, patent for invention.

Введение. Научно-технический прогресс сопровождается стремительными преобразованиями и коренными изменениями в производстве средств производства, предметов труда, в использовании новых методов получения энергии, в совершенствовании технологии, организации и управления производственными процессами, которые, в свою очередь, оказывают значительное воздействие на все сферы деятельности человека. Совершенствование техники, создание новых, более прогрессивных и эффективных её образцов неразрывно связано с практикой новаторства и изобретательства. Однако для высокопроизводительной творческой новаторской деятельности необходимы не только глубокие научно-технические знания, но и современная информация из области патентоведения, изобретательства и основ авторского права [1].

Потребность к формированию основ новаторского инженерного мышления у студентов технических вузов на основе новых подходов к процессам развития креативного мышления начинающих изобретателей многие авторы отмечают в своих публикациях достаточно давно. Следует отметить известных специалистов в этой области знаний – Г.С. Альтшуллера [2], А.И. Половинкина [3], Дж.К. Джонса [4], Ю.Н. Кузнецова [1], Н.Н. Хоменко [5], Н.А. Шпаковского [6], А.Г. Карлова [7], которые внесли огромный вклад в дело обобщения и распространения накопленного в мире опыта применения на практике теории решения изобретательских задач (ТРИЗ).

Целью настоящего исследования является обоснование целесообразности формирования основ новаторского инженерного мышления у студентов технических вузов для создания инновационных технологий и систем на основе разработанных для этого специальных дисциплин.

Основная часть. В Севастопольском государственном университете на основе многолетнего опыта преподавания на кафедре «Автоматизация и технология машиностроения» таких дисциплин, как «Патентоведение и изобретательство», «Теория решения изобретательских задач (ТРИЗ)», «Методология научных исследований», «Анализ и синтез структур современных многооперационных станков», «Научно-исследовательская деятельность в машиностроении» реализована методика проведения занятий по подготовке обучающихся (бакалавров, магистров, аспирантов) к новаторской деятельности.

Большинство из них пересекаются с основными концепциями ТРИЗ и направлены на применение теории на практике с использованием достижений инноваторов в машиностроительных отраслях.

На одном из практических занятий изучается необходимость и целесообразность патентования изобретений, основы права интеллектуальной собственности, условия патентоспособности. Цель правовой охраны изобретений, как объектов интеллектуальной собственности (ОИС), заключается в создании правового механизма законного

предотвращения актов безвозмездного использования прав на ОИС третьими лицами с целью коммерциализации [8, 9, 10].

На другом практическом занятии изучается содержание, порядок проведения и методы патентных исследований. Студент получает в качестве варианта индивидуального задания название технического объекта для предстоящего патентования на изобретение или на полезную модель. Выполняет классификацию данного объекта в соответствии с МПК: определяет раздел объекта патентования, класс, подкласс, группу, подгруппу; производит по выбранной рубрике МПК поиск аналогов для заданного объекта; указывает патентные реквизиты выбранных аналогов.

Третье практическое занятие преследует цель привития навыков практического применения простых инструментов при решении изобретательских задач. Студенты знакомятся с несколькими эвристическими методами. Традиционным методом поиска решения долгое время являлся метод проб и ошибок: в поисках подходящего результата перебирались все доступные действия или материалы. Метод дает результат при решении относительно простых изобретательских задач, когда число возможных путей, вариантов решения относительно невелико. Первые методы активизации творческого процесса стали применяться в конце 20-х годов прошлого века. К этим методам относятся: мозговой штурм, синектика, морфологический анализ, метод контрольных вопросов, ассоциативный метод и др. [9, 10]. Всего таких методов порядка тридцати. Метод морфологического анализа, предложенный астрономом и изобретателем Ф. Цвикки, предусматривает следующие этапы:

1. Выделение узловых точек или осей, которые характеризуют разрабатываемую систему с позиции ранее сформулированной цели. Это могут быть принципы работы, форма, расположение, характеристики, свойства.

2. Формирование вариантов реализации для каждой узловой точки.

3. Перебор всех вариантов решений с проверкой на соответствие условиям задачи.

Данный метод принят в качестве наиболее приемлемого для удобной фиксации альтернатив признаков в виде таблицы (морфологической матрицы) или графа.

В качестве примера (таблица 1) морфологический анализ для колеса и его возможных реализаций дает сочетания, приводящие к таким изобретениям, как колесо с упругими спицами, сферомобиль (патент RU 2554905), шароходы (патент RU 2505447, RU 2297356) и шарокопесные движители (патент RU 2581806), ведомое колесо транспортного средства полой конструкции (патент RU 2573665), мотор-колеса и другие изобретения разнообразных его конструктивных реализаций (рисунок 1).

Используя методы активизации творческого мышления, студент должен предложить решения для улучшения показателей заданного объекта. Для наилучших результатов необходимо ознакомиться с примерами из информационных источников [10, 11], а также просмотреть опыт работы ТРИЗ-экспертов на страницах Интернет-ресурсов. При выполнении работы также следует:

- 1) для заданного объекта составить морфологическую матрицу, в которой отразить возможные альтернативы принципов работы, формы, расположения, характеристик, свойств;

- 2) произвести улучшение функциональных показателей заданного объекта с помощью изученных методов активизации творческого мышления.

Для рассмотрения предлагаются (в зависимости от направления подготовки обучающегося) следующие объекты:

- А) автомобиль повышенной проходимости; устройство для очистки поверхности лобового стекла автомобиля; устройство для ограничения скорости транспортного потока;

устройство для компактной парковки автотранспорта; устройство, предотвращающее засыпание водителя за рулем; устройства для разгрузки кузова грузового автомобиля;

Б) токарный резец; сверлильный инструмент для обработки некруглых отверстий; станок с числовым программным управлением; промышленный робот-манипулятор; защитное устройство металлорежущего станка; координатно-измерительная машина.

В отчете по выполненной работе приводится: описание технического объекта, выбранного для предстоящего улучшения его технического уровня; морфологическая матрица с возможными альтернативами принципов работы, формы, расположения, характеристик, свойств объекта; общий вид (схема, эскиз) улучшенного объекта в результате морфологического анализа; выводы по результатам улучшения признаков и показателей заданного объекта на основе методов активизации творческого мышления.

Следующее практическое занятие знакомит студентов с жизненным циклом технической системы, раскрывает суть законов развития технических систем: полноты частей системы; энергетической проводимости; согласования ритмики частей системы; неравномерности развития и др. Главной движущей силой развития технических систем является противоречие между растущими потребностями общества и возможностями самих систем. Диалектический характер творчества состоит в том, что в новом объекте сочетаются новые и известные технические решения.

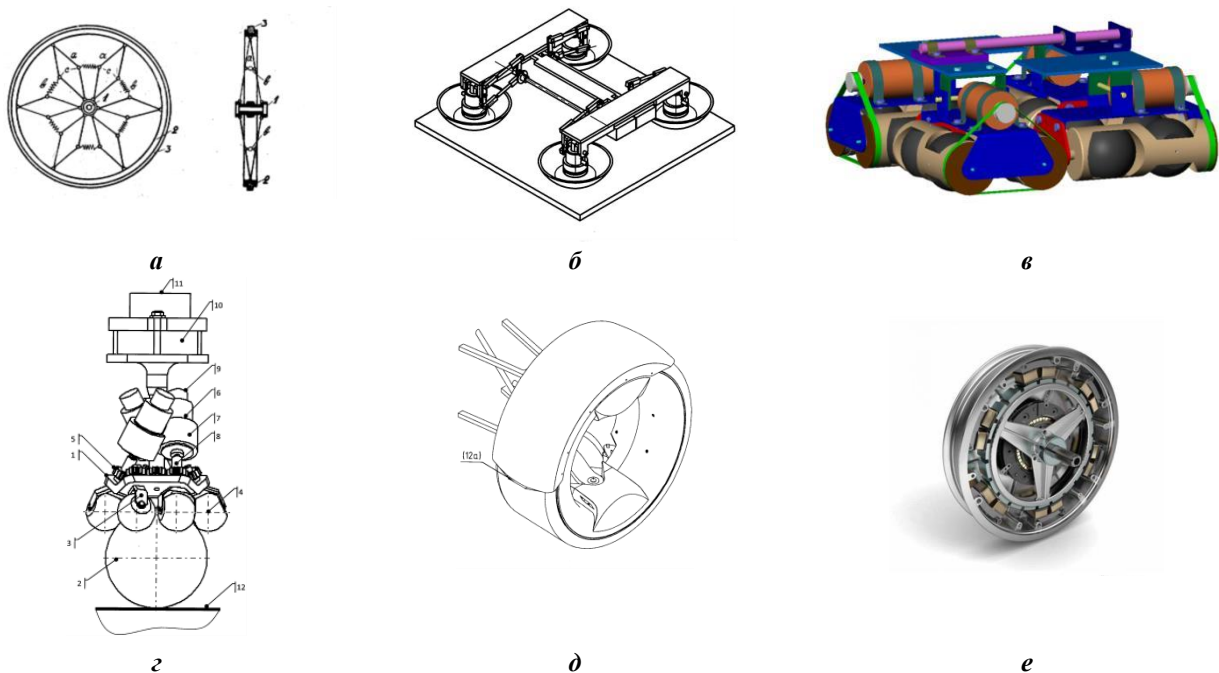


Рисунок 1. Примеры варьирования морфологических признаков колеса: а – с упругими спицами (патент SU 12618, 1926 г.); б – сферомобиль (патент RU 2554905, 2013 г.); в – шароходы (патент RU 2505447, RU 2297356), г – шарокопесные движители (патент RU 2581806, 2016 г.); д – ведомое колесо транспортного средства полой конструкции (патент RU 2573665, 2016 г.); е – мотор-колесо Шкондина (патент RU 2035114, 1995 г.)

Таблица 1. – Морфологическая матрица для колеса

Элементы		Ось признаков элементов		
		Признак 1	Признак 2	Признак 3
Ось элементов	Ступица	Есть	Нет	–
	Диск	Круглый	Некруглый	Сферический
	Упругий элемент	Пневматический	Пружинный	Электромагнитный
	Привод	Вне колеса	Внутри колеса	–

Так, в начале развития металлорежущие станки получали вращение от общего привода – локомобиля или от ручного привода [7, 10]. В начале XVIII в. родоначальник отечественного станкостроения А.К. Нартов изобрел первый в мире токарный станок с механическим суппортом (рисунок 2, а). Затем появились станки с индивидуальным приводом от электродвигателя через ременные и зубчатые передачи (рисунок 2, б). Тенденция развития современных станков – снабжение каждого узла собственным приводом в виде шагового электродвигателя, высокомоментного двигателя (рисунок 2, в) и создание на агрегатной основе многооперационных станков с ЧПУ (рисунок 2, г). Неравномерность развития частей системы наблюдается в появлении регулируемых электродвигателей различных типов и сохранении обычных зубчатых передач, в быстром прогрессе систем управления и медленном развитии собственно приводов. В настоящее время широко реализуется модульный принцип построения компоновок токарного станка на основе механизмов параллельной структуры, (рисунок 2, д, е) [9, 10, 11]. Студент производит обзор эволюции заданного объекта и характеризует примеры реализации законов развития технических систем, прогнозирует возможные варианты усовершенствования объекта или способа с учетом указанных законов.

В процессе пятого практического занятия изучаются обозначения вепольных схем (от сочетания слов «вещество» и «поле») и применение данного инструмента ТРИЗ для решения изобретательских задач. Веполь (от сочетания слов «вещество» и «поле») – принятая в ТРИЗ модель минимально работоспособной технической системы, состоящей, как минимум, из трех элементов: двух веществ и поля. Решение технических изобретательских задач с помощью вепольного анализа подразумевает построение правила, по которому должна решаться та или иная задача на основе моделирования исследуемых технических систем. При построении модели используются вепольные схемы [10].

Существует пять простых правил преобразования веполей, позволяющих применять их для решения множества изобретательских задач: достройки веполя; перехода к феполью; разрушения веполя; перехода к двойному и цепному веполью; выявления физических эффектов.

Студент должен изучить обозначения вепольных схем и применить их для решения поставленной конкретной задачи, выбрав из нерешенных на сегодняшний день проблем вариант в качестве задания для создания изобретения.

На шестом практическом занятии неотъемлемым этапом решения изобретательской задачи является столкновение с противоречием: административным; техническим; физическим. Изучают 40 основных приемов устранения технических противоречий, основанных на принципах: дробления, вынесения, местного качества, асимметрии,

объединения, универсальности, интегрирующей концентрации, противовеса, предварительного напряжения, эквипотенциальности, инверсии, сфероидальности и т.д. Студент должен предложить возможные варианты решения заданной проблемы (задачи) на основе патентных описаний аналогов и прототипа. Провести анализ данного объекта, изучить устройство и принцип действия, после чего: определить основные противоречия при создании объекта; ознакомиться с приемами и принципами устранения противоречий при решении изобретательских задач; предложить принципы, приемлемые для решения конкретной задачи; на основе отобранных принципов предложить новый рациональный вариант технического объекта, превосходящий базовый.



Рисунок 2. Уровни изобретений на примере развития металлорежущего токарного станка: а – первый в мире токарно-копировальный станок Андрея Нартова (1718 г.); б – токарно-винторезный станок 16К20 (1973 г.); в – токарный станок с ЧПУ 16К20Ф30 (1980 г.); г – многооперационный токарный центр 1П420ПФ40 (1990 г.); д – токарный многоцелевой станок на базе механизмов параллельной структуры (2006 г.); е – станок VerticalLine V100 (Германия) на основе дельта-робота (2015 г.)

На последующих практических занятиях изучаются основные требования к оформлению материалов заявки на изобретение в печатном и электронном видах, правила оформления и порядок подачи заявки и других документов на получение патента. После изучения требований оформляется учебная заявка на получение патента.

Выводы. Такой подход [9, 10, 11, 12] позволяет достичь основные цели при освоении основ инновационно-творческой деятельности и получить требуемые компетенции для технических направлений подготовки в сфере систематизация, анализа и обобщения знаний о

правовой охране и защите интеллектуальной собственности, патентованию объектов; способности руководить подготовкой заявок на изобретения в области конструкторско-технологической подготовки машиностроительных производств, оценивать стоимость интеллектуальных объектов, способность разрабатывать методики, рабочие планы и программы проведения научных исследований и перспективных технических разработок, готовить отдельные задания для исполнителей, научно-технические отчеты, обзоры и публикации по результатам выполненных исследований, управлять результатами научно-исследовательской деятельности и коммерциализации прав на объекты интеллектуальной собственности, осуществлять ее фиксацию и защиту.

Список литературы

1. Кузнецов Ю.Н. Патентоведение и авторское право: учебник для студ. вузов /Ю.Н. Кузнецов. – К.: Кондор, 2009. – 446 с.
2. Альтшуллер Г.С. Поиск новых идей: от озарения к технологии (Теория и практика решения изобретательских задач) / Г.С. Альтшуллер, Б.Л. Злотин, А.В. Зусман, В.И. Филатов. – Кишинев: Картя Молдовэняске, 1989. – 381 с.
3. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: Учеб. пособие / А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988. –368 с.
4. Джонс Дж. К. Методы проектирования / Дж. К. Джонс. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
5. N. Khomenko «General Theory on Powerful Thinking (OTSM): Digest of Evolution, Theoretical Background, Tools for Practice and Some Domain of Application». Tokyo, 2010. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: // <http://jlpjproj.org>
6. Шпаковский Н.А.. ОТСМ-ТРИЗ. Подходы и практика применения. — М.: Инфра-М, 2018 г. 348 с.
7. Карлов А.Г., Шпаковский Н.А. Идеи, изобретения, инновации в сфере автоматизации технологий и технических систем: учебное пособие - М.: Центркаталог, 2019. – 536 с. – (Вузовский учебник).
8. Ишков А. Д. Промышленная собственность. Оформление заявки на выдачу патента на изобретение [Электронный ресурс]: справ. пособие / А. Д. Ишков, А. В. Степанов; под ред. А. Д. Ишкова. – 2-е изд., стер. – М.: ФЛИНТА, 2013. – 48 с.
9. Харченко А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков Практикум /А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рощупкин. – М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.
10. Харченко А.О. Патентоведение и изобретательство. Практикум /А.О. Харченко, А.Г. Карлов, А.А. Харченко, К.Н. Осипов. – М.: Центркаталог, 2018. – 112 с.
12. Харченко А.О. Металлообрабатывающие станки и оборудование машиностроительных производств: Учеб. пособие / А.О. Харченко – М: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 260 с.
13. Харченко А.О. Практикум по научно-исследовательской деятельности в машиностроении / А.О. Харченко, С.М. Братан, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая. – М.: Центркаталог, 2022. – 288 с.

