

НГТУ



НЭТИ

# Обработка металлов

## (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)

### Прогнозирование качества получаемой при резании металлов поверхности в условиях роста изношенности инструмента

Виктор Лапшин <sup>a, \*</sup>, Александра Губанова <sup>b</sup>, Илья Дудинов <sup>c</sup>

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5114-0316>, [lapshin1917@yandex.ru](mailto:lapshin1917@yandex.ru); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9785-5384>, [anatoliya81@mail.ru](mailto:anatoliya81@mail.ru);

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0009-0009-0784-1287>, [ilya.sandman@yandex.ru](mailto:ilya.sandman@yandex.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

#### История статьи:

Поступила: 29 ноября 2024  
Рецензирование: 19 декабря 2024  
Принята к печати: 23 января 2025  
Доступно онлайн: 15 марта 2025

#### Ключевые слова:

Износ  
Вибрации  
Процесс резания  
Качество поверхности

#### Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ № 24–29–00287.

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Важнейшим фактором, определяющим эффективность обработки металлов резанием, является качество получаемой при резании поверхности детали. Качество поверхности детали напрямую зависит от вибрационной активности режущего инструмента, амплитуда которой зависит от сложной эволюционной динамики процесса резания. С учетом этого современная технология цифрового двойника, которая позволяет рассчитывать на виртуальных моделях прогнозные значения качества получаемой поверхности деталей, становится крайне актуальным способом повышения эффективности в системах управления металлообработкой. **Цель работы:** повышение точности прогнозирования системой цифрового двойника качества получаемой при резании поверхности обрабатываемых деталей в условиях роста износа режущего инструмента. **В работе исследована** динамика процесса обработки на токарном станке деталей из металла, а также математическая модель, описывающая динамику вибраций инструмента в условиях обработки металлов на станках токарной группы с учетом влияния термодинамической подсистемы системы резания. **Методы исследования:** экспериментальный, на базе авторского измерительного стенда с привлечением следующего оборудования: современного металлографического инвертированного микроскопа «ЛабoМет-И», вариант 4, с широкоугольными объективами 5/20 с линейным полем зрения 20 мм; цифровой камеры для микроскопов Usam-1400 с матрицей размером 1,4×1,4 мкм; контурографа-профилографа T4HD. Математическое моделирование динамической системы резания выполнялось в среде Matlab, для чего авторами разработана специальная программа обработки данных. **Результаты и обсуждение.** Построены кривые изнашиваемости режущего инструмента, изменения показателей качества обработанной поверхности в функциях пути резания, а также в функции износа режущего инструмента. Определены показатели динамики, по которым можно осуществлять параметрическую идентификацию виртуальных моделей цифрового двойника. Определена структура этих моделей и осуществлена параметрическая идентификация. Произведено численное моделирование в среде Matlab, по результатам которого построена кривая изменения среднеарифметического показателя шероховатости при росте износа режущего инструмента. Проведена оценка сходимости результатов натурного и численного экспериментов, которая показала высокую достоверность возможного прогноза качества получаемых при резании деталей системой цифрового двойника.

**Для цитирования:** Лапшин В.П., Губанова А.А., Дудинов И.О. Прогнозирование качества получаемой при резании металлов поверхности в условиях роста изношенности инструмента // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 106–128. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-106-128.

## Введение

Как известно, повышение качества обработки металлических деталей на металлорежущих станках может быть достигнуто за счет повышения точности позиционирования или за счет

снижения вибраций как режущего инструмента, так и самой заготовки, закрепленной в шпинделе станка [1]. Одним из важнейших факторов, определяющим качество получаемой при резании поверхности, является износ режущего инструмента. Наиболее опасна ситуация, когда инструмент достигает значений критического износа, после чего резко возрастает вибрационная активность режущего инструмента и, как следствие, снижается качество поверхности, получаемой при резании. Исходя из этих соображений, оценка вли-

#### \*Адрес для переписки

Лапшин Виктор Петрович, к.т.н., доцент  
Донской государственный технический университет,  
пл. Гагарина, 1,  
344000, г. Ростов-на-Дону, Россия  
Тел.: +7 900 122-75-14, e-mail: lapshin1917@yandex.ru

яния износа режущего инструмента на качество получаемой при резании поверхности является актуальной научной задачей.

В современном представлении использование систем вибромониторинга позволяет, основываясь на цифровых измерениях вибраций, прогнозировать качество поверхности, получаемой при резании [2, 3]. Такой прогноз возможен только при условии разработки сложных математических моделей эволюционной динамики процессов, происходящих в процессе резания [4]. Сложность этих моделей и требование к их параметрической идентификации представляют собой проблему, решение которой значительно повысит возможности современных систем металлообработки. Одним из способов решения этой проблемы является использование новой цифровой парадигмы в системах управления металлообработкой, получившей название «цифровой двойник» [5–7]. В частности, подход, основанный на использовании интеллектуальных моделей, которые описывают сложную динамику технологических процессов, происходящих при резке металла, является наиболее перспективным в этой новой области научных знаний [8, 9]. Например, в работах, выполненных коллективами под руководством Y. Altintas – одного из известных специалистов в области цифровых двойников управления металлообработкой, предлагается использовать цифровые двойники для формирования новых программ ЧПУ, которые позволят обрабатывать детали без предварительных настроек и экспериментов [10]. То есть вопросы выбора технологических режимов обработки как в процессе решения текущих задач, так и при перестройке системы управления на металлорежущем станке (свойство гибкости) могут быть решены с использованием виртуальных моделей цифрового двойника. В современном представлении технология построения цифровых двойников с точки зрения синтеза виртуальных моделей базируется на двух парадигмах, первая из которых основана на использовании детерминированных математических моделей [10], а вторая – на широком внедрении нейронных сетей [8, 9].

Одним из важнейших направлений развития технологии цифрового двойника является направление диагностики различных неисправно-

стей. К примеру, в работе [11] рассматриваются вопросы генерации размеченных обучающих наборов данных для различных неисправностей подшипников, которые дополняли бы ограниченные измеренные данные. Здесь авторы предлагают новый подход с использованием цифрового двойника для решения проблемы ограниченных измеренных данных при диагностике неисправностей подшипников. Результаты экспериментов, проведенных авторами, показывают повышение точности диагностики неисправностей [12]. Это же направление, но несколько в ином представлении, раскрывается в работе [13]. Здесь авторы указывают на ограниченность традиционных методов диагностики неисправностей на основе экспериментальных данных. Они отмечают, что в некоторых критически важных промышленных сценариях такой набор данных не всегда доступен. Именно технология цифрового двойника, которая создает виртуальное представление физического объекта, отражающее его рабочие условия, позволяет диагностировать неисправности технических систем или технологических процессов, когда данных о неисправностях недостаточно. Авторы предлагают систему диагностики неисправностей на основе цифровых двойников с использованием размеченных смоделированных данных и неразмеченных измеренных данных [13]. Построение системы цифрового двойника, осуществляющей в режиме реального времени интеграцию данных датчиков с неисправных подшипников в подпространстве виртуальных моделей, представлено в работе [14]. Авторы уточняют параметры виртуальных моделей путем сравнения результатов цифрового моделирования во временной области с измеренными и снятыми сигналами [14].

Вместе с тем комплексное влияние изношенности режущего инструмента на динамику процесса резания – крайне сложная задача современности, решение которой невозможно без учета термодинамических особенностей процессов, протекающих при резании металлов [15, 16]. В результате анализа видно, что технология цифрового двойника получила широкое распространение в диагностике неисправностей, в том числе неисправностей подшипников. Поэтому очевидным развитием технологии цифрового двойника является применение ее для прогнозирования влияния изнашиваемости режущего

инструмента на качество получаемых при резании деталей.

Исходя из этого, сформулируем *цель исследования* как повышение точности прогнозирования системой цифрового двойника качества получаемой при резании поверхности обрабатываемых деталей в условиях роста износа режущего инструмента за счет параметрической идентификации виртуальных моделей цифрового двойника по данным, получаемым системой вибрационного мониторинга процесса резания.

### Методика исследований

*Система вибромониторинга с оценкой изношенности режущего инструмента, а также качества получаемых при резании поверхностей*

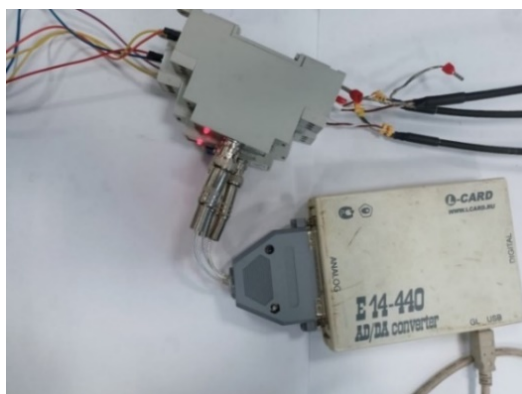
В основе экспериментальной составляющей исследований лежит широкое использование вибродиагностической подсистемы, которая была размещена на самом режущем инструменте, вернее на его державке (рис. 1). В основе этой



а



б



в



з

Рис. 1. Система вибромониторинга на станке 1К625:

а, б – промышленные акселерометры; в, з – усилитель-преобразователь и АЦП

Fig. 1. Vibration monitoring system on the 1K625 lathe:

а, б – industrial accelerometers; в, з – amplifier converter and ADC



системы выступает промышленный акселерометр общего назначения стандарта IEPЕ (ICP) со встроенным усилителем-преобразователем заряда А603С01Т (частотный диапазон ( $\pm 3$  дБ): 0,4...15 000 Гц; чувствительность ( $\pm 10$  %): 100 мВ/г, или 10,2 мВ/(м/с<sup>2</sup>)) и преобразователь ICP (IEPE) одноканальный с частотным диапазоном 0,1...50 000 Гц.

Как видно из рис. 1, основа системы вибромониторинга – это пьезоэлектрические датчики вибраций режущего инструмента. Отметим, что сейчас получили широкое развитие новые интеллектуальные датчики, которые уже обладают возможностью цифрового отображения виброу-

скорений, скоростей и перемещений инструмента [17–20].

Рассмотрим работу этой системы на одном примере точения, в котором обработке подвергался стальной вал (сталь 45) диаметром 50 см. Резание проходило на станке 1К625, режим обработки – со скоростью 124 м/мин, глубиной 1 мм и скоростью подачи 0,11 мм на оборот (рис. 2–4). Результаты измерения виброускорений последовательно интегрировали дважды в программе, написанной в среде Matlab.

