



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)









Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние динамических характеристик процесса резания на шероховатость поверхности детали при токарной обработке

Валерия Гвинджилия^{a, *}, Евгений Фоминов^b, Денис Моисеев^c, Екатерина Гамалеева^d

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

^a  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  vvgvindjiliya@donstu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-0165-7536>,  fominoff83@mail.ru;
^c  <https://orcid.org/0000-0002-7186-7758>,  denisey2003@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-5829-4695>,  belan_kate80@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.06

История статьи:

Поступила: 18 декабря 2023

Рецензирование: 22 февраля 2024

Принята к печати: 15 апреля 2024

Доступно онлайн: 15 июня 2024

Ключевые слова:

Динамика процесса резания

Вибрации

Имитационная модель

Шероховатость поверхности

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта в рамках конкурса «Наука-2030».

АННОТАЦИЯ

Введение. В основе формирования поверхности детали при ее обработке на металлорежущем станке лежат правильно подобранные режимы резания. Комплексные методики обеспечения заданного качества поверхности детали также учитывают геометрию инструмента, его состояние и включают в себя поправки на отклонение инструмента от траектории, заданной системой ЧПУ, под влиянием кинематических возмущений и биений шпинделя. **Предмет.** В статье анализируется связь между режимами резания, динамическими характеристиками процесса точения и их отображением в шероховатость поверхности. **Цель работы:** оценить влияние технологических режимов резания с учетом вибрационной активности инструмента на шероховатость обработанной поверхности с помощью имитационного моделирования. **Метод и методология.** Приводится математическое моделирование динамики процесса резания, на основе которого строится цифровая имитационная модель. Предлагается методика использования имитационной модели для определения оптимальных режимов резания и предсказания шероховатости поверхности с учетом вибраций инструмента. С помощью экспериментов и анализа частотных характеристик вибраций инструмента проводится валидация созданной модели, уточняются параметры подсистемы модели сил резания и динамической подсистемы инструмента, а также строятся геометрические топологии поверхности детали. Вычисленные силы резания сравниваются с экспериментальными силами, при этом наблюдаются схожие закономерности и уровни характеристик. Предлагается оценка оптимальности подобранных режимов резания на основе анализа спектра колебаний инструмента относительно заготовки и результатов симуляции цифровой модели. **Результаты и обсуждение.** Приводится сравнение результатов цифрового моделирования геометрической поверхности детали и реальной поверхности, полученной в ходе натурального эксперимента. Показано, что шероховатость реальной поверхности, полученной при обработке с постоянными режимами резания, варьируется относительно шероховатости поверхности имитационной модели в пределах не более 0,066 мкм.

Для цитирования: Влияние динамических характеристик процесса резания на шероховатость поверхности детали при токарной обработке / В.Е. Гвинджилия, Е.В. Фоминов, Д.В. Моисеев, Е.И. Гамалеева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 143–157. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-143-157.

Введение

Вопросы формирования требуемого геометрического профиля поверхности детали в совокупности ее микрорельефа, отклонений от линейных размеров и волнистости особенно актуальны для машиностроительной и авиакосмической отраслей. В основе решений указанной проблемы лежит прямая обработка экспериментальных данных, следствием которых являются

эмпирические зависимости [1]. Они определили три основных фактора, влияющих на формирование поверхности детали при механической обработке: начальное состояние поверхности, геометрию режущего инструмента, возмущения в виде биений шпиндельной группы и кинематических возмущений со стороны приводной группы [1–4]. Следующим шагом в совершенствовании методов анализа и прогнозирования геометрического профиля поверхности детали стало технологическое обеспечение параметров состояния ее поверхностного слоя [5–10]. Однако траектории движения инструмента определяются не только технологическими режимами

*Адрес для переписки

Гвинджилия Валерия Энвериевна, к.т.н., старший преподаватель
Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1,
344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
Тел.: +7 918 583-23-33, e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru

резания, но и деформационными смещениями инструмента относительно заготовки, а также вибрациями, источником которых являются, например, колебания, вызванные регенеративным эффектом [11–15].

Комплексные методики решения проблемы обеспечения заданного качества поверхности детали и его прогнозирования рассмотрены во многих эмпирических и аналитических исследованиях. Предпринимаются попытки анализа и прогнозирования шероховатости поверхности на основе регрессионных моделей и методологии поверхностного отклика (RSM) [16–18]. Большое количество современных исследований направлено на прогнозирование шероховатости поверхности с помощью искусственных интеллектуальных систем и имитационных моделей [19–23]. В работах [21–23] Y. Altintas и др. рассматривают создание имитационных моделей динамики процесса резания, в основе которых лежит аналитическое представление взаимовлияния параметров резания на динамику обработки и экспериментальная идентификация коэффициентов динамических сил резания в выведенных закономерностях. В отечественных исследованиях рассматривается нейросетевая модель кинематики режущего инструмента, позволяющая рассчитывать оптимальную скорость резания по критерию минимизации интенсивности изнашивания инструмента [24]. Комплексное моделирование процесса фрезерования с оценкой траектории формообразующих движений инструмента представлено в работе [25]. Показывается аналитическая зависимость шероховатости поверхности от упругих деформационных смещений инструмента относительно заготовки [26]. В работе [27] предлагается методика построения геометрической топологии поверхности детали для оценки влияния деформационных смещений инструмента на геометрический профиль детали на основе стробоскопического отображения Пуанкаре. Учет зависимости параметров динамической связи от вибраций в математическом описании динамики процесса резания является необходимым условием для моделирования и прогнозирования выходных характеристик обработки детали [28–31], так как вследствие вибраций будет наблюдаться реальное изменение траектории формообразующих движений инструмента относительно заготовки.

Анализ исследований показал актуальность создания различных методов оценки и прогнозирования шероховатости поверхности детали при механообработке, а также внимание российских и зарубежных ученых к этим вопросам. В настоящей статье предлагается рассмотреть аналитическую зависимость сил резания от технологических режимов с учетом возмущающих воздействий и деформационных смещений инструмента. Геометрическая топология поверхности детали рассматривается как точное отображение вершины инструмента в пространстве относительно заготовки с учетом вибраций и деформационных смещений. **Цель работы:** оценить влияние свойств динамических характеристик процесса резания на геометрию поверхности детали с помощью имитационного моделирования динамики процесса резания.

Методика исследований

Определение формообразующей траектории движения инструмента

Рассмотрим динамическую систему продольного точения недеформируемой заготовки. Модель системы представляется в виде пространственной конечномерной модели движения вершины инструмента, взаимодействующего с заготовкой. Взаимодействие описывается силами резания, являющимися функциями деформационных смещений инструмента $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \mathbb{R}^{(3)}$, а также технологических режимов резания (рис. 1, а).