УДК 621.04, 004.942, 62-186

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ 3D-СКАНИРОВАНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ: ТОЧНОСТЬ, ТЕХНОЛОГИИ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

*А.Ю. Тараховский¹,
Ю.О. Стреляная¹*

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются современные методы 3D-сканирования, их точностные характеристики, технологические особенности и актуальные направления применения в машиностроении. Анализируются контактные и бесконтактные методы, включая лазерное сканирование, технологию структурированного света и фотограмметрию, с фокусом на их преимущества и ограничения в условиях промышленного производства. Представлены примеры использования 3D-сканирования для контроля качества, обратного проектирования и мониторинга износа оборудования, что подтверждает его ключевую роль в цифровой трансформации машиностроительной отрасли. Работа подчеркивает значимость интеграции 3D-сканирования с CAD-системами для повышения эффективности и точности производственных процессов, а также перспективы дальнейших исследований и внедрения данных технологий на производстве.

Ключевые слова: 3D сканирование, машиностроение, контактные методы измерения, координатно-измерительные машины, лазерное сканирование, технология структурированного света, фотограмметрия, реверс-инжиниринг, контроль качества, цифровая трансформация.

MODERN METHODS OF 3D SCANNING AND THEIR APPLICATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING: ACCURACY, TECHNOLOGIES, AND PRACTICAL ASPECTS

*A.Yu. Tarakhovskiy¹,
Y.O. Strelyanaya¹*

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

ABSTRACT

The article examines modern 3D scanning methods, their accuracy characteristics, technological features, and current application areas in mechanical engineering. It analyzes contact and non-contact methods, including laser scanning, structured light technology, and photogrammetry, focusing on their advantages and limitations in industrial production conditions. Examples of 3D scanning use for quality control, reverse engineering, and equipment wear monitoring demonstrate its key role in the digital transformation of mechanical engineering. The work highlights the importance of integrating 3D scanning with CAD systems to improve production efficiency and precision, as well as prospects for further research and industrial adoption.

Keywords: 3D scanning, mechanical engineering, contact measurement methods, coordinate measuring machines, laser scanning, structured light technology, photogrammetry, reverse engineering, quality control, digital transformation.

Введение. Современное машиностроение сталкивается с растущими требованиями к точности, скорости и гибкости производственных процессов. В этом контексте технологии 3D-сканирования стали ключевым инструментом, обеспечивающим цифровую трансформацию традиционных подходов к проектированию и контролю качества. От реверс-инжиниринга сложных деталей до оперативного мониторинга износа оборудования — спектр применений продолжает расширяться, охватывая все этапы жизненного цикла продукции [1 - 4].

Развитие методов сканирования демонстрирует устойчивую тенденцию к преодолению классических ограничений: современные системы достигают точности 0,005-0,1 мм при скорости обработки до 8 миллионов точек в секунду. Особый интерес представляет адаптация этих технологий к жестким условиям промышленной среды, где факторы вибрации, запыленности и температурных колебаний традиционно снижали достоверность измерений.

Контактные методы измерения и 3D-сканирование в машиностроении представляют собой два взаимодополняющих подхода для цифровой оцифровки геометрии деталей и изделий, каждый из которых находит своё применение в зависимости от требований к точности, скорости и характеру объектов.

Контактные методы и координатно-измерительные машины (КИМ).

Контактные методы относятся к традиционным способам измерения геометрии объектов с помощью механического зонда, непосредственно контактирующего с поверхностью детали [5]. Одним из наиболее распространённых инструментов для таких задач являются координатно-измерительные машины (КИМ), обеспечивающие контроль соответствия изделий конструкторской документации и требованиям допусков. Ниже приведены основные особенности их работы, области применения и ограничения:

- Принцип работы КИМ основан на точном измерении координат точек поверхности детали в трехмерном пространстве с помощью перемещающегося механического щупа.
- Современные КИМ обеспечивают точность измерений до 1 микрометра.
- Основные области применения: поверка особо ответственных деталей, контроль допусков в серийном производстве, верификация результатов бесконтактных измерений.
- Значительный недостаток — низкая скорость сканирования (несколько часов на сложные детали) и неудобство для измерения мягких или деформируемых материалов из-за риска искажения геометрии.
- Для отражающих металлических поверхностей требуется матирование, что добавляет погрешности.

Примеры использования контактных методов (КИМ):

- Измерение размеров и габаритов сложных деталей, например, цилиндрических и плоских поверхностей. Образец — автомобильный цилиндрический блок двигателя, где с помощью КИМ определяется точность сопряжения поршней с цилиндрами.
- Контроль профиля деталей, например, проверка формы шатунов и валов двигателя. Для этого используют КИМ с высокоточными датчиками, позволяющими получить точные координаты точек поверхности.
- Измерение углов и ориентации элементов, например, проверка правильности сборки

редуктора или коробки передач, где важна точная установка деталей под заданным углом.

- Построение карт рельефа и оцифровка поверхности, например, для восстановления изношенных государственных форм, или для последующего моделирования CAD.

Методы 3D-сканирования.

Современные бесконтактные методы 3D-сканирования приобрели широкое распространение благодаря своей высокой скорости и универсальности [6 - 10]. Они обеспечивают получение точных и детализированных трехмерных моделей объектов за считанные секунды, что значительно ускоряет процессы контроля и анализа. Активные методы, такие как лазерное сканирование и структурированный свет, позволяют сканировать объекты с точностью до нескольких микрон, что особенно важно при контроле сложных геометрий и мелких деталей в машиностроении и аэрокосмической отрасли. Пассивные методы, включая фотограмметрию, эффективны для быстрого получения моделей больших и труднодоступных объектов без необходимости физического контакта и с минимальными затратами. Бесконтактные технологии минимизируют риск повреждения объектов, что критично при работе с хрупкими и дорогостоящими деталями. Кроме того, современные 3D-сканеры легко интегрируются в автоматизированные производственные линии, снижая влияние человеческого фактора и повышая надежность измерений. Все это делает бесконтактное 3D-сканирование незаменимым инструментом для цифровой трансформации производства и повышения его эффективности. Основные технологии:

Лазерное сканирование:

- Осуществляет измерения с помощью лазерного луча, который проецируется на объект, а датчики фиксируют отражение.
- Используются два принципа: времяпролетный метод (измерение времени прохождения лазера) и фазовый метод.
- Точность от 0,01 до 0,1 мм, оптимально подходит для сканирования крупных объектов (до 10 м).
- Пример оборудования: Faro Focus, Scanform L5.
- Работает при различных условиях освещения, но требует матирования отражающих поверхностей.
- Высокая скорость сканирования (миллионы точек в секунду).
- Активно применяется в контроле качества, обратном инжиниринге, аэродинамическом анализе.

Технология структурированного света:

- Использует проекцию светового паттерна на объект и анализ искажений этого паттерна камерами.
- Обеспечивает точность до 0,005 мм, что позволяет восстанавливать геометрию мелких элементов и сложных поверхностей.
- Эффективна для работы со сложной топологией и мелкими деталями.
- Пример оборудования: Creaform HandySCAN, GOM Atos.
- Очень высокая скорость сканирования.
- Требуется статичности объекта и матирования или новых поляризационных фильтров для работы с отражающими поверхностями.

Фотограмметрия:

- Основывается на сборе множества фотографий объекта с разных ракурсов и

построении 3D модели с помощью программного обеспечения.

- Точность средняя, подходит для больших объектов и полевых условий.
- Менее точна, чем лазерное и структурированный свет, но более мобильна и дешева.

Примеры применения бесконтактных методов (лазерное и структурированный свет):

- Контроль больших и сложных объектов, таких как корпус или кузов автомобиля, с помощью лазерных сканеров Faro Focus или Scanform L5, которые позволяют создать точную трехмерную модель за короткое время.
- Высокоточечное сканирование мелких или сложных деталей, например, деталей авиационных двигателей или мелких механизмов, где важно сохранить мелкие геометрические детали. Здесь используют системы структурированного света, такие как GOM Atos или Creaform HandySCAN, обеспечивающие точность до 0,005 мм.
- Обратное проектирование и восстановление деталей через фотограмметрию, особенно при необходимости получения модели больших объектов и сложных форм в полевых условиях.

Сведем всё вышесказанное в сводную таблицу

Таблица 1. Сравнительная таблица методов сканирования.

Параметр	КИМ (контактные)	Лазерные сканеры	Структурирован- ный свет	Фотограм- метрия
Точность	До 1 мкм	0,01–0,1 мм	До 0,005 мм	Средняя
Скорость сканирования	Низкая	Высокая	Очень высокая	Средняя- низкая
Максимальный размер	До 2 м	До 10 м	До 3 м	Очень большие объекты
Работа с отражением	Требуется матирование	Требуется матирование	Матирование или поляризационные фильтры	Требуется текстура и освещение
Особенности	Высокая точность, долгий процесс, не подходит для мягких материалов	Универсальность, высокая скорость, точность	Высокая детализация, требует стабильности объекта	Мобильность, низкая стоимость, слабая детализация

Конкретные примеры применения:

- В машиностроении координатно-измерительные машины (КИМ) активно применяются для контроля точности сборочных размеров деталей и выявления несоответствий в контурах изделий, что является критичным при серийном производстве коробок передач, редукторов и других сложных узлов. Точное измерение координат позволяет обеспечить высокое качество сборки и снизить уровень брака.
- В аэрокосмической промышленности лазерное сканирование используется для поверхностной диагностики и контроля геометрии деталей с очень высокой точностью, достигающей микронного уровня. Это дает возможность выявлять

деформации и повреждения, которые возникают как в процессе эксплуатации, так и при производстве сложных компонентов, таких как лопатки турбин, а также проводить оперативный мониторинг состояния конструкций без демонтажа.

- В производстве кузовных элементов автомобилей применяется технология структурированного света, позволяющая за считанные минуты получить многоточечные трехмерные модели. Эти модели сравниваются с эталонными CAD-моделями, что позволяет быстро выявлять отклонения и дефекты, обеспечивая высокую точность геометрии и качество сборки автомобильных кузовов.
- Для ремонта и реставрации крупногабаритных деталей, а также объектов с ограниченным доступом, активно используется фотограмметрия. Этот метод дает возможность быстро создавать точные геометрические модели без необходимости применения громоздкого лазерного оборудования. Фотограмметрия повышает мобильность и экономичность процессов восстановления деталей сложной формы и большого размера.

В таблице ниже приведены основные характеристики методов 3D-сканирования, применимых для машиностроительных цехов, а также примеры популярных моделей сканеров, которые эффективно используются в промышленности.

Таблица 2. Основные характеристики методов 3D-сканирования и примеры моделей сканеров для машиностроительных цехов.

Метод	Точность	Скорость сканирования	Максимальный размер объекта	Особенность работы с поверхностями	Примеры моделей сканеров	Основное применение в цеху
Координатно-измерительные машины (КИМ)	До 1 мкм	Низкая	До 2 м	Требуется матирование для блестящих поверхностей	Mitutoyo Crysta-Plus, Hexagon GLOBAL S, Nikon Metrology	Контроль особо ответственных деталей, проверка допусков
Лазерные сканеры	0,01–0,1 мм	Высокая	До 10 м	Требуется матирование	Faro Focus, Leica ScanStation, Scanform L5	Быстрое сканирование крупных деталей и узлов
Структурированный свет	До 0,005 мм	Очень высокая	До 3 м	Требуется матирование или поляризационные фильтры	Creaform HandySCAN 3D, GOM Atos, Artec Eva	Высокоточное сканирование сложной геометрии
Фотограмметрия	Средняя	Средняя	Очень большие объекты	Требуется однородная текстура и освещение	Agisoft Metashape (ПО), RealityCapture (ПО)	Прототипирование и работа с крупногабаритными объектами

Краткое описание моделей:

- Mitutoyo Crysta-Plus — популярная координатно-измерительная машина с высокой точностью, используется для контроля сложных станочных деталей и узлов, особенно в авиастроении и автостроении [11].
- Hexagon GLOBAL S и Nikon Metrology — современные КИМ с автоматизацией и интеграцией с CAD-системами, подходят для производств с высокими требованиями [12, 13].
- Faro Focus — лазерный сканер для быстрых и точных замеров, применяемый для крупных и средних объектов; хорошо подходит для цехов с необходимостью быстро контролировать крупногабаритные изделия [14].
- Leica ScanStation — лазерный сканер с возможностями точного 3D-сопоставления и мониторинга изменений [15].
- Creaform HandySCAN 3D — портативный сканер со структурированным светом для высокодетализированных 3D-моделей мелких и средних объектов в условиях производственного цеха [16].
- GOM Atos — стационарный сканер высокой точности для сложных и мелких деталей, используется в авиастроении и точном машиностроении [17].
- Artec Eva — лёгкий сканер структурированного света, удобный для быстрого захвата геометрии сложных форм и текстур [18].
- Agisoft Metashape и RealityCapture — программные решения для фотограмметрии, применяемые для моделирования больших объектов и нестандартного оборудования, требуют смартфоны или фотоаппараты для первичных съемок [19, 20].

Выводы. Технологии 3D-сканирования играют ключевую роль в цифровой трансформации машиностроения, обеспечивая высокую точность, скорость и гибкость измерений, что позволяет улучшить проектирование, контроль качества и мониторинг состояния оборудования на всех этапах жизненного цикла изделий.

1. Современные 3D-сканеры достигают точности от 0,005 до 0,1 мм и скорости обработки данных до миллионов точек в секунду, что значительно превосходит традиционные контактные методы измерений по скорости, при этом контактные методы сохраняют преимущество в высокой точности (до 1 мкм) для особо ответственных деталей.
2. Контактные методы (КИМ) и бесконтактные 3D-сканеры дополняют друг друга: КИМ применяются для контроля особо точных и ответственных деталей, тогда как лазерные сканеры, структурированный свет и фотограмметрия используются для быстрой цифровой оцифровки крупных и сложных объектов, а также сложных геометрий.
3. Лазерное сканирование подходит для больших объектов с точностью 0,01-0,1 мм и высокой скоростью, структурированный свет обеспечивает максимальную точность до 0,005 мм для мелких и сложных деталей, а фотограмметрия, несмотря на среднюю точность, ценится за мобильность и возможность работы с крупногабаритными объектами в полевых условиях.
4. Внедрение 3D-сканирования снижает время контроля и повышает автоматизацию производственных процессов, сокращая участие человека в рутинных операциях и обеспечивая высокую степень интеграции с CAD-системами и технологиями обратного проектирования.
5. Практические примеры использования включают контроль допусков и геометрии деталей в автомобильном и аэрокосмическом производстве, мониторинг износа, реверс-

инжиниринг, создание высокоточных 3D-моделей для проектирования и последующего производства сложных деталей и узлов.

6. Сводные таблицы характеристик методов 3D-сканирования и моделей оборудования подчеркивают многообразие доступных решений для разных производственных задач, акцентируя внимание на выборе метода в зависимости от требований к точности, размеру объекта и рабочим условиям.