Таким образом, все измеренные по каналам  $x$ ,  $y$ ,  $z$  сигналы виброускорений, а также расчетные значения виброскоростей и виброперемеще-

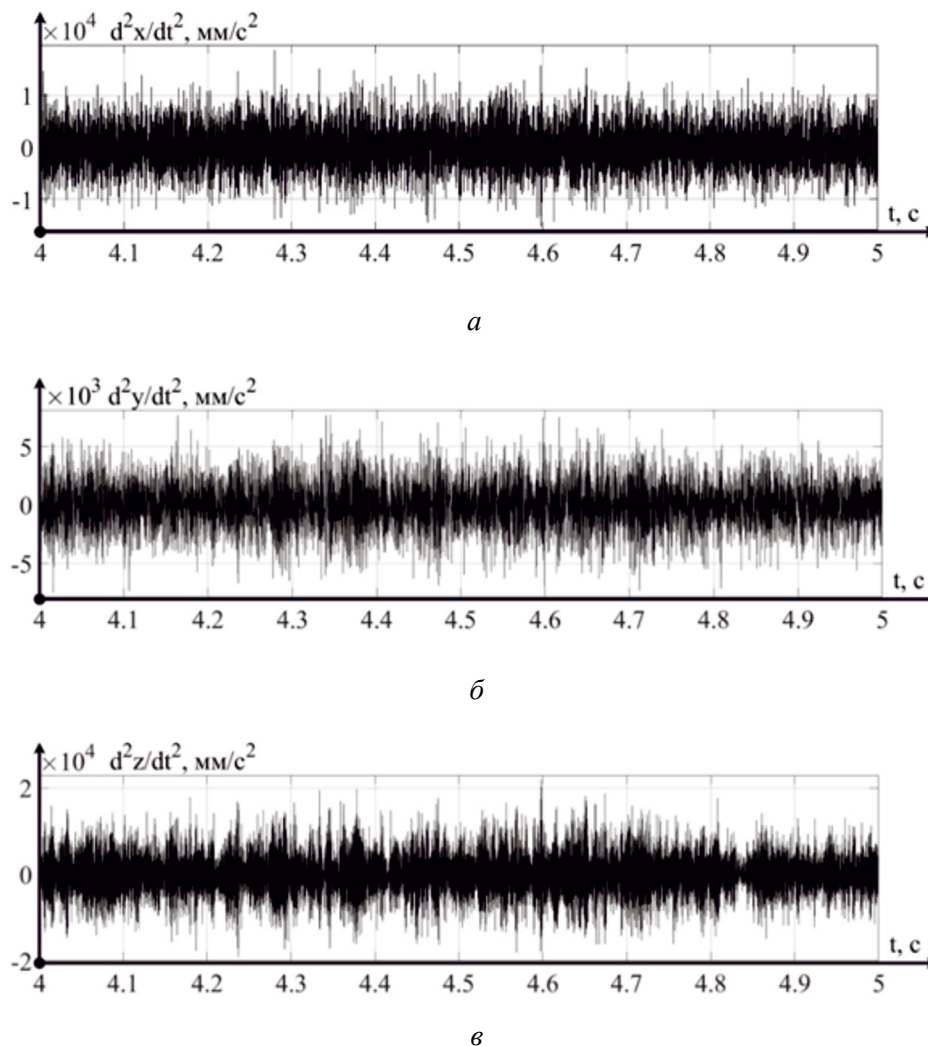


Рис. 2. Сигналы вибрационного ускорения для случая резания на скорости 150 м/мин:

$a$  – в осевом направлении;  $b$  – в радиальном направлении;  $v$  – в тангенциальном направлении

Fig. 2. Vibration acceleration signals for cutting at a speed of 150 m/min:  
 $a$  – in the axial direction;  $b$  – in the radial direction;  $v$  – in the tangential direction



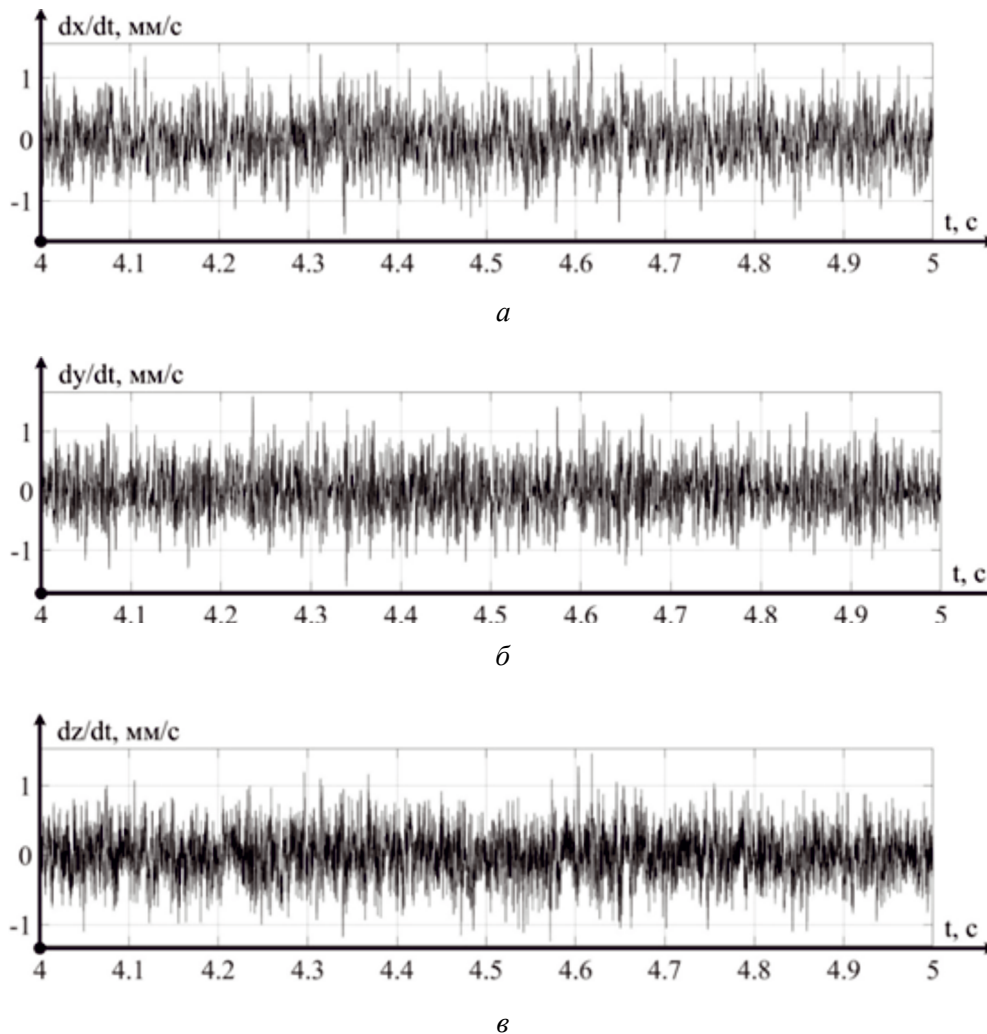


Рис. 3. Сигналы вибрационной скорости для случая резания на скорости 150 м/мин:

$a$  – в осевом направлении;  $b$  – в радиальном направлении;  $v$  – в тангенциальном направлении

Fig. 3. Vibration velocity signals for cutting at a speed of 150 m/min:

$a$  – in the axial direction;  $b$  – in the radial direction;  $v$  – in the tangential direction

ний приведены для одного случая измерений на указанных выше рисунках.

Проверку адекватности работы программы поэтапного интегрирования снятого сигнала виброускорения удобно рассматривать на примере анализа основных несущих частот в спектре снимаемого сигнала, как это сделано на рис. 5.

Как видно из рис. 5, основные несущие частоты остаются на своих местах, однако высокочастотная составляющая вибросигнала существенно ослабляется. Это связано с тем фактом, что при интегрировании использовали операцию суммирования и усреднения, которая совпадает с инерционными свойствами объекта (инструмента).

Реальный износ режущего инструмента может быть обусловлен влиянием случайных факторов, учесть которые в математических моделях цифрового двойника не представляется возможным. Для оценки реального износа режущего инструмента был проведен отдельный эксперимент на станке 1К625, где с указанными ранее параметрами резания производилась обработка вала из стали 45. Для измерения изношенности режущего клина на каждом шаге (всего 8 шагов) оценивался реальный износ режущего клина на задней грани с использованием микроскопа металлографического инвертированного «ЛабoМет-И», вариант 4, с широкоугольными объективами 5/20 с линейным полем зрения

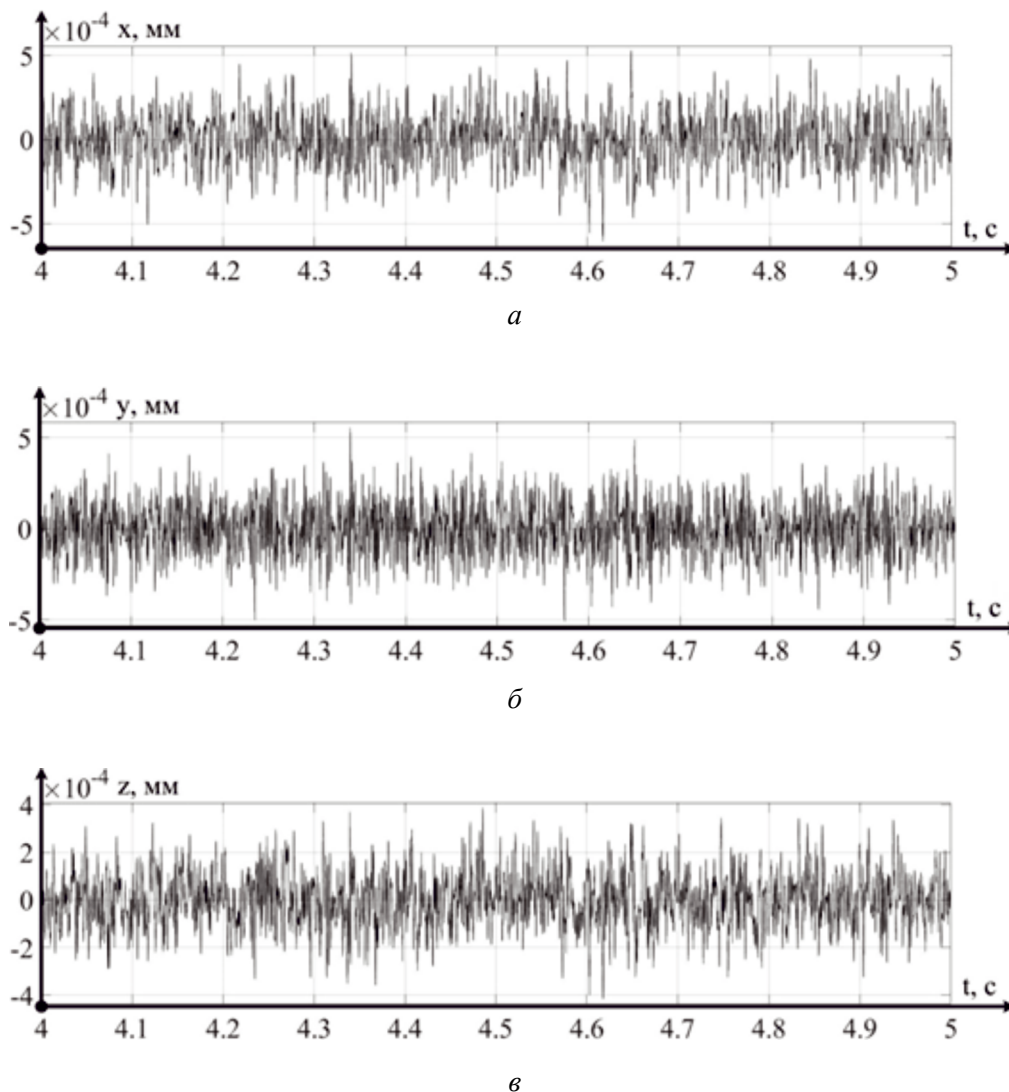


Рис. 4. Сигналы вибрационного перемещения для случая резания на скорости 150 м/мин:

$a$  – в осевом направлении;  $b$  – в радиальном направлении;  $v$  – в тангенциальном направлении

Fig. 4. Vibration displacement signals for cutting at a speed of 150 m/min:  $a$  – in the axial direction;  $b$  – in the radial direction;  $v$  – in the tangential direction

20 мм и с цифровой камерой для микроскопов Usam-1400 с матрицей размером  $1,4 \times 1,4$  мкм. Сам микроскоп и результаты измерений по нему приведены на рис. 6.

Часть результатов измерений величины износа режущего инструмента приведены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, износ по задней грани составил для первого варианта 0,3 мм, а для второго варианта 0,33 мм. Результаты всех измерений удобно представить в виде табл. 1.

