

Управление динамической устойчивостью металлорежущих систем в процессе резания по фрактальности шероховатости обработанной поверхности

© 2023

Кабалдин Юрий Георгиевич^{1,3}, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения»
Саблин Павел Алексеевич^{*2,4}, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Машиностроение»
Щетинин Владимир Сергеевич^{2,5}, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Машиностроение»

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород (Россия)

²Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре (Россия)

*E-mail: ikpmta@knastu.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4300-6659>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5950-9010>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0194-2254>

Поступила в редакцию 15.06.2023

Принята к публикации 06.09.2023

Аннотация: 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. Ее актуальность еще более возрастает с развитием цифрового производства в нашей стране. Сегодня при наличии широкой номенклатуры изделий предприятия вынуждены создавать условия для сокращения технологического цикла при производстве того или иного изделия. Для проведения исследования был поставлен эксперимент, в котором в качестве обрабатываемого материала использовалась углеродистая сталь У8, а в качестве инструментального материала – Т15К6. В ходе проведения эксперимента наблюдали за изменением шероховатости обработанной поверхности в зависимости от скорости резания. В работе рассмотрена возможность оценки качества поверхностного слоя при резании на основе фрактального и нейронносетового моделирования. Обнаружено, что фрактальная размерность показывает регулярность воспроизведения неровностей на обработанной поверхности при резании. Рассчитанная фрактальная размерность шероховатости обработанной поверхности хорошо коррелирует со значениями шероховатости обработанной поверхности (коэффициент корреляции 0,8–0,9). Разработана структура нейронной сети, позволяющая управлять качеством обработанной поверхности в зависимости от условий резания. Изучена возможность использования нейронносетовых моделей для управления технологическими системами обработки резанием. Предложено при создании цифровых двойников учитывать факторы, влияющие на качество обработанной поверхности и производительность обработки, которые слабо поддаются учету при моделировании, а также при проведении натурных экспериментов в ходе механической обработки. Такими факторами являются износ режущего инструмента, процесс пластической деформации и динамика резания.

Ключевые слова: процесс резания; шероховатость обработанной поверхности; нейронная сеть; управление качеством поверхностного слоя.

Для цитирования: Кабалдин Ю.Г., Саблин П.А., Щетинин В.С. Управление динамической устойчивостью металлорежущих систем в процессе резания по фрактальности шероховатости обработанной поверхности // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 3. С. 43–51. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-3-65-4.

ВВЕДЕНИЕ

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.

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 механообработки 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.

В работе [1] для высоких скоростей обработки предложен метод формирования неровностей обработанной поверхности, учитывающий случайный характер их формирования на основе фрактальных представлений. В своих работах автор описывает, что для образования фракталов необходимы ударные нагрузки, которые создают волны растяжения – сжатия, отражая бегущую волну последующего отрыва слоя, толщина которого определяется свойствами материала заготовки. Такое разрушение принято называть отколом.

Приведенные в работе [1] значения фрактальной размерности (D_F) хотя и являются дробными, но имеют большие значения и требуют уточнений. Например, финишные и прецизионные станки имеют $D_F=2,6-3,0$ соответственно. Известно, что высокие значения D_F соответствуют хаотическим аттракторам [2], т. е. неустойчивым режимам.

Качество обработанных поверхностей различных деталей машин и механизмов является комплексным эксплуатационным показателем, влияющим в первую очередь на надежность производимой продукции. В показатели качества поверхности включены такие характеристики, как шероховатость, волнистость, погрешности формы, погрешности расположения формы и т. д. [4–6].

Факторы, влияющие на параметр шероховатости обработанной поверхности [7–9], можно представить в виде трех групп:

- факторы, зависящие от геометрии процесса резания;
- факторы, зависящие от пластической деформации обрабатываемого материала;
- факторы, зависящие от автоколебаний при обработке.

В этой связи, например, суммарное значение высоты неровностей R_z при резании может быть представлено в следующем виде:

$$R_z = \Delta R_z^H + \Delta R_z^{ПЛ} + \Delta R_z^B, \quad (1)$$

где ΔR_z^H – высота несрезанного металла;

$\Delta R_z^{ПЛ}$ – прирост высоты неровностей из-за пластических деформаций;

ΔR_z^B – прирост высоты неровностей из-за автоколебаний.