Таким образом, 3D-сканирование является неотъемлемой частью современных машиностроительных технологий, обеспечивая новый уровень цифровизации, повышения качества и эффективности производства. Эта технология позволяет создавать точные цифровые модели изделий и комплектующих, что способствует ускорению проектирования, улучшению контроля качества и снижению вероятности производственных дефектов. Внедрение 3D-сканирования дает возможность оптимизировать производственные процессы за счет автоматизации измерений и минимизации ручного труда, что сокращает время и затраты на изготовление продукции. Интеграция 3D-сканирования с CAD/CAM системами открывает новые перспективы для производства изделий с высокой точностью и адаптацией к современным требованиям рынка, что делает предприятие более конкурентоспособным и инновационно развитым.

Список литературы

1. Цитируемая литература и источники приводятся в конце статьи в порядке упоминания (оформляются по ГОСТ Р 7.0.5–2008), не менее 10 источников. Ссылки на литературу даются в тексте в квадратных скобках.
2. Кислова, А. В. Реверс-инжиниринг рабочей лопатки газовой турбины с использованием лазерного 3D-сканирования / А. В. Кислова, Д. С. Еремин // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2025) : Сборник докладов Национальной научно-технической конференции с международным участием, Москва, 07–12 апреля 2025 года. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2025. – С. 290-294.
3. Денисенко, Д. Д. Реверс-инжиниринг водомётного двигателя: от сканирования создания 3D модели / Д. Д. Денисенко, А. Ю. Тараховский // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования : сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 12–14 февраля 2025 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2025. – С. 5-10.
4. Стреляная, Ю. О. Цифровой инжиниринг - альтернатива импортозамещения в машиностроении / Ю. О. Стреляная, А. Ю. Тараховский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 5(367). – С. 174-180. – DOI 10.33979/2073-7408-2024-367-5-174-180.
5. Осипов, А. К. Применение технологий 3D-сканирования в машиностроении / А. К. Осипов, К. В. Люляева, Е. С. Рыскина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 246.
6. Быков, В. В. Перспективы применения технологий 3d-сканирования деталей при контроле качества деталей машин / В. В. Быков, М. И. Голубев // Инновационные технологии в АПК региона: достижения, проблемы, перспективы развития : Сборник научных трудов по материалам Национальной научно-практической конференции, Тверь, 09–11 февраля 2021

года. – Тверь: Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. – С. 320-323.

7. Тараховский, А. Ю. Современные технологии 3D-сканирования: принципы работы, области применения и перспективы развития / А. Ю. Тараховский // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования : сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 12–14 февраля 2025 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2025. – С. 98-102.

8. Методика оптического 3D сканирования тел вращения по технологии структурированного подсвета / А. О. Головинский, Д. А. Клишкин, Н. Н. Татарников [и др.] // XXXV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2023) : Сборник трудов конференции, Москва, 13–14 ноября 2023 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2023. – С. 532-536.

9. Решетникова, Е. С. Технологии 3D-сканирования / Е. С. Решетникова, Е. В. Скрипничук // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы 80-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – С. 151.

10. Стреляная, Ю. О. Интегрированный подход к реверс-инжинирингу детали судового компрессора на основе цифровых технологий / Ю. О. Стреляная, А. Ю. Тараховский, К. А. Мишкина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 4(372). – С. 116-120. – DOI 10.33979/2073-7408-2025-372-4-116-120.

11. Тараховский, М. А. Практическое применение технологии ручного лазерного сканирования с маркерами и создание точной CAD модели кронштейна средствами КОМПАС 3D / М. А. Тараховский, А. Ю. Тараховский // Современные технологии: проблемы и перспективы : сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных, Севастополь, 14–17 апреля 2025 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2025. – С. 212-217.

12. Mitutoyo Crysta-Plus. Координатно-измерительная машина. Японская компания Mitutoyo. Технические характеристики и описания. — [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.mitutoyo.com> (дата обращения: 20.11.2025).

13. Hexagon GLOBAL S. Координатно-измерительная машина с автоматизацией. Компания Hexagon. — [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://hexagon.com> (дата обращения: 20.11.2025).

14. Nikon Metrology. Системы измерений и контроля. Nikon Corporation. — [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://nikonmetrology.com> (дата обращения: 20.11.2025).

15. Faro Focus. Лазерный 3D-сканер для крупных объектов. Faro Technologies. — [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.faro.com> (дата обращения: 20.11.2025).

16. Leica ScanStation. Лазерный сканер для точных 3D измерений. Leica Geosystems. — [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://leica-geosystems.com> (дата обращения: 20.11.2025).

17. Creaform HandySCAN 3D. Портативный 3D-сканер структурированного света. Creaform. — [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.creaform3d.com> (дата обращения: 20.11.2025).

18. GOM Atos. Стационарный высокоточный 3D-сканер. GOM GmbH. — [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.gom.com> (дата обращения: 20.11.2025).

19. Artec Eva. Легкий 3D-сканер для быстрого захвата геометрии. Artec 3D. — [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.artec3d.com> (дата обращения: 20.11.2025).

20. Agisoft Metashape. Программное обеспечение для обработки фотограмметрических данных. Agisoft LLC. — [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.agisoft.com> (дата обращения: 20.11.2025).

21. RealityCapture. Программа для 3D-моделирования по фотоснимкам. Capturing Reality. — [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.capturingreality.com> (дата обращения: 20.11.2025).

УДК 621.865.8; 338.2

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ВЫБОРА ТИПА ЛИНЕЙНОГО ПРИВОДА МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

*Л.Е. Карташов¹,
А.С. Казак¹,
А.И. Дробитько¹*

¹*Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*

АННОТАЦИЯ

В статье выполнен анализ параметров существующих типов линейных приводов. Рассмотрены различные языки программирования, позволяющие реализовать аппарат нечеткой логики. Разработана программа, реализующая выбор типа линейного привода по заданным значениям параметров.

Ключевые слова: линейный привод, нечеткая логика, Python, библиотека Scikit-Fuzzy.

APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO SELECT MECHATRONIC LINEAR DRIVE TYPE

*L.E. Kartashov¹,
A.S. Kazak¹,
A.I. Drobitko¹*

¹ *Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

ABSTRACT

The article analyzes the parameters of existing types of linear drives. Various programming languages are considered that allow you to implement a fuzzy logic device. A program has been developed that implements the selection of the type of linear drive according to the specified parameter values.

Keywords: line drive, fuzzy logic, Python, Scikit-Fuzzy library

Введение. При разработке оборудования в машиностроение, особенно при создании автоматизированных, мехатронных и робототехнических систем требуется осуществлять линейные перемещения с возможностью позиционирования различных технологических объектов с высокой точностью и скоростью. Для этого используются линейные приводы.

Линейный привод – это устройство, преобразующее входную энергию (электрическую, гидравлическую, пневматическую или иную) в механическое линейное перемещение. Привод имеет такие характеристики прямолинейного движения, как скорость, ускорение, точность, силу или момент, и другие параметры.

Существуют разные типы линейных приводов, которые отличаются по типу двигателя, исполнительного органа, механизму передачи движения и способу управления. Наиболее часто используемые типы приводов:

- электрические;
- гидравлические;
- пневматические;
- пьезоэлектрические,

Однако выбор конкретного привода является трудной задачей, поскольку проектировщику необходимо произвести анализ существующих приводов и по определённым параметрам выбрать оптимальное или близкое к нему решение.

Постановка задач. Целью данной статьи является анализ параметров существующих приводов линейного перемещения, выявление их преимуществ и недостатков и разработка алгоритма выбора наилучшего решения на основе аппарата нечетной логики,

Основная часть. Проанализируем преимущества и недостатки различных типов линейных приводов.

Электрические линейные приводы обладают следующими преимуществами:

- Высокая точность позиционирования с использованием обратной связью на основе датчиков положения, скорости и силы,
- Достаточная скорость перемещения,
- Высокая эффективность и доступность применения,
- Низкий уровень шума и вибраций, которые обеспечиваются плавностью хода,
- Простота монтажа и обслуживания, характеризуются компактностью и модульностью.

К недостаткам линейных электрических приводов относят:

- Ограниченный диапазон перемещения, который определяется рабочей длиной преобразователя вращательного движения в поступательное,
- Высокая стоимость некоторых типов электрических линейных приводов,
- Потребность в наличии источника электросети с защитой от перегрузок и коротких замыканий.

Гидравлические линейные приводы обладают следующими преимуществами:

- Большая сила и нагрузочная способность, которые обеспечиваются высоким давлением жидкости в гидросистеме,
- Высокий КПД и плавность хода.

К недостаткам относятся:

- Сложность конструкции и эксплуатации, которые обусловлены наличием гидросистемы,
- Высокий уровень шума и вибраций, обусловленные работой насоса, клапанов и турбулентностью потока жидкости в трубопроводах,

- Риск утечки рабочей жидкости и загрязнения окружающей среды, который обусловлен необходимостью поддержания герметичности гидросистемы и очистки жидкости от примесей.

Пневматические приводы обладают следующими преимуществами:

- Простота конструкции и эксплуатации, которые обусловлены отсутствием сложных механизмов в пневмосистеме,

- Низкая стоимость и доступность, которые характеризуются использованием воздуха как рабочей среды и стандартных компонентов в пневмосистеме.

К недостаткам относят:

- Низкая точность и скорость перемещения, которые обусловлены наличием зазоров, упругости и гистерезиса в пневмосистеме,

- Высокий уровень шума, обусловленные необходимостью поддержания высокого давления воздуха в пневмосистеме и его выпуском в атмосферу,

- Зависимость от качества воздуха, который должен быть очищен от влаги, масла и примесей, чтобы не повредить пневмоцилиндр и прочие компоненты пневмосистемы.

Пьезоэлектрические линейные приводы имеют следующие преимущества:

- Очень высокая точность и разрешение перемещения, которые обусловлены малой деформацией пьезоэлемента под действием электрического поля,

- Высокая чувствительность и быстродействие, которые характеризуются отсутствием инерции и механических передач в пьезоэлектрическом приводе,

- Низкий уровень шума и вибраций,

К недостаткам относят:

- Ограниченный ход перемещения, которые обусловлены малой деформацией пьезоэлемента под действием электрического поля,

- Высокая стоимость и сложность управления, обусловленные необходимостью подачи высокого напряжения на пьезоэлемент и регулирования его частоты и амплитуды,

- Чувствительность к температуре, магнитным полям и механическим нагрузкам, которые могут изменять свойства пьезоэлемента.

Был произведен анализ параметров некоторых приводов, применяемых в настоящее время для создания мехатронных систем, результаты которого анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры линейных приводов

Модель	Грузоподъемность, кг	Рабочая скорость, м/с	Точность позиционирования, мм
Электрические линейные приводы			
VEVOR 1000N Linear Actuator DC 12 V [1]	100	0,014	-
Actuonix P16 Linear Actuator 50 мм [2]	5	0,020	0,1
LINAK LA36 Heavy Duty Linear Actuator [3]	1000	0,16	0,5
Гидравлические линейные приводы			
HYDRAFORE Hydraulic Stellringzylinder 300 T 50 мм [4]	300 000	100	0,1

Модель	Грузоподъемность, кг	Рабочая скорость, м/с	Точность позиционирования, мм
Enerpac RSM500 Hydraulic Cylinder [5]	50 000	70	0,05
Bosch Rexroth CDT3 Heavy-Duty Hydraulic Cylinder [6]	160 000	500	0,02
Пневматические линейные приводы			
Airtac SC 32×300 [7]	30	500	0,5
SMC MXQ guided slide actuator [8]	15	400	0,05
Festo DGC servo-pneumatic actuator [9]	100	700	0,01
Пьезоэлектрические линейные приводы			
KEMET AE035035D08H09DF [10]	2,2	60...90	10-30·10-6
PI PICMA Stack P-882,1 [11]	60	0,8	5·10-6
Thorlabs DRV517 Piezo Linear Stage [12]	10	0,5	1·10-6

Стоит учесть, что в случае реализации следящего привода на основе пневмопривода или гидропривода, точность позиционирования будет значительно ниже заявленной.

Анализируя таблицу 1, можно сделать вывод, что для конкретного типа привода значения параметров достаточно сильно различаются и поэтому задача выбора типа привода при проектировании мехатронной системы является достаточной сложной. Поэтому представляет целесообразным использовать аппарат нечетной логики, который позволит проектировщику осуществить оптимальный выбор линейного привода.

В обычной жизни крайне редко используют четкие правила и алгоритмы. Вместо этого у человека есть органы чувств и врожденное чувство меры. Дело в том, что окружающий мир настолько сложен, что ни одна вычислительная машина не сможет учесть все зависимости. Поэтому для точных компьютерных вычислений обычно упрощается задача, идеализируя её, отбрасывая несуществующие факторы, принимая какие-либо допущения. Во многих случаях полезно наделить управляющее устройство «нечетким мышлением», где в системе все влияющие на неё факторы учесть сложно или невозможно – это позволяет облегчить работу человека-эксперта, имеющего большой практический опыт, заменяя рутинные действия автоматическим выбором.

Следующим шагом является выбор языка программирования, где реализована возможность работы с нечетной логикой, и имеются библиотеки, которые позволяют реализовать этот математический аппарат. Можно воспользоваться приведенным в [13] анализом программного обеспечения и библиотек нечеткой логики, которые сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Программное обеспечение для разработки модели нечетной логики

Название	Язык программирования	Последний релиз	Описание
FuzzyLite	C++	2017	Набор библиотек C++ разработанные под Fuzzy, совместимые с стандартом FCL.
FisPro	C++	2019	Универсальное программное обеспечение с графическим интерфейсом, предназначенное для облегчения обучения систем нечеткого вывода на основе данных.
Juzzy	Java	2013	Набор инструментов на основе Java, реализующий нечеткие рассуждения типа 2.
JFML	Java	2018	Библиотека Java, реализующая стандарт FML
FuzzyR	R	2019	Инструментарий R с графическим интерфейсом для проектирования систем нечеткого вывода 1-го и 2-го типов.
Fuzzy Toolbox for Matlab	Matlab	1994	Универсальный набор инструментов, реализованный в среде Matlab
Fuzzy Logic Toolbox	Matlab	2020	Коммерчески распространяемый набор инструментов с графическим интерфейсом, доступный внутри среды Matlab
PyFuzzy	Python 2	2014	Библиотека Python 2, совместимая со стандартом FCL. Разработка библиотеки прекращена, и Python 2 официально не поддерживается. Эта библиотека зависит от среды выполнения ANTLR 3.
Fuzzylab	Python 3x	2019	Библиотека Python на основе Octave Fuzzy Logic Toolkit
Scikit-Fuzzy	Python 3x	2019	Универсальный API, предназначенный для работы в стеке SciPy, предлагающий классы и методы для поддержки определения нечетких систем.
Py4JFML	Python 3	2019	Оболочка Python для библиотеки Java JFML

Исходя из того, что язык Python является свободно распространяемым программным обеспечением, а библиотека SciKit-Fuzzy достаточно хорошо документирована [14], воспользуемся ими для реализации программы.

