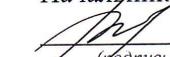


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Работа выполнена в СКБ «Машиностроение»

СОГЛАСОВАНО

Начальник отдела ОНиПКРС


(подпись) Е.М. Димитриади
« 10 » 06 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе


(подпись) А.В. Космынин
« 10 » января 2024 г.

Декан


(подпись) П.А. Саблин

« 10 » 06 2024 г.

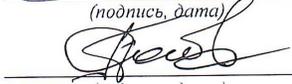
«Создание цифрового двойника изготовления детали»
Комплект конструкторской / проектной документации

Руководитель СКБ


(подпись, дата) 15.01.2024

Н.О. Плетнев

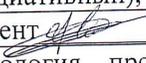
Руководитель проекта


(подпись, дата)

П.А. Саблин

Комсомольск-на-Амуре 2024

Карточка проекта

Название	Создание цифрового двойника изготовления детали
Тип проекта	Тип проекта: техническое творчество (инициативный),
Исполнители	Студент  И.А. Плуталов – группа 1МНБ-1
Дисциплина	Технология производства сварных конструкций, расчет и проектирование сварных конструкций
Срок реализации	01.2024- 06.2024

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

На выполнение работ в рамках студенческого конструкторского бюро «Машиностроение»

№ 00.01.2024.04

Наименование		Создание шифравого двойника изготовления детали
1	Разработать КД	
1.1	Место назначения, функциональное назначение	Специализированные лаборатории кафедры «Машиностроение», 222/2 спальный зал
1.2	Эстетические, эргономические и прочие требования	Не требуется
1.3	Условия эксплуатации	Не требуется
1.4	Задачи программы ЭВМ	Обеспечить возможность на стадии проектирования технологических процессов выбрать режимы механической обработки, обеспечивающие заданную шероховатость в зависимости, как от динамического состояния станочного оборудования, так и от марки обрабатываемого материала, его прочностных свойств
15	Количество	1 шт
16	Срок сдачи проекта КД	06.2024
1.7	Приложение, информация об аналогах	Провести литературный обзор, патентный поиск
2	Разработка технологии изготовления	
2.1	Изготовить в	Не требуется
3	Разработать технологию измерения	Не требуется
4	Рассчитать стоимость изготовления	Не требуется
5	Рассчитать экономическую эффективность	Не требуется

Ответственный исполнитель И.А. Плуталов
ФИО

группа 1МНБ-1

подпись



План работ:

Наименование работ	Срок
Анализ существующих аналогов	01-02.2024
Проведение экспериментальных исследований на зготовках из материала У8	03.2024
Анализ профилограмм обработанных поверхностей	04.2024
Построение нейросетевой модели на входных данных	05-06.2024
Написание отчета	06.2024

Комментарии:

Перечень графического материала:

1. Профилограммы обработанных поверхностей;
2. Аттракторы профиллограм;
3. Зависимость шероховатости от скорости резания;
4. Структура искусственной нейронной сети для оценки фрактальности обработанной поверхности;
5. И др.

Руководитель проекта


(подпись, дата)

П.А. Саблин

1 Нормативные ссылки, используемые при разработке ККД

При выполнении ККД должны быть использованы нормативные ссылки на следующие межгосударственные стандарты:

ГОСТ 2.001-2013 Единая система конструкторской документации. Общие положения;

ГОСТ 2.051-2013 Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения;

ГОСТ 2.052-2006 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения;

ГОСТ 2.053-2013 Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия. Общие положения;

ГОСТ 2.103-68 Единая система конструкторской документации. Стадии разработки;

ГОСТ 2.104-2006 Единая система конструкторской документации. Основные надписи;

ГОСТ 2.109-73 Единая система конструкторской документации. Основные требования к чертежам;

ГОСТ 2.124-85 Единая система конструкторской документации. Порядок применения покупных изделий;

ГОСТ 2.305-2008 Единая система конструкторской документации. Изображения - виды, разрезы, сечения;

ГОСТ 2.601-2013 Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы;

ГОСТ 2.602-95 Единая система конструкторской документации. Ремонтные документы;

ГОСТ 2.610-2006 Единая система конструкторской документации. Правила выполнения эксплуатационных документов;

ГОСТ 2.701-2008 Единая система конструкторской документации.