Таким образом, с учетом $\mathbf{F}_Y(\mathbf{X})$ в модели системы формируется обратная связь между динамикой процесса резания и подсистемой инструмента, которая может как оказывать эффект стабилизации процесса резания, так и приводить к потере устойчивости:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c}\mathbf{X} = \\ = \mathbf{F}_\Sigma \left(X, t_P^{(0)}, S_P^{(0)}, V_P^{(0)} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{m} (кгс²/мм), \mathbf{h} (кгс/мм) и \mathbf{c} (кг/мм) – симметричные, диагональные, положительно определенные матрицы инерционности, диссипации и жесткости размерностью $[3 \times 3]$;

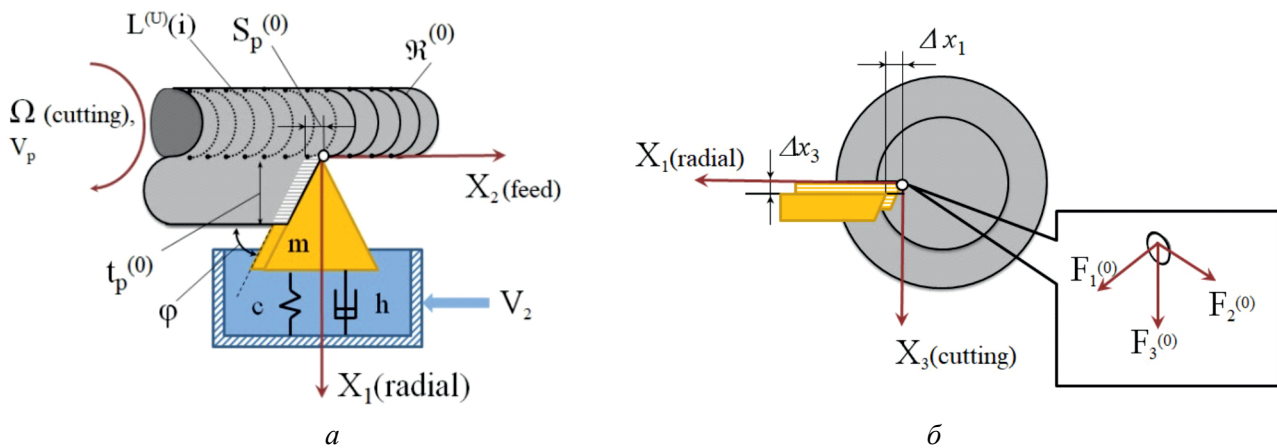


Рис. 1. Ориентация осей деформаций и сил резания:

a – схема осей деформаций в плоскости X_1 – X_2 ; *б* – схема осей сил и отклонений движения инструмента в плоскости X_1 – X_3

Fig. 1. Orientation of the deformation axes and cutting forces:

a – diagram of deformation axes in the plane X_1 – X_2 ; *б* – diagram of force axes and deviations of tool movement in the plane X_1 – X_3

$\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \mathcal{R}^{(3)}$ – вектор упругих где

деформационных смещений инструмента относительно несущей системы станка в пространстве $\mathcal{R}^{(3)}$, координаты состояния системы;

$F_\Sigma(X, t_p^{(0)}, S_p^{(0)}, V_p^{(0)})$ – суммарные силы резания, действующие в пространстве на режущий инструмент $\mathbf{F}_y = F^{(0)}\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$, где χ_i – коэффициенты ориентации сил резания в пространстве, удовлетворяющие условиям нормировки; $t_p^{(0)}, S_p^{(0)}, V_p^{(0)}$ – номинальные технологические режимы резания, заданные системой управления станка с ЧПУ (глубина резания, подача и скорость резания соответственно).

Следуя работам [27, 30], пространственные формообразующие движения инструмента

$\Phi(t) = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}^T$ определяются как совокупность движений, заданных системой управления станка $\mathbf{U}(t)$, т. е. технологическими режимами $t_p^{(0)}, S_p^{(0)}, V_p^{(0)}$, и движениями $\mathbf{R}(t)$,

обусловленными упруго-деформационными свойствами подсистемы инструмента, а также возмущающими воздействиями, т. е. отклонениями от заданной управлением траектории реза:

$$\Phi(t) = \mathbf{U}(t) + \mathbf{R}(t) = \mathbf{U}(t) - \mathbf{X}(t) + \Delta\mathbf{x}(t), \quad (2)$$

$$\Delta\mathbf{x}(t) = \{\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3\},$$

$$\Delta x_i(t) = \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k t)$$

– колебания инструмента в зоне резания; A_k, ω_k – параметры частотных составляющих в сигнале вибраций инструмента, рассматриваемые в виде гармонических функций с неизменной ориентацией вдоль осей X_1, X_2, X_3 с набором частотных составляющих ω_k , Гц, и соответствующих им амплитуд $A_k, k = 1, 2, 3 \dots$ С учетом $\mathbf{R}(t)$ уравнение (1) преобразуется в вид

$$\mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d \mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c} \mathbf{X} = \mathbf{F}_\Sigma(X, t_p, S_p, V_p), \quad (3)$$

где

$$t_p(t) = t_p^{(0)} - X_1(t) + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t), \text{ мм};$$

$$S_p(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t) \omega_i t +$$

$$+ \int_{t-T}^t (V_2^{(0)} - dX_2 / dt) dt, \text{ мм/об};$$

$T = \Omega^{-1}$ – время оборота детали, с;

$$V_p(t) = V_3^{(0)} - dX_3 / dt + \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t) \cdot \omega_i t, \text{ м/с}.$$

В уравнении (3) представлена модель возмущенной динамической системы. Технологические режимы зависят от деформационных смещений инструмента и вынужденных колебаний. Силы резания, формирующие связь между подсистемами инструмента и заготовки, представляются в виде

$$T^{(0)} dF^{(0)} / dt + F^{(0)} = \rho \left(1 + \mu \exp \left[-\zeta V_p(t) \right] \right) t_p(t) S_p(t), \quad (4)$$

где ρ – давление стружки на переднюю грань инструмента, кг/мм²; μ – безразмерный параметр; ζ – коэффициент крутизны нелинейного изменения сил от $V_p(t)$, с · м⁻¹; $T^{(0)}$ – постоянная времени стружкообразования, учитывающая переходные процессы в зоне резания, с.

Система уравнений (3), (4) аналитически задает связь между силами, деформациями, вибрационным возмущением и параметрами управления динамической системы резания.

Рассмотрим идеальный случай продольного точения детали, т. е. при отсутствии деформационных смещений инструмента и возмущающих колебаний $\mathbf{R}(t) = 0$. Тогда траектория формообразующих движений инструмента $\Phi(t)$ в каждый момент времени t_i определяется лишь значениями параметров технологических режимов резания и образует совокупность отрезков пути инструмента относительно детали за каждый ее оборот $L^{(U)} = \sum_{i=1}^{i=n} V_{\Sigma} i T$, где $L^{(U)}$ – это путь ин-

струмента относительно детали при постоянных значениях скорости резания, глубины и подачи. В этом случае следы от вершины инструмента на поверхности детали будут образовывать эталонную геометрическую топологию ее поверхности $() \subset \mathfrak{R}^{(0)}$ (рис. 1, а). Однако с учетом вибраций и деформаций путь инструмента будет отличаться от заданного программой управления станка, и геометрическая топология поверхности детали будет определяться характеристиками и свойствами процесса резания $L^{(\Phi)} \subset \mathfrak{R}^{(D)}$ (рис. 2).