Различные способы определения функции принадлежности и алгоритмы нечетной логики достаточно подробно изложены, например, в [15, 16], и в данной работе рассматривать их подробно не имеет смысла

Листинг программы приводится ниже.

```
import numpy as np
import skfuzzy as fuzz
import matplotlib.pyplot as plt

speed = np.arange(0, 30, 1)
speed_fast = fuzz.trimf(speed, [10, 15, 25])
speed_medium = fuzz.trimf(speed, [5, 10, 15])
speed_slow = fuzz.trimf(speed, [1, 3, 6])

mass = np.arange(0, 500, 1)
mass_big = fuzz.trimf(mass, [50, 100, 500])
mass_medium = fuzz.trimf(mass, [5, 50, 75])
mass_small = fuzz.trimf(mass, [0, 5, 15])

precision = np.arange(0, 2500, 1)
precision_big = fuzz.trimf(precision, [25, 50, 100])
precision_medium = fuzz.trimf(precision, [50, 100, 150])
precision_small = fuzz.trimf(precision, [150, 500, 2000])
```

В данном фрагменте мы задаем функции принадлежности нечетких множеств при помощи оператора `fuzz.trimf`, который позволяет сформировать треугольные функции принадлежности – функции треугольной формы, которые используются для определения отношений между входными данными перед фазификацией и фазифицированными выходными данными. В качестве параметров выбрана скорость перемещения, грузоподъемность и точность позиционирования линейных приводов.

Следующий фрагмент программы не является обязательным и служит для вывода соответствующих функций принадлежности.

```
plt.figure()
plt.plot(speed, speed_fast, label = 'Быстро')
plt.plot(speed, speed_medium, label = 'Средне')
plt.plot(speed, speed_slow, label = 'Медленно')
plt.show()

plt.figure()
plt.plot(mass, mass_small, label = 'Легкий')
plt.plot(mass, mass_medium, label = 'Средний')
plt.plot(mass, mass_big, label = 'Тяжелый')
plt.show()

plt.figure()
plt.plot(precision, precision_small, label = 'Низкая')
plt.plot(precision, precision_medium, label = 'Средняя')
```

```
plt.plot(precision, precision_big, label = 'Высокая')
plt.show()
```

На рисунке 1, рисунке 2 и рисунке 3 представлены функции принадлежности скорости, грузоподъёмности и точности позиционирования соответственно.

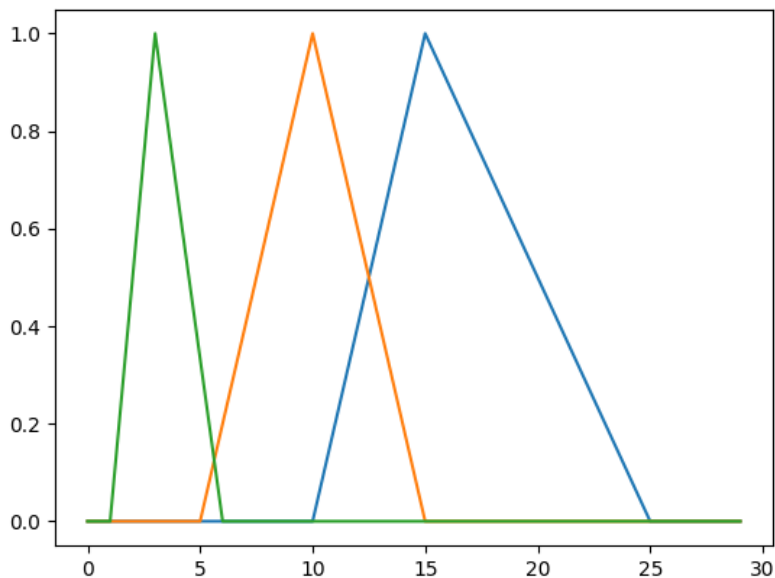


Рисунок 1. Функция принадлежности скорости линейных приводов

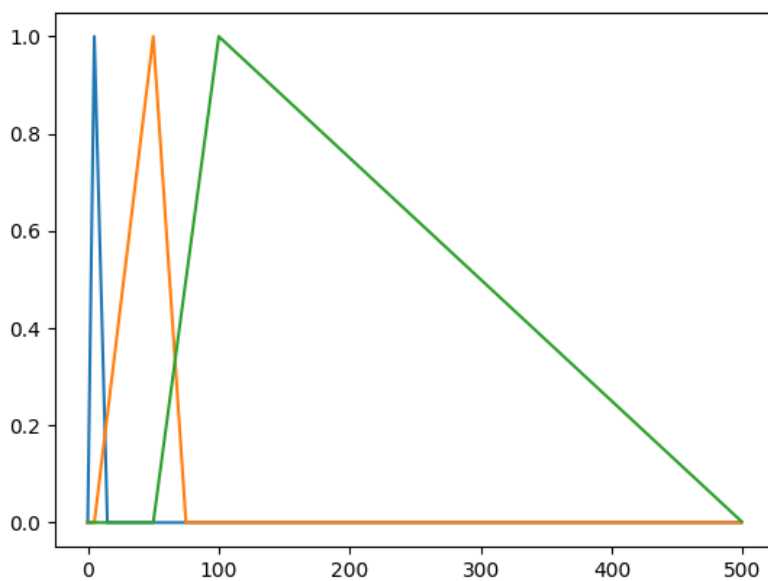


Рисунок 2. Функция принадлежности грузоподъёмности линейных приводов

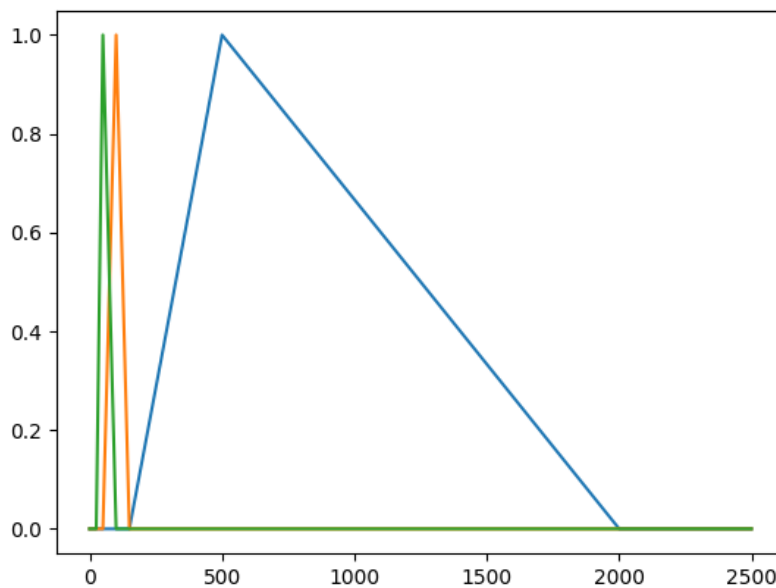


Рисунок 3. Функция принадлежности точности позиционирования линейных приводов

Далее необходимо определить правила нечеткого вывода, которые рассматриваются как база знаний, описывающая взаимосвязь между входными и выходными выражениями. Они представлены последовательностью условий «ЕСЛИ-ТО». Это приводит к набору процедур, которые определяют, какие действия или выводы должны быть предприняты в данный момент времени при появлении входных комбинаций. Нечеткие правила создаются на основе знаний относительно выбранного приложения. Данный фрагмент кода программы приводится ниже.

```
def sol_smp(sp, ma, pr):
    gidro_drv_speed = fuzz.interp_membership(speed, speed_fast, sp)
    pnevm_drv_speed = fuzz.interp_membership(speed, speed_medium, sp)
    elekt_drv_speed = fuzz.interp_membership(speed, speed_slow, sp)

    gidro_drv_mass = fuzz.interp_membership(mass, mass_big, ma)
    pnevm_drv_mass = fuzz.interp_membership(mass, mass_medium, ma)
    elekt_drv_mass = fuzz.interp_membership(mass, mass_small, ma)

    gidro_drv_precision = fuzz.interp_membership(precision, precision_medium, pr)
    pnevm_drv_precision = fuzz.interp_membership(precision, precision_small, pr)
    elekt_drv_precision = fuzz.interp_membership(precision, precision_big, pr)

    if gidro_drv_speed > pnevm_drv_speed and gidro_drv_mass > pnevm_drv_mass and
gidro_drv_precision > pnevm_drv_precision:
        return 'Гидропривод'

    elif gidro_drv_speed < pnevm_drv_speed and gidro_drv_mass < pnevm_drv_mass and
gidro_drv_precision < pnevm_drv_precision:
```

```
    return 'Пневмопривод'  
else:  
    return 'Электропривод'
```

Используя функцию print, вызовем разработанную функцию для трёх различных комбинаций входных параметров.

```
print(sol_smp(15, 400, 100))  
print(sol_smp(10, 50, 800))  
print(sol_smp(5, 15, 25))
```

На рисунке 4, можно приводится результат выполнения программы в консоли IDLE Python.



```
IDLE Shell 3.12.2  
File Edit Shell Debug Options Window Help  
Python 3.12.2 (tags/v3.12.2:6abddd9, Feb 6 2024, 21:26:36) [MSC v.1937 64 bit (AMD64)] on win32  
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.  
>>>  
===== RESTART: D:\fuzz_ver_1.py =====  
  
Гидропривод  
Пневмопривод  
Электропривод  
>>> |  
Ln: 8 Col: 0
```

Рисунок 4. Результат работы аппарата нечетной логики

Стоит учесть, что это базовый пример применения аппарата нечетной логики для выбора типа линейного привода.

Выводы.

Результаты работы разработанной программы позволяют утверждать, что данный подход существенно упрощает выбор типа привода на стадии подбора оборудования при проектировании мехатронных систем. Дальнейшее направления исследования могут быть связаны с рассмотрением использования других вариантов функции принадлежности, уточнением и увлечением числа параметров приводов, которые учитываются при их выборе.

Представляется целесообразным рассмотреть реализацию данной программы с использованием других библиотек для языка Python, а также разработкой дружественного к пользователю интерфейса, что позволит разработать полноценную систему поддержки выбора решений для проектировщика.

Список литературы

1. Vevor: официальный сайт. – URL: <https://vevor.de> (дата обращения: 10.11.2025).
2. Digi-Key Electronics: официальный сайт. — URL: <https://www.digikey.de/> (дата обращения: 10.11.2025).
3. LINAK A/S: официальный сайт. – URL: <https://www.linak.com/> (дата обращения: 10.11.2025).
4. EZ-Tools: официальный сайт. – URL: <https://ez-tools.de> (дата обращения: 10.11.2025).
5. Enerpac: официальный сайт. – URL: <https://www.enerpac.com/> (дата обращения: 10.11.2025).
6. Bosch Rexroth: официальный сайт. – URL: <https://www.boschrexroth.com> (дата обращения: 10.11.2025).
7. Airtac International Group: официальный сайт. – URL: <https://www.airtac.com/> (дата обращения: 10.11.2025).
8. MINIMUM ENERGY CAPACITY FOR ACCELERATION-BRAKING CONTROL Bokhonsky A., Maistrishin M., Ryzhkov A., Varinskaya N. В сборнике: ACM International Conference Proceeding Series. 2. Сер. "Proceedings of 2021 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems, ICAIIS 2021" 2021. С. 3469216.
9. Festo AG & Co. KG: официальный сайт. – URL: <https://www.festo.com/> (дата обращения: 10.11.2025).
10. Physik Instrumente (PI): официальный сайт. – URL: <https://www.pi-usa.us/> (дата обращения: 10.11.2025).
11. Digi-Key Electronics: официальный сайт. – URL: <https://www.digikey.de/> (дата обращения: 13.11.2025)
12. Thorlabs GmbH: официальный сайт. – URL: <https://www.thorlabs.de/> (дата обращения: 10.11.2025).
13. Spolaor S. et al., Simpful: A User-Friendly Python Library for Fuzzy Logic International Journal of Computational Intelligence Systems, Vol. 13(1), 2020, pp. 1687–1698
14. Skfuzzy — skfuzzy v0.3 docs: официальный сайт – URL: <https://scikit-fuzzy.readthedocs.io> (дата обращения: 10.11.2025)
15. Рутковская, Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский // – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
16. Ross, Timothy J. Fuzzy logic with engineering applications – 3rd ed., 2010 John Wiley & Sons, Ltd. – 602 p.

УДК 621.7

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОВОРОТНОГО СТОЛА
РЕЗЬБОНАРЕЗНОГО СТАНКА С КОМБИНИРОВАННЫМ МПС
В ЗАДАННОМ ПОЛОЖЕНИИ**

**С.М. Братан¹,
А.С. Часовитина¹,
А.О. Харченко¹,
А.Г. Колесов¹**

¹*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Российская Федерация.*

АННОТАЦИЯ

Выполнено моделирование и расчеты замкнутой системы стабилизации углового положения стола резбонарезного станка с комбинированным МПС, приведены и оценены показатели качества исследуемой системы.

Ключевые слова: механизмы параллельных структур, система управления, поворотный стол.

**MODELING OF THE ROTARY TABLE STABILIZATION SYSTEM
OF A THREAD-MILLING MACHINE WITH A COMBINED MPS
IN A GIVEN POSITION**

**S.M. Bratan¹,
A.S. Chasovitina¹,
A.O. Kharchenko¹,
A.G. Kolesov¹**

¹*Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.*

ABSTRACT

The article presents the modeling and calculations of a closed-loop system for stabilizing the angular position of the table of a thread-cutting machine with a combined MPS. The quality indicators of the studied system are presented and evaluated.

Keywords: mechanisms of parallel structures, control system, turntable.

Введение. Результаты исследований [1-5] по созданию резбонарезного модуля на основе МПС для обработки деталей сложной геометрии показали, что станки традиционной компоновки в значительной мере уступают по функциональным возможностям и габаритным показателям конструкциям на основе механизмов параллельных структур. В связи с этим предложенные варианты модуля на основе МПС, имеющие преимущество в гибкости и маневренности, оказываются достаточно эффективными для условий гибкой производственной системы, но нуждается в усовершенствованиях, повышающих надежность, жесткость конструкции и оптимизации параметров, влияющих на точность обработки изделий. Поэтому

для дальнейшего проектирования нового технологического оборудования следует обозначить ряд недостатков системы, которые, в процессе решения, необходимо минимизировать.

Одним из наиболее весомых недостатков, влияющих на качество обработанной поверхности при обработке деталей сложной геометрии, является неточность позиционирования положения поворотного стола резбонарезного станка с МПС.

После получения корректной математической модели станка (выявляется путем моделирования структурных вариантов) [2-4] необходимо осуществить повышение показателей качества модулей полученного оборудования.

При решении задач оптимизации (стабилизации) движения элементов резбонарезного модуля за целевую функцию принята точность позиционирования подсистемы станка (поворотный стол) для улучшения описанного ранее рационального варианта, выбранного в процессе синтеза [2].

Для решения поставленной задачи разработана САУ, работающая по следующему признаку: на энкодере выставляется угол, соответствующий требуемому (ранее заданному), далее на выходе энкодера формируется напряжение, пропорциональное сигналу ошибки $\varepsilon = \varphi_0 - \varphi$. Это напряжение подается на вход регулятора. Полученный сигнал управления u сравнивается с сигналом обратной связи, исходящего от датчика угла поворота стола. Таким образом формируется сигнал ошибки и поступает на силовой регулятор, где выполняется усиление по мощности (рисунок 1).

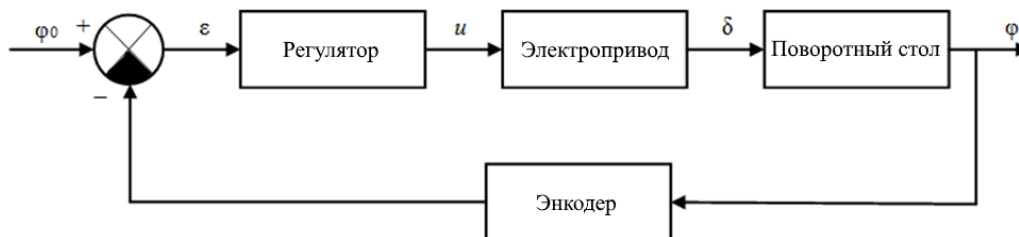


Рисунок 1. Функциональная схема системы стабилизации

Далее в зависимости от угла поворота стола δ , стол разворачивается вокруг своей вертикальной оси, проходящей через центр масс. Текущий угол поворота φ измеряется энкодером и сравнивается с задающим φ_0 . Вышеописанный процесс будет продолжаться до тех пор, пока ошибка регулирования не будет равняться нулю ($\varepsilon = 0$).