Результаты измерений, приведены на рис. 8.

В представленном на рис. 9 варианте развития кривой изношенности режущего инструмента определили три точки измерения характери-

стик, которые использовали в последующем для идентификации виртуальных моделей цифрового двойника.

Рассмотрим вопрос изменения качества получаемой при резании поверхности при нарастании степени изношенности режущего инструмента. Для проведения такой оценки применялся оптический трехмерный микроскоп Contour ELITE и контурограф-профилограф T4HD, которые представлены на рис. 9.

Контроль качества обработанной поверхности, учитывая размеры измерительного оборудования (оптический трехмерный микроскоп Contour ELITE, контурограф-профилограф T4HD),

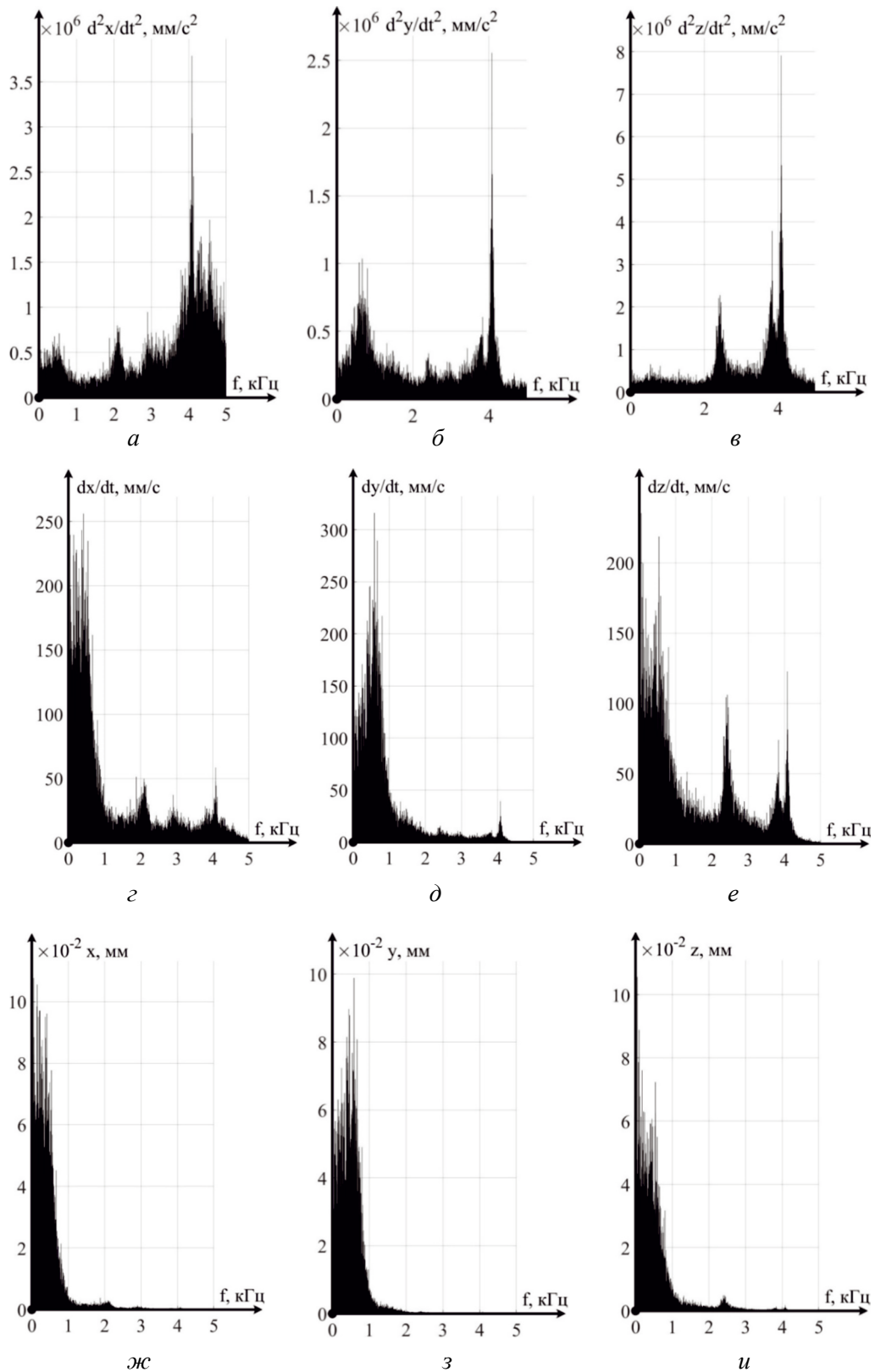


Рис. 5. Спектры мощности сигналов вибрационной активности режущего инструмента для случая резания со скоростью 150 м/мин:

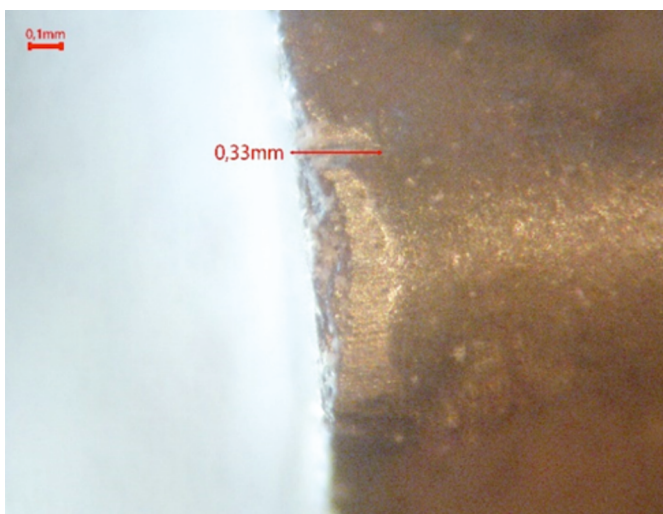
*a, б, в* – в осевом направлении; *г, д, е* – в радиальном направлении; *ж, з, и* – в тангенциальном направлении

Fig. 5. Power spectra of cutting tool vibration activity signals for cutting at a speed of 150 m/min:

*a, б, в* – in the axial direction; *г, д, е* – in the radial direction; *ж, з, и* – in the tangential direction



*Рис. 6.* Внешний вид микроскопа  
*Fig. 6.* The appearance of the microscope



*Рис. 7.* Фотография с измеренным значением изношенности

*Fig. 7.* Photograph with measured wear value

Таблица 1

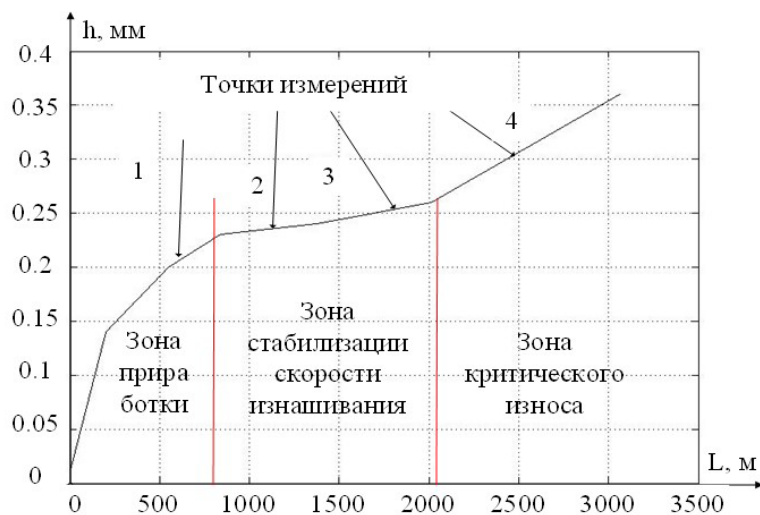
Table 1

**Данные износа инструмента в процессе обработки**  
**Data on tool wear during processing**

Пройденный резцом путь, м	0	202	552	840	1375	2010	3061
Износ режущей пластины, мм	0,01	0,11	0,20	0,23	0,24	0,26	0,36

*Рис. 8.* Измеренная кривая износа режущего инструмента

*Fig. 8.* Measured wear curve of the cutting tool





а



б

Рис. 9. Измерительное оборудование:  
 а – контурограф-профилограф Т4HD; б – микроскоп Contour ELITE

Fig. 9. Measuring device:  
 а – contour profile recorder T4HD; б – microscope Contour ELITE

на самом станке и обрабатываемой детали проводить нельзя. С целью оценки качества потребовалось уменьшить оцениваемую обработанную поверхность, для чего каждый шаг эксперимента, на котором был измерен уровень износа инструмента, должен был иметь свою оцениваемую обработанную поверхность. Учитывая, что в эксперименте обтачивался вал, удобно после каждого прохода инструмента вдоль вала измерять износ инструмента, а следующий этап осуществлять таким образом, чтобы оставалась часть обработанной поверхности, полученной на предыдущем этапе.

После серии такого рода экспериментов, в которых также измерялась силовая реакция и мощность необратимых преобразований (температура в зоне резания), обработанный вал представлял собой конус с дискретно уменьшающимся радиусом (рис. 10).

После обработки на токарном станке этот вал можно разрезать на небольшие части (рис. 11), каждая из которых характеризует качество обработки для оцененного уровня износа инструмента.

Полученные части вала уже позволили получить оценку качества обработки поверхно-



Рис. 10. Деталь после окончания эксперимента  
 Fig. 10. Part after the experiment is complete



Рис. 11. Подготовленная к измерениям деталь  
 Fig. 11. The part prepared for measurements

сти точением с различной степенью износа инструмента как на контурографе-профилографе Т4HD, так и на оптическом трехмерном микроскопе Contour ELITE.

Результаты оценки данных, полученных с помощью оптического микроскопа Contour ELITE, – изменение параметров  $Ra$  и  $Rz$  (мкм) по шагам эксперимента, представлены в табл. 2.

Как видно из данных, приведенных в табл. 2, единой и стройной картины изменения параметров  $Ra$  и  $Rz$  не наблюдается. Можно заметить значительный рост среднего арифметического отклонения профиля от средней линии вдоль оси  $y$  с некоторыми колебаниями на пятом шаге, но изменения  $Ra$  и  $Rz$  по оси  $x$  незначительны, более того – в целом оба показателя вдоль этой оси даже уменьшаются.

В представленном на рис. 12 случае, полученном во второй точке измерений, хорошо видно, что изменения профиля детали вдоль линии подачи (ось  $y$ ) обусловлены именно величиной шага перемещения инструмента вдоль линии подачи. При этом если скорость подачи уменьшить, то и параметры  $Ra$  и  $Rz$  по оси  $y$  упадут, а если увеличить, то они вырастут. Для наглядности проиллюстрируем

обработанную поверхность, полученную с помощью микроскопа Contour ELITE, во второй точке эксперимента в виде 3D-модели (рис. 13).

Для иллюстрации вида поверхности при износе, близком к катастрофическому, рассмотрим фотографию обработанной поверхности, полученной с помощью микроскопа Contour ELITE, в четвертой точке эксперимента (рис. 14).

Как видно из рис. 14, качество обработанной поверхности на этом шаге эксперимента существенно ухудшилось, что также видно из показателя  $Ra$  по оси  $y$ , который для этого случая максимален (см. табл. 2). Среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии вдоль оси  $y$  не самое большое, что объясняется особенностью расположения оси измерения, которая просто не попадает на участок с наибольшими перепадами микропрофиля детали. Для наглядности проиллюстрируем последний случай 3D-моделью изображения поверхности (рис. 15).