					СКБФМХТ.00.01.2024.04	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата.</i>		5

Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению;

ГОСТ 15.001-88 Система разработки и постановки продукции на производство.

2.1 Термины, определения и сокращения

В настоящем стандарте приняты следующие сокращения:

КД – конструкторский документ (документы, документация);

ТЗ – техническое задание;

ТУ – технические условия;

3 Виды конструкторских документов

Конструкторские документы подразделяют на виды, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Виды конструкторских документов

Вид документа	Определение
1	2
Электронная модель детали	Документ, содержащий электронную геометрическую модель детали и требования к ее изготовлению и контролю. В зависимости от стадии разработки он включает в себя предельные отклонения размеров, шероховатости поверхностей и др.
Чертеж детали	Документ, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля
Электронная модель сборочной единицы	Документ, содержащий электронную геометрическую модель сборочной единицы, соответствующие электронные геометрические модели составных частей, свойства, характеристики и другие данные, необходимые для сборки (изготовления) и контроля. К электронным моделям сборочных единиц также относят электронные модели для выполнения гидромонтажа и пневмомонтажа
Сборочный чертеж	Документ, содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки (изготовления) и контроля. К сборочным чертежам также относят чертежи, по которым выполняют гидромонтаж и пневмомонтаж
Чертеж общего вида	Документ, определяющий конструкцию изделия, взаимодействие его составных частей и поясняющий принцип работы изделия

					СКБФМХТ.00.01.2024.04	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		6

Продолжение таблицы 1

1	2
Теоретический чертеж	Документ, определяющий геометрическую форму (контур) изделия и координаты расположения составных частей
Габаритный чертеж	Документ, содержащий контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами
Монтажный чертеж	Документ, содержащий контурное (упрощенное) изображение изделия, а также данные, необходимые для его установки (монтажа) на месте применения. К монтажным чертежам также относят чертежи фундаментов, специально разрабатываемых для установки изделия
Схема	Документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними
Электронная структура изделия	Документ, содержащий структуру изделия (сборочной единицы, комплекса или комплекта) и другие данные в зависимости от его назначения
Спецификация	Документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта
Пояснительная записка	Документ, содержащий описание устройства и принципа действия разрабатываемого изделия, а также обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений
Технические условия	Документ, содержащий требования (совокупность всех показателей, норм, правил и положений) к изделию, его изготовлению, контролю, приемке и поставке, которые нецелесообразно указывать в других конструкторских документах
Программа и методика испытаний	Документ, содержащий технические данные, подлежащие проверке при испытании изделий, а также порядок и методы их контроля
Расчет	Документ, содержащий расчеты параметров и величин, например расчет размерных цепей, расчет на прочность и др.
Эксплуатационные документы	Документы, предназначенные для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте изделия в процессе эксплуатации
Инструкция	Документ, содержащий указания и правила, используемые при изготовлении изделия (сборке, регулировке, контроле, приемке и т.п.).

Документы в зависимости от стадии разработки подразделяют на проектные (техническое предложение, эскизный проект и технический проект) и рабочие (рабочая документация) в соответствии с ГОСТ 2.103.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

1 Литературный обзор

1. Кудинов А.В. Фрактальный подход к формированию поверхностей на металлорежущих станках // СТИН. 1996. № 6. С. 13–16.

2. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.

3. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В. Управление киберфизическими системами в цифровом производстве на основе искусственного интеллекта и облачных технологий. М.: Иновационное машиностроение, 2019. 293 с.

4. Исаев А.И. Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием. М.: Машгиз, 1950. 358 с.

5. Кабалдин Ю.Г. Механизмы деформации срезаемого слоя и стружкообразование при резании // Вестник машиностроения. 1993. № 7. С. 25–30.

6. Myl'nikov V.V., Pronin A.I., Chernyshov E.A. Optimization of the Turning of Quenched Steel by Cutting Ceramic on the Basis of Simplex Planning // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39. P. 49–51. DOI: [10.3103/S1068798X19010209](https://doi.org/10.3103/S1068798X19010209).

7. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 296 с.

8. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров шероховатости поверхностей деталей машин при обработке лезвийным инструментом // Вестник машиностроения. 1988. № 1. С. 40–42.

9. Якобсон М.О. Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке. М.: Машгиз, 1986. 292 с.

10. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 277 с.