Моделирование замкнутой системы стабилизации выполнено в среде визуального моделирования *Simulink* программы MathLab. Структурная схема моделирования (s-модель), предназначенная для решения поставленной задачи, приведена на рисунке 2.

Как следует из рисунка 2, исследуемая система управления состоит из двух замкнутых контуров: внешнего и внутреннего. Внешний контур сформирован в результате выполнения I этапа и дополнен ПИД регулятором (на схеме элемент PID Controller), параметры которого подлежат выбору в процессе моделирования, исходя из требований желаемых показателей качества: времени установления (регулирования) – $t_p \leq 100$ сек и перерегулирования – $\sigma < 10\%$.

Внутренний контур образует систему управления электроприводом, которая на этапе предварительного моделирования была представлена упрощенной моделью в виде аperiodического звена 1 порядка. В состав электропривода входят: ПИ регулятор (элементы

$Gain1, Gain2, Integrator1, Add$); тиристорный преобразователь ($Transfer Fon1$); ДПТ (Zero-Pole); дополнительное устройство ($Gain3$). Переходная характеристика системы электропривода приведена на рисунке 3.

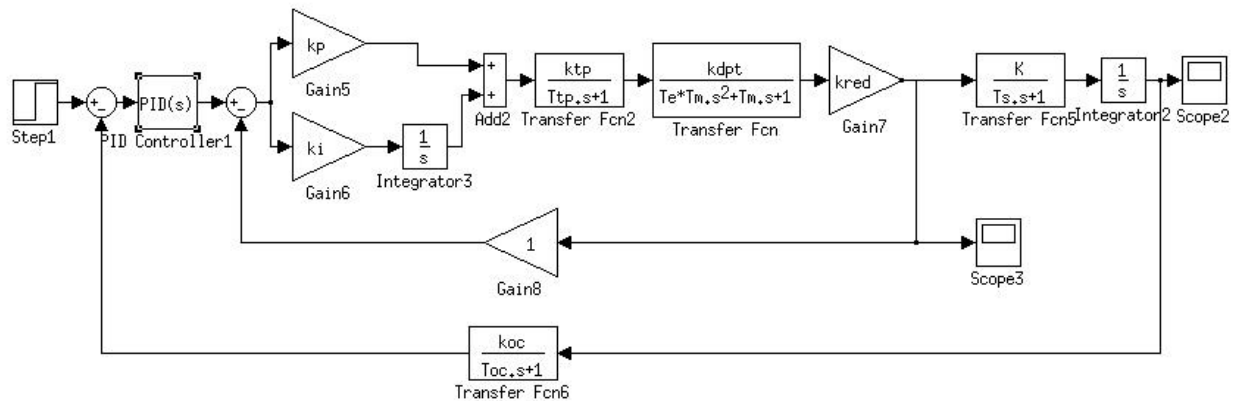


Рисунок 2. Структурная схема моделирования системы стабилизации стола в заданном положении

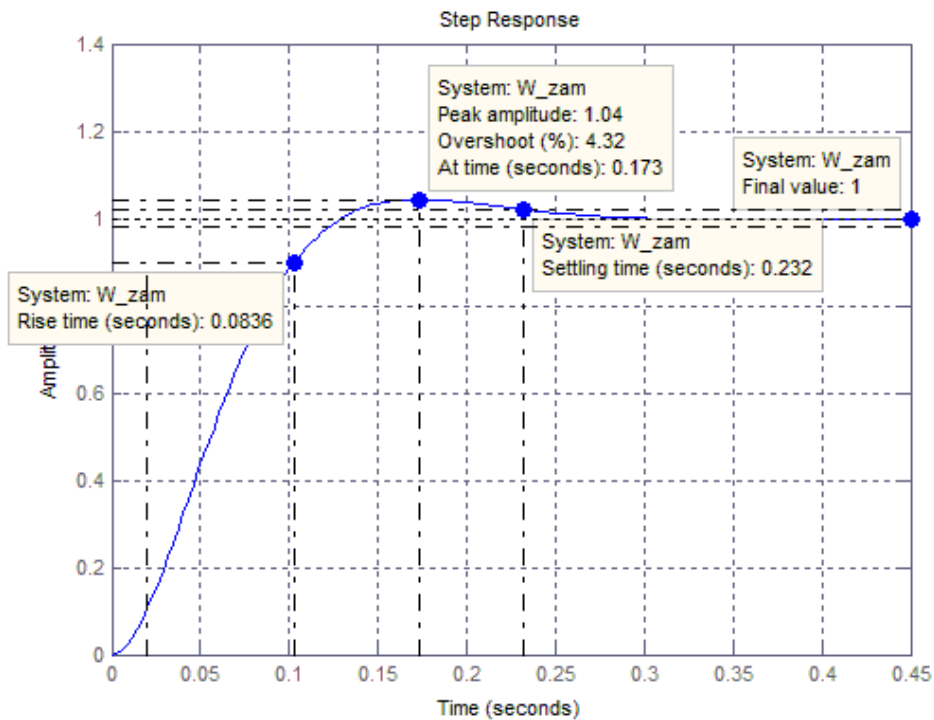


Рисунок 3. Переходная характеристика для ЭП постоянного тока

Характеристика со следующими показателями качества:

$t_n = 0,0836$ сек – время нарастания;

$t_p = 0,232$ – время регулирования;

Число полных колебаний: 1;

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\% :$$

$$y_{\max} = 1,04,$$

$$y(\infty) = 1,$$

$$\sigma = \frac{1,04 - 1}{1} \cdot 100\% = 4\%,$$

$$\sigma = 4,32\% < 5\% - \text{перерегулирование.}$$

Ниже приведены скоростная и угловая переходная характеристики системы стабилизации (рисунок 3 и рисунок 4).

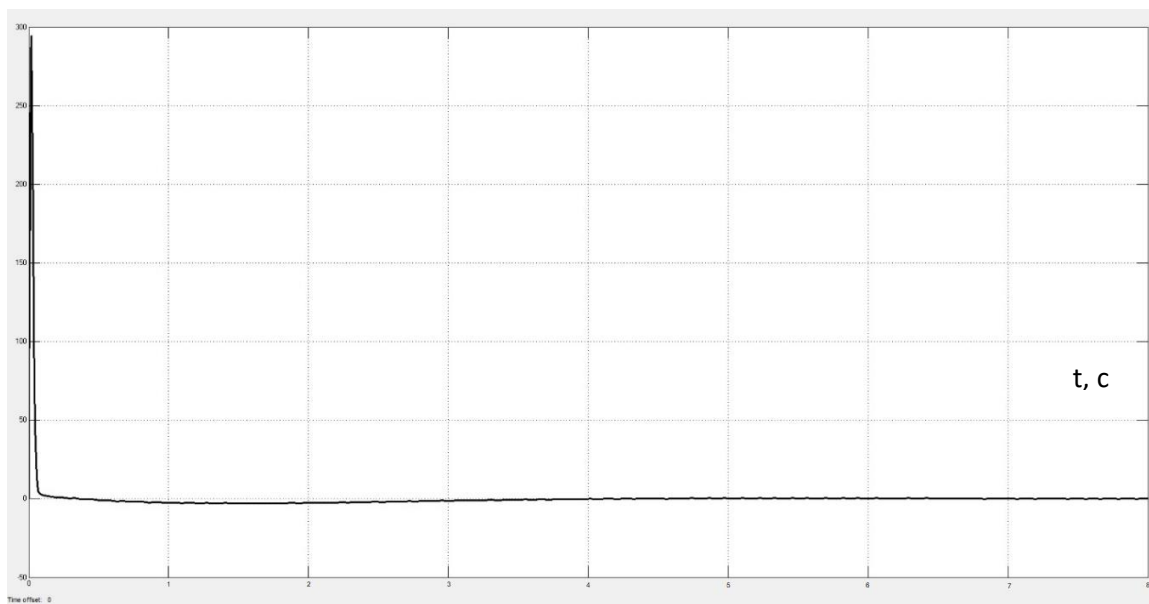


Рисунок 3. Скоростная переходная характеристика (Score 3)

Прямые показатели качества системы в переходном режиме определяем непосредственно по графику переходной характеристики, которая изображена на рисунке 4.

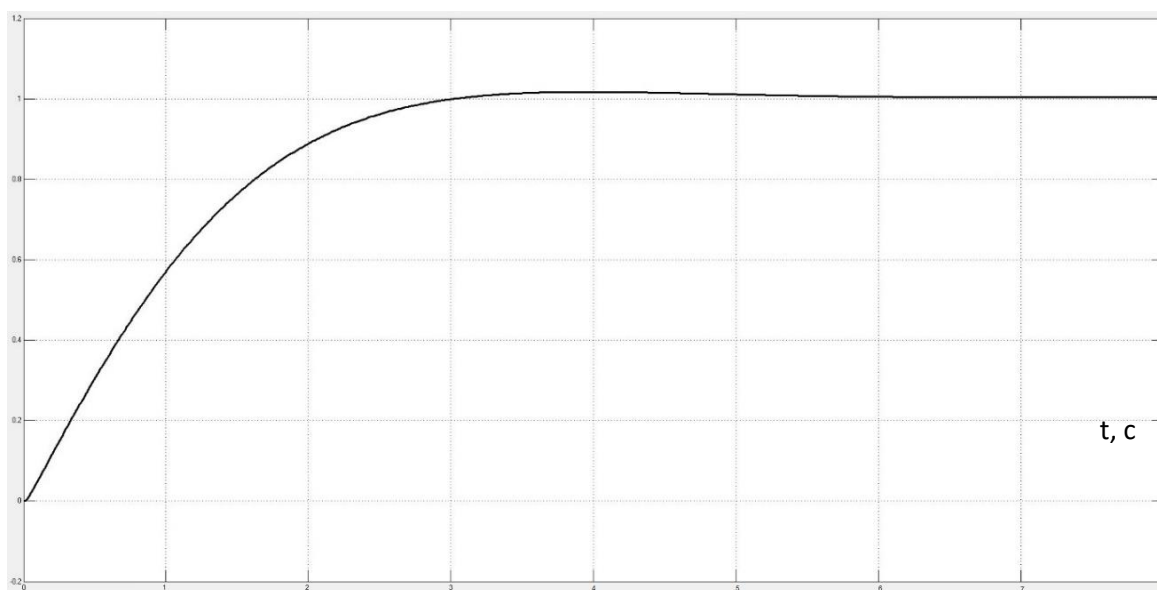


Рисунок 4. Угловая переходная характеристика (Score 2)

Эти показатели получили следующие значения:

$t_n = 2,8$ сек – время нарастания;

$t_p = 5,8$ сек < 10 сек – время регулирования;

Число полных колебаний: 1;

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\% :$$

$$y_{\max} = 1,02 ,$$

$$y(\infty) = 1 ,$$

$$\sigma = \frac{1,02 - 1}{1} \cdot 100\% = 2\% ,$$

$\sigma = 2\% < 10\%$ - перерегулирование.

Найденные показатели качества удовлетворяют заданным требованиям.

Вывод. Разработанная система управления удовлетворяет заданным требованиям и поможет повысить точность позиционирования, влияющую на качество обрабатываемого изделия. Однако, для комплексного подхода к минимизации обозначенного недостатка конструкций на основе МПС этого недостаточно.

Список литературы

1. Харченко, А. О. Механизмы параллельных структур (МПС) в гибридных компоновках резьбонарезного оборудования / А. О. Харченко, А. А. Харченко, А. С. Часовитина // Вестник современных технологий. – 2021. – № 2(22). – С. 33-38.
2. Часовитина, А. С. Гибридная компоновка резьбонарезного станка для гибкого автоматизированного производства / А. С. Часовитина, А. О. Харченко // Современные технологии: проблемы и перспективы : сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных, Севастополь, 19–22 мая 2020 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2020. – С. 40-44.
3. Харченко, А. О. Структура резьбообрабатывающего модуля с механизмами параллельной кинематики / А. О. Харченко, А. С. Часовитина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – № 4-2(342). – С. 95-102. – DOI 10.3390/угол79/2073-7408-2020-342-4-2-95-102.
4. Часовитина, А. С. Комбинированный механизм параллельной структуры (МПС) многооперационного станка / А. С. Часовитина, А. О. Харченко // Современные технологии: проблемы и перспективы : Сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных, Севастополь, 20–23 мая 2019 года / Главный редактор О.В. Мухина. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2019. – С. 105-109.
5. Тищенко, И. В. Систематизация проектных решений с помощью комбинаторного файла для синтеза резьбонарезного станка с механизмом параллельных структур (МПС) / И. В. Тищенко, А. О. Харченко, А. С. Часовитина // Вестник современных технологий. – 2023. – № 3(31). – С. 4-8.

УДК 621.7

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРА ШЕРОХОВАТОСТИ R_a ОТ ДЛИНЫ ТРАССЫ ИЗМЕРЕНИЯ

**В.Б. Богуцкий¹,
Л.Б. Шрон²**

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

²ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова», Симферополь, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье исследуются некоторые статистические характеристики R_a нерегулярной шероховатости, возникающей после финишной обработки с применением абразивных инструментов. Отмечается, что погрешность определения этого параметра шероховатости в ряде случаев зависит от длины трассы измерения. Материалы проведенных исследований показывают, что математическое ожидание величины R_a не зависит от длины трассы измерения, однако, с увеличением длины трассы измерения необходимое количество измерений убывает, а с увеличением точности и достоверности возрастает. Поверхности с меньшей шероховатостью требуют меньшего количества измерений R_a . Выполненный анализ показал, что количество измерений R_a определяется не типом корреляционной функции, а длиной интервала корреляции. Так как при низких классах шероховатости поверхности интервал корреляции больше то и необходимое количество измерений параметра R_a возрастает.

Ключевые слова: шлифование, нерегулярная шероховатость поверхности, точность измерения, статистические характеристики, количество необходимых измерений.

ESTIMATION OF THE ERROR IN DETERMINING THE ROUGHNESS PARAMETER R_a FROM THE LENGTH OF THE MEASUREMENT PATH

**V. B. Bogutsky¹,
L. B. Shron²**

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

²SBEIHE RC «Crimean Engineering and Pedagogical University the name of Fevzi Yakubov», Simferopol, Russia

ABSTRACT

The article examines some statistical characteristics of R_a irregular roughness that occurs after finishing with abrasive tools. It is noted, that the error in determining this roughness parameter in some cases depends on the length of the measurement path. The research materials show that the mathematical expectation of the value of R_a does not depend on the length of the measurement path, however, with increasing length of the measurement path, the required number of measurements decreases, and with increasing accuracy and reliability increases. Surfaces with less roughness require fewer R_a measurements. The performed analysis showed that the number of R_a measurements is

determined not by the type of correlation function, but by the length of the correlation interval. Since the correlation interval is longer at low surface roughness classes, the required number of measurements of the parameter R_a increases.

Keywords: grinding, irregular surface roughness, measurement accuracy, statistical characteristics, the number of measurements required.

Введение. Одним из параметров, характеризующих шероховатость обработанных поверхностей, является среднее арифметическое отклонение профиля R_a . Как показано в [1-6 и др.], для оценки по этому параметру величины нерегулярной шероховатости поверхности после финишной обработки с применением абразивных инструментов, необходимо определить его с заданной точностью, т. е. необходимо знать количество базовых длин n , обеспечивающих выборочное среднее значение R_a с погрешностью, не превышающей допускаемую.

Изложение основного материала. При оценке точности определения R_a для нерегулярной шероховатости, полученной с применением абразивных инструментов, профиль поверхности рассматривался как реализация стационарного нормального случайного процесса с непрерывной быстро убывающей корреляционной функцией [3, 6, 7]. Без потери общности будем считать, что математическое ожидание случайного процесса

$$E\{h(x)\} = 0$$

Тогда одномерная плотность вероятностей процесса будет

$$f(h) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – среднеквадратичное отклонение процесса.