Согласно уравнению (2) $L^{(\Phi)}$ является точечным отображением траектории движения

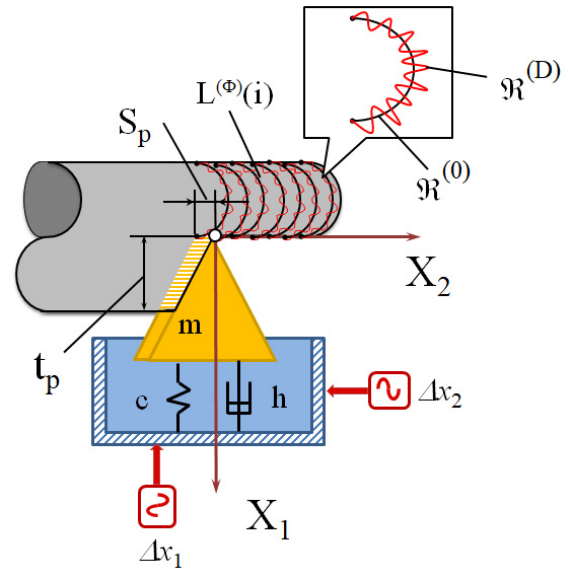


Рис. 2. Пример формирования формообразующей траектории движения инструмента $L^{(\Phi)}$ с учетом вибраций инструмента и соответствующей ей геометрической топологии поверхности детали $\mathfrak{R}^{(D)}$

Fig. 2. Example of the tool trajectories of the forming motions $L^{(\Phi)}$ taking into account tool vibrations and the corresponding geometrical topology of the workpiece surface $\mathfrak{R}^{(D)}$

инструмента относительно детали в каждом направлении его подвижности и представима в виде $\mathbf{L}^{(\Phi)} = \{L_1^{(\Phi)}, L_2^{(\Phi)}, L_3^{(\Phi)}\}^T \in \mathfrak{R}^{(D)}$. Функция учитывает высотные $L_1^{(\Phi)}$ и шаговые $L_2^{(\Phi)}$, $L_3^{(\Phi)}$ неровности, оставляемые инструментом в процессе резания, т. е. отклонения геометрической поверхности инструмента от ее эталонного вида $L^{(U)} \subset \mathfrak{R}^{(0)}$. Тогда уравнения (2–4) являются базовой математической моделью для имитационного моделирования динамики процесса резания, оценки неровностей и волнистости полученной поверхности. Благодаря полученным моделям становится возможным всестороннее исследование динамики процесса резания с учетом различных вынужденных колебаний инструмента относительно заготовки и предсказания выходных характеристик процесса резания при изменении технологических режимов.

Базовая модель будет справедлива в случае малых отклонений траектории движения исполнительных элементов станка от точки равно-

весия в системе. Для практиков адекватность имитационного моделирования соответствует обработке заготовки в период нормального износа инструмента или квазипостоянной скорости размерного износа.

Имитационное моделирование динамики процесса резания осуществляется в несколько этапов. На первом этапе необходимо выяснить параметры вибрационных характеристик станка со стороны шпинделя и приводной подсистемы инструмента, так как они оказывают влияние на след, оставленный инструментом на поверхности заготовки. Наиболее информативными будут данные вибрационных характеристик, снятых в процессе резания, так как распределение потерь энергии вибраций зависит от материалов пары «резец – заготовка». Снятие вибрационных данных возможно при первой технологической операции в процессе обработки детали, в результате которой устраняются вариации геометрической формы заготовки и физико-механические свойства поверхностного слоя материала, возникающие в процессе заготовительных операций. Обработка данных основывается на методах спектрального анализа. В модель вибрационных возмущений также необходимо добавить источник случайной шумовой составляющей, всегда существующей в реальных технических системах, – например, генерируемой процессами стружкообразования.

На втором этапе проводится цифровое моделирование динамики процесса резания с реальными данными о вибрационных характеристиках процесса для пары материалов при различных

режимах резания. В результате моделирования на основе анализа силовых характеристик выбираются режимы, обеспечивающие наиболее высокую производительность точения из условия минимизации составляющих сил резания $F_1^{(0)}$, $F_2^{(0)}$, $F_3^{(0)}$.

На третьем этапе происходит построение геометрической топологии поверхности детали на основе вычисленного сигнала деформационных смещений инструмента, а также вычисляются оценки качества поверхности – например, по параметру шероховатости R_a . Итоговым результатом имитационного моделирования становятся режимы резания, обеспечивающие наиболее высокую производительность точения и требуемое качество обработанной поверхности.

Моделирование динамики процесса резания и ее отображение в геометрической топологии поверхности детали

В качестве примера для симуляции будет рассмотрено продольное точение детали диаметром $D = 114$ мм из нержавеющей стали 10ГН2МФА твёрдосплавными пластинами Т15К6 с покрытием. На первом этапе для уточнения частотных составляющих вибраций инструмента экспериментально снимались вибрационные последовательности в направлениях X_1 , X_2 , X_3 с помощью виброакселерометров, установленных на инструменте, и затем строились их спектральные характеристики (рис. 3).

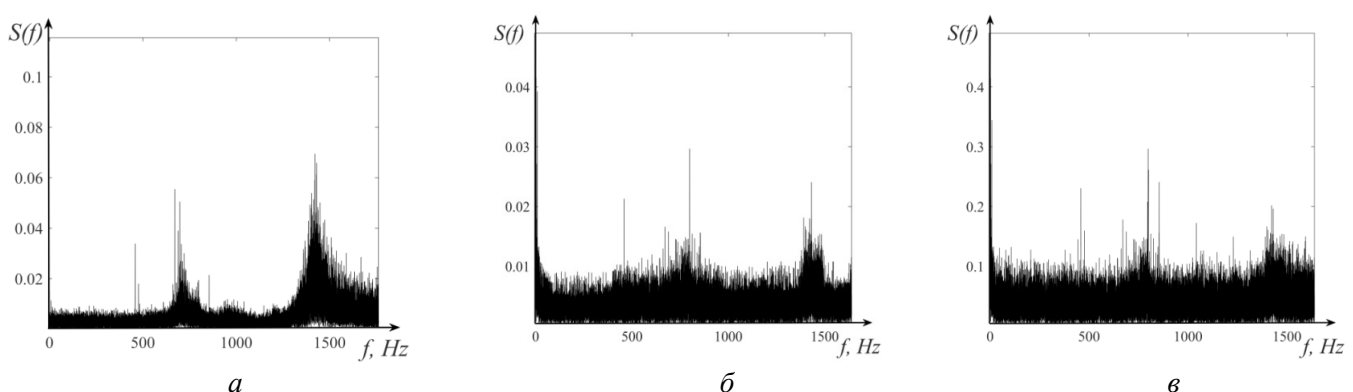


Рис. 3. Спектры мощностей последовательностей виброускорений в относительных единицах к дисперсии по направлениям:

$a - X_1$; $б - X_2$; $в - X_3$ для режимов $S_p^{(0)} = 0,15$ мм / об, $t_p^{(0)} = 0,5$ мм, $V_3^{(0)} = 190$ м / мин

Fig. 3. Power spectra of vibration acceleration sequences in relative units to dispersion along the directions:

$a - X_1$; $б - X_2$; $в - X_3$ for modes $S_p^{(0)} = 0.15$ mm / rev, $t_p^{(0)} = 0.5$ mm, $V_3^{(0)} = 190$ m / min

На рис. 3 хорошо заметны три всплеска частот в каждом направлении вибрационной активности инструмента: $\omega_1 = 460$ Гц, $\omega_2 = 790$ Гц, $\omega_3 = 1,42$ кГц. Измеренные частотные составляющие являются параметрами гармонических функций, используемых в имитационной модели процесса резания в качестве возмущений (уравнение (4)). Согласно методике исследования при моделировании возмущений для качественного результата симуляции в имитационную модель был введен сигнал «белого» шума по каналам возмущения. Параметры подсистемы инструмента: коэффициенты матрицы жесткости и диссипации приведены в табл. 1 с учетом, что $m = 0,27 \cdot 10^{-3}$, кгс²/мм, передний угол $\gamma = 10^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$ и угол в плане $\varphi = 90^\circ$. Параметры динамической связи представлены в табл. 2.