					СКБФМХТ.00.01.2024.04	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		8

11. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Лончаков С.З., Фролова А.В. Особенности деформации и разрушения упрочненных высокоуглеродистых сталей после обработки в температурных условиях фазового предпревращения и превращения // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 1. С. 62–72. DOI: [10.17073/0368-0797-2019-1-62-72](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-62-72).
12. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 184 с.
13. Саблин П.А., Щетинин В.С. Влияние микропрофиля обработанной поверхности на прочностные и эксплуатационные характеристики деталей машин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17. № 8. С. 368–370. DOI: [10.36652/1813-1336-2021-17-8-368-370](https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-8-368-370).
14. Амосов О.С., Амосова С.Г., Иочков И.О. Точное многоклассовое распознавание дефектов заклепочных соединений в авиационных изделиях по их видеоизображениям с использованием глубоких нейронных сетей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 5. С. 30–41. DOI: [10.25791/pribor.5.2022.1339](https://doi.org/10.25791/pribor.5.2022.1339).
15. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. 630 с.
16. Кабалдин Ю.Г., Башков А.А. Самоорганизация и механизм трения при резании // Вестник машиностроения. 2023. № 2. С. 167–173. DOI: [10.36652/0042-4633-2023-102-2-167-173](https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-2-167-173).
17. Shchelkunov E.B., Vinogradov S.V., Shchelkunova M.E., Pronin A.I., Samar E.V. Formalized Configurational Calculations of Parallel Mechanisms // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. № 8. P. 581–584. DOI: [10.3103/S1068798X18080130](https://doi.org/10.3103/S1068798X18080130).
18. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Кондрашкин О.Б., Чернышов Е.А., Пронин А.И. Изменение показателей сопротивления усталости конструкционных сталей при различных спектрах нагружения // Известия выс-

					СКБФМХТ.00.01.2024.04	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		9

ших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 10. С. 796–802.
DOI: [10.17073/0368-0797-2019-10-796-802](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-796-802).

19. Shchelkunov E.B., Shchelkunova M.E., Ryabov S.A., Glinka A.S. Parallel Mechanisms with Flexible Couplings // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41. P. 593–597. DOI: [10.3103/S1068798X21070236](https://doi.org/10.3103/S1068798X21070236).

20. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Связь притягивающих множеств деформаций инструмента с пространственной ориентацией упругости и регенерацией сил резания при точении // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30. № 1. С. 37–56.
DOI: [10.18500/0869-6632-2022-30-1-37-56](https://doi.org/10.18500/0869-6632-2022-30-1-37-56).

2 Описание проекта

Проблема повышения эффективности механической обработки в условиях современного автоматизированного производства является актуальной для многих отраслей перерабатывающей промышленности. Данная проблема требует глубокого изучения физических процессов, происходящих при резании. Сегодня при наличии широкой номенклатуры изделий предприятия вынуждены создавать условия для сокращения технологического цикла при производстве того или иного изделия.

Повышение эффективности механической обработки является важной научно-технической проблемой, над которой работают ведущие мировые ученые на протяжении многих десятилетий. Понятие «эффективность механической обработки» подразумевает два очень важных показателя: производительность и качество. В этой связи ряд научных школ Российской Федерации используют показатели качества механической обработки как основной критерий оценки ее эффективности. Шероховатость поверхности является одним из основных параметров, определяющих качество обработанной детали.

					СКБФМХТ.00.01.2024.04	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		10

В условиях автоматизированного производства остро стоит проблема повышения эффективности механообработки на основе более глубокого изучения физических процессов, сопровождающих резание. Данная проблема становится актуальной особенно для цифрового производства, создание которого в стране связано с программой Правительства РФ «Индустрия 4.0». Цифровая трансформация на всех уровнях механообрабатывающих предприятий обусловлена необходимостью не только проводить анализ больших данных (Big Data), поступающих от оборудования, систем, устройств с помощью сенсоров (датчиков), но и использовать эти данные для сокращения времени проектирования технологических процессов и вывода новых изделий на рынок, повышая гибкость производства, качество продукции и эффективность производственных процессов.