Таблица 2

Table 2

**Результаты измерения показателей шероховатости Contour ELITE**  
**Results of measuring Contour ELITE roughness indicators**

Параметр	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4
$Rz$ по оси $y$ (мкм)	26,186	21,347	22,898	18,152
$Ra$ по оси $y$ (мкм)	2,41	1,493	1,794	2,975

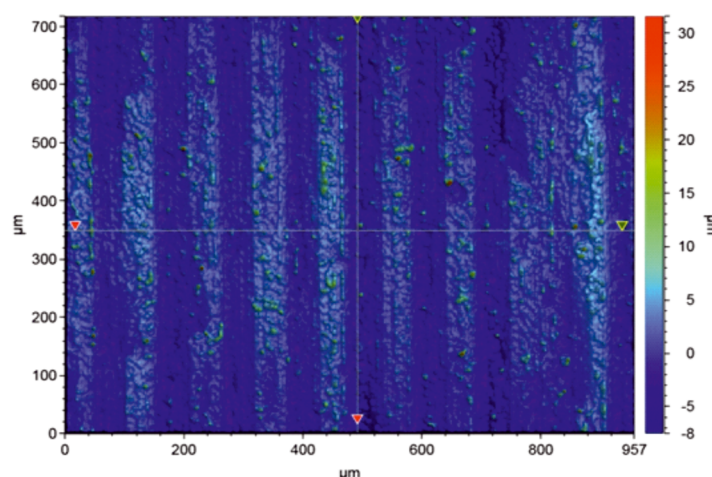
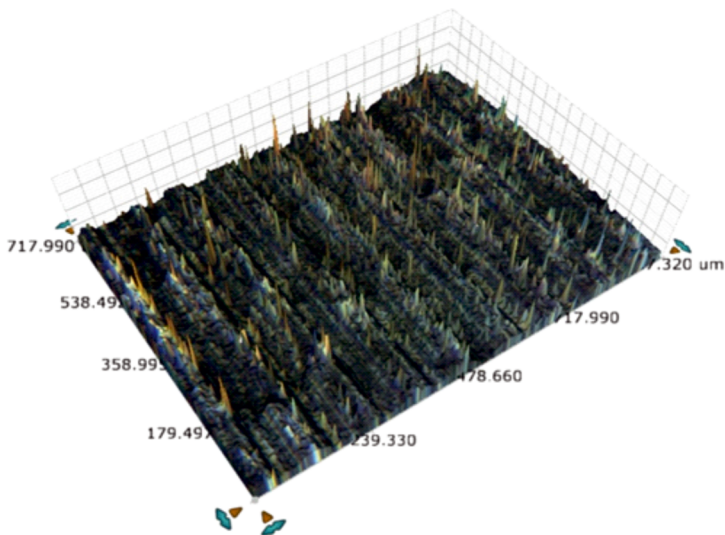


Рис. 12. Фотография обработанной поверхности, полученная с помощью микроскопа Contour ELITE, после первого шага эксперимента

Fig. 12. Photograph of the machined surface, obtained with a microscope Contour ELITE, after the first step of the experiment



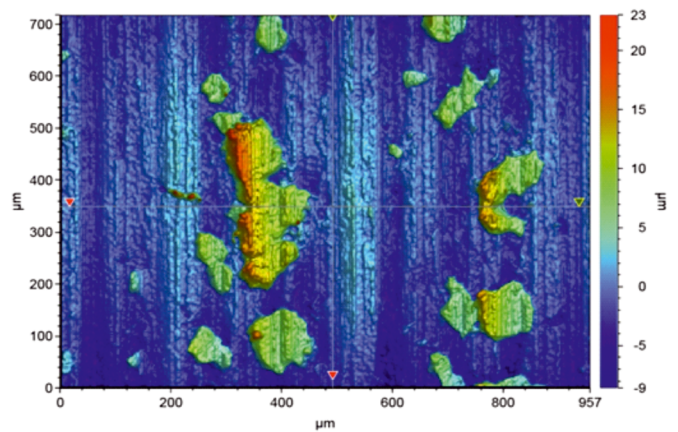


*Рис. 13.* 3D-модель поверхности после первого шага эксперимента

*Fig. 13.* 3D model of the surface after the first step of the experiment

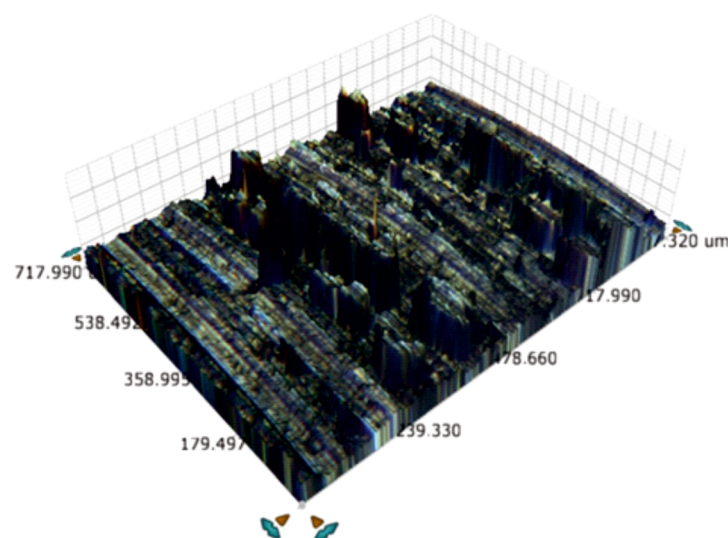
*Рис. 14.* Фотография обработанной поверхности, полученная с помощью микроскопа Contour ELITE, после шестого шага эксперимента

*Fig. 14.* Photograph of the machined surface, obtained with a microscope *Contour ELITE*, after the sixth step of the experiment



*Рис. 15.* 3D-модель поверхности после шестого шага эксперимента

*Fig. 15.* 3D model of the surface after the sixth step of the experiment

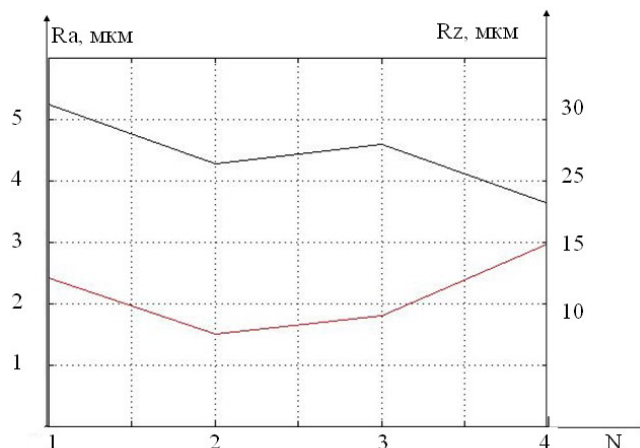


3D-модель, представленная на рис. 15, в сравнении со случаем на рис. 13 позволяет говорить о существенном ухудшении качества обработанной поверхности. График, обобщающий проведенные эксперименты, приведен на рис. 16.

Как видно из рис. 16, наиболее информативным параметром здесь выступает показатель  $Ra$ . В целом данные, полученные с помощью оптического трехмерного микроскопа Contour ELITE, носят качественный характер, особенно их

Рис. 16. Результаты измерения качества поверхности в четырех точках

Fig. 16. Results of surface quality measurement at 4 points



3D-модели, и не позволяют получить четкую количественную картину изменения шероховатости обработанной поверхности. Для получения количественной оценки качества обработанной поверхности нами был использован контурграф-профилограф Т4НД, протоколы его изме-

рений по одному шагу эксперимента представлены на рис. 17. Отметим, что оценка параметров шероховатости проводилась в направлении, ортогональном подаче, т. е. вдоль оси у.

Все результаты измерений показателей шероховатости удобно обобщить в виде табл. 3.

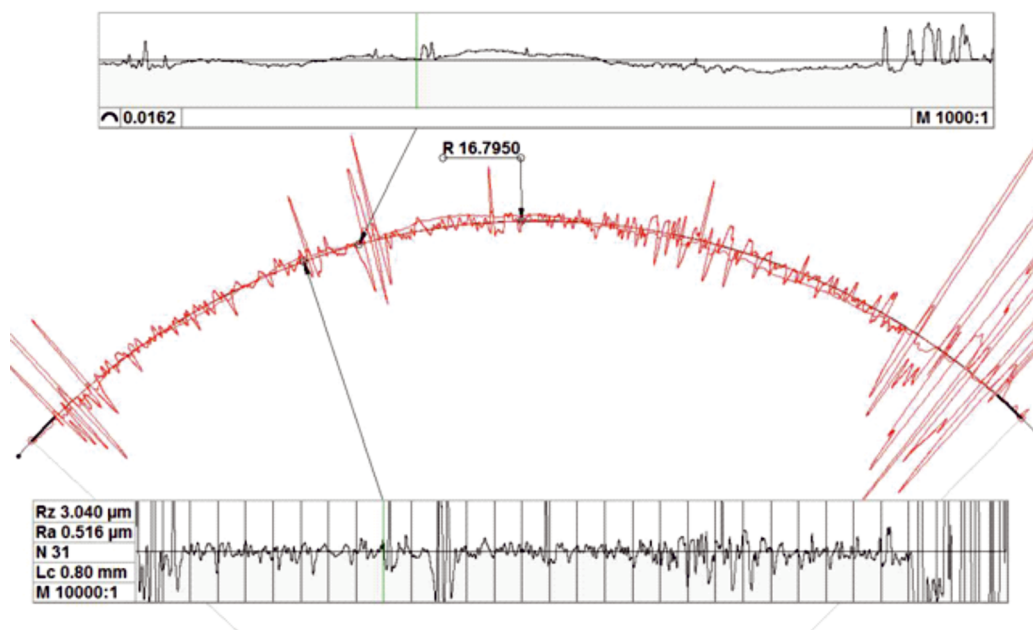


Рис. 17. Пример протокола, снятого на контурграф-профилографе Т4НД

Fig. 17. Example of the protocol captured on the contour profile recorder T4HD

Таблица 3

Table 3

**Показатели качества по протоколам Т4НД**

**Quality indicators for T4HD protocols**

Путь (м)	0	202	552	840	1375	2010	3061
Rz (мкм)	4,704	3,040	3,272	3,396	3,632	5,92	9,274
Ra (мкм)	0,609	0,516	0,527	0,532	0,602	0,969	1,69

Как видно из табл. 3, оба параметра шероховатости растут вместе с ростом износа, причем со второго шага эксперимента наблюдается некоторая стабилизация, а после шестого шага – резкий рост шероховатости. График изменения шероховатости во времени представлен на рис. 18.

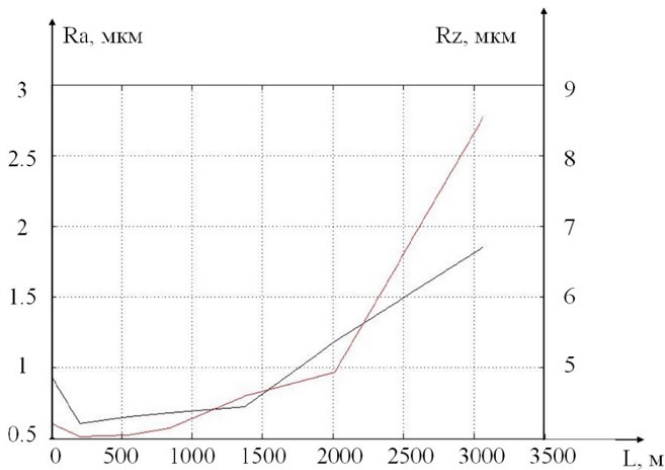


Рис. 18. Изменение показателей шероховатости по пути резания

Fig. 18. Change in roughness indicators along the cutting path

Как видно из рис. 18, при увеличении износа начинают расти показатели шероховатости, а на начальном этапе зависимость  $Ra$  и  $Rz$  от износа носит падающий характер, что связано с влиянием приработки режущего инструмента. Чем ближе к точке катастрофического износа, тем сильнее рост шероховатости, и зависимость уже нелинейная.

