

Технология Technology

Научная статья
УДК 621.92(07)
DOI: 10.14529/engin260105

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ПАК

А.В. Акинцева¹, akintsevaav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0588-1401>
П.П. Переверзев¹, pereverzevpp@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1416-8918>
В.Г. Некрутов¹, nekrutovvg@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3458-226X>
Д.В. Моисеев², dvmoiseev@sevsu.ru
В.Г. Шаламов¹, shalamovvg@susu.ru
Б.А. Лопатин³, lopatinba@susu.ru
А.В. Морозов⁴, ntk_2005@rambler.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

³ Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, Златоуст, Россия

⁴ Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена отсутствием в машиностроении эффективных цифровых инструментов для прогнозирования стабильности точности обработки поверхностей при шлифовании, что приводит к необходимости дорогостоящих опытных испытаний, занижению режимов резания и выпуску брака. Особую сложность представляют операции круглого врезного шлифования, являющиеся финишными для точных деталей. Существующие модели часто не учитывают совместного влияния динамических процессов в технологической системе (ТС), переменной податливости заготовки и положения прибора активного контроля (ПАК). Целью работы является разработка модели расчета глубины резания, интегрирующей эти факторы для повышения точности прогнозирования. В статье проанализированы ограничения существующих статических подходов и обоснована необходимость учета динамических колебаний, приводящих к периодическому нарушению контакта между кругом и заготовкой. На основе установленных аналитических зависимостей между силой резания, упругими деформациями, массой заготовки и динамическими параметрами ТС предложена комплексная модель. Модель позволяет рассчитывать фактическую глубину резания, текущие размеры заготовки и радиальные силы в течение всего ступенчатого цикла подачи. Проведенное моделирование демонстрирует существенное влияние динамики: увеличение массы заготовки может повышать фактическую радиальную подачу до 16 %, вызывать колебания скорости подачи до ± 46 % и радиальной силы резания до ± 34 % по сравнению со статическим расчетом. Разработанная модель служит основой для создания цифрового двойника процесса шлифования, позволяющего виртуально проверять и оптимизировать технологические циклы, прогнозировать показатели точности формы и размеров, что в перспективе позволит сократить брак и повысить производительность.

Ключевые слова: круглое врезное шлифование, глубина резания, динамика технологической системы, прибор активного контроля (ПАК), точность обработки, цифровой двойник

Для цитирования: Модель расчета глубины резания с учетом динамики технологической системы и положения ПАК / А.В. Акинцева, П.П. Переверзев, В.Г. Некрутов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2026. Т. 26, № 1. С. 51–61. DOI: 10.14529/engin260105

MODEL FOR ESTIMATING THE DEPTH OF CUT WITH REGARD TO MACHINE TOOL SYSTEM DYNAMICS AND IN-PROCESS GAUGE POSITION

A.V. Akintseva¹, akintsevaav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0588-1401>
P.P. Pereverzev¹, pereverzevpp@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1416-8918>
V.G. Nekrutov¹, nekrutovvg@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3458-226X>
D.V. Moiseev², dvmoiseev@sevsu.ru
V.G. Shalamov¹, shalamovvg@susu.ru
B.A. Lopatin³, lopatinba@susu.ru
A.V. Morozov⁴, ntk_2005@rambler.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

³ South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russia

⁴ Vladimir State University named after A. and N. Stoletovs, Vladimir, Russia

Abstract. The relevance of the study is driven by the lack of effective digital tools in mechanical engineering for predicting the stability of surface machining accuracy during grinding. This leads to costly pilot tests, understated cutting conditions, and the production of defective parts. External plunge grinding operations, which are final for precision parts, present a particular challenge. Existing models often fail to account for the combined influence of dynamic processes in the technological system (TS), variable workpiece compliance, and the position of the active control device (ACD). The aim of this work is to develop a cutting depth model that integrates these factors to improve prediction accuracy. The paper analyzes the limitations of existing static approaches and substantiates the necessity of considering dynamic vibrations that lead to periodic loss of contact between the wheel and the workpiece. Based on established analytical relationships between cutting force, elastic deformations, workpiece mass, and dynamic parameters of the TS, a comprehensive model is proposed. The model allows for calculating the actual cutting depth, current workpiece dimensions, and radial forces throughout the entire step-feed cycle. The conducted simulation demonstrates the significant impact of dynamics: an increase in workpiece mass can raise the actual radial feed by up to 16 %, cause fluctuations in feed rate of up to ± 46 %, and fluctuations in radial cutting force of up to ± 34 % compared to static calculations. The developed model serves as a basis for creating a digital twin of the grinding process, enabling virtual verification and optimization of technological cycles, and predicting indicators of form and dimensional accuracy. This paves the way for reducing defects and increasing productivity.