При возникновении факторов, связанных с геометрией процесса резания, процесс возникновения микронеровностей принято рассматривать как копирование траектории движения режущего инструмента определенной формы на обрабатываемой поверхности. В этой связи высота микронеровностей и форма поверхности определяются как формой режущего инструмента, так и элементами режимов резания, которые могут повлиять на изменение траектории движения режущих лезвий относительно обрабатываемой поверхности.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований был создан стенд, состоящий из:

- токарно-винторезного станка модели 1К625;
- токарного динамометра модели STD.201-2;
- интерфейсного блока National Instruments NI cDAQ-9174;
- ПЭВМ.

Для проведения эксперимента была подготовлена заготовка из углеродистой стали У8. Для получения более достоверных данных с динамометра

					СКБФМХТ.00.01.2024.04	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		11

данную экспериментальную установку необходимо тарировать под каждый обрабатываемый материал. В комплекте с динамометром поставляется эталонная тарировочная заготовка (в том числе из стали У8), а также методика поверки.

После тарировки согласно рекомендациям калькулятора Walter были подобраны режимы резания, которые были дополнены другими, выбранными исходя из требований эффективности обработки: от щадящих режимов, но с получением максимального качества поверхности, до высокопроизводительных режимов с потерей качества обработанной поверхности.

После обработки заготовок на экспериментальном стенде были сняты профилограммы поверхностей.

Для оценки параметров R_a и R_z , характеризующих шероховатость обработанной поверхности, был разработан стенд [3], включающий заготовку, закрепленную в центрах токарного станка, и профилометр TR200, подключенный через интерфейс к ПЭВМ. Профилометр TR200 позволяет как получить значение любого параметра шероховатости, согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014, так и увидеть характер неровностей поверхности.

Далее рассчитывалась фрактальная размерность D_F шероховатости обработанной поверхности по аттракторам профилограмм. Фрактальная размерность рассчитывалась по известным методикам, но с использованием оригинального программного обеспечения.

Завершающим этапом реализации методики стало нейросетевое моделирование. При нейронносетевом моделировании шероховатости поверхности поиск оптимальной структуры искусственной нейронной сети (ИНС) проводился с помощью программного обеспечения Matlab версии 6.5, который привел к архитектуре, содержащей 7 нейронов в первом скрытом слое и 1 нейрон во втором скрытом слое. Обучение ИНС выполняли на основе полученных экспериментальных данных. Была также проведена проверка

					СКБФМХТ.00.01.2024.04	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		12

нейросетевой модели на входных данных, отличных от тех, на которых она обучалась.

3 Результаты исследования

На рис. 1 представлены профилограммы обработанных поверхностей стали У8 на различных режимах резания.