Результаты симуляции процесса резания при различных технологических режимах представлены на рис. 4, глубина резания является постоянной величиной $t_p^{(0)} = 0,5$ мм.

На рис. 4 приведены примеры временной реализации сил резания для заданной динамической системы (3–4) при варьировании параметра скорости $V_3^{(0)}$ с учетом характеристик реального вибрационного возмущения процесса реза-

ния. Отметим, что при изменении скорости резания наблюдается не только уменьшение средних значений силы резания, но и изменение амплитуды вибрационного возмущения, которое связано с нелинейными свойствами системы, проявляющимися в перераспределении резонансной частоты модели при изменении управляющих параметров. В соответствии с периодическими изменениями амплитуды вибраций силовых характеристик можно выделить оптимальные значения скорости резания $V_3^{(0)} = 190$ м/мин, обеспечивающие высокую производительность точения с условием минимизации составляющих сил резания и вибраций, так как они негативно влияют на геометрию поверхности обрабатываемой детали. Итоговая амплитуда возмущающего сигнала ограничена по максимальной амплитуде возмущений, измеренных непосредственно в процессе точения детали (рис. 5, б).

На втором этапе рассмотрим симуляцию динамики процесса резания для двух вариантов режимов обработки детали – с $S_p^{(0)} = 0,15$ мм/об и $S_p^{(0)} = 0,25$ мм/об, а также с выбранной оптимальной скоростью резания $V_3^{(0)} = 190$ м/мин (рис. 5, а).

Таблица 1

Table 1

Параметры подсистемы инструмента

Parameters of the tool subsystem

$h_{1,1}$, кг·с/мм	$h_{2,2}$, кг·с/мм	$h_{3,3}$, кг·с/мм	$h_{1,2} = h_{2,1}$, кг·с/мм	$h_{1,3} = h_{3,1}$, кг·с/мм	$h_{2,3} = h_{3,2}$, кг·с/мм
1,3	1,15	0,85	0,36	0,2	0,1
$c_{1,1}$, кг/мм	$c_{2,2}$, кг/мм	$c_{3,3}$, кг/мм	$c_{1,2} = c_{2,1}$, кг/мм	$c_{1,3} = c_{3,1}$, кг/мм	$c_{2,3} = c_{3,2}$, кг/мм
1051	955	725	372	113	195

Таблица 2

Table 2

Параметры динамической связи

Dynamic link options

ρ , кг/мм ²	ζ , (мм/с) ⁻¹	$T^{(0)}$, с	μ	χ_1	χ_2	χ_3
350	0,1	0,0005	0,5	0,7	0,5	0,5

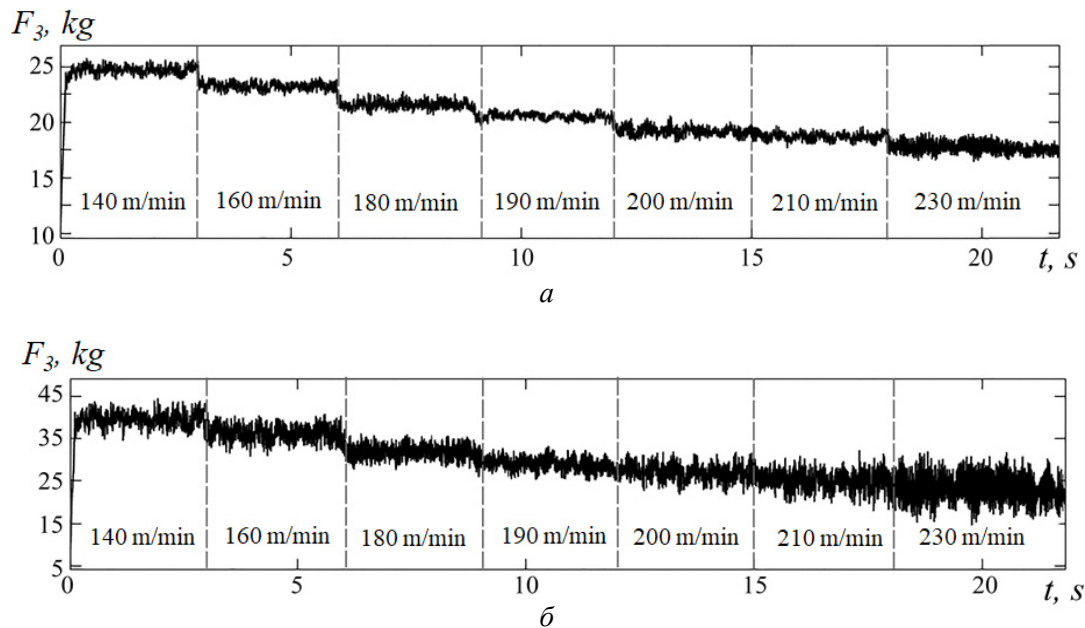


Рис. 4. Моделирование сил резания в тангенциальном направлении при варьировании скорости резания:

a – подача $S_p^{(0)} = 0,15$ мм/об ; b – подача $S_p^{(0)} = 0,25$ мм/об

Fig. 4. Simulation of cutting forces in tangential direction at varying cutting speed:

a – feed rate $S_p^{(0)} = 0.15$ mm / rev ; b – feed rate $S_p^{(0)} = 0.25$ mm / rev

На рис. 5, a для качественной оценки достоверности модельных характеристик представлено их сравнение с результатами, которые были получены в ходе итоговых реальных экспериментов, направленных на проверку адекватности предложенного метода. Можно отметить значительное влияние изменения подачи на характер вибраций и стабильность процесса резания (рис. 5, b), что, в свою очередь, приведет к снижению качества поверхности заготовки [32]. Это естественно образом следует из уравнения (4), раскрытие которого демонстрирует, что вариации подачи в направлении X_2 непосредственно оказывают влияние на движение инструмента в направлении X_1 , учитывающее неровности поверхности, оставляемые инструментом. Кроме этого, в экспериментальных характеристиках вибраций инструмента обнаружено, что в направлении X_2 при увеличении подачи появляются новые частотные составляющие в области 165 Гц. Это связано с увеличением сил резания по задней грани инструмента, которые также могут приводить к волнистости поверх-

ности заготовки. Оценка данного эффекта имеет самостоятельное значение.

На третьем этапе рассмотрим «скелетную» геометрию поверхности детали, смоделированную цифровой моделью в радиальном направлении, т. е. для высотных характеристик качества поверхности (рис. 6), и реконструированные геометрические топологии поверхности детали для итогового эксперимента. Под «скелетной» топологией поверхности понимается совокупность отклонений наблюдаемой топологии, т. е. обусловленных вибрационными смещениями инструмента, от эталонного вида топологии, формируемой геометрическим следом инструмента на поверхности резания без учета возмущений и деформационных смещений инструмента $L^{(U)} \subset \mathcal{R}^{(0)}$.