### Виртуальные модели цифрового двойника

Синтез виртуальных моделей цифрового двойника начнем с построения кривой изнашиваемости режущего инструмента на основе использования оператора Вольтерры второго рода [20]. Здесь надо учитывать реальный путь, пройденный инструментом, в том числе из-за вибрационных перемещений вершины инструмента. Этот путь рассчитывается с учетом результатов обработки данных, получаемых системой вибромониторинга. То есть путь, пройденный инструментом, будет вычисляться как сумма расчетного пути  $L_0$ , определяемого скоростью резания и подачи, а также виртуального пути, пройденного инструментом:

$$L_v = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (1)$$

Результаты моделирования систем уравнений цифрового двойника позволяют рассчитать прогнозируемое развитие величины изношенности режущего инструмента. При моделировании необходимо учитывать тот факт, что причина эволюционных преобразований связана с мощностью и работой сил резания, т. е. с энергией необратимых преобразований в зоне обработки. Для моделирования эволюционных изменений в этом случае необходимо использовать интегральные операторы Вольтерры второго рода, имеющие следующую структуру [20]:

$$h_3 = k \int_0^A w(t - \xi) N(\xi) d\xi, \quad (2)$$

где  $w(t - \xi)$  – ядро интегрального оператора;  $N(\xi)$  – фазовая траектория мощности необратимых преобразований по совершенной работе;  $A$  – работа сил резания.

Однако, как это следует из структуры оператора, износ зависит от текущей необратимых преобразований и ее предыстории, которая учитывается ядром интегрального оператора. Естественно положить ядро интегрального оператора в следующем виде:

$$h_3 = \int_0^A \left( \beta_1 e^{\alpha_1(\xi - A)} + \beta_2 e^{\alpha_2(A - \xi)} \right) N(\xi) d\xi, \quad (3)$$

где  $(\beta_1 e^{\alpha_1(\xi - A)} + \beta_2 e^{\alpha_2(A - \xi)})$  – сумма ядер интегрального оператора, при этом  $\beta_1 e^{\alpha_1(\xi - A)}$  – ядро, определяющее процессы приработки инструмента, а  $\beta_2 e^{\alpha_2(A - \xi)}$  – ядро, определяющее процессы износа;  $\beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2$  – параметры, подлежащие идентификации;  $N$  – мощность необратимых преобразований;  $A$  – работа.

Мощность необратимых преобразований определим как  $N = R \sqrt{V_{\text{под}}^2 + V^2}$ , где  $R$  – сила резания. Работу определим в виде следующего интеграла:  $A = \int_0^t N(t) dt$ .

Для случая, когда  $N = N_0 = \text{const}$ , формулу (2) удобно представить в виде

$$h_3 = N_0 \int_0^A \left( e^{\alpha_1(\xi - A)} + e^{\alpha_2(A - \xi)} \right) d\xi. \quad (4)$$



Решение для уравнения (4) будет следующим:

$$h_3 = N_0 \frac{1}{\alpha_1} (1 - e^{-\alpha_1 A}) + N_0 \frac{1}{\alpha_2} (e^{\alpha_2 A} - 1). \quad (5)$$

Если  $N(t)$  не равно  $N_0 = \text{const}$ , и приняв допущение, что  $N_0, N_1, \dots, N_{n-1}$  ввиду малости величины  $\Delta A = A_k - A_{k-1}$  – величины, близкие к постоянным, то получим следующую приближенную сумму, описывающую интегральный оператор (5):

$$\begin{aligned} h_3 = & \frac{\beta_1}{\alpha_1} \left[ -N_0 e^{-\alpha_1 A} - (N_1 - N_0) e^{\alpha_1 (A_1 - A)} - \right. \\ & \left. - (N_2 - N_1) e^{\alpha_1 (A_2 - A)} - \dots - \right. \\ & \left. - (N_{n-1} - N_{n-2}) e^{\alpha_1 (A_{n-1} - A)} + N_{n-1} \right] + \\ & + \frac{\beta_2}{\alpha_2} \left[ N_0 e^{\alpha_2 A} + (N_1 - N_0) e^{-\alpha_2 (A - A_1)} + \right. \\ & \left. + (N_2 - N_1) e^{-\alpha_2 (A - A_2)} + \dots + \right. \\ & \left. + (N_{n-1} - N_{n-2}) e^{-\alpha_2 (A - A_{n-1})} - N_{n-1} \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

Оговорим здесь, что  $\beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2$  – параметры, подлежащие идентификации, – в модели расчета износа были определены по результатам предварительных экспериментов, проведенных нами ранее. График развития изношенности режущего инструмента по задней грани по расчетным данным приведен на рис. 19.

Сравнительный анализ рис. 8 и 19 показывает, что зона критического износа на рис. 8 начинается раньше, чем на рис. 19. Такое расхождение обусловлено процессом стружкообразования: при обработке мы сознательно допустили случай резания с сильными вибрациями из-за накопления сливной стружки. В результате этих вибраций произошли изменения в контакте задней грани инструмента и обрабатываемой детали, что привело к появлению новых элементов в зоне износа.

Как видно из рис. 8 и 19, кривая развития изношенности режущего инструмента по пройденному пути делится на три области:

- область приработки, где формируется предварительный износ режущего инструмента;
- область стабилизации изношенности, когда величина износа нарастает достаточно медленно;
- область формирования критического износа, при котором величина изношенности режущего инструмента нарастает очень быстро.

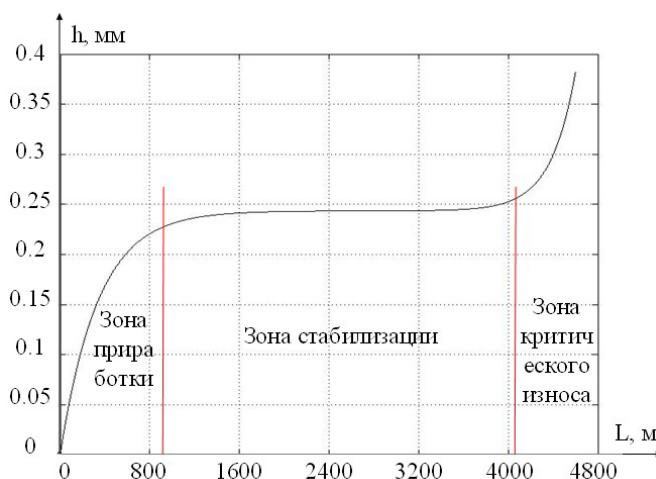


Рис. 19. Рассчитанная кривая износа режущего инструмента

Fig. 19. Calculated cutting tool wear curve

В качестве базовой виртуальной модели цифрового двойника примем систему нелинейных уравнений. Зависимость силы резания от температурно-скоростного коэффициента резания будем интерпретировать в виде убывающей экспоненциальной зависимости:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \mu e^{-\alpha_\mu \left( V_c \frac{dz}{dt} \right)} \right), \quad (7)$$

где  $\rho_0$  – наименьшее значение  $\rho$  (коэффициента, зависящего от температуры и характеризующего давление стружки на переднюю грань режущего клина);  $\mu$  – коэффициент, показывающий кривизну экспоненциального уменьшения  $\rho$  при росте температуры контакта;  $\alpha_\mu$  – коэффициент крутизны характеристики  $\rho$ ;  $V_c - dz/dt$  – реальная скорость резания.

С учетом формулы (7) сила резания может быть представлена в виде следующего выражения:

$$\begin{aligned} F = & \rho_0 \left( 1 + \mu e^{-\alpha_1 \left( V_c \frac{dz}{dt} \right)} \right) \times \\ & \times (a_p - y) \int_{t-T_v}^t \left( V_f - \frac{dx}{dt} \right) dt, \quad (8) \end{aligned}$$

где  $(a_p - y)$  – реальная глубина резания;

$\int_{t-T_v}^t \left( V_f - \frac{dx}{dt} \right) dt$  – реальная подача.

Выталкивающее усилие, исходящее из зоны резания, в зависимости от износа инструмента вдоль задней поверхности и в зависимости от температурного расширения обрабатываемого материала мы рассматриваем как

$$F_h = (\sigma_0 + k_Q^F Q_h) h_3 (a_p - y) e^{-K_h x}, \quad (9)$$

где  $\sigma_0$  – предел прочности обрабатываемого металла при сжатии [кг/мм<sup>2</sup>], зависящий от температуры контакта между задней поверхностью инструмента и обрабатываемой деталью  $Q_h$ , измеряемой в градусах Цельсия;  $K_h$  – коэффициент, характеризующий нелинейное увеличение толкающего усилия при сближении задней поверхности инструмента и обрабатываемой детали.

Через главный угол в плане  $\varphi$  выталкивающую силу можно разложить по осям деформации  $x$  и  $y$  следующим образом:

$$\begin{cases} F_h^{(x)} = \cos \varphi F_h; \\ F_h^{(y)} = \sin \varphi F_h. \end{cases} \quad (10)$$

Составляющая силы на задней грани в направлении координаты  $z$ , интерпретируемая как сила трения:

$$F_h^{(z)} = k_t F_h, \quad (11)$$

где  $k_t$  – коэффициент трения, интерпретируется как

$$k_t = k_{0t} + \Delta k_t \left[ e^{-K_{f1} Q_h} + e^{K_{f2} Q_h} \right] / 2, \quad (12)$$

где  $k_{0t}$  – минимальное значение коэффициента трения;  $\Delta k_t$  – величина приращения коэффициента трения при изменении температуры в зоне контакта;  $K_{f1}$  и  $K_{f2}$  – коэффициенты, определяющие крутизну падения и рост коэффициента трения характеристик.

Общее выражение, описывающее разложенную по осям деформации силовую реакцию, примет следующий вид:

$$\begin{cases} F_f = \chi_1 F + F_h^{(x)}; \\ F_p = \chi_2 F + F_h^{(y)}; \\ F_c = \chi_3 F + F_h^{(z)}, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\chi_i$  является коэффициентом разложения силы резания на  $i$ -ю ось деформации инструмента.

Модель деформационных перемещений вершины инструмента будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + h_{11} \frac{dx}{dt} + h_{12} \frac{dy}{dt} + h_{13} \frac{dz}{dt} + \\ + c_{11} x + c_{12} y + c_{13} z = F_f; \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} + h_{21} \frac{dx}{dt} + h_{22} \frac{dy}{dt} + h_{23} \frac{dz}{dt} + \\ + c_{21} x + c_{22} y + c_{23} z = F_p; \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} + h_{31} \frac{dx}{dt} + h_{32} \frac{dy}{dt} + h_{33} \frac{dz}{dt} + \\ + c_{31} x + c_{32} y + c_{33} z = F_c, \end{cases} \quad (14)$$

где  $m$  [кг · с<sup>2</sup>/мм],  $h$  [кг · с/мм],  $c$  [кг/мм] – матрицы коэффициентов инерции, диссипации и жесткости соответственно.

Дифференциальное уравнение, описывающее передачу температуры через заднюю поверхность инструмента при предыдущем вращении шпинделя в текущую зону контакта инструмента и обрабатываемой детали, имеет следующий вид:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 Q_h}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dQ_h}{dt} + Q_h = kN, \quad (15)$$

где  $T_1 = \frac{\lambda}{\alpha_1 V_c}$ ,  $T_2 = \frac{h_3}{\alpha_2}$  – постоянные времени;

$k = \frac{k_Q \lambda h_3}{\alpha_1 \alpha_2 V_c}$  – коэффициент передачи;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  –

идентифицируемые безразмерные параметры масштабирования интегрального оператора;  $\lambda$  – коэффициент температуропроводности;  $k_Q$  – коэффициент, характеризующий преобразование мощности необратимых преобразований в температуру;  $N = F_c (t - T_v) \left( V_c - \frac{dz(t - T_v)}{dt} \right) =$

$\left( \chi_3 F (t - T_v) + F_h^{(z)} (t - T_v) \right) \left( V - \frac{dz(t - T_v)}{dt} \right) =$

мощность необратимых преобразований.