Таким образом, шероховатость обработанных поверхностей является не только важнейшей характеристикой качества поверхности, но и отражением взаимосвязей между процессами, происходящими в системе резания.

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.

Пластические деформации поверхностного слоя заготовки [6] при обработке, а также автоколебательные процессы нарушают эталонную форму будущей детали, и закономерное распределение неровностей поверхности увеличивается на порядок. Как правило, только один из трех факторов оказывает существенное влияние на формирование микронеровностей поверхности, что в конечном итоге и определяет величину шероховатости. Однако в отдельных ситуациях на процесс формирования поверхностного слоя детали влияют все три фактора, и оценить степень влияния каждого из них очень сложно. Шероховатость обработанной поверхности в подобных случаях приобретает сложный характер, лишенный четко выраженных закономерностей.

Существует ряд статистических зависимостей, связывающих шероховатость поверхности с условиями обработки. В настоящее время имеются теоретические и эмпирические формулы, устанавливающие взаимосвязь того или иного критерия шероховатости поверхности с основными технологическими факторами. Так, например, в работе [10] приведена зависимость шероховатости поверхности при скоростном и тонком точении от условий резания:

$$R_a = \frac{C_t C_s C_v C_r C_\phi C_{HB} t^m s^n \phi^x \alpha^y}{v^p r^q HB^w}, \quad (2)$$

где R_a, t, s, r – в мкм;

v – в м/мин;

углы ϕ, ϕ_1, α – в °;

HB – твердость обрабатываемого материала;

m, n, p, q и т. д. – показатели степени при соответствующих параметрах, которые характеризуются константами C_t, C_s, C_v и т. д.

Для тонкого растачивания резцами из твердых сплавов Т15К6 и Т30К4 заготовок из сталей формула (2) имеет следующий вид:

$$R_a = \frac{t^{0,16} s^{0,45} \phi^{0,82}}{v^{0,49} r^{0,25}}. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) следует, что основными технологическими факторами, определяющими шероховатость поверхности при обработке резанием, являются скорость, подача, глубина резания, свойства обрабатываемого материала, а также угол ϕ в плане и радиус r округления вершины резца. Существуют и другие, более сложные статистические зависимости. Поэтому важным моментом при изучении механизма формирования неровностей при механообработке является также изучение физики процессов, сопровождающих резание, в отношении передачи энергии в зону обработки, нелинейности возникающих эффектов и неизбежного влияния диссипативных процессов на высоту шероховатости и устойчивость технологической системы в целом.

Цель исследования – показать, что использование подходов нелинейной динамики и нейросетевого моделирования позволяет управлять процессом резания на уровне динамической устойчивости металлорежущих систем.

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 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.

Сотрудниками кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета была разработана программа для ЭВМ DynAnalyzer, позволяющая по числовому ряду (по профилограмме либо по сигналам виброакустической эмиссии (ВАЭ) и др.) построить аттрактор и рассчитать фрактальную размерность.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

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

Известно [4], что фрактальная размерность характеризует устойчивость процесса, его регулярность воспроизведения. В данном случае это регулярность воспроизведения неровностей на обработанной поверхности. Причем, чем меньше фрактальная размерность, тем устойчивее будет воспроизведение неровностей при резании.

Как видно из рис. 2, наиболее хаотичным является аттрактор, соответствующий поверхности, обработанной при скорости резания 50 м/мин (рис. 2 б). 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 е), 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].

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 зависимости наблюдаются в области низких и высоких скоростей.

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.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как указывалось выше, процессы стружкообразования (пластическая деформация), износ режущего инструмента, свойства обрабатываемого материала и динамика резания являются основными факторами, определяющими высоту неровностей при механообработке [11].