Keywords: plunge cylindrical grinding, cutting depth, technological system dynamics, active control device (ACD), machining accuracy, digital twin

For citation: Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Nekrutov V.G., Moiseev D.V., Shalamov V.G., Lopatin B.A., Morozov A.V. Model for estimating the depth of cut with regard to machine tool system dynamics and in-process gauge position. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2026:26(1):51–61. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin260105

Введение

Цель и актуальность исследования. Повышение точности и производительности операций механической обработки остается одной из ключевых задач современного машиностроения. Особую важность эта проблема приобретает для финишных операций, таких как круглое врезное шлифование, где требования к точности размеров, формы и взаимного расположения поверхностей максимально высоки. В настоящее время отсутствуют надежные цифровые инструменты, позволяющие на этапе технологической подготовки производства прогнозировать стабильность достижения заданных показателей точности. Это вынуждает предприятия прибегать к дорогостоящим и длительным опытным наладкам, вручную корректировать режимы резания и занижать

их для гарантированного исключения брака, что негативно сказывается на общей производительности. Таким образом, целью данного исследования является разработка модели расчета глубины резания, которая позволит учитывать комплекс технологических факторов для точного прогнозирования формообразования поверхности и стабильности точности при круглом врезном шлифовании.

Обзор литературы. Анализ современных исследований показывает, что значительное число работ посвящено прогнозированию параметров шероховатости поверхности при шлифовании [1–6]. Вопросы же обеспечения точности в смысле соблюдения геометрических размеров и формы, особенно в условиях серийного производства, изучены в меньшей степени. Имеющиеся работы [7–18] затрагивают отдельные аспекты влияния упругих деформаций технологической системы (ТС) или тепловых явлений. Однако в них недостаточно внимания уделяется совместному влиянию динамических процессов в ТС и положения прибора активного контроля (ПАК), который является ключевым элементом управления циклом подачи. Существующие модели, как правило, носят статический характер [19, 20] и не учитывают колебаний, приводящих к периодическому нарушению контакта между шлифовальным кругом и заготовкой, что существенно искажает реальную картину съема материала.

Постановка проблемы и формулирование гипотезы. На основании обзора литературы выявлена следующая проблема: статические модели расчета процессов шлифовании неадекватно описывают реальный процесс формообразования из-за пренебрежения динамическими эффектами и пространственным положением системы контроля. Это приводит к значительным расхождениям между расчетными и фактическими параметрами точности. В связи с этим выдвинута гипотеза, что разработка модели, интегрирующей влияние динамики технологической системы, переменной податливости заготовки и положения ПАК, позволит значительно повысить точность прогнозирования глубины резания, силовых нагрузок и, как следствие, итоговых показателей точности обработанной детали.

Методология исследования. В основе исследования лежит аналитическое моделирование процесса круглого врезного шлифовании. Для учета динамических явлений использован подход, описывающий колебания системы и возникновение «динамического зазора» между кругом и заготовкой. Модель строится на системе взаимосвязанных аналитических зависимостей, связывающих радиальную подачу, силу резания, упругие деформации ТС, массу заготовки и кинематические параметры процесса [12]. Валидация модели проводится путем сравнительного анализа результатов симуляции с учетом динамики и без, с оценкой влияния на такие параметры, как фактическая подача, сила резания и величина упругих деформаций.

Структура работы. Статья структурирована следующим образом: после введения представлена постановка задачи, где детально описан принцип управления циклом шлифовании с помощью ПАК и проанализировано влияние его положения на точность. Далее излагается разработанная модель расчета глубины резания с учетом динамики ТС. Затем приведены результаты математического моделирования и их анализ. В заключительном разделе сформулированы основные выводы и перспективы практического применения разработанной модели.