Таким образом, система уравнений (3–15) и будет виртуальной математической моделью цифрового двойника процесса обработки металлов на металлорежущем станке.

## Результаты и их обсуждение

Наиболее перспективным направлением с точки зрения параметрической идентификации

виртуальных моделей цифрового двойника является использование данных, полученных системой вибромониторинга [20]. Здесь из всей совокупности данных мы предлагаем опираться на так называемые эллипсы рассеивания, которые можно получить непосредственно из снятого сигнала виброускорения.

Рассмотрим эллипсы рассеивания для случаев, представленных на рис. 8, идентифицировав по этим данным параметры модели цифрового двойника. Результаты сопоставления этих двух вариантов расчета эллипсов рассеивания для одинаковых значений изношенности режущего клина приведены на рис. 20.

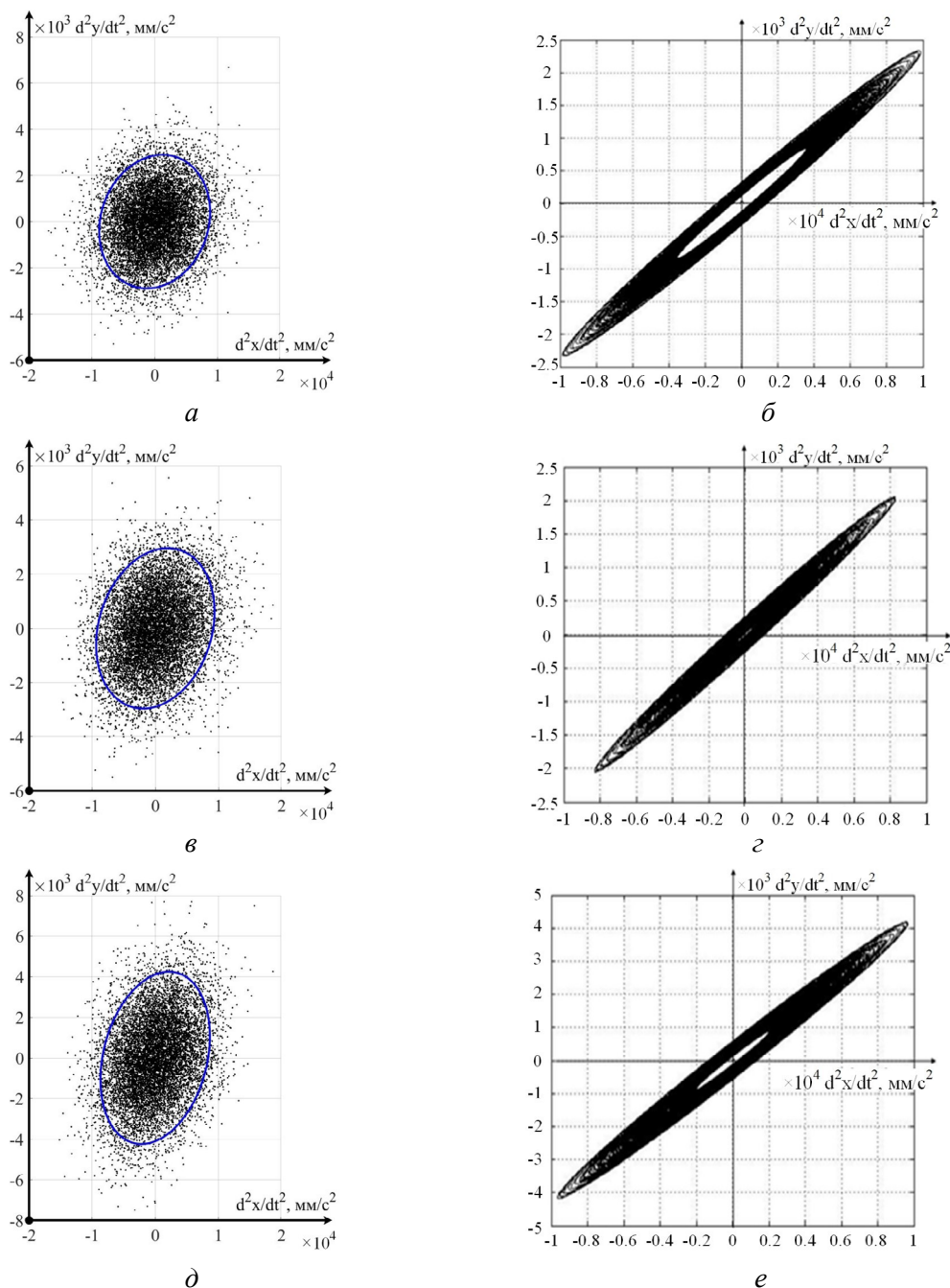


Рис. 20. Эллипсы рассеивания «розы» вибраций:

$a, б$  – в плоскости  $X/Y$  с величиной изношенности  $h = 0,24$  мм;  $в, з$  – в плоскости  $X/Y$  с величиной изношенности  $h = 0,27$  мм;  $д, е$  – в плоскости  $X/Y$  и величиной изношенности  $h = 0,32$  мм

Fig. 20. Ellipses of dispersion of the “rose” of vibrations:

$a, б$  – in the  $X/Y$  plane with a wear value of  $h = 0.24$  mm;  $в, з$  – in the  $X/Y$  plane with a wear value of  $h = 0.27$  mm;  $д, е$  – in the  $X/Y$  plane and a wear and tear  $h = 0.32$  mm



Как видно из рис. 20, размах осей эллипсов рассеивания совпадает почти точно, но рассеивание вибраций для реального станка существенно выше. Это объясняется тем, что на реальном станке присутствует вибрационная активность не только от процесса резания, но и от других несущих систем. Задача моделирования всех несущих систем вместе с системой резания пока нами не решалась.

Для оценки качества получаемой при резании поверхности анализу подвергалась только координата вибрационной активности режущего инструмента в направлении оси  $y$ . Такой выбор связан с тем, что вибрации вершины режущего инструмента в направлении осей  $z$  и  $x$  будут срезаться при продольной токарной обработке, которая взята за основу при моделировании системы резания. Однако при других вариантах обработки металлов резанием можно подвергать анализу и вибрационный сигнал в других направлениях. Для анализа качества получаемой при резании поверхности нам потребовалось обработать данные таким образом, чтобы из них была удалена постоянная составляющая и учитывались лишь вибрации в некотором заданном временном диапазоне. Для этого нами была составлена программа, позво-

ляющая анализировать качество получаемой при резании поверхности как в системе цифрового двойника, так и по данным, снимаемым системой вибромониторинга. В результате получился достаточно мощный вычислительный инструмент, который в последующем можно будет использовать для параметрической идентификации виртуальных моделей цифрового двойника на реальных металлообрабатывающих станках.

Результаты моделирования деформационного движения в направлении оси  $y$ , а также точки, по которым оценивалась шероховатость поверхности по показателю  $Ra$ , приведены на рис. 21–23. На рис. 21 показан вариант расчета качества обработки по показателю  $Ra$  для случая резания с износом режущего инструмента по задней грани в 0,11 мм.

Как видно из рис. 21, расчет проводился по данным, полученным из модели, но не с первой секунды, т. е. не с начала моделирования, а с того времени, когда процесс резания устанавливается. В полученный выборке мы брали в расчет только минимальные и максимальные значения и использовали их для расчета показателя шероховатости, который для рассматриваемого случая будет равен 1,26 мкм.

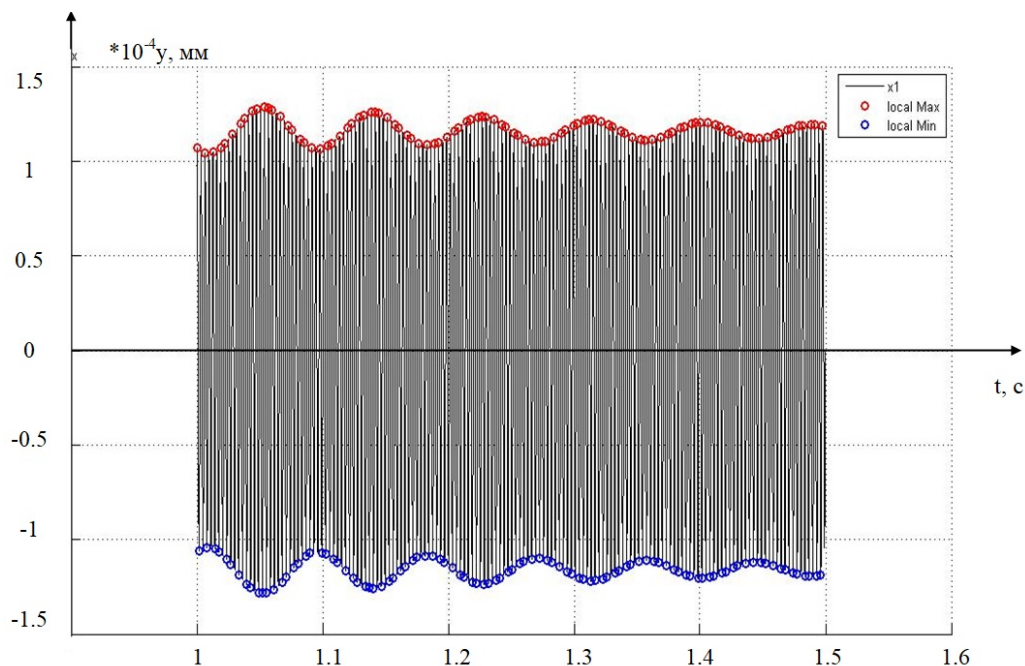


Рис. 21. Пример расчета показателя качества для случая резания с износом в 0,11 мм

Fig. 21. Example of calculating the quality index for the case of cutting with a wear of 0.11 mm

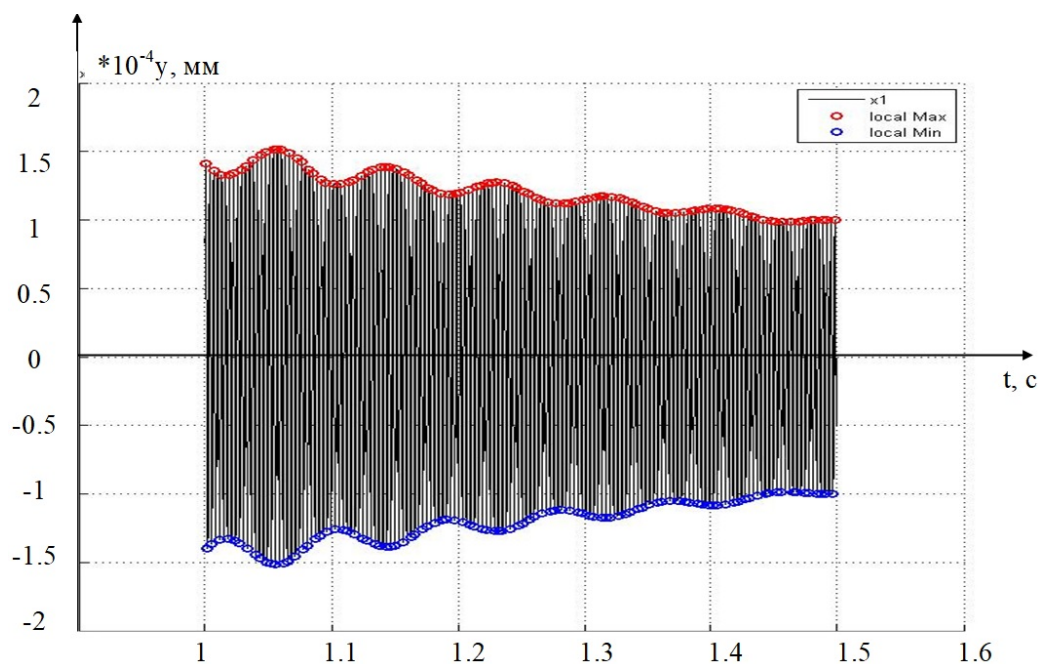


Рис. 22. Пример расчета показателя качества для случая резания с износом в 0,29 мм