Как видно, поверхности, восстановленные на основе экспериментальных данных о деформационных смещениях инструмента в процессе резания 1 и 3 (рис. 6), отображают не только последовательные проходы режущего инструмента вдоль заготовки, но и неровности, вызванные случайной составляющей колебаний резца. Расстояние между пиками вдоль поверхности по на-

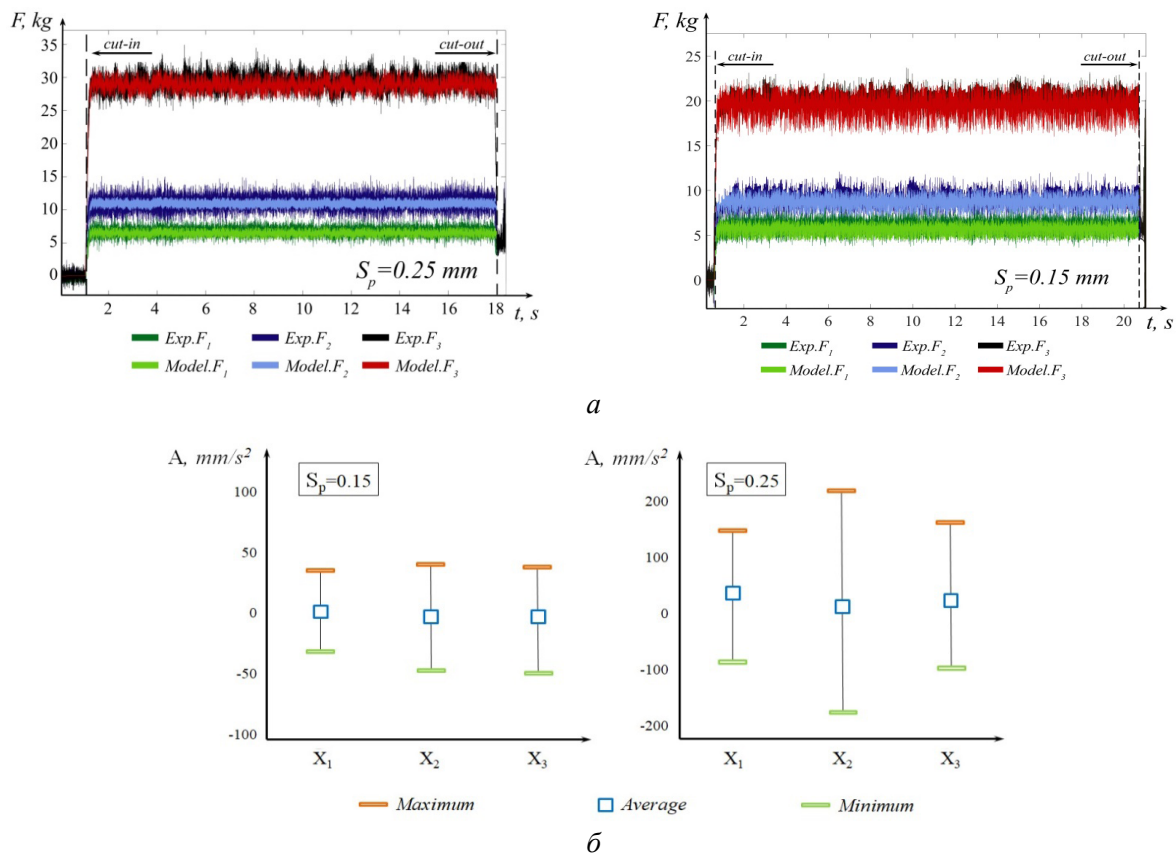


Рис. 5. Пример изменения характеристик резания при $t_p^{(0)} = 0,5$ мм, $V_3^{(0)} = 190$ м / мин :
 а – данные, полученные в ходе эксперимента $Exp.F_i$ и на основе имитационного моделирования $Model.F_i$, $i = 1, 2, 3$; б – значения амплитуды виброускорений в процессе резания для направлений X_1, X_2, X_3

Fig. 5. Example of changes in cutting characteristics at $t_p^{(0)} = 0.5$ mm, $V_3^{(0)} = 190$ m / min :
 а – data obtained during the experiment $Exp.F_i$ and on the basis of simulation modelling $Model.F_i$, $i = 1, 2, 3$;
 б – values of vibration acceleration amplitude during cutting for directions X_1, X_2, X_3 .

правлению L соответствует скорости подачи при точении заготовки диаметром $D = 114$ мм на расстояние $L = 15$ мм. Приведенные «скелетные» топологии 2 и 4 (рис. 6) получены путем имитационного моделирования без учета случайной компоненты в колебаниях инструмента, являющейся следствием непрерывно изменяющейся геометрии инструмента, пластического деформирования металла и других многочисленных факторов, случайным образом проявляющихся в процессе резания. Однако реконструированные геометрические поверхности получают качественно схожими между собой, а оценки шероховатости реальной поверхности R_{ai} , полученной при обработке с постоянными режимами резания, варьируются относительно шероховатости поверхности, предсказанной имитационным моделирова-

нием $R_a^{(Model)}$, в пределах не более 0,066 мкм (табл. 3) для разных режимов подачи.

Итоговая экспериментальная проверка выбранных комбинаций режимов резания проводилась на универсальном модернизированном токарном станке 16K20 с системой бесступенчатого регулирования оборотов Mitsubishi. Шероховатость поверхности измерялась с помощью профилометра SurfTest SJ-210 фирмы Mitutoyo с разрешением измерений 0,0064 мкм (рис. 7).

На основании полученных данных экспериментальной и имитационной реализации поверхности заготовки можно заключить, что предложенная методика имитационного моделирования позволяет прогнозировать качество формируемой поверхности в зависимости от выбранных технологических режимов и вибрационного портрета станка. Однако стоит отметить,

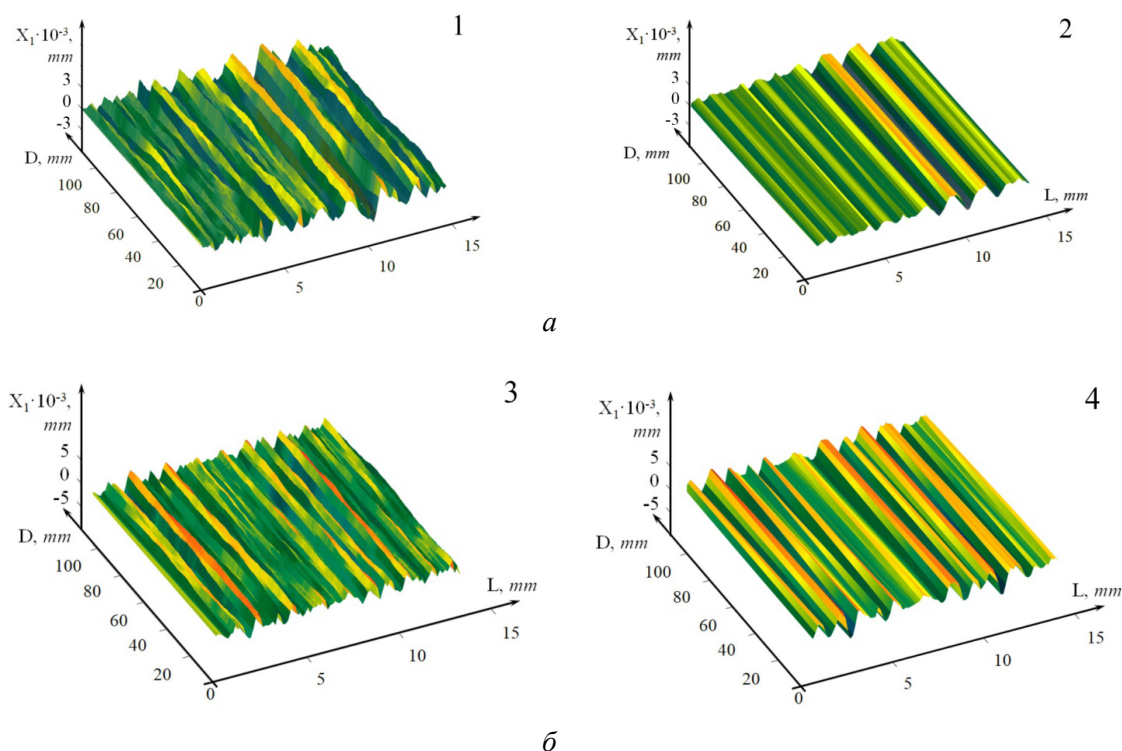


Рис. 6. Сравнение реальной (1, 3) и модельной (2, 4) геометрических топологий поверхности заготовки для $S_p^{(0)} = 0,15$ мм / об (а) и $S_p^{(0)} = 0,25$ мм / об (б)