Однако данные факторы в литературе [12] рассматриваются вне зависимости друг от друга, т. е. исследуются и оптимизируются по отдельности. В частности, при разработке методов снижения интенсивности износа режущего инструмента, а также шероховатости обработанной поверхности не учитываются тип образующейся стружки и динамическое состояние оборудования. Изучение взаимного влияния различных параметров этих факторов, т. е. системный подход к механообработке, позволит более точно составить, в частности, модели стружкообразования, шероховатости обработанной поверхности, износа режущего инструмента и самого процесса резания.

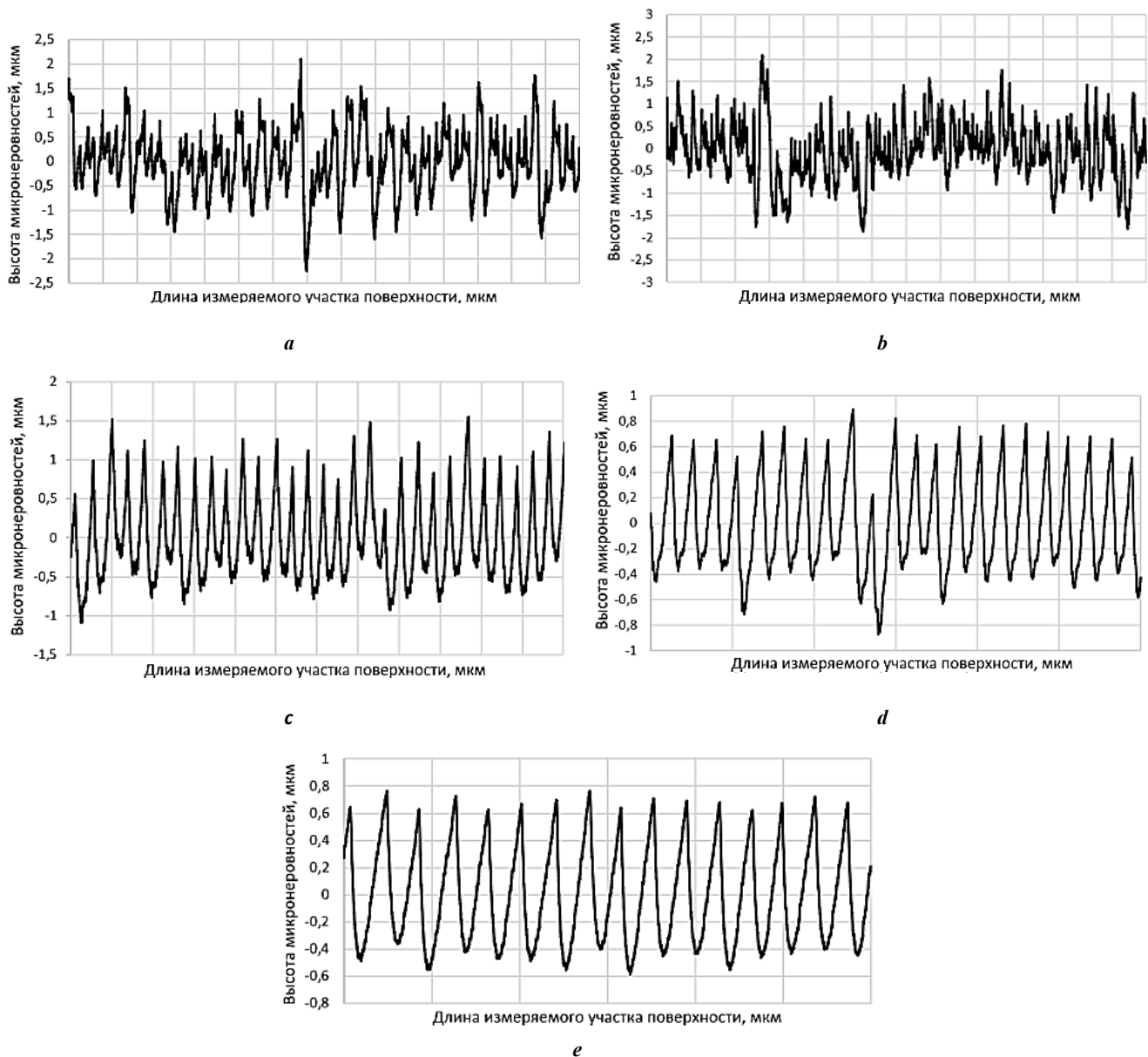


Рис. 1. Профилограммы обработанных поверхностей (сталь У8, резец Т15К6):
a – $V_{рез}=20$ м/мин, Ra 2,32; **b** – $V_{рез}=50$ м/мин, Ra 2,6;
c – $V_{рез}=75$ м/мин, Ra 1,6; **d** – $V_{рез}=105$ м/мин, Ra 1,25; **e** – $V_{рез}=130$ м/мин, Ra 1,2
Fig. 1. Profile records of machined surfaces (У8 steel, Т15К6 cutter):
a – $V_{cut}=20$ m/min, Ra 2.32; **b** – $V_{cut}=50$ m/min, Ra 2.6;
c – $V_{cut}=75$ m/min, Ra 1.6; **d** – $V_{cut}=105$ m/min, Ra 1.25; **e** – $V_{cut}=130$ m/min, Ra 1.2

Одним из перспективных инструментов для исследований, которые могут учитывать взаимосвязь и взаимобусловленность выходных параметров процесса резания, являются подходы искусственного интеллекта. Последнее может быть достигнуто на основе создания цифровых двойников [13; 14]. Цифровой двойник – новое слово в моделировании оборудования, технологических процессов и планирования цифровых производств. В основе цифровых двойников 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 нейронносетевое моделирование [14; 15] 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-технологии, 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.