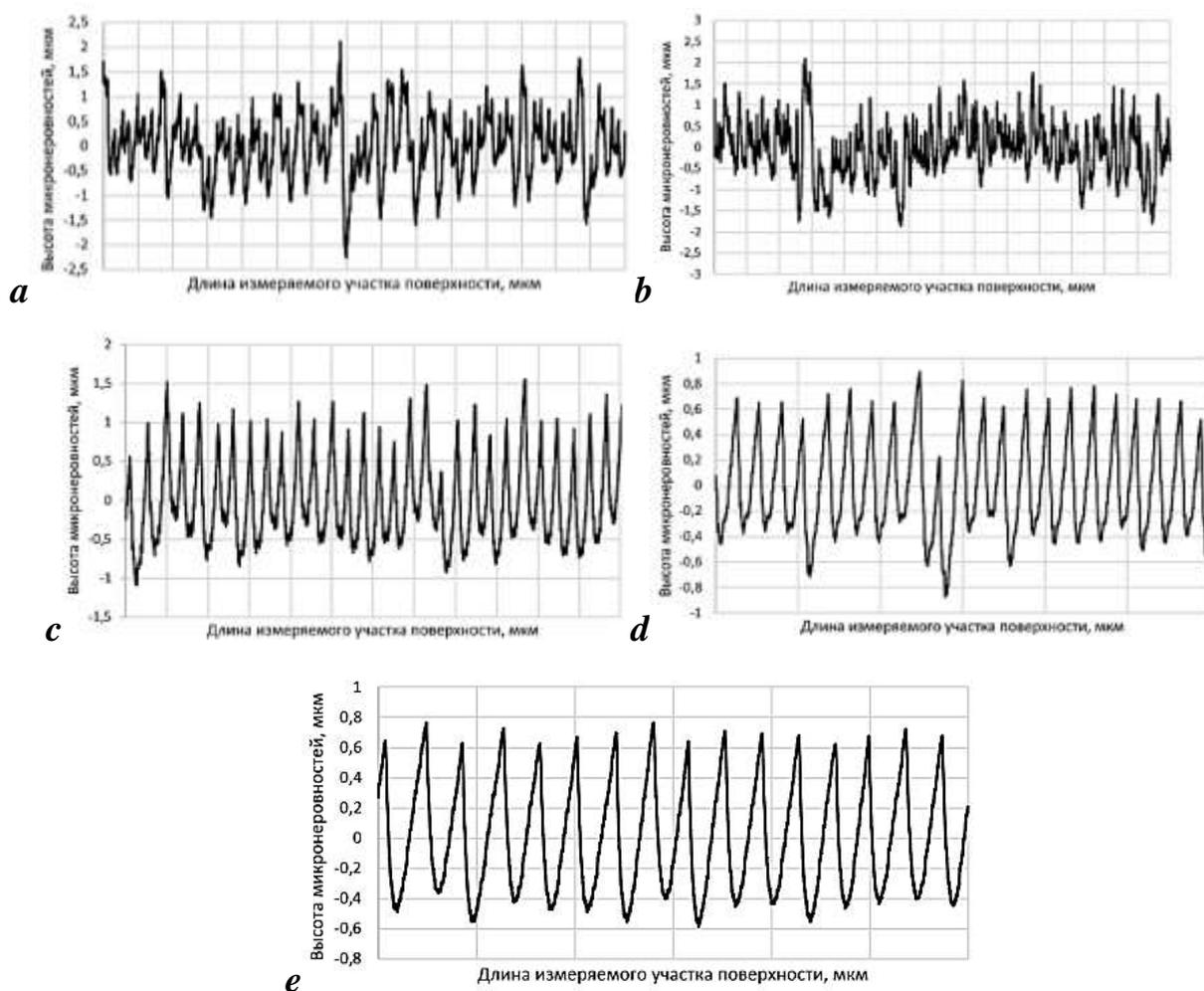


Рис. 1. Профилограммы обработанных поверхностей (сталь У8, резец Т15К6):

На рис. 2 представлены аттракторы профилограмм на основе расчетов с использованием разработанных ПО.