Fig. 22. Example of calculating the quality index for the case of cutting with a wear of 0.29 mm

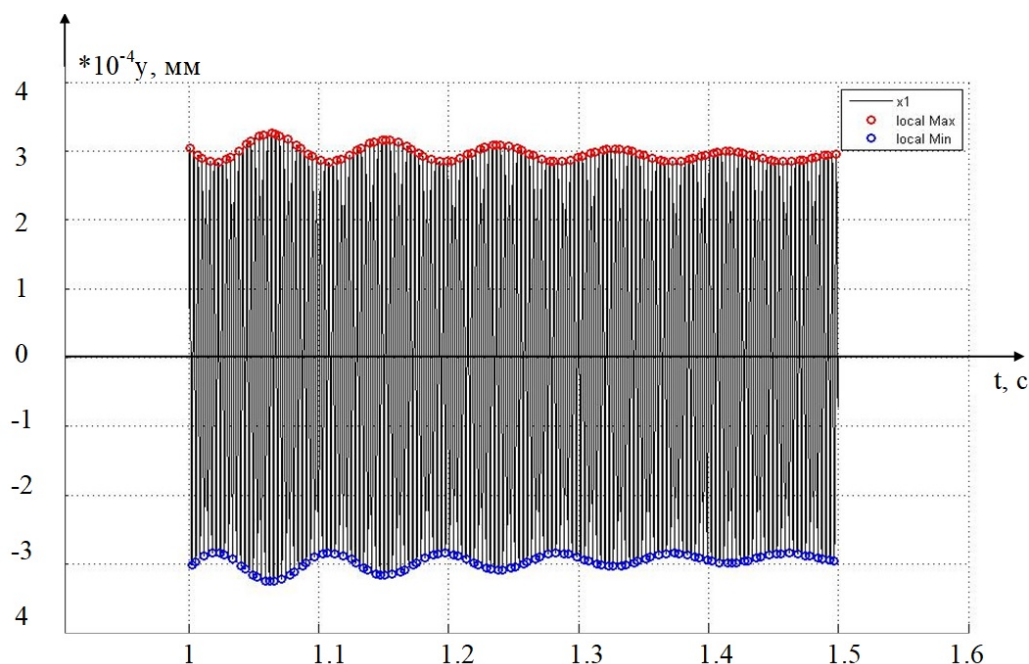


Рис. 23. Пример расчета показателя качества при  $h = 0,314$  мм

Fig. 23. Example of calculating the quality index at  $h = 0.314$  mm

Результаты моделирования координаты, отражающей деформационные движения вершины режущего инструмента в радиальном направлении с изношенностью режущего инструмента по задней грани в 0,29 мм, приведены на рис. 22.

Как видно из рис. 22, амплитуда деформационных движений уже значительно возрастает, и для рассматриваемого случая резания расчетное значение  $Ra$  достигает величины в 2,2 мкм, что существенно превышает предыдущие расчетные значения. Этот скачок обусловлен переходом

кривой изношенности из области стабилизации в область критического износа.

Рассмотрим еще один вариант резания, который характеризуется изношенностью режущего инструмента по задней грани на величину в 0,344 мм. Результаты моделирования координаты  $y$  для этого случая приведены на рис. 23.

Сравнение рис. 22 и 23 показывает еще более увеличившуюся амплитуду вибраций режущего инструмента, в том числе и в радиальном направлении. Величина расчетного показателя качества для рассматриваемого случая составила 4,17 мкм – это очень большое значение для токарной обработки металлов резанием, и оно может рассматриваться только как вариант предчистовой обработки.

Всего нами было проведено девять экспериментов для построения кривой изменения качества получаемой при резании поверхности. Для наглядности рассмотрим оба варианта изменения качества, а также вариант экспериментальной оценки и вариант модельной оценки. Для этого изучим изменение показателя  $Ra$  для случая экспериментальных данных, опираясь на интерпретацию этого показателя с использованием данных, представленных на рис. 8 и 19 (табл. 4).

Интерпретация данных табл. 4 в виде совместного графика двух характеристик приведен на рис. 24.

Как видно из рис. 24, в рассматриваемом случае сопоставления результатов моделирования

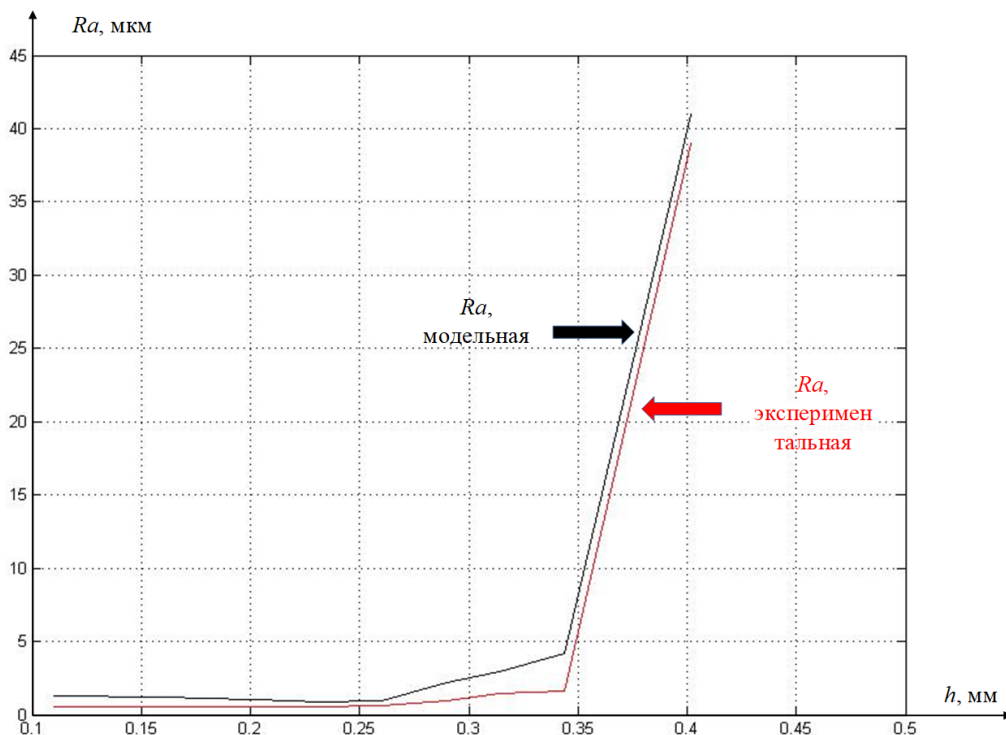
Таблица 4

Table 4

**Значения показателя качества  $Ra$  (экспериментальные и модельные)**

**Values of the quality indicator  $Ra$  (experimental and modeled)**

Износ (мм)	0,11	0,16	0,22	0,23	0,26	0,29	0,314	0,344	0,402
$Ra$ (мкм) (модельный)	1,26	1,22	0,96	0,84	0,98	2,2	2,9	4,17	41
$Ra$ (мкм) (экспериментальный)	0,516	0,52	0,53	0,532	0,602	0,97	1,45	1,6	39



**Рис. 24.** Зависимость качества получаемой при резании поверхности от изношенности режущего инструмента

**Fig. 24.** Dependence of the surface quality obtained during cutting on the cutting tool wear

и результатов, полученных экспериментальным путем, обе характеристики обладают очень высокой степенью близости. Есть небольшое расхождение в области средних значений величины, характеризующей изношенность режущего инструмента по задней грани, но в целом характеристики почти идентичны.

Здесь надо отметить, что и модельная, и экспериментальная характеристика показывает стабилизацию и даже некоторое снижение показателя  $Ra$  в зоне стабилизации кривой изнашиваемости режущего инструмента (см. рис. 24).

Технология цифрового двойника опирается на широкое использование виртуальных математических моделей, численное моделирование которых может предсказывать развитие тех или иных процессов в технических системах. Важность такого прогноза во многом зависит от точности используемых при моделировании моделей, которые, в свою очередь, требуют постоянной параметрической подстройки параметров. Прежде всего такая подстройка связана с нарастающим износом режущего инструмента, который тоже должен моделироваться в системе цифрового двойника. Рассмотренный же нами частный случай резания позволяет сделать вывод только о возможности прогнозирования качества получаемой при резании поверхности по расчетам, проводимым на виртуальных моделях цифрового двойника.

В целом поставленная в начале статьи цель исследования была достигнута в основном за счет введения в модель блока расчета нарастания изношенности режущего инструмента, а также за счет параметрической идентификации остальных параметров модели. Исследования показали, что точность прогнозирования зависимости качества получаемой при резании поверхности от изношенности режущего инструмента для рассматриваемого частного случая достаточно высока. Наибольшие расхождения между моделируемой и экспериментальной характеристикой наблюдаются в области от 0,25 до 0,36 мм износа режущего инструмента. Эта область характеризуется наибольшим отклонением экспериментальной и моделируемой кривых нарастания изношенности режущего инструмента (см. рис. 8 и 19). В приведенном нами примере кривая изношенности режущего инструмента по пути резания вела себя классически, и на ней

можно было отметить три участка износа, так же как на моделируемой характеристике. Однако это частный случай, и износ режущего инструмента может нарастать резко, скачком, в силу различных случайных факторов. Поэтому необходимо встраивать в систему идентификации параметров виртуальных моделей цифровых двойников интеллектуальную подсистему распознавания подобных нестандартных случаев развития износа режущего инструмента.

## Заключение

В работе рассматривались вопросы оценки взаимосвязанности изнашиваемости режущего инструмента и качества получаемых при резании поверхностей. Качество получаемых при резании поверхностей оценивалось по показателю  $Ra$ , который оказался наиболее информативным для рассматриваемого случая – как для обработки экспериментальных данных, так и для моделирования. Учитывая зависимости, представленные на рис. 24, можно утверждать, что прогнозирование качества получаемой при резании поверхности деталей по результатам моделирования систем уравнений – вполне достижимая задача. Результаты исследований показали, что повышение качества прогнозирования получаемой при резании металлов поверхности напрямую зависит от точности моделирования кривой нарастания изнашиваемости режущего инструмента.

Некоторое расхождение результатов в целом допустимо и в части реализации системы цифрового двойника, а в части последующего уточнения параметров моделей возможно использование интеллектуальных алгоритмов распознавания, которые можно настроить на разницу между прогнозируемым и реальным значением износа режущего инструмента.

## Список литературы

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с. – ISBN 5-217-02976-5.
2. Гимадеев М.П., Ли А.А. Анализ автоматизированных систем определения параметров шероховатости поверхности на основе динамического мониторинга // Advanced Engineering Research. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 116–129. – DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129.