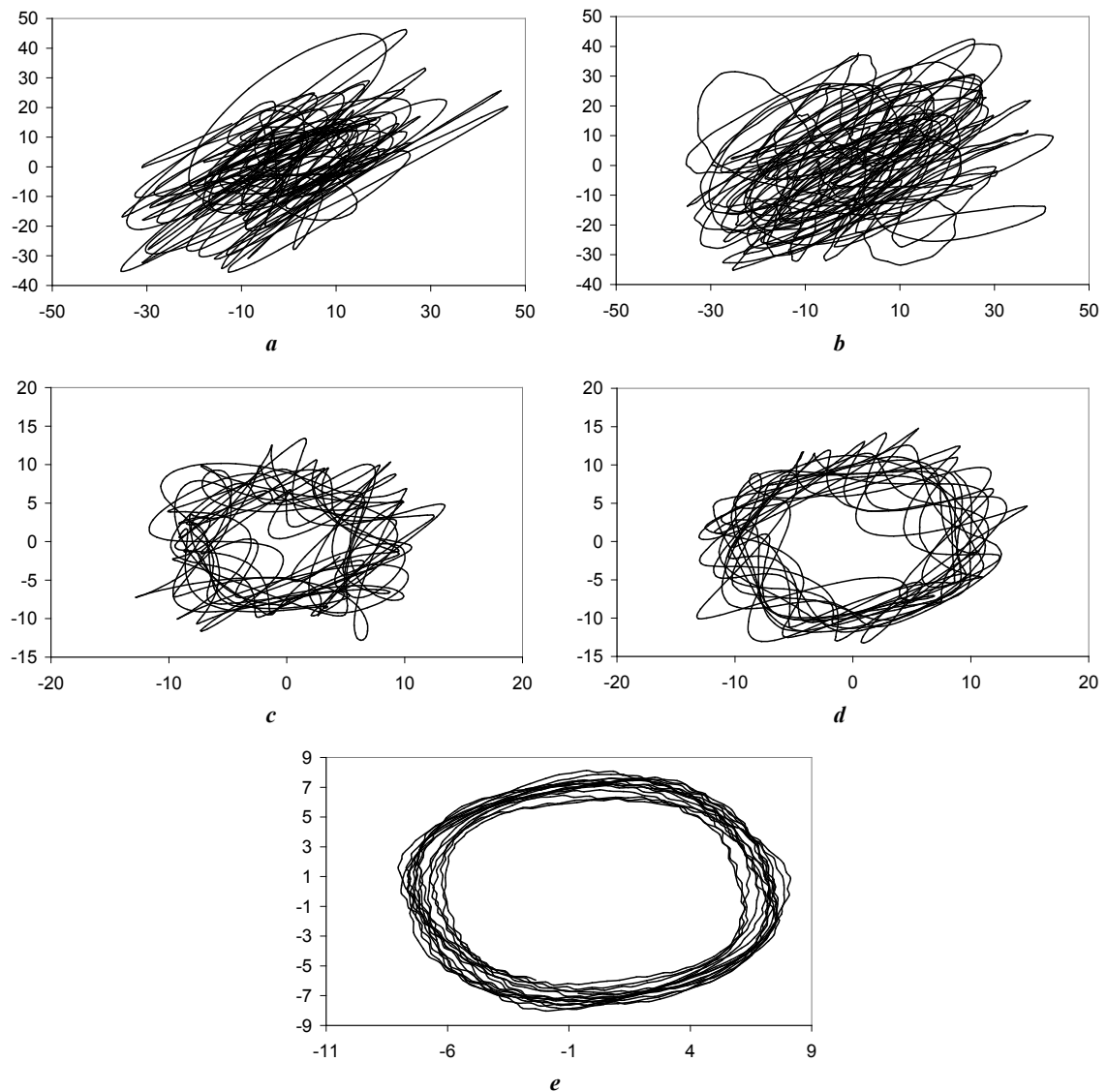


Рис. 2. Аттракторы обработанных поверхностей стали У8, соответствующие скоростям резания:

a – $V_{рез}=20$ м/мин, Ra 2,32; **b** – $V_{рез}=50$ м/мин, Ra 2,6;
c – $V_{рез}=75$ м/мин, Ra 1,6; **d** – $V_{рез}=105$ м/мин, Ra 1,25;
e – $V_{рез}=130$ м/мин, Ra 1,2

Fig. 2. Attractors of the machined У8 steel surfaces corresponding to cutting rates:

a – $V_{cut}=20$ m/min, Ra 2.32; **b** – $V_{cut}=50$ m/min, Ra 2.6;
c – $V_{cut}=75$ m/min, Ra 1.6; **d** – $V_{cut}=105$ m/min, Ra 1.25;
e – $V_{cut}=130$ m/min, Ra 1.2

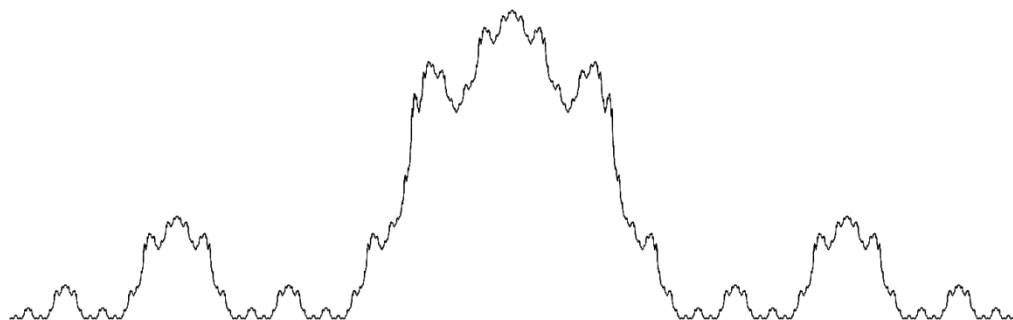


Рис. 3. Модель канторовского профиля шероховатости поверхности
Fig. 3. The model of Cantor profile of surface roughness