Условимся, что выборочное среднее R_a , получаемое вследствие экспериментального определения R_a согласно предельной теореме, будет асимптотически иметь нормальное распределение. Найдем такую величину Δ , для которой

$$P\left\{\bar{R}_a - E\{R_a\} \leq \Delta\right\} = \beta,$$

где $\bar{R}_a$ – выборочное среднее R_a , полученное вследствие экспериментального определения R_a ; β – доверительная вероятность; Δ – абсолютная ошибка.

Эта вероятность в случае нормального распределения величины R_a равна

$$2\Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma_{\bar{R}_a}}\right) - 1 = \beta, \quad (1)$$

где $\sigma_{\bar{R}_a}$ – среднеквадратичное отклонение $\bar{R}_a$.

Из уравнения (1) находим значение Δ :

$$\Delta = \sigma_{\bar{R}_a} \arg\Phi\left(\frac{1+\beta}{2}\right) = \sigma_{\bar{R}_a} t_\beta,$$

где t_β – табулированная величина, зависящая от доверительной вероятности [8, 9].

Исходя из этого, с вероятностью β можно ожидать, что при n измерениях

$$\left|\bar{R}_a - E\{R_a\}\right| \leq t_\beta \sqrt{\frac{D\{R_a\}}{n}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\bar{R}_a} = \sqrt{\frac{D\{R_a\}}{n}}$; $D\{R_a\}$ – дисперсия R_a .

Следовательно, относительная ошибка $\varepsilon = \frac{\Delta}{E\{R_a\}}$.

Таким образом, получаем выражение для подсчета необходимого количества измерений при определении величины R_a с заданной погрешностью ε :

$$n = \frac{t_{\beta}^2}{\varepsilon^2} \times \frac{D\{R_a\}}{E^2\{R_a\}}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что для решения поставленной задачи необходимо найти следующие статистические характеристики R_a : математическое ожидание $E\{R_a\}$ и дисперсию $D\{R_a\}$. Для этого воспользуемся исследованиями [10, 11].

Пусть $h(x)$ – заданная на отрезке $[0, L]$ непрерывная реализация рассматриваемого процесса. Среднее арифметическое отклонение точек профиля от средней линии определяется по формуле

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |h(x)| dx.$$

Обозначим $y = |h(x)|$. Математическое ожидание вычисляется по формуле

$$E\{R_a\} = \frac{1}{L} \int_0^L E\{|h(x)|\} dx = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times \frac{1}{L} \int_0^L \int_0^\infty y e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} dy dx = \frac{2\sigma}{\sqrt{2\pi}}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что при $0 \leq |h(x)| \leq \infty$ математическое ожидание R_a является величиной, не зависящей от длины трассы измерения.

Однако на практике, как показывают исследования, случайная величина $y = |h(x)|$ при конечных трассах измерения не превышает определенного уровня, который зависит от длины трассы измерения. В связи с этим как частный случай нормального распределения рассмотрим усеченное нормальное распределение. Условимся, что случайная величина $y = |h(x)|$ не превышает уровня a , отсчитанного от средней линии профиля:

$$0 \leq |h(x)| \leq a.$$

Одномерная плотность распределения вероятностей в таком случае определяется так:

$$f(h) = \frac{c}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}},$$

где c – коэффициент нормирования плотности.

Для определения коэффициента c , воспользуемся свойством плотности распределения

$$\int_{-a}^a \frac{c}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}} = 1 \quad \text{или} \quad \frac{2c}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^a e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}} = 1, \quad \text{откуда} \quad 2c \left[\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right) - \frac{1}{2} \right] = 1 \quad \text{и}$$

$$c = \frac{1}{\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right) - \frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – функция Лапласа.

Следовательно, математическое ожидание R_a при усеченном распределении будет

$$E_1\{R_a\} = \frac{2\sigma}{\sqrt{2\pi}} \times \frac{1 - e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}}}{2\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right) - 1}.$$

Обозначим $\frac{1 - e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}}}{2\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right) - 1} = K_L$ тогда математическое ожидание R_a можно записать как

$$E_1\{R_a\} = \frac{2\sigma}{\sqrt{2\pi}} K_L = E\{R_a\} K_L.$$

Коэффициент K_L меняется от 0 до 1, если a соответственно имеет значения в пределах от 0 до ∞ . Индекс L указывает на зависимость K от длины трассы. Изменение K_L в зависимости от различных значений a показано на рис. 1. Видно, что уже при $a=2,5\sigma$ коэффициент K_L весьма близок к единице. Так как при длинах трасс, равных базовой длине, а обычно не меньше $2,5\sigma$, в практических расчетах можно пользоваться формулой (4).

Для расчета дисперсии воспользуемся формулой, выражающей дисперсию случайной величины через ее второй начальный момент:

$$D\{R_a\} = \alpha_2\{R_a\} - E^2\{R_a\}.$$

Второй начальный момент R_a равен

$$\alpha_2\{R_a\} = E^2\{R_a^2\} = E\{R_a, R_a\} = \frac{1}{L^2} \int_0^L \int_0^L E\{h(x_1), h(x_2)\} dx_1 dx_2.$$

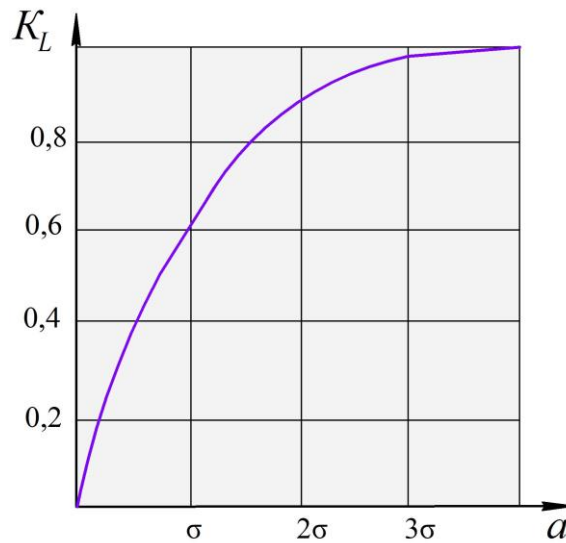


Рисунок 1. Изменение коэффициента K_L в зависимости от уровня a .

Плотность нормального распределения двух случайных величин h_1 и h_2 при $\sigma_1=\sigma_2=\sigma$ выражается формулой

$$f(h_1, h_2) = \frac{1}{2\pi\sigma\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{h_1^2 - h_1 h_2 \rho + h_2^2}{2\sigma^2(1-\rho^2)}}, \quad (6)$$

где ρ – коэффициент корреляции между h_1 и h_2 .

Поскольку в двумерную плотность входит коэффициент корреляции между величинами h_1 и h_2 , для вычисления дисперсии необходимо знать вид корреляционной функции процесса.

Для профилей шлифованных поверхностей рекомендуются или монотонно убывающая корреляционная функция $\rho_1 = e^{-\alpha|\tau|}$, или корреляционная функция с периодической составляющей $\rho_2 = e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega\tau$ [3, 6, 10 и др.].

Разлагаем двумерную плотность в ряд по степеням ρ при помощи полиномов Эрмита [12, 13] и при монотонно убывающей корреляционной функции после математических преобразований получаем следующее выражение для, вычисления второго начального момента R_a :

$$E\{R_a^2\} = \frac{4\sigma^2}{L^2} \left\{ \frac{L^2}{2\pi} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i)!} [\Phi^{(2i-1)}(0)]^2 \times \frac{1}{i\alpha} \left[L + \frac{1}{2i\alpha} (e^{-2i\alpha L} - 1) \right] \right\}$$

или при $\alpha L \geq 10$ с погрешностью, не превышающей 5%

$$E\{R_a^2\} = \frac{4\sigma^2}{L^2} \left\{ \frac{L^2}{2\pi} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i)!} [\Phi^{(2i-1)}(0)]^2 \frac{L}{i\alpha} \right\}.$$

Дисперсия R_a при этом виде корреляционной функции будет

$$D\{R_a\} = \frac{4\sigma^2}{\alpha L} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i)!} [\Phi^{(2i-1)}(0)]^2 \frac{1}{i}. \quad (7)$$

Далее по формуле (3) получаем выражение для определения необходимого количества измерений R_a :

$$n = \frac{t_{\beta}^2 2\pi}{\varepsilon^2 L \alpha} \times \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i)!} [\Phi^{(2i-1)}(0)]^2 \frac{1}{i}. \quad (8)$$

Поскольку ряд (8) быстро сходится, в расчетах можно ограничиться несколькими первыми членами ряда.

Если корреляционная функция профиля имеет периодическую составляющую, то второй начальный момент величины R_a

$$E\{R_a^2\} \approx \frac{4\sigma^2}{L^2} \left\{ \frac{L^2}{2\pi} + \frac{L}{2\pi} \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega^2}{2\alpha(\alpha^2 + \omega^2)} \right] \right\},$$

а дисперсия R_a

$$D\{R_a\} \approx \frac{\sigma^2}{\pi L^2} \left[\frac{2\alpha^2 + \omega^2}{2\alpha(\alpha^2 + \omega^2)} \right]. \quad (9)$$

Количество необходимых измерений R_a при точности и достоверности определяется так:

$$n = \frac{t_{\beta}^2}{4\varepsilon^2 L \alpha} \left[\frac{2\alpha^2 + \omega^2}{2\alpha(\alpha^2 + \omega^2)} \right]. \quad (10)$$

Как видно из выражений: (8) и (10), количество необходимых измерений R_a зависит от заданной точности ε , выбранной доверительной вероятности β (которая определяет коэффициент t_{β}), длины трассы измерения L и параметров корреляционной функции α и ω .

С увеличением длины трассы L необходимое количество измерений убывает, а с увеличением точности и достоверности возрастает. Влияние некоторых факторов на

количество измерений представлено на рис. 2 и 3. На рис. 2 показано изменение величины n в зависимости от длины трассы L для различных классов чистоты поверхности.

Из графика следует, что поверхности с меньшей шероховатостью требуют меньшего количества измерений R_a . Это явление имеет физическое объяснение, поскольку с уменьшением R_a параметр корреляционной функции α возрастает [3, 6, 14 и др.] и связь между точками профиля убывает быстрее т.е. для надежного определения R_a требуется меньшее количество измерений.

На рис. 3 показано изменение необходимого количества измерений в зависимости от величины среднего арифметического отклонения R_a . Из графика следует, что при одинаковом количестве измерений даже в пределах одного класса чистоты невозможно с одинаковой точностью и достоверностью определить R_a . Кроме того, видно, что при корреляционной функции с периодической составляющей требуется несколько большее количество измерений R_a , чем при монотонно убывающей корреляционной функции.

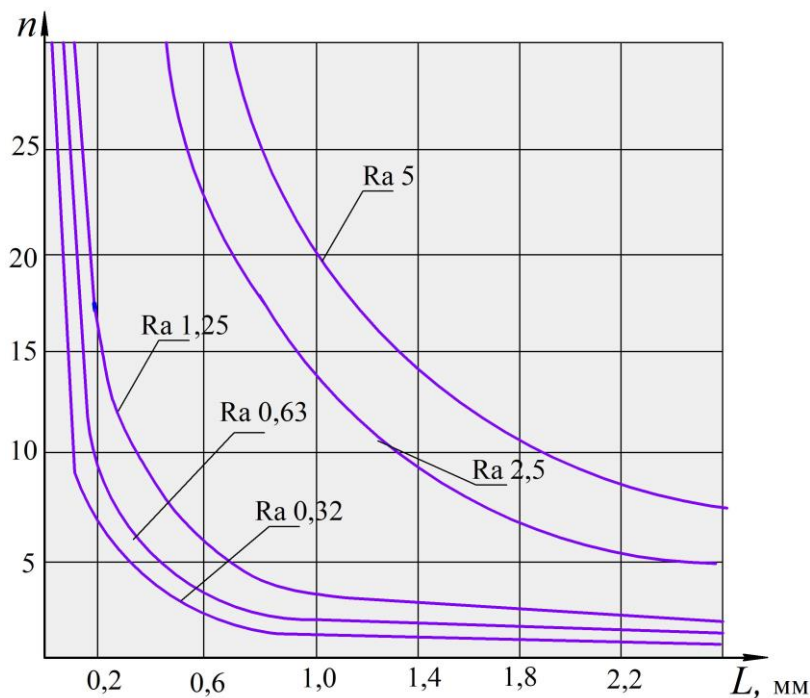


Рисунок 2. Изменение числа необходимых измерений для определения R_a в зависимости от длины трассы L для различных классов чистоты ($\varepsilon=0,1$; $\beta=0,9$; $\rho = e^{-\alpha|r|}$).

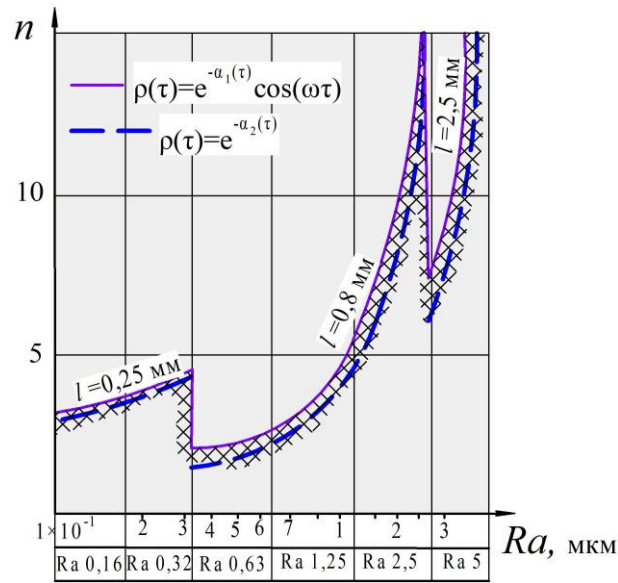


Рисунок 3. Изменение числа необходимых измерений для определения R_a в зависимости от чистоты поверхности ($\varepsilon=0,1$; $\beta=0,9$).

Выводы. Выполненный анализ показал, что количество измерений R_a определяется не типом корреляционной функции, а длиной интервала корреляции. Так как при низких классах шероховатости поверхности интервал корреляции больше то и необходимое количество измерений параметра R_a возрастает.

Список литературы

1. Modern machining technology. A practical guide. Ed. J. Paulo Davim. Woodhead Publ., 2011. 412 p.
2. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании : монография / С.Г. Бишутин. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 144 с.
3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке./Ю.К. Новоселов. Севастополь: Из-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
4. Drbúll M. Analysis of roughness profile on curved surfaces/ M. Drbúll, P. Martikáň, J. Bronček, I. Litvaj, J. Svobodová//MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 244. – P.1-7.
5. Богуцкий В.Б. О влиянии типа корреляционной функции на необходимое число измерений R_a / В.Б Богуцкий// Вестник современных технологий. 2024. № 2 (34). С. 4-10.
6. Stepien P. A probabilistic model of the grinding process. Applied Mathematical Modelling. – 2009. –Vol. 33(10). – P. 3863–3884.
7. Zhen Bing Hou. On the mechanics of the grinding process. Part I. Stochastic nature of the grinding process./ Zhen Bing Hou, R. Komanduri// International journal of machine tools & manufacture. – 2003. – Vol. 43. – P. 1579–1593.
8. Братан, С. М. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию / Братан С.М., Головин В.И.,

Новоселов Ю.К., Дымченко И.А. // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 30-38.

9. Мостеллер Ф. Вероятность. Перевод с англ. /Ф. Мостеллер, Р. Рурке, Дж. Томас. М.: МЦНМО, 2015. – 356 с.

10. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход)/ А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. М.: Наука. 1975. – 343 с.

11. Waechter M. Stochastic analysis of different rough surfaces / M. Waechter, F. Riess, Th. Schimmel, U. Wendt & J. Peinke // The European Physical Journal B. Condensed Matter and Complex Systems. – 2004. – Vol. 4. – P. 259–277.

12. Игнатенко М. В. Методы вычислений. Интерполирование и интегрирование: курс лекций / М. В. Игнатенко. – Минск: БГУ, 2006. – 115 с.

13. Прикладной анализ случайных процессов. Под ред. Прохорова С.А. СНЦ РАН, 2007. – 582 с.

14. Bogutsky V.B. Analysis of existing approaches for describing the parameters of single sections during grinding/ V.B. Bogutsky, L.B., Shron, E.E.Yagyayev// Journal of Physics: Conference. Ser. «International scientific practical conference materials science, shape-generating technologies and equipment. 2021, ICMSTE 2021». – 2021. – P. 012026

15. Олышанская И.В. Однопоточная автоматизированная линия с промежуточными накопителями и различными видами простоев производственных ячеек / Олышанская И.В., Федоренко С.Н. Информационные технологии. 2025. Т. 31. № 1. С. 16-23.

16. Obzherin Yu.E. Hidden markov model and states prediction of an autonomous wind-diesel complex / Obzherin Yu.E., Sidorov S.M., Fedorenko S.N. В сборнике: E3S Web of Conferences. Rudenko International Conference "Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems" (RSES 2022). EDP Sciences, 2023. С. 01023.

УДК 621

КИНЕТИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ И КРИТЕРИЙ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

***В.А. Лебедев¹,
А.В. Фоменко¹***

¹Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье показано, что процесс износа инструмента при резании включает в себя совокупность последовательных этапов «упругопластическая деформация –повреждаемость – разрушение», носит кинетический и необратимый характер, а степень износа есть результат накопления повреждений. За параметр, интегрально отражающего износ в энергетическом фазовом пространстве, принята внутренняя энергия материала поверхностного слоя рабочей поверхности инструмента. В качестве критерия износостойкости инструмента предложена

величина внутренней энергии равная сумме теплосодержания при температуре плавления и скрытой теплоты плавления материала рабочей поверхности инструмента.

Ключевые слова: режущий инструмент, износ, кинетика, внутренняя энергия, температура плавления.

KINETIC NATURE AND WEAR CRITERION OF CUTTING TOOLS

**V.A. Lebedev¹,
A.V. Fomenko¹**

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

ABSTRACT

The article shows that the process of tool wear during cutting includes a set of successive stages "elastoplastic deformation - damage - destruction", has a kinetic and irreversible nature, and the degree of wear is the result of damage accumulation. The internal energy of the material of the surface layer of the working surface of the tool is taken as a parameter that integrally reflects wear in the energy phase space. As a criterion for tool wear resistance, the value of internal energy is proposed equal to the sum of the heat content at the melting point and the latent heat of fusion of the material of the working surface of the tool.

Keywords: cutting tool, wear, kinetics, internal energy, melting point.

В результате работы сил трения в процессе резания рабочие поверхности режущего инструмента непрерывно изнашиваются. С течением времени инструмент теряет свое служебное назначение, перестает обеспечивать необходимую точность обработки, заданные параметры шероховатости поверхности детали, требует замены или переточки.

Установлено, что износ является следствием повышения плотности дислокаций связанной с взаимодействием упругих полей искажений вокруг ядра дислокаций [1-4]. В результате такого взаимодействия движение дислокаций затрудняется, что приводит повреждению и разрушению кристаллических тел. К этому же эффекту приводят также отклонения от идеальной кристаллической структуры металлов в поверхностном слое инструмента.

В соответствии с дислокационными представлениями процесс изнашивания связан с генерированием (зарождением), движением и уничтожением в деформируемых объемах материала, различного рода элементарных дефектов (вакансий атомов внедрения, дислокаций, свободных радикалов и др.) и их скоплений, а также субмикроскопических нарушений сплошности (пор, трещин).

Согласно [1-9] любой процесс контактного взаимодействия твердых тел, сопровождающийся деформированием, деградацией и как следствие разрушением является кинетическим и необратимым процессом независимо от физико-химической природы материала, его структуры, а также условий нагружения. Представления процесса изнашивания инструмента как кинетического вытекает из двух экспериментально установленных фактов, из которых первый свидетельствует и его статистическом характере, второй – раскрывает его феноменологическую сторону.

Установленные выше закономерности износа инструмента в процессе резания, с позиций кинетического подхода, могут быть описаны и проиллюстрированы следующим

образом. Обозначим через U количественную меру поврежденности элемента рабочей поверхности инструмента в процессе контактного взаимодействия стружки с поверхностью резца, а через $U_t^0 = \frac{du}{dt}$ интенсивность повреждаемости. Тогда при любом способе внешнего силового нагружения (динамическом или квазистатическом) поврежденность элемента рабочей поверхности будет изменяться с интенсивностью U_t^0 , которая в общем случае будет являться функцией силового параметра деформирования P , температуры T и времени t протекания процесса резания.

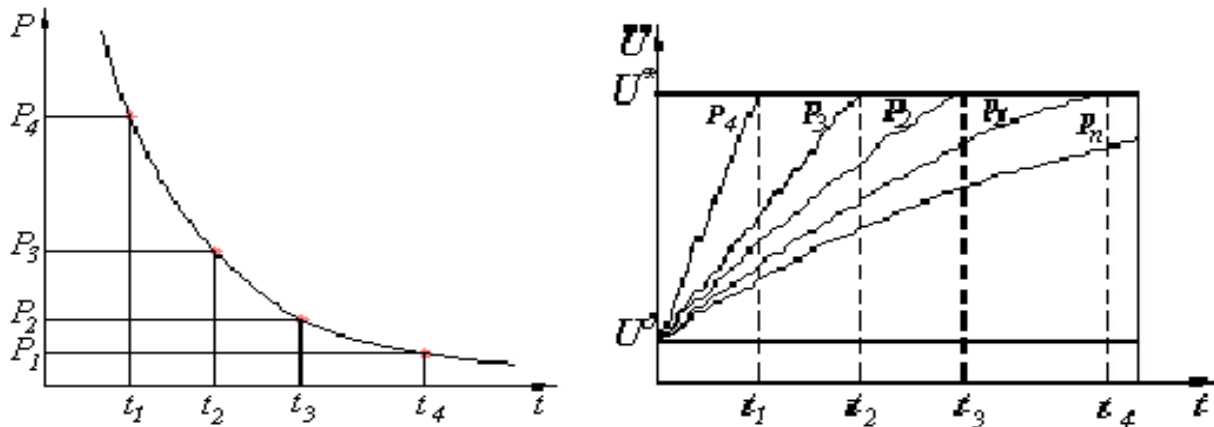


Рисунок 1. Кинетика процесса износа рабочей поверхности инструмента

Графически это можно представить в виде кинетических кривых (рис. 166), из которых следует, что по мере контактного взаимодействия стружки с поверхностью резца повреждаемость элемента рабочей поверхности увеличивается. Это увеличение происходит до тех пор, пока повреждаемость U не достигает критической величины U^* , зависящей от свойств рабочей поверхности инструмента и не зависящей от способа силового нагружения. Последнее обстоятельство обусловлено феноменологичностью процессов деформирования и разрушения материалов. На рис.1 представлена зависимость повреждаемости элемента рабочей поверхности от силовых параметров и продолжительности нагружения. Аналогичные кривые могут быть построены для любого уровня повреждаемости. $U < U^*$.

Запишем условие предельной повреждаемости элемента рабочей поверхности инструмента и в виде:

$$U = U_0 + \int_0^{t^*} U_t dt = const, \quad (1)$$

где U_0 - поврежденность элемента рабочей поверхности инструмента на стадии обработки, предшествующей резанию; t^* - предельное время резания эквивалентное предельной продолжительности силового нагружения рабочей поверхности инструмента.

Принимая, что повреждаемость локальных объемов рабочей поверхности инструмента в процессе контактного взаимодействия стружки с поверхностью носит необратимый характер, а степень износа есть результат накопления (суммирования) поврежденностей, можно сделать вывод, что предельная повреждаемость и, как следствие, предельный износ рабочей

поверхности инструмента. произойдет тогда, когда сумма относительных повреждений станет равной 1, т.е.

$$W = \frac{1}{U^*} \int_0^t U^0(t) dt = 1 \quad (2)$$

Это условие позволяет прогнозировать предельное время стойкости инструмента, а также продолжительность силового нагружения рабочей поверхности инструмента. для различных режимов резания, обеспечивающая максимальную степень разрушения при условии знания зависимости $U = f(P, T, t)$.

Для практической реализации этого условия необходимо установить параметр U^* , способный интегрально характеризовать прочностные свойства материала и обосновать критерий разрушения объемов рабочей поверхности инструмента. в процессе резания.

Вопрос связанный с выбором рациональных параметров, однозначно и интегрально характеризующих состояние поврежденности элемента рабочей поверхности инструмента в процессе резания, является одним из сложных и на сегодняшний день не получил окончательного научного обоснованного разрешения. Объясняется это тем, что процесс резания сопровождается резкими изменениями механических, физических и химических свойств материала. На первый взгляд казалось бы, что любую из механических и физических характеристик материала, претерпевающих изменение в ходе резания можно принять за параметр поврежденности U . Однако состояние материала рабочей поверхности инструмента, подвергаемого силовому внешнему воздействию в процессе резания, является настолько сложным и неоднородным даже в очень локальных микрообъемах, что это состояние не всегда можно адекватно характеризовать одним механическим или физическим параметром, или свойством. Кроме того, эта задача усложняется еще и тем, что различные физико-механические характеристики материала по-разному и неоднозначно зависят от основных структурных изменений, происходящих в твердых телах в процессе их силового контактного взаимодействия (трение ,пластическая деформация и др).

В последнее годы многие исследователи, для описания процессов пластической деформации и разрушения твердых тел все чаще обращаются к энергетическим параметрам повреждаемости и критериям разрушения, базирующихся на основных понятиях и законах термодинамики [1,4-6,10]. Обусловлено это тем, что они не требуют знания физических процессов при деформировании и разрушении твердых тел.

Для количественной оценки изменения предельной плотности внутренней энергии, при которой в процессе изнашивания происходит разрушение элемента рабочей поверхности инструмента, воспользуемся аналогией между процессами поглощения энергии кристаллической решеткой при механическом нагружении и при нагреве. И в том, и в другом случае нарушение межатомных связей наступает в результате поглощения предельной для данной кристаллической решетки величины энергии. Так в случае нагрева металла от заданной температуры T_0 до температуры плавления T_s , поглощаемая предельная удельная энергия составит:

$$\theta = \int_{T_0}^{T_s} C_p dT, \quad (3)$$

где C_p - удельная теплоемкость;

Величина $\int_{T_0}^{T_s} C_p dT$ характеризует изменение теплосодержания металла при нагреве от заданной температуры до температуры плавления и расходуется на возбуждение атомных

колебаний критической величины без нарушения межатомных связей. Эти нарушения возникают, когда кристаллическая решетка поглощает дополнительную энергию, равную скрытой теплоте плавления $L_{пл}$.

$$\theta^* = \int_{T_0}^{T_s} C_p dT + L_{пл}, \quad (4)$$

Подобная аналогия, для оценки энергетического состояния деформированных в различных условиях силового нагружения локальных структур твёрдых кристаллических тел, использовали в работах [3,4,10]. В основе такого подхода заложены следующие предпосылки. При механическом нагружении до разрушения поверхностного материала, как и при плавлении, процессу нарушения межатомных связей предшествует искажение кристаллической решетки до критической величины. Разница заключается в том, что при механическом нагружении предельное искажение кристаллической решетки обусловлено скоплением в деформируемых локальных объёмах поверхностного слоя критической плотности дислокаций, при которой дальнейшее поглощение энергии кристаллической решеткой приводит к нарушению межатомных связей.

Если принять, что удельная энергия, затрачиваемая на предельное искажение кристаллической решетки, не зависит от вида подводимой энергии (тепловая или механическая), то предельная удельная энергия, которую способна поглотить кристаллическая решетка, должна соответствовать величине равной разности теплосодержания (энтальпии) материала в твердом состоянии, при температуре плавления H_{TS} и энтальпии при 2930К:

$$\Delta H^* = H_{TS} - H_{293^0} = \int_{T_{293^0}}^{T_{TS}} C_p dT. \quad (5)$$

Тогда критическая плотность внутренней энергии U^* , накапливаемая в изнашиваемом в процессе резания элементе поверхностном слое рабочей поверхности инструмента, приводящая к его разрушению, количественно может быть оценена посредством термодинамической константы:

$$U^* = \Delta H^* + L_{пл}. \quad (6)$$

Следует отметить очень важное обстоятельство, что подобная аналогия правомерна только на уровне локальных объемов металла, которые насыщены удельной энергией предельной величины. Перенос же её на уровень больших объемов не правомерен и вот почему. В процессе нагрева энергия поглощается кристаллической решеткой практически равномерно по всему объему металла, а при пластической деформации и трении вследствие анизотропности и несовершенств кристаллической решетки происходит неоднородное поглощение энергии.

Список литературы

1. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография // СГТУ, г. Самара: 2008 – 387 с.
2. Алиев М.М. Влияние износостойких покрытий на трибологические процессы в контактной зоне при резании материалов / М.М. Алиев, А.В. Фоменко, Е.В. Фоминов // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102. № 7. – С. 596-600.
3. Алиев М.М., Выбор оптимальных режимов резания при точении на основе термодинамических критериев/Алиев М.М., Фоминов Е.В., Харахашев А.Х.//

Машиностроительные технологические системы. Сборник трудов Международной научно-технической конференции. ДГТУ, г. Ростов-на-Дону. 2022. – С. 23-28.

4. Марченко А.А. Моделирование температуры передней поверхности токарного резца с учётом флуктуаций параметров режимов резания/ Марченко А.А., Фоминов Е.В., Гвинджилия В.Е.- //Научные технологии машиностроения, авиации и транспорта: сборник трудов XVI международной научно-технической конференции ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, 2024 . – С.428-432.

5. Соколов В.Д. Исследования энергетического состояния поверхностного слоя, упрочненного методами поверхностного пластического деформирования/ Соколов В.Д., Лебедев В.А., Штынь С.Ю., -Машиностроительные технологические системы : материалы международной научно-технической конференции, посвящённой 95-летию ДГТУ, г.Ростов-на-Дону, 2025. – С. 560-567.

6. Лебедев В.А. Исследования адгезионной прочности вибрационных механохимических покрытий и их влияние на коррозионную стойкость деталей // В.А. Лебедев, С.Ю. Штынь, И. Кукаркин/ Воронежский научно-технический вестник № 3, 2023. – С. 48-52.

7. Иноземцев В. Е. Исследование процесса формирования поверхности при механоэлектрохимической обработке алюминиевых сплавов // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 11. – С. 8–15.

8. Сьянов С. Ю. Технологическое обеспечение износостойкости машин с помощью электроэрозионной обработки // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 12. – С. 18-21.

9. Тамаркин М. А., Тищенко Е. Е., Хашаш О., Оптимизация упрочняющей обработки деталей с помощью колебательного инструмента // Транспортное машиностроение. 2023. № 5. – С. 26-38.

10. Фоминов Е.В., Шучев К.Г. Термодинамические основы выбора рациональных режимов при лезвийной обработке инструментом из быстрорежущей стали.// Фундаментальные основы физики, химии и механики научных технологических систем формообразования и сборки изделий : сборник трудов научного симпозиума технологическо-машиностроителей , : ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, 2021. – С. 207-212.