3. Интеллектуальная система мониторинга и управления техническим состоянием мехатронных технологических объектов / А.К. Тугенгольд, Е.А. Лукьянов, Р.Н. Волошин, В.Ф. Бонилья // Вестник Донского государственного технического университета. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 188–195. – DOI: 10.23947/1992-5980-2020-20-2-188-195.
4. *Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E.* Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 112. – P. 202–213. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.037.
5. Virtual process systems for part machining operations / Y. Altintas, P. Kersting, D. Biermann, E. Budak, B. Denkena, I. Lazoglu // CIRP Annals. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 585–605. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.
6. *Altintas Y.* Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. – Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2012. – 366 p.
7. *Altintas Y., Budak E.* Analytical prediction of stability lobes in milling // CIRP Annals. – 1995. – Vol. 44 (1). – P. 357–362. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.
8. *Kabaldin Y.G., Shatagin D.A.* Artificial intelligence and cyberphysical machining systems in digital production // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40 (4). – P. 292–296. – DOI: 10.3103/S1068798X20040115.
9. *Чигиринский Ю.Л., Ингеманссон А.Р.* Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 9 (147). – С. 39–48. – DOI: 10.30987/2223-4608-2023-39-48.
10. *Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E.* Process control synergetics for metal-cutting machines // Journal of Vibroengineering. – 2022. – Vol. 24 (1). – P. 177–189. – DOI: 10.21595/jve.2021.22087.
11. Digital twin-assisted intelligent fault diagnosis for bearings / S. Gong, S. Li, Y. Zhang, L. Zhou, M. Xia // Measurement Science and Technology. – 2024. – Vol. 35 (10). – P. 106128. – DOI: 10.1088/1361-6501/ad5f4c.
12. Digital twin-driven partial domain adaptation network for intelligent fault diagnosis of rolling bearing / Y. Zhang, J.C. Ji., Ren Z., Q. Ni, F. Gu, K. Feng, K. Yu, J. Ge, Z. Lei, Z. Liu // Reliability Engineering & System Safety. – 2023. – Vol. 234. – P. 109186. – DOI: 10.1016/j.res.2023.109186.
13. A digital twin model of life-cycle rolling bearing with multiscale fault evolution combined with different scale local fault extension mechanism / T. Li, H. Shi, X. Bai, K. Zhang // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – P. 1–11. – DOI: 10.1109/TIM.2023.3243663.
14. Digital twin-assisted dual transfer: a novel information-model adaptation method for rolling bearing fault diagnosis / Z. Li, X. Ding, Z. Song, L. Wang, B. Qin, W. Huang // Information Fusion. – 2024. – Vol. 106. – P. 102271. – DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102271.
15. *Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е.* Синергетический подход к повышению эффективности управления процессами обработки на металлорежущих станках // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 84–99. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-84-99.
16. *Рыжкин А.А.* Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибоэлектрический аспект). – Ростов н/Д.: Изд-во Дон. гос. техн. ун-та, 2004. – 322 с. – ISBN 5-7890-0307-9.
17. *Lapshin V.P.* Turning tool wear estimation based on the calculated parameter values of the thermodynamic subsystem of the cutting system // Materials. – 2021. – Vol. 14 (21). – P. 6492. – DOI: 10.3390/ma14216492.
18. *Lapshin V., Turkin I., Dudinov I.* Research on influence of tool deformation in the direction of cutting and feeding on the stabilization of vibration activity during metal processing using metal-cutting machines // Sensors. – 2023. – Vol. 23 (17). – P. 7482. – DOI: 10.3390/s23177482.
19. Sensor-based intelligent tool online monitoring technology: applications and progress / J. Huang, G. Chen, H. Wei, Zh. Chen, Y. Lv // Measurement Science and Technology. – 2024. – Vol. 35 (11). – P. 112001. – DOI: 10.1088/1361-6501/ad66f1.
20. *Лапшин В.П., Мусеев Д.В.* Определение оптимального режима обработки металлов при анализе динамики систем управления резанием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 16–43. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-16-43.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

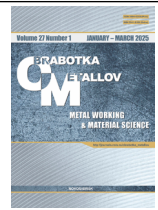
© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



## Obrabotka metallov -

# Metal Working and Material Science





Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)





## Predicting machined surface quality under conditions of increasing tool wear

Victor Lapshin <sup>a, \*</sup>, Alexandra Gubanova <sup>b</sup>, Ilya Dudinov <sup>c</sup>

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-5114-0316>,  [lapshin1917@yandex.ru](mailto:lapshin1917@yandex.ru); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9785-5384>,  [anatoliya81@mail.ru](mailto:anatoliya81@mail.ru);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0009-0009-0784-1287>,  [ilya.sandman@yandex.ru](mailto:ilya.sandman@yandex.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 29 November 2024

Revised: 19 December 2024

Accepted: 23 January 2025

Available online: 15 March 2025

#### Keywords:

Wear

Vibrations

Cutting process

Surface quality

#### Funding

The study was carried out with the financial support of the RSF grant No. 24-29-00287.

### ABSTRACT

**Introduction.** The most important factor determining the efficiency of metal cutting is the quality of the surface of the part obtained during cutting. The surface quality of a machined part is directly dependent on the vibration activity of the cutting tool, the amplitude of which is influenced by the complex evolutionary dynamics of the cutting process. In light of this, modern digital twin technology, which allows predicting the surface quality values of the parts using virtual models, is becoming an extremely relevant way to improve the efficiency in metalworking control systems. **The purpose of the work.** This study aims to improve the prediction accuracy of a digital twin system for the surface quality of the machined parts under conditions of increasing cutting tool wear. **The paper examines:** the dynamics of the turning process of metal parts, as well as a mathematical model describing the dynamics of tool vibrations during metal machining on lathes, considering the influence of the thermodynamic subsystem of the cutting system. **Research methods.** An experimental approach was employed, utilizing a author-designed measuring stand along with a modern inverted metallographic microscope *LaboMet-1* version 4, equipped with wide-angle lenses 5/20, having a 20 mm linear field of view, and a digital camera for microscopes *Ucam-1400* with a 1.4 μm×1.4 μm matrix, and a contour profile recorder *T4HD*. Furthermore, the study used mathematical modeling of the dynamic cutting system in the *Matlab* environment, for which the authors developed a specialized data processing program. **Results and discussion.** Curves depicting the tool wear rate, changes in the quality parameters of the machined surface as functions of cutting path, and as a function of cutting tool wear are constructed. Dynamic indicators suitable for parametric identification of virtual digital twin models are determined. The structure of these models is established, and parametric identification is performed. Numerical modeling is conducted in the *Matlab* environment, based on the results of which a curve depicting the change in average arithmetic surface roughness as a function of increasing tool wear is constructed. The convergence of the results of field and numerical experiments is evaluated, which shows a high reliability of the surface quality prediction achievable through the use of digital twin systems.

**For citation:** Lapshin V.P., Gubanova A.A., Dudinov I.O. Predicting machined surface quality under conditions of increasing tool wear. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 106–128. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-106-128. (In Russian).

### References

1. Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detalei mashin* [The quality of the surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000, 320 p. ISBN 5-217-02976-5.
2. Gimadeev M.P., Li A.A. Analiz avtomatizirovannykh sistem opredeleniya parametrov sherokhovatosti poverkhnosti na osnove dinamicheskogo monitoringa [Analysis of automated surface roughness parameter support systems based on dynamic monitoring]. *Advanced Engineering Research*, 2022, no. 2 (22), pp. 116–129. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129.
3. Tugengol'd A.K., Luk'yanov E.A., Voloshin R.N., Bonilla V.F. Intellektual'naya sistema monitoringa i upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem mekhatronnykh tekhnologicheskikh ob'ektov [Intelligent system for monitoring and controlling the technical condition of mechatronic process facilities]. *Vestnik Donskogo*

#### \* Corresponding author

Lapshin Viktor P., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Don State Technical University,  
 1 Gagarin square,  
 344000, Rostov-on-don, Russian Federation  
 Tel.: +7 900 122-75-14, e-mail: [lapshin1917@yandex.ru](mailto:lapshin1917@yandex.ru)

gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = *Vestnik of Don State Technical University*, 2020, no. 2 (20), pp. 188–195. DOI: 10.23947/1992-5980-2020-20-2-188-195.

4. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, no. 112, pp. 202–213. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.037.

5. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B., Lazoglu I. Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals*, 2014, no. 2 (63), pp. 585–605. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.

6. Altintas Y. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2012. 366 p.

7. Altintaş Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals*, 1995, vol. 1 (44), pp. 357–362. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.

8. Kabaldin Y.G., Shatagin D.A. Artificial intelligence and cyberphysical machining systems in digital production. *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40 (4), pp. 292–296. DOI: 10.3103/S1068798X20040115.

9. Chigirinsky Yu.L., Ingemansson A.R. Tekhnologicheskie aspekty podgotovki tsifrovogo mashinostroitel'nogo proizvodstva [Engineering process aspects of digitalization of machine-building production]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2023, no. 9 (147), pp. 39–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-39-48.

10. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Process control synergetics for metal-cutting machines. *Journal of Vibroengineering*, 2022, vol. 24 (1), pp. 177–189. DOI: 10.21595/jve.2021.22087.

11. Gong S., Li S., Zhang Y., Zhou L., Xia M. Digital twin-assisted intelligent fault diagnosis for bearings. *Measurement Science and Technology*, 2024, vol. 35 (10), p. 106128. DOI: 10.1088/1361-6501/ad5f4c.

12. Zhang Y., Ji J.C., Ren Z., Ni Q., Gu F., Feng K., Yu K., Ge J., Lei Z., Liu Z. Digital twin-driven partial domain adaptation network for intelligent fault diagnosis of rolling bearing. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, vol. 234, p. 109186. DOI: 10.1016/j.res.2023.109186.

13. Li T., Shi H., Bai X., Zhang K. A digital twin model of life-cycle rolling bearing with multiscale fault evolution combined with different scale local fault extension mechanism. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, vol. 72, pp. 1–11. DOI: 10.1109/TIM.2023.3243663.

14. Li Z., Ding X., Song Z., Wang L., Qin B., Huang W. Digital twin-assisted dual transfer: a novel information-model adaptation method for rolling bearing fault diagnosis. *Information Fusion*, 2024, vol. 106, p. 102271. DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102271.

15. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Sinergeticheskii podkhod k povysheniyu effektivnosti upravleniya processami obrabotki na metallovezhushchikh stankakh [Synergetic approach to improve the efficiency of machining process control on metal-cutting machines]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 84–99. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-84-99.

16. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh rezhushchikh materialov (triboelektricheskii aspekt)* [Synergetics of wear of tool cutting materials (triboelectric aspect)]. Rostov-on-Don, DSTU Publ., 2004. 323 p. ISBN 5-7890-0307-9.

17. Lapshin V.P. Turning tool wear estimation based on the calculated parameter values of the thermodynamic subsystem of the cutting system. *Materials*, 2021, vol. 21 (14), p. 6492. DOI: 10.3390/ma14216492.

18. Lapshin V., Turkin I., Dudinov I. Research on influence of tool deformation in the direction of cutting and feeding on the stabilization of vibration activity during metal processing using metal-cutting machines. *Sensors*, 2023, vol. 17 (23), p. 7482. DOI: 10.3390/s23177482.

19. Huang J., Chen G., Wei H., Chen Zh., Lv Y. Sensor-based intelligent tool online monitoring technology: applications and progress. *Measurement Science and Technology*, 2024, vol. 35 (11), p. 112001. DOI: 10.1088/1361-6501/ad66f1.

20. Lapshin V.P., Moiseev D.V. Opredelenie optimal'nogo rezhima obrabotki metallov pri analize dinamiki sistem upravleniya rezaniem [Determination of the optimal metal processing mode when analyzing the dynamics of cutting control systems]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 16–43. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-16-43.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).