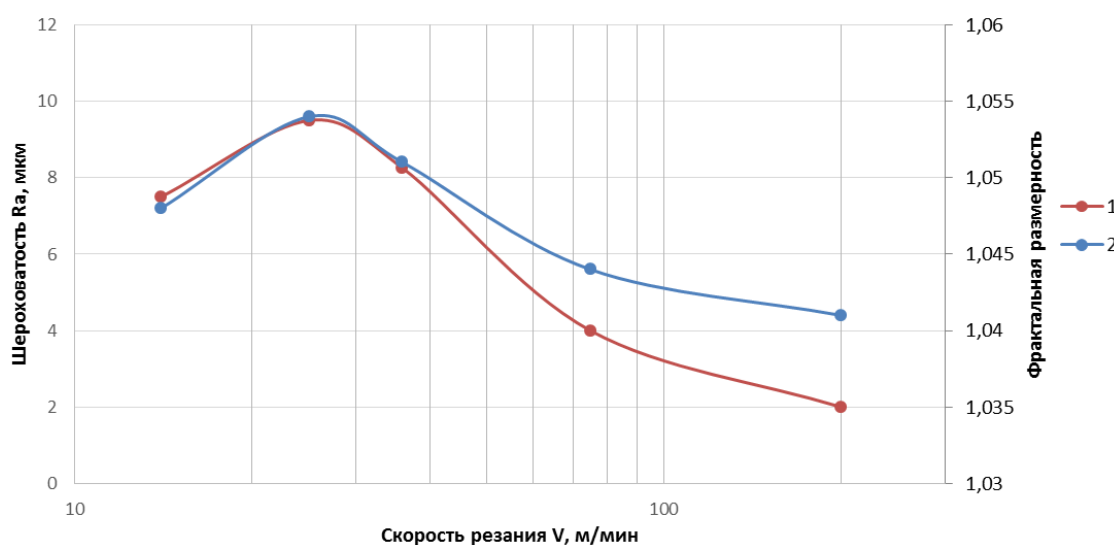


Рис. 4. Зависимость R_a шероховатости (1) и D_{Ra} фрактальной размерности (2) от скорости резания (сталь У8, резец Т15К6; $S=0,11$ мм/об, $t=1$ мм)
Fig. 4. The dependence R_a of roughness (1) and D_{Ra} of fractal dimension (2) on the cutting rate (У8 steel, Т15К6 cutter; $S=0.11$ mm/rev, $t=1$ mm)

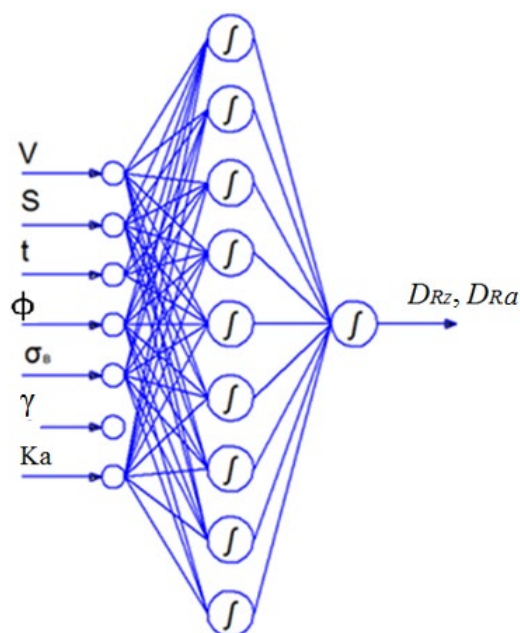


Рис. 5. Структура искусственной нейронной сети для оценки фрактальности обработанной поверхности от условий резания
Fig. 5. The structure of artificial neural network for assessing the fractality of the machined surface based on the cutting conditions