Fig. 6. Comparison of real (1, 3) and modeled (2, 4) geometrical topologies of the workpiece surface for $S_p^{(0)} = 0.15$ mm / rev (a) and $S_p^{(0)} = 0.25$ mm / rev (b)

Таблица 3

Table 3

Величина шероховатости для модели и реальных данных

Roughness for model and real data

$S_p^{(0)}$, мм / об	$V_3^{(0)}$, м / мин	$t_p^{(0)}$, мм	$R_a^{(Model)}$, мкм	Результат измерения шероховатости поверхности для разных экспериментов, мкм									
				R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}	R_{a4}	R_{a5}	R_{a6}	R_{a7}	R_{a8}	R_{a9}	R_{a10}
0,15	190	0,5	0,94	0,934	0,937	0,960	0,967	0,964	0,964	0,966	0,985	0,985	1,001
0,25	190	0,5	1,25	1,184	1,200	1,237	1,243	1,214	1,217	1,279	1,240	1,305	1,304

что на данном этапе апробирования модели ее результаты справедливы для случая износа инструмента по главной режущей поверхности не более 0,1 мм. В случае превышения указанного порога износа в системе начинают преобладать собственные эволюционные процессы, прежде всего связанные с пластической деформацией материала в зоне контакта инструмента и детали. Тогда рассогласование оценок экспериментальных и моделируемых поверхностей относительно шероховатости поверхности заготовки варьируется в пределах 0,61...1,36 мкм по мере развития износа.

Результаты и их обсуждение

Оценка выходных характеристик процесса резания на основе информации о динамике вибраций инструмента показала, что существует наблюдаемая зависимость между высокими амплитудами частотных составляющих в сигнале виброускорений собственных движений системы и погрешностью контура заготовки относительно ее параметра шероховатости (рис. 8).

На рис. 8 показано, что увеличение подачи приводит к повышению амплитуд оборотной частоты детали, к появлению большого количе-

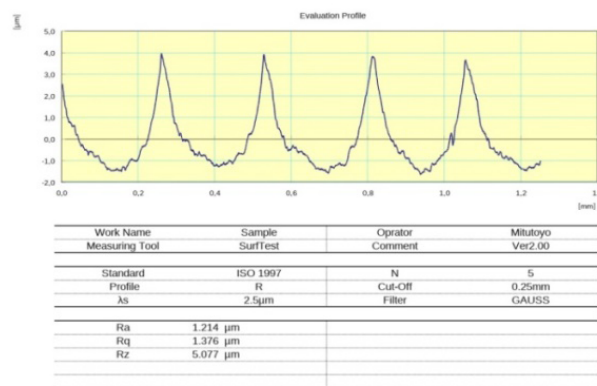
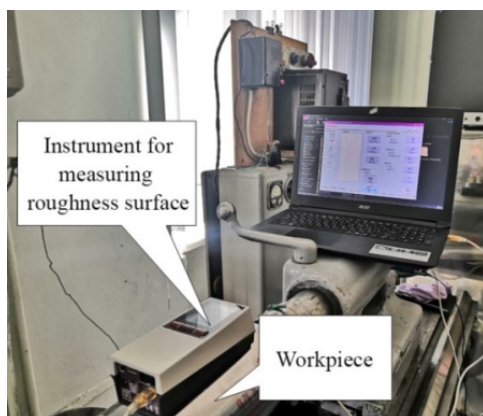


Рис. 7. Прибор для измерения шероховатости поверхности Surftest SJ-210 и пример регистрируемых данных из программного обеспечения обмена данными между прибором и ЭВМ

Fig. 7. Surface roughness measuring device Surftest SJ-210 and an example of recorded data from the software of data exchange between the device and the computer

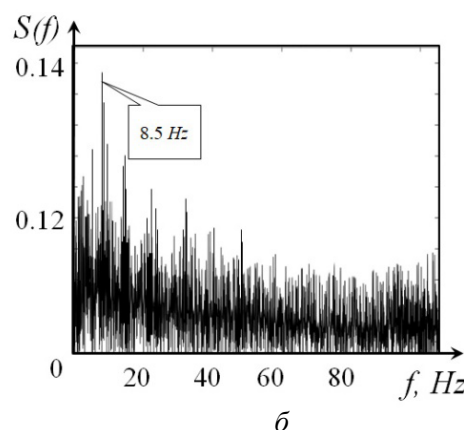
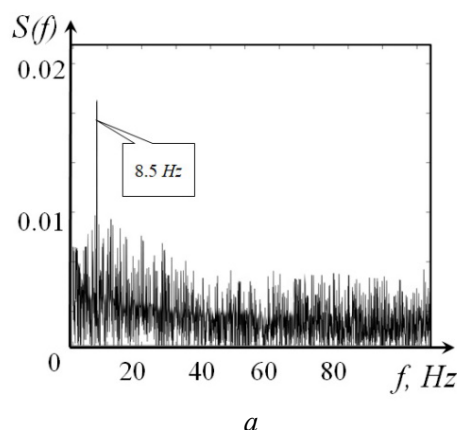


Рис. 8. Спектральная характеристика сигнала виброускорений для радиального направления:

$$a - S_p^{(0)} = 0,15 \text{ мм / об} ; \bar{b} - S_p^{(0)} = 0,25 \text{ мм / об}$$

Fig. 8. Spectral characteristic of the vibration acceleration signal for radial direction:

$$S_p^{(0)} = 0.15 \text{ mm / rev (a)}; S_p^{(0)} = 0.25 \text{ mm / rev (b)}$$

ства частотных составляющих в спектре виброускорения в районе частоты вращения заготовки и возрастанию их амплитуд. Такое поведение может характеризоваться интенсивным повышением температуры в зоне резания, вырывами металла по траектории движения режущего инструмента или усилением влияния кинематических возмущений на динамику процесса резания. Нивелирование подобных эффектов до момента интенсификации износа инструмента обеспечивает правильный подбор режимов резания, что для рассмотренной задачи можно осуществить с помощью созданной цифровой имитационной модели. В данной статье в качестве диагностического признака предлагается выбрать величину дисперсии автоспектра коле-

баний инструмента в радиальном направлении и продольном, так как они в большей степени оказывают влияние на формирование неровностей в поверхности детали. Таким образом, использование имитационной модели сокращает количество проводимых реальных экспериментов при поисковом исследовании оптимальных режимов резания по критериям максимальной износостойкости инструмента и сохранения качества обрабатываемой поверхности.

Заклучение

В рамках экспериментов и цифрового моделирования было показано, что на качество формируемой резанием поверхности заготовки



наряду с глубиной резания оказывает влияние и подача инструмента. Свойства вибрационных последовательностей, измеряемых в процессе резания, изменяются по мере увеличения подачи инструмента, повышается энергия вибраций в продольном направлении, что согласно уравнению (4) также затрагивает движение инструмента в радиальном направлении. Наконец, анализ адекватности вычисленной шероховатости поверхности детали на основе цифрового моделирования и экспериментально измеренной позволяет сделать заключение о возможности использования рассматриваемой методики в качестве основы оценки влияния динамических характеристик процесса резания на шероховатость поверхности детали при токарной обработке.