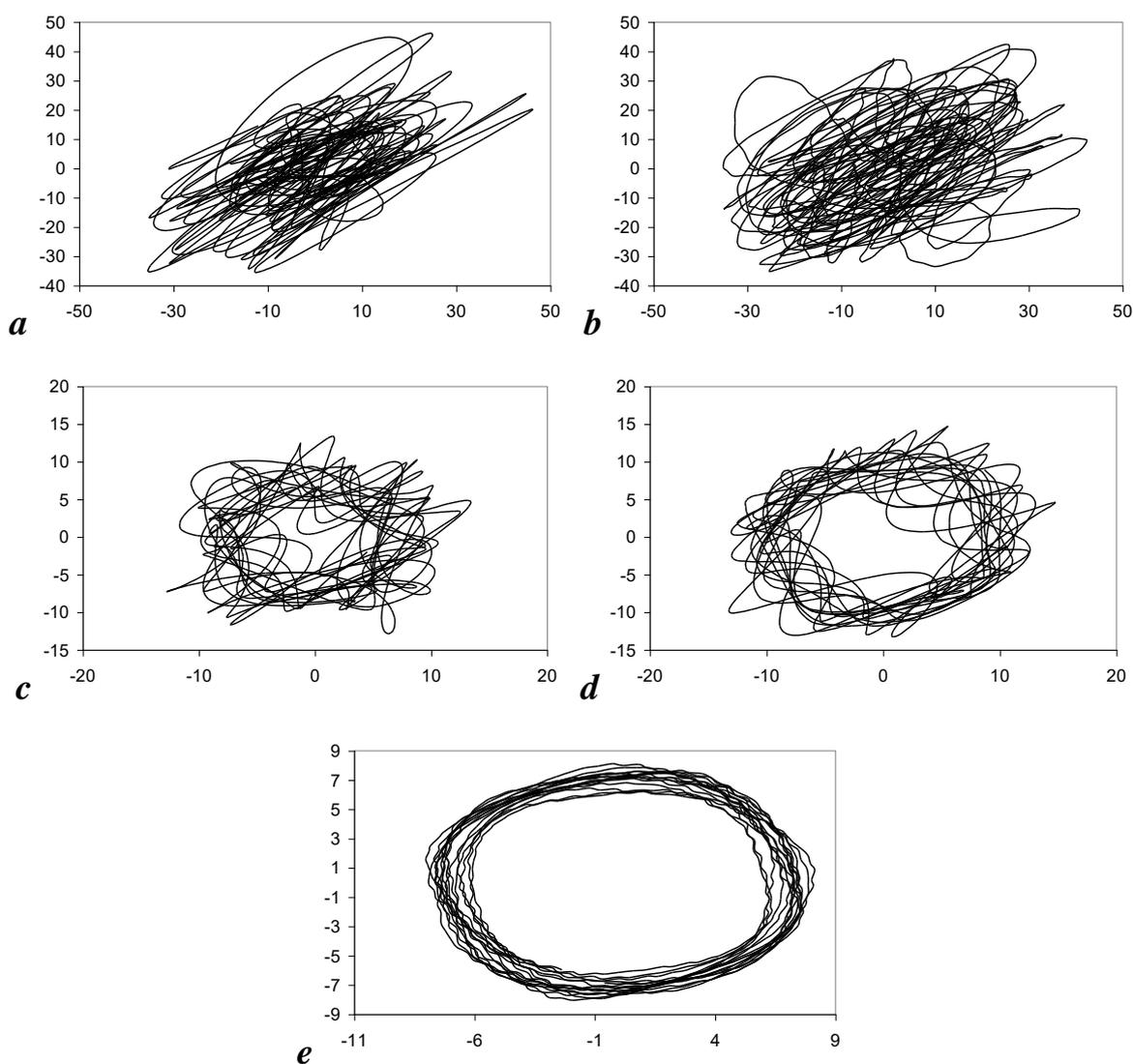


Рис. 2. Аттракторы обработанных поверхностей стали У8, соответствующие скоростям резания:

Как видно из рис. 2, наиболее хаотичным является аттрактор, соответствующий поверхности, обработанной при скорости резания 50 м/мин (рис. 2 b). Известно, что на низких скоростях резания происходит интенсивное наростообразование, которое отражается на шероховатости. По фрактальной размерности этого аттрактора можно утверждать, что процессы, возникающие в станочной системе, нерегулярны, а сама система неустойчива. В результате шероховатость поверхности высокая. Последний, пятый, аттрактор (рис. 2 e), напротив, говорит о том, что колебания, возникающие в системе, регулярны и система является устойчивой.

На рис. 3 показана модель фрактальной шероховатой поверхности в виде канторовского множества [2].



Рис. 3. Модель канторовского профиля шероховатости поверхности

Данная модель показывает подобие неровностей поверхности, связанное с повторяющимися процессами при механической обработке. На основе данной модели нами предложен фрактальный подход к формированию и управлению шероховатостью обработанных поверхностей при резании для условий автоматизированного производства.

На рис. 4 приведена зависимость шероховатости R_a от скорости резания V , выполненная на описанном стенде при обработке стали У8, и результаты оценки фрактальной размерности профилограмм шероховатости R_a после их обработки. Анализ результатов показывает, что наибольшие различия в указанных видах зависимостей наблюдаются в области низких и высоких скоростей.

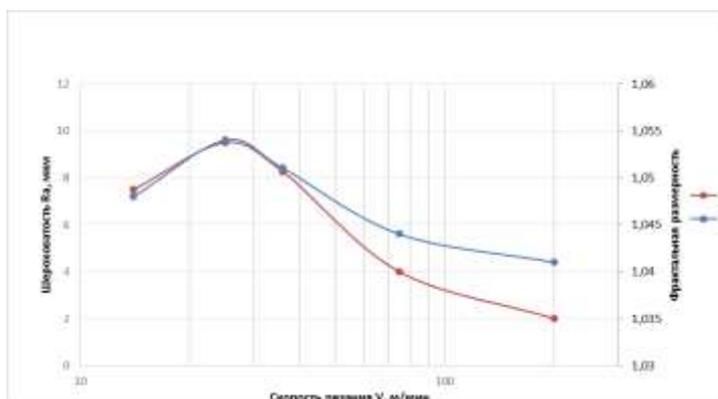


Рис. 4. Зависимость R_a шероховатости (1) и D_{Ra} фрактальной размерности (2) от скорости резания (сталь У8, резец Т15К6; $S=0,11$ мм/об, $t=1$ мм)

Для оценки возможности диагностики параметра R_a в процессе резания был проведен корреляционный анализ зависимостей R_a от D_{Ra} . Значения коэффициентов корреляции получились высокими (0,7–0,9).