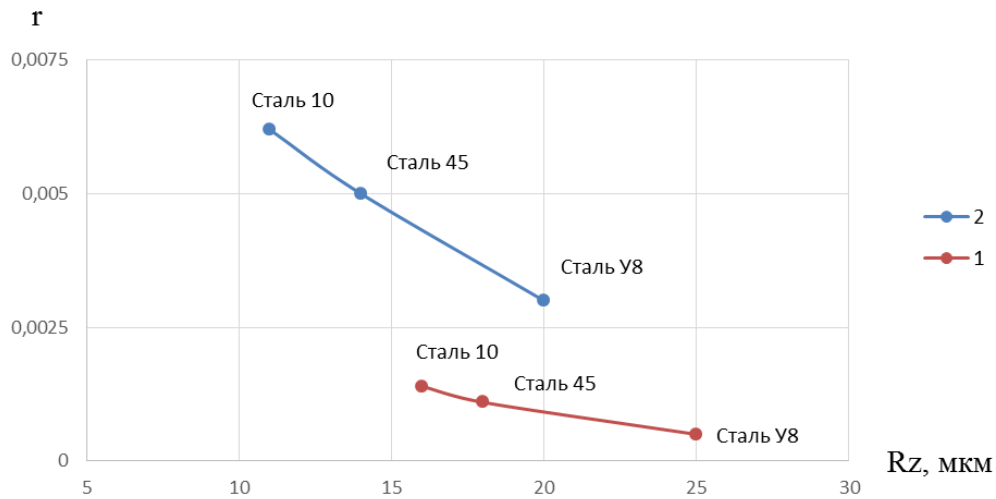


Рис. 6. Зависимость r фазовой характеристики сил резания от шероховатости обработанной поверхности (1 – 80 м/мин; 2 – 30 м/мин) [16]

Fig. 6. The dependence r of phase characteristic of cutting forces on the machined surface roughness (1 – 80 m/min; 2 – 30 m/min) [16]

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)).

В настоящее время доказано, что автоколебания при резании связаны с фазовым сдвигом сил резания [16]. В работе [16] показана связь r фазовой характеристики сил резания с усадкой стружки K_a .

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 [17; 19].

Цифровой двойник шероховатости поверхности (рис. 6) позволяет на стадии проектирования технологических процессов выбирать режимы механообработки, 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 [14; 15], 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 [12; 18; 20] и на других ответ-

ственных 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 позволяет 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).

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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., Шагагин 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.
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 превращения 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. МАТЛАВ 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 высших 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).

REFERENCES

1. Kudinov A.V. Fractal approach to the formation of surfaces on metal-cutting machines. *STIN*, 1996, no. 6, pp. 13–16.
2. Feder E. *Fraktaly* [Fractals]. Moscow, Mir Publ., 1991. 260 p.
3. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kolchin P.V. *Upravlenie kiberfizicheskimi sistemami v tsifrovom proizvodstve na osnove iskusstvennogo intellekta i oblachnykh tekhnologiy* [Control of cyber-physical systems in digital production based on artificial intelligence and cloud technologies]. Moscow, Inovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 293 p.
4. Isaev A.I. *Protsess obrazovaniya poverkhnostnogo sloya pri obrabotke metallov rezaniem* [The process of formation of the surface layer during metal cutting]. Moscow, Mashgiz Publ., 1950. 358 p.
5. Kabaldin Yu.G. Mechanisms of deformation of the cut layer and chip formation during cutting. *Vestnik mashinostroeniya*, 1993, no. 7, pp. 25–30.
6. Mylnikov 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, pp. 49–51. DOI: [10.3103/S1068798X19010209](https://doi.org/10.3103/S1068798X19010209).
7. Starkov V.K. *Obrabotka rezaniem. Upravlenie stabilnostyu i kachestvom v avtomatizirovannom proizvodstve* [Cutting processing. Stability and quality management in automated production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 296 p.
8. Suslov A.G. Technological support of machinery surface roughness parameters at cutter edge machining. *Vestnik mashinostroeniya*, 1988, no. 1, pp. 40–42.
9. Yakobson M.O. *Sherokhovatost, naklep i ostatochnye napryazheniya pri mekhanicheskoy obrabotke* [Roughness, work hardening, and residual stress during machining]. Moscow, Mashgiz Publ., 1986. 292 p.
10. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 277 p.
11. Muravev V.I., Bakhmatov P.V., Lonchakov S.Z., Frolova A.V. Deformation and fracture of strengthened high-