Выявленные параметры силовой модели пригодны для моделирования процессов обработки заготовки из нержавеющей стали 10ГН2МФА твёрдосплавными пластинами Т15К6 с покрытием для случая износа инструмента по главной режущей поверхности не более 0,1 мм. Представленные параметры силовой модели справедливы для возмущенного движения инструмента с амплитудой виброускорений не более, чем указанной на рис. 5, б. В случае отклонения от этого диапазона или изменения исходных данных моделирования следует провести все этапы изложенной методики для коррекции параметров модели. Таким образом, прикладная эффективность использования имитационного моделирования будет повышаться в случае формирования базы вибрационных данных определенного типа станка предприятия, задаваемых номенклатурой деталей, материалами заготовки и инструмента, а также его геометрией.

Приведенный пример имитационного моделирования позволяет определить оптимальные режимы резания по критерию максимальной производительности с учетом требуемого качества поверхности детали, а также дает представление о том, как предлагаемая аналитическая модель динамики процесса резания, уточненная экспериментальными данными, может прогнозировать шероховатости поверхности в зависимости от режимов резания, сокращая трудозатраты производства на проведение поисковых экспериментов. Таким образом, представленные результаты обуславливают на-

чало более глубокого экспериментально-теоретического исследования механизмов отображения деформационных смещений инструмента в геометрию детали.

Список литературы

1. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
2. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen / J. Tlustý, A. Poláček, C. Danek, J. Spacek. – Berlin: Verlag Technik, 1962. – 340 p.
3. Табенкин А.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 133 с.
4. Al-Ahmari A.M.A. Mathematical model for determining machining parameters in multipass turning operations with constraints // International Journal of Production Research. – 2001. – Vol. 39 (15). – P. 3367–3376. – DOI: 10.1080/00207540110052562.
5. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
6. Сулов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
7. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
8. Benga G.C., Abrao A.M. Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 143. – P. 237–241. – DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00346-7.
9. Choudhury I.A., El-Baradie M.A. Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – Vol. 67. – P. 55–61. – DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02818-X.
10. Upadhyay V., Jain P.K., Mehta N.K. In-process prediction of surface roughness in turning of Ti–6Al–4V alloy using cutting parameters and vibration signals // Measurement. – 2013. – Vol. 46 (1). – P. 154–160. – DOI: 10.1016/j.measurement.2012.06.002.
11. Hahn R.S. On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation // Transactions of American Society of Mechanical Engineers. – 1954. – Vol. 76. – P. 356–260.
12. Merritt H.E. Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research // Journal of Engineering for Industry. – 1965. – Vol. 87. – P. 447–454. – DOI: 10.1115/1.3670861.
13. Tobias S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter // The Engineer. – 1958. – Vol. 205 (7). – P. 199–203.

14. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process // *Chaos Solitons & Fractals*. – 2002. – Vol. 13. – P. 1531–1535. – DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.
15. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. Correlation of attracting sets of tool deformations with spatial orientation of tool elasticity and regeneration of cutting forces in turning // *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. – 2022. – Vol. 30 (1). – P. 37–56. – DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-1-37-56.
16. Experimental and numerical investigation of burr formation in intermittent turning of AISI 4140 / H. Persson, M. Agmell, V. Bushlya, J. Stahl // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 58. – P. 37–42. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.165.
17. Patel K.A., Brahmabhatt P.K. A comparative study of the RSM and ANN models for predicting surface roughness in roller burnishing // *Procedia Technology*. – 2016. – Vol. 23. – P. 391–397. – DOI: 10.1016/j.protec.2016.03.042.
18. Alam S.T., Tomal A.N.M., Nayeem M.K. High-speed machining of Ti–6Al–4V: RSM-GA based optimization of surface roughness and MRR // *Results in Engineering*. – 2023. – Vol. 17. – P. 100873. – DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100873.
19. Abu-Mahfouz I., Rahman A.H.M.E., Banerjee A. Surface roughness prediction in turning using three artificial intelligence techniques: A comparative study // *Procedia Computer Science*. – 2018. – Vol. 140. – P. 258–267. – DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.322.
20. Laghari R.A., Samir M. Comprehensive approach toward IIoT based condition monitoring of machining processes // *Measurement*. – 2023. – Vol. 217. – P. 113004. – DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113004.
21. 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.
22. Altintas Y., Eynian M., Onozuka H. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping // *CIRP Annals*. – 2008. – Vol. 57 (1). – P. 371–374. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.048.
23. Virtual compensation of deflection errors in ball end milling of flexible blades / Y. Altintas, O. Tuysuz, M. Habibi, Z.L. Li // *CIRP Annals*. – 2008. – Vol. 57 (1). – P. 371–374. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.048.
24. Kabaldin Y.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. The development of a digital twin of a cutting tool for mechanical production // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. – 2019. – Vol. 4. – P. 11–17. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-4-11-17.
25. Воронов С.А., Киселев И.А. Нелинейные задачи динамики процессов резания // *Машиностроение и инженерное образование*. – 2017. – № 2. – С. 9–23.
26. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В. Прогнозирование и диагностика качества обрабатываемой детали на токарных станках с ЧПУ // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 1996. – № 1. – С. 95–104.
27. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Influence of spindle wobble in turning on the workpiece's surface topology // *Russian Engineering Research*. – 2018. – Vol. 38. – P. 818–823. – DOI: 10.3103/S1068798X18100192.
28. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting / V.L. Zakovorotny, A.D. Lukyanov, A.A. Gubanova, V.V. Hristoforova // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – Vol. 368. – P. 174–190. – DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.
29. Санкин Ю.Н., Санкин Н.Ю. Устойчивость токарных станков при нелинейной характеристике процесса резания. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 137 с.
30. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Зависимость изнашивания инструмента и параметров качества формируемой резанием поверхности от динамических характеристик // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 31–46. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-31-46.
31. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) / В.Л. Заковоротный, Д.Т. Фам, С.Т. Нгуен, М.Н. Рыжкин // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2011. – Т. 11, № 3 (54). – С. 301–311.
32. FEM to predict the effect of feed rate on surface roughness with cutting force during face milling of titanium alloy / M.H. Ali, B.A. Khidhir, M.N.M. Ansari, B. Mohamed // *Housing and Building National Research Center Journal*. – 2013. – Vol. 9 (3). – P. 263–269. – DOI: 10.1016/j.hbrej.2013.05.003.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science





Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Influence of dynamic characteristics of the turning process on the workpiece surface roughness

Valery Gvindjiliya^{a, *}, Evgeniy Fominov^b, Denis Moiseev^c, Ekaterina Gamaleeva^d

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

^a  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  vvgvindjiliya@donstu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-0165-7536>,  fominoff83@mail.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-7186-7758>,  denisey2003@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-5829-4695>,  belan_kate80@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 December 2023

Revised: 22 February 2024

Accepted: 15 April 2024

Available online: 15 June 2024

Keywords:

Dynamics of the cutting process

Vibrations

Simulation model

Surface roughness

Funding

The study was supported by a grant within the framework of the «Nauka-2030».