В ходе разработки системы управления процессом резания нами была создана нейронная сеть (рис. 5), основанная на диагностировании по фрактальности обработанной поверхности.

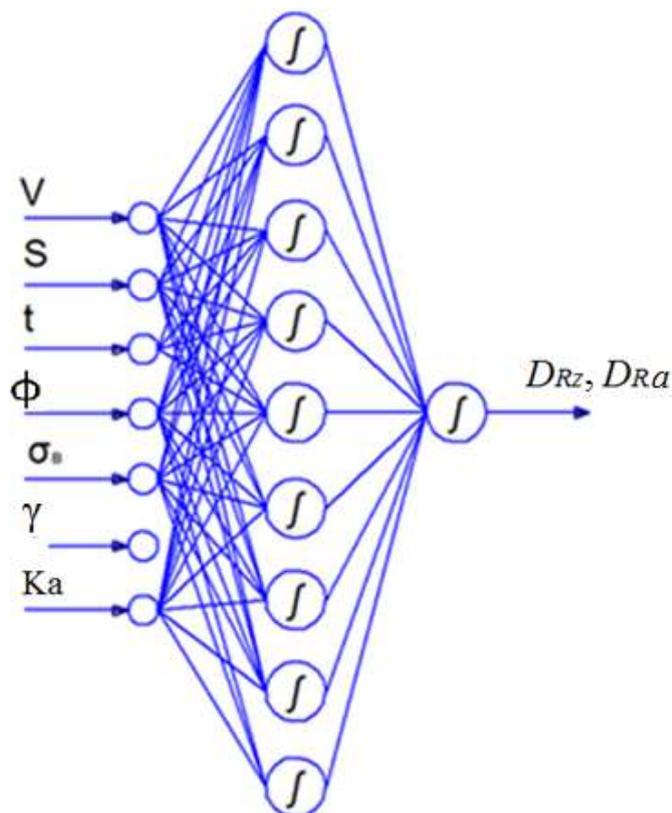


Рис. 5. Структура искусственной нейронной сети для оценки фрактальности обработанной поверхности от условий резания

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из перспективных инструментов для исследований, которые могут учитывать взаимосвязь и *взаимообусловленность* выходных параметров процесса резания, являются подходы искусственного интеллекта. Последнее может быть достигнуто на основе создания цифровых двойников. Цифровой двойник – новое слово в моделировании оборудования, технологических процессов и планирования цифровых производств. В основе цифровых двой-

ников лежит ряд математических моделей, достоверно описывающих процессы и взаимосвязи как на отдельном объекте, так и в рамках целого производственного оборудования с использованием анализа больших данных (Big Data). В этой связи важное значение приобретает разработка нейросетевых моделей и машинного обучения.

Использование уже имеющихся статистических зависимостей и нейронно-сетевое моделирование позволяет проводить как его симуляцию, так и оценку текущего состояния технологического оборудования в целом, а следовательно, качества обработанной поверхности.

Цифровой двойник выступает виртуальной моделью детали, изделия, процесса, технологии и т. д. Такая модель способна на микро- и макроуровне либо описать реально существующий объект-технология, выступая как дубль готового конкретного изделия или процесса, либо послужить прототипом будущего объекта-технологии. При этом любая информация, которая может быть получена при тестировании физического объекта, должна быть получена и на базе тестирования цифрового двойника.

Влияние режимов обработки (V ; s ; t) и физико-механических свойств обрабатываемого материала (σ_b) на шероховатость обработанной поверхности наиболее освещено в литературе [4; 6; 9]. Наименее изучено влияние динамики процесса резания на шероховатость обработанной поверхности (уравнение (1)).

На рис. 6 представлены зависимости r фазовой характеристики сил резания от высоты микронеровностей R_z [16]. Из рис. 6 следует, что наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности автоколебания оказывают при резании пластичных материалов (сталь 10). С ростом скорости резания влияние автоколебаний на шероховатость обработанной поверхности снижается.