11. Владецкая Е.А. Повышение эффективности сверления и резбонарезания электроинструментом в условиях судостроения и судоремонта / Владецкая Е.А., Головин В.И., Харченко А.О., Владецкий О.В. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2-1 (60). – С. 42-52.

РАЗДЕЛ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 666.798

ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА НА УДАРНУЮ ПРОЧНОСТЬ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КАОЛИНОВОЙ ГЛИНЫ

*В.М. Гавриш¹,
Ю.О. Шагова¹,
О.П. Гавриш¹*

¹ФГОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследований керамики из каолиновой глины с добавлением упрочняющего наноразмерного модификатора в различных концентрациях. В качестве добавки использовались наночастицы оксида вольфрама (IV). Порошок был получен с изделий, которые составляют основу перерабатываемых металлических отходов, таких как сплавы типа ТТК, ВК, ВНЖ путем обжига получаемых порошков в атмосфере кислорода.

Ключевые слова: глина, ударная прочность, оксид вольфрама, керамика.

EFFECTS OF TUNGSTEN OXIDE NANOPARTICLES ON THE IMPACT STRENGTH OF CERAMIC PRODUCTS MADE OF KAOLIN CLAY

*V.M. Gavrish¹,
J.O. Shagova¹,
O.P. Gavrish¹*

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The article presents the results of studies of ceramics made of kaolin clay with the addition of a strengthening nanoscale modifier in various concentrations. Tungsten (IV) oxide nanoparticles were used as an additive. The powder was obtained from products that form the basis of recyclable metal waste, such as alloys such as TTK, VK, and VNJ by firing the resulting powders in an oxygen atmosphere.

Keywords: clay, impact strength, tungsten oxide, ceramics.

Актуальность. За тысячелетние развития человечества керамика глубоко проникла во многие сферы человеческой жизни. Особое место в промышленности занимает каолиновая керамика ввиду своей пластичности, огнеупорности и доступности. Такой вид керамики активно используют в производстве напольных плит, облицовки стен, хозяйственной и культурно-бытовой керамики, кислотоупорных и электротехнических фарфоров [1].

Согласно данным исследования Future Market Insight, размер рынка усовершенствованной керамики в 2025 году оценивается в 44 миллиарда долларов США, планируется, что к 2035 году его доходы достигнут почти 70 миллиардов долларов США [2]. Такой рост может быть обусловлен увеличением спроса на высокоэффективные материалы различных отраслей промышленности, в которых остро стоит вопрос улучшения физических характеристик – прочности, твердости, износостойкости.

Одним из перспективных вариантов повышения предложенных характеристик может быть введение модификаторов-наночастиц в основной химический состав каолиновой глины: кремнезем – SiO_2 , глинозем – Al_2O_3 , оксиды металлов – Fe_2O_3 , CaO [3, 4, 5, 6]. Можно выделить следующие исследования:

- способ изготовления керамики на основе карбида кремния, армированного волокнами карбида кремния. Способ получения керамики включает перемешивание порошка карбида кремния, содержащего спекающую добавку в виде оксидов алюминия и иттрия, с волокнами карбида кремния, полученными методом силицирования. Главным недостатком способа является образование вторичных фаз при спекании;

- способ изготовления керамики на основе композита нитрид кремния – нитрид титана. Способ изготовления композита на основе нитрида кремния, армированного нитридом титана, включает смешивание компонентов — тонкодисперсного порошка нитрида кремния, содержащего в качестве спекающей добавки алюминат кальция с эвтектической температурой плавления 1600°C , и металлического титана;

- модификация цементного камня путем добавления нанодисперсного диоксида кремния SiO_2 , полученного плазменным методом;

- улучшение механических характеристик керамических материалов на основе диборидов циркония и гафния.

Целью данной работы является исследование влияния наночастиц оксида вольфрама на ударную прочность керамических изделий из каолиновой глины.

Образцы для испытания были изготовлены из шликерной массы согласно ГОСТа 26407-84 «Посуда фарфоровая и фаянсовая. Метод определения сопротивления удару» [7], с добавлением к основному составу различных концентраций нанопорошка оксида вольфрама от 0 до 5%.

Установленная площадь поверхности порошка составляет $0,81 \text{ м}^2/\text{г}$. Порошок оксида вольфрама представляет собой частиц неправильной формы, в основном игольчатой. На рисунке 1 представлены фотографии порошка оксида вольфрама WO_3 при разном увеличении.

Измеренный средний размер частиц менее 100-400 нм. Допускается присутствие агломератов размером до 2,0 мкм в количестве не более 15% (рис. 2).

Для проведения исследований, было изготовлено пять партий образцов по восемнадцать единиц. В каждой отдельной партии количество образцов с содержанием нанопорошка оксида вольфрама (IV) составляло 15 единиц.

Образцы изготавливались по следующей схеме: смешивали 270 грамм шликерной массы с нанопорошком оксида вольфрама (IV) различной концентрацией: 0, 1, 2, 3, 4, 5%. Готовые партии шликера заливали в изготовленные ранее гипсовые формы и после выдерживали сутки при температуре 18°C и влажности 40%.

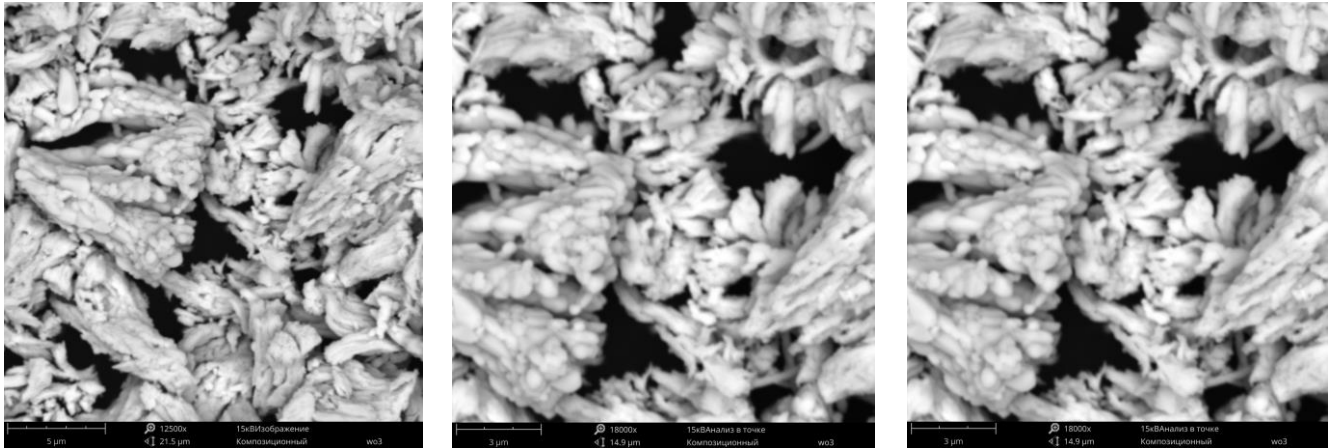


Рисунок 1. Микрофотографии порошка оксида вольфрама WO_3

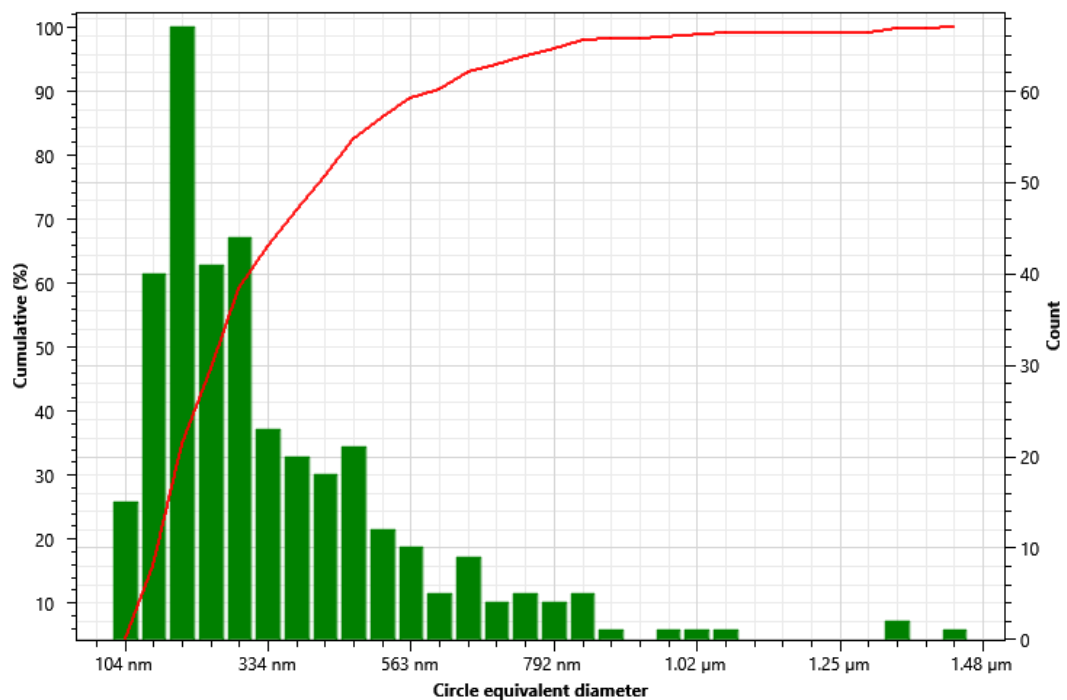


Рисунок 2. График распределения размеров порошка оксида вольфрама WO_3

После извлечения образцов из гипсовых форм, они подвергались естественной сушке на протяжении 48 часов. Затем производился обжиг в муфельной печи в течении 12 часов, со скоростью набора температуры – $1,5^{\circ}C/мин$ или $100^{\circ}C/час$.

Методика проведения эксперимента представлена ниже:

1. Для испытания отбирали не менее десяти неглазурованных образцов круглого сечения, диаметром $10,0 \pm 0,5$ мм и длиной 80 ± 1 мм (рис. 3). Стрела прогиба образца должна быть не более 1 мм.



Рисунок 3. Внешний вид и размер образца

2. Для подготовки образца к испытанию определяли середину образца (допустимая погрешность измерения $\pm 0,5$ мм). Диаметр образца в найденной середине измеряли микрометром.

3. Испытание проводилось при температуре воздуха от 10 до 45°C и относительной влажности 65 ± 15 %. Испытания на ударную прочность проводились на маятниковом копре, обеспечивающим измерение энергии удара, затраченной на разрушение образца и определяемой как разность между первоначальным запасом потенциальной энергии маятника и энергией, оставшейся у маятника после разрушения испытуемого образца.

Образец помещали на опоры таким образом, чтобы на его середину приходился удар с погрешностью измерения $\pm 0,5$ мм. Поднимали и закрепляли маятник, а затем осторожно (без рывка) освобождали его. На рисунке 4 представлены образцы после проведения испытаний.



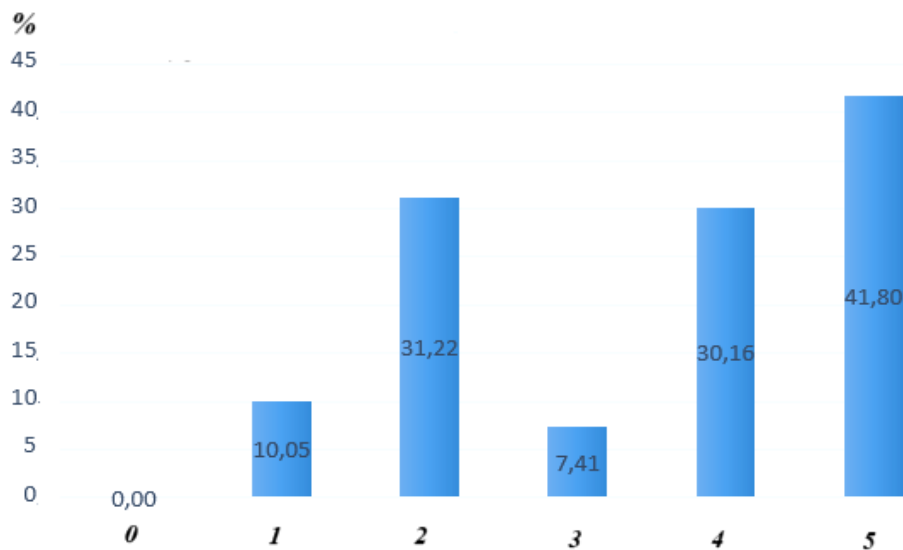
Рисунок 4. Внешний вид образцов после проведения испытаний

За результат принимают среднее арифметическое результатов испытаний всех образцов. Значение округляют до второго десятичного знака. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний

Процент содержания оксида вольфрама (VI)	Ударная прочность, кДж/м ²	Прирост ударной прочности, %
0%	1,89	0,00
1%	2,08	10,05
2%	2,48	31,22
3%	2,03	7,41
4%	2,46	30,16
5%	2,68	41,80

Из рисунка 5 видно, что наибольшую ударную прочность имеют образцы с добавлением нанопорошка оксида вольфрама (IV) в концентрации 2%, 4% и максимальный результат получен при добавлении 5%.

**Рисунок 5. Диаграмма результатов испытаний**

В результате анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что добавление наночастиц оксида вольфрама (IV) в исходный состав каолиновых глин приводит к росту ударной прочности образцов. При добавлении 2, 4 и 5% нанопорошка ударная прочность образцов увеличивается до 41,8%.

Список литературы

1. Кадырбаков, И. Х. Области промышленного использования каолина / И. Х. Кадырбаков // Молодой ученый. – 2024. – № 16(515). – С. 63-65. – EDN QSEIXH.
2. Future Market Insights: офиц. сайт. Штат Delaware. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/ru/reports/advanced-ceramics-market> (дата обращения 15.05.2025).
3. Патент № 2744543 С1 Российская Федерация, МПК C04B 35/577, C04B 35/645. Способ получения керамического композиционного материала на основе карбида кремния,

армированного волокнами карбида кремния: № 2020130338: заявл. 15.09.2020: опубл. 11.03.2021 / М. Г. Фролова, А. С. Лысенков, Ю. Ф. Каргин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. – EDN UVNPTI.

4. Патент № 2697987 C1 Российская Федерация, МПК C04B 35/593, C04B 35/645, C04B 35/65. Способ изготовления керамики на основе композита нитрид кремния - нитрид титана: № 2018138560: заявл. 01.11.2018: опубл. 21.08.2019 / Д. Д. Титов, А. С. Лысенков, М. Г. Фролова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН). – EDN AIVZDH.

5. Композиционные материалы на основе цемента с нанодисперсным диоксидом кремния / П. В. Космачев, О. В. Демьяненко, В. А. Власов [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 4(63). – С. 139-146. – EDN ZDDEGN.

6. Портнова, Е. Н. Способы повышения механических характеристик керамики на основе диборидов циркония и гафния (обзор) / Е. Н. Портнова // Вестник Пермского университета. Серия: Химия. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 180-190. – DOI 10.17072/2223-1838-2020-2-180-190. – EDN MTUDES.

7. ГОСТ 26407-84. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Посуда фарфоровая и фаянсовая. Метод определения сопротивления удару: национальный стандарт СССР: дата введения 1984-12-28/ Государственный комитет СССР по стандартам. – Изд. официальное. – Москва, 1984. – 7 с.

8. Kuznetsov A.V. Annotation of a new low-threshold potential-dependent calcium channel of trichoplax adhaerens (phylum placozoa) / Kuznetsov A.V., Kartashov L.E. Biophysics. 2024. Т. 69. № 1. – С. 25-42.

9. Kuznetsov A.V. Аннотация нового низкопорогового потенциал-зависимого кальциевого канала трихоплакса trichoplax adhaerens (тип placozoa) / Кузнецов А.В., Карташов Л.Е. Биофизика. 2024. Т. 69. № 1. – С. 32-52.