ABSTRACT

Introduction. The formation of the surface of a part when processing it on a metal-cutting machine is based on properly selected cutting modes. Complex methods of ensuring the specified quality of the part surface also take into account the tool geometry, its condition, and include corrections for tool deviation from the trajectory set by the CNC system under the influence of kinematic disturbances and spindle wavering. **Subject.** The paper analyzes the relationship between cutting modes and dynamic characteristics of the turning process, and its mapping into surface roughness. **The aim of the work** is to evaluate the influence of technological cutting modes taking into account the vibration activity of the tool on the roughness of the machined surface by means of simulation modeling. **Method and methodology.** Mathematical simulation of the dynamics of the cutting process is given, on the basis of which a digital simulation model is built. A methodology of using the simulation model for determining optimal cutting modes and predicting surface roughness taking into account tool vibrations is proposed. By means of experiments and analysis of the frequency characteristics of tool vibrations, the created model is validated, parameters of the cutting forces model subsystem and dynamic tool subsystem are specified, and geometrical topologies of the part surface are constructed. The calculated cutting forces are compared with experimental forces, and similar patterns and levels of characteristics are observed. An assessment of the optimality of the selected cutting modes is proposed based on the analysis of the tool vibration spectrum relative to the workpiece and the results of the numerical model simulation. **Results and Discussion.** A comparison of the results of digital modeling of the geometrical surface of the workpiece and the real surface obtained during the field experiment is given. It is shown that the roughness of the real surface obtained by machining with constant cutting modes varies relative to the surface roughness of the simulation model within the limits of not more than 0.066 μm.

For citation: Gvindjiliya V.E., Fominov E.V., Moiseev D.V., Gamaleeva E.I. Influence of dynamic characteristics of the turning process on the workpiece surface roughness. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 143–157. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-143-157. (In Russian).

References

1. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.
2. Tlustý J., Poláček A., Danek C., Spacek J. *Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen*. Berlin, Verlag Technik, 1962. 340 p.
3. Tabenkin A.N., Tarasov S.B., Stepanov S.N. *Sherokhovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyi opyt* [Roughness, waviness, profile. International experience]. St. Petersburg, Politekhnikeskii universitet Publ., 2007. 133 p.
4. Al-Ahmari A.M.A. Mathematical model for determining machining parameters in multipass turning operations with constraints. *International Journal of Production Research*, 2001, vol. 39 (15), pp. 3367–3376. DOI: 10.1080/00207540110052562.

* Corresponding author

Gvindjiliya Valery E., Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer
 Don State Technical University,
 1 Gagarin square,
 344000, Rostov-on-Don, Russian Federation
Tel.: +7 918 583-23-33, **e-mail:** vvgvindjiliya@donstu.ru

5. Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detalei mashin* [The quality of the surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 320 p.
6. Suslov A.G. *Tekhnologicheskoe obespechenie parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detalei* [Technological support of the parameters of the state of the surface layer of the part]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 206 p.
7. Demkin N.B. *Kachestvo poverkhnosti i kontakt detalei mashin* [Surface quality and contact of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 244 p.
8. Benga G.C., Abrao A.M. Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 143, pp. 237–241. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00346-7.
9. Choudhury I.A., El-Baradie M.A. Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 67, pp. 55–61. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02818-X.
10. Upadhyay V., Jain P.K., Mehta N.K. In-process prediction of surface roughness in turning of Ti–6Al–4V alloy using cutting parameters and vibration signals. *Measurement*, 2013, vol. 46 (1), pp. 154–160. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.06.002.
11. Hahn R.S. On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation. *Transactions of American Society of Mechanical Engineers*, 1954, vol. 76, pp. 356–260.
12. Merritt H.E. Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research. *Journal of Engineering for Industry*, 1965, vol. 87, pp. 447–454. DOI: 10.1115/1.3670861.
13. Tobias S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter. *The Engineer*, 1958, vol. 205 (7), pp. 199–203.
14. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos Solitons & Fractals*, 2002, vol. 13, pp. 1531–1535. DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.
15. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. Correlation of attracting sets of tool deformations with spatial orientation of tool elasticity and regeneration of cutting forces in turning. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 30 (1), pp. 37–56. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-1-37-56.
16. Persson H., Agmell M., Bushlya V., Stahl J. Experimental and numerical investigation of burr formation in intermittent turning of AISI 4140. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 58, pp. 37–42. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.165.
17. Patel K.A., Brahmabhatt P.K. A comparative study of the RSM and ANN models for predicting surface roughness in roller burnishing. *Procedia Technology*, 2016, vol. 23, pp. 391–397. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.03.042.
18. Alam S.T., Tomal A.N.M., Nayeem M.K. High-speed machining of Ti–6Al–4V: RSM-GA based optimization of surface roughness and MRR. *Results in Engineering*, 2023, vol. 17, p. 100873. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100873.
19. Abu-Mahfouz I., Rahman A.H.M.E., Banerjee A. Surface roughness prediction in turning using three artificial intelligence techniques: A comparative study. *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 140, pp. 258–267. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.322.
20. Laghari R.A., Samir M. Comprehensive approach toward IIoT based condition monitoring of machining processes. *Measurement*, 2023, vol. 217, p. 113004. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113004.
21. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B. Virtual technological systems for parts processing operations. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 585–605. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.
22. Altintas Y., Eynian M., Onozuka H. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping. *CIRP Annals*, 2008, vol. 57 (1), pp. 371–374. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.048.
23. Altintas Y., Tuysuz O., Habibi M., Li Z.L. Virtual compensation of deflection errors in ball end milling of flexible blades. *CIRP Annals*, 2008, vol. 57 (1), pp. 371–374. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.048.
24. Kabaldin Y.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. The development of a digital twin of a cutting tool for mechanical production. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, vol. 4, pp. 11–17. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-4-11-17.
25. Voronov S.A., Kiselev I.A. Nelineinye zadachi dinamiki protsessov rezaniya [Nonlinear problems of cutting process dynamics]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie = Mechanical Engineering and Engineering Education*, 2017, no. 2 (51), pp. 9–23.
26. Zakovorotny V.L., Bordachev E.V. Prognozirovanie i diagnostika kachestva obrabatyvaemoi detali na tokarnykh stankakh s ChPU [Prediction and diagnostics of the quality of the workpiece on CNC lathes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1996, no. 1, pp. 95–104.
27. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Influence of spindle wobble in turning on the workpiece's surface topology. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, pp. 818–823. DOI: 10.3103/S1068798X18100192.



28. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D., Gubanova A.A., Hristoforova V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, vol. 368, pp. 174–190. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.

29. Sankin Yu.N., Sankin N.Yu. *Ustoichivost' tokarnykh stankov pri nelineinoi kharakteristike protsessa rezaniya* [Stability of lathes with nonlinear characteristics of the cutting process]. Ulyanovsk, UlSTU Publ., 2008. 137 p.

30. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Zavisimost' iznashivaniya instrumenta i parametrov kachestva formiruemoi rezaniem poverkhnosti ot dinamicheskikh kharakteristik [The dependence of tool wear and quality parameters of the surface being cut on dynamic characteristics]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 31–46. DOI: 10.17212/1994-6309-201921.4-31-46.

31. Zakovorotny V.L., Pham D.T., Nguyen X.Ch., Ryzhkin M.N. Modelirovanie dinamicheskoi svyazi, formiruemoi protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (pozitsionnaya svyaz') [Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (positional coupling)]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2011, vol. 11 (3), pp. 301–311.

32. Ali M.H., Khidhir B.A., Ansari M.N.M., Mohamed B. FEM to predict the effect of feed rate on surface roughness with cutting force during face milling of titanium alloy. *Housing and Building National Research Center Journal*, 2013, vol. 9 (3), pp. 263–269. DOI: 10.1016/j.hbrej.2013.05.003.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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>).