					СКБФМХТ.00.01.2024.04	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		17

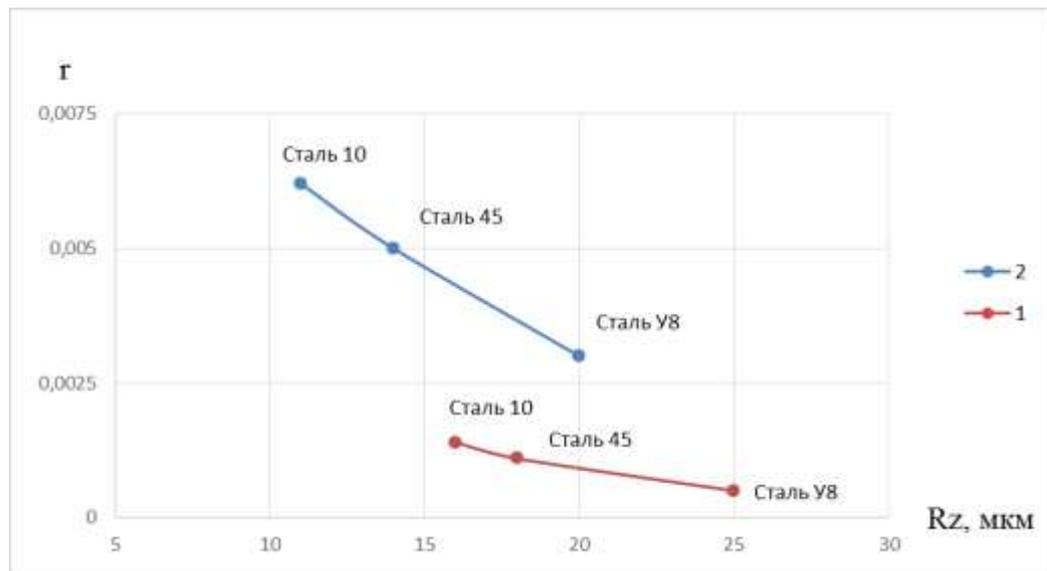


Рис. 6. Зависимость r фазовой характеристики сил резания от шероховатости обработанной поверхности (1 – 80 м/мин; 2 – 30 м/мин)

Цифровой двойник шероховатости поверхности (рис. 6) позволяет на стадии проектирования технологических процессов выбирать режимы механической обработки, обеспечивающие заданную шероховатость в зависимости как от динамического состояния станочного оборудования, так и от марки обрабатываемого материала, его прочностных свойств (σ_b).

Увеличение числа параметров на входе нейронной сети, изменение ее архитектуры и накопление базы данных о процессе резания позволяет исследовать и другие факторы, влияющие на шероховатость обработанной поверхности, но трудно поддающиеся исследованию, в частности влияние радиуса округления вершины режущего лезвия, угла в плане и т. д.

В настоящее время современное станочное оборудование рассматривается как киберфизическая система (КФС), которая использует датчики, установленные на режущем инструменте и на других ответственных органах управления станка, собирающие данные о состоянии КФС в реальном времени, после чего эти сведения отправляются цифровому двойнику. Постоянное пополнение базы данных для цифрового двойника о процессе резания позво-

ляет повысить точность моделирования шероховатости обработанной поверхности и управления динамическим состоянием КФС при резании.

С этой целью изучена возможность использования нейронносетевых моделей для управления технологическими системами обработки резанием, проведены дополнительные экспериментальные исследования. Для этого берется временной ряд сигналов виброакустической эмиссии, снятый с динамической системы станка во время резания, и рассчитывается уже фрактальная размерность сигнала ВАЭ, которая, как показали исследования, хорошо коррелирует с фрактальной размерностью шероховатости обработанной поверхности. Значения коэффициентов корреляции получились довольно высокими (0,8–0,9).

4 Основные результаты и выводы

1. Выявлена корреляционная зависимость между шероховатостью обработанной поверхности и фрактальной размерностью D_{Ra} . Коэффициент корреляции составил 0,8–0,9.

2. Предложена система на основе искусственного интеллекта, позволяющая учесть широкий спектр входных параметров, влияющих на шероховатость обработанной поверхности.

3. Предложенная интеллектуальная система способна к самообучению, что позволяет увеличить количество входных параметров и сформировать базу данных виртуальных моделей (цифровых двойников).

					СКБФМХТ.00.01.2024.04	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		19