- carbon steel after treatment in temperature conditions of phase pre-transformation and transformation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 62–72. DOI: [10.17073/0368-0797-2019-1-62-72](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-62-72).
12. Zharkov I.G. *Vibratsii pri obrabotke lezviynym instrumentom* [Vibrations during edge-tool treatment]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 184 p.
 13. Sablin P.A., Shchetinin V.S. Influence of the micro profile of the treated surface on the strength and performance characteristics of machine parts. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2021, vol. 17, no. 8, pp. 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. Amosov O.S., Amosova S.G., Iochkov I.O. Accurate multi-class recognition of defects in rivet joints in aircraft products by their video images using deep neural networks. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*, 2022, no. 5, pp. 30–41. DOI: [10.25791/pribor.5.2022.1339](https://doi.org/10.25791/pribor.5.2022.1339).
 15. Medvedev V.S., Potemkin V.G. *Neyronnye seti. MATLAB 6* [Neural networks. MATLAB 6]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2001. 630 p.
 16. Kabaldin Yu.G., Bashkov A.A. Self-organization and mechanism of friction during cutting. *Vestnik mashinostroeniya*, 2023, no. 2, pp. 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, no. 8, pp. 581–584. DOI: [10.3103/S1068798X18080130](https://doi.org/10.3103/S1068798X18080130).
 18. Mylnikov V.V., Kondrashkin O.B., Shetulov D.I., Chernyshov E.A., Pronin A.I. Fatigue resistance changes of structural steels at different load spectra. *Steel in Translation*, 2019, vol. 49, no. 10, pp. 678–682. DOI: [10.3103/S0967091219100097](https://doi.org/10.3103/S0967091219100097).
 19. Shchelkunov E.B., Shchelkunova M.E., Ryabov S.A., Glinka A.S. Parallel Mechanisms with Flexible Couplings. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, pp. 593–597. DOI: [10.3103/S1068798X21070236](https://doi.org/10.3103/S1068798X21070236).
 20. Zakovorotnyy V.L., Gvindzhiliya V.E. Correlation of attracting sets of tool deformations with spatial orientation of tool elasticity and regeneration of cutting forces in turning. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Prikladnaya nelineynaya dinamika*, 2022, vol. 30, no. 1, pp. 37–56. DOI: [10.18500/0869-6632-2022-30-1-37-56](https://doi.org/10.18500/0869-6632-2022-30-1-37-56).

Control of the dynamic stability of metal-cutting systems in the process of cutting based on the fractality of roughness of the machined surface

© 2023

Yury G. Kabaldin^{1,3}, Doctor of Sciences (Engineering),

professor of Chair “Technology and Equipment of Machine Building”

Pavel A. Sablin^{*2,4}, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chair “Machine Building”

Vladimir S. Schetinin^{2,5}, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, professor of Chair “Machine Building”

¹R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod (Russia)

²Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur (Russia)

*E-mail: ikpmto@knastu.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4300-6659>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5950-9010>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0194-2254>

Received 15.06.2023

Accepted 06.09.2023

Abstract: The problem of increasing the efficiency of mechanical treatment within modern automated production is relevant for many branches of the processing industry. This problem requires a deep study of the physical processes occurring during cutting. The urgency of the problem increases even more with the development of digital production in our country. Today, in the presence of a wide range of products, enterprises are forced to create conditions for reducing the technological cycle when manufacturing a particular product. To carry out the study, an experiment was conducted in which the U8 carbon steel was used as the processed material, and the T15K6 alloy was used as the tool material. During the experiment, the authors observed a change in the roughness of the machined surface depending on the cutting speed. The paper considers the possibility of assessing the quality of the surface layer during cutting based on fractal and neural network modeling. It is identified that the fractal dimension shows the regularity of the reproduction of the machined surface roughness during cutting. The calculated fractal dimension of the machined surface roughness correlates well with the values of the machined surface roughness (correlation coefficient is 0.8–0.9). A neural network structure has been developed, which allows controlling the machined surface quality depending on the cutting conditions. The authors studied the possibility of using neural network models to control technological systems of cutting treatment. When creating digital twins, it is proposed to take into account factors affecting the quality of the treated surface and processing performance, which are poorly accounted for in modeling, as well as when conducting full-scale experiments during machining. Such factors are wear of the cutting tool, the process of plastic deformation, and cutting dynamics.

Keywords: cutting process; machined surface roughness; neural network; surface layer quality control.

For citation: Kabaldin Yu.G., Sablin P.A., Schetinin V.S. Control of the dynamic stability of metal-cutting systems in the process of cutting based on the fractality of roughness of the machined surface. *Frontier Materials & Technologies*, 2023, no. 3, pp. 43–51. DOI: [10.18323/2782-4039-2023-3-65-4](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4).