Материалы и методы

Круглое врезное наружное шлифование является одним из распространенных видов шлифовании. Управление врезной радиальной подачей осуществляется на основе данных прибора активного контроля (ПАК), который измеряет диаметр заготовки в одном сечении. Величина оставшегося припуска на диаметр ($2\Pi_z$) рассчитывается как разность между текущим диаметром, измеренным ПАК ($d_{\text{пак}_z}$), и конечным целевым диаметром.

Исходно припуск максимален ($2\Pi_{\text{max}}$), а к концу цикла шлифовании снижается до нуля. Шлифование завершается, когда пак фиксирует достижение заданного среднего диаметра (d_{cp}), который обычно соответствует середине поля допуска по чертежу. Таким образом, пак настраивается на этот средний диаметр, что и является целевым значением для всего цикла обработки. Пак настраивается по среднему диаметру заготовки, который представляет собой середину поля допуска детали по чертежу:

$$d_{\text{cp}} = 0,5(d_{\text{es}} + d_{\text{ei}}), \quad (1)$$

где d_{es} и d_{ei} – максимальный и минимальный диаметры детали по чертежу, мм.

При круглом наружном врезном шлифовании ПАК переключает скорость подачи на следующую ступень, когда диаметр обрабатываемой поверхности достигает заранее заданного значения $d_{нак_z}$. Таким образом, ПАК управляет процессом, ориентируясь непосредственно на текущий размер детали, а не на расчетный остаток припуска. Соответственно, значение каждого следующего настроечного диаметра $d_{нак_z}$ рассчитывается по завершении предыдущей ступени цикла:

$$d_{нак_{z=1}} = d_{cp} + (2\Pi_{z=2} + 2\Pi_{z=3} + 2\Pi_{z=4}), \quad (2)$$

$$d_{нак_{z=2}} = d_{cp} + (2\Pi_{z=3} + 2\Pi_{z=4}), \quad (3)$$

$$d_{нак_{z=3}} = d_{cp} + 2\Pi_{z=4}, \quad (4)$$

$$d_{нак_{z=4}} = d_{cp}, \quad (5)$$

где d_{cp} – средний диаметр заготовки, определяется по формуле (1), мм; $d_{нак_z}$ – диаметр, в котором установлен ПАК, мм; $2\Pi_z$ – величина снятого припуска на z -й ступени цикла, мм.

Цикл шлифования завершается на последней ступени ($z = Z_{max}$) при достижении диаметром детали значения $d_{нак_z} = Z_{max}$, после чего ПАК инициирует отвод шлифовального круга.

Выделим на всей длине заготовки 5 сечений на равном расстоянии друг от друга (начальное – С1, среднее – С3 и конечное – С5), имеющих разную податливость (рис. 1). Величина снимаемого припуска в каждом сечении будет иметь свое значение, так как податливость заготовки переменна по длине. Поэтому величина снимаемого припуска для каждого сечения также будет различной, так как ПАК может быть установлен в произвольном месте и настроечный диаметр ПАКа может совпасть с любым из пяти диаметров. На рис. 1 показано изменение снимаемого припуска при размещении ПАК в разных сечениях. В результате можно сказать о том, что различное расположение ПАК на длине заготовки оказывает значительное влияние на точность обработки.

Податливость является одним из важных параметров, влияющих на стабильность показателей точности при механической обработке. Податливость ТС в случае круглого врезного шлифования напрямую зависит от величины упругих деформаций заготовки. В настоящий момент имеются работы [19, 20], направленные на установления взаимосвязи между глубиной резания, упругими деформациями ТС и силой резания для различных видов круглого шлифования, но отсутствуют работы, учитывающие влияние динамики на упругие деформации ТС.

Процесс круглого врезного шлифования характеризуется колебаниями: ось заготовки отклоняется по синусоидальному закону из-за упругих деформаций технологической системы (рис. 2). Амплитуда этих колебаний и результирующих сил резания в 2–5 раз превышает значения, рассчитанные по статической модели [21].

Как видно на рис. 2, из-за колебаний между кругом и заготовкой образуется зазор, в результате чего круг не контактирует одновременно по всей длине обрабатываемой поверхности. В такие моменты фактический съем материала ($\Delta s_{\phi z}$) падает до нуля, что физически означает прекращение процесса резания. Следовательно, для адекватного моделирования съема припуска необходимо учитывать динамические эффекты, а не ограничиваться статической моделью.

На основании установленной взаимосвязи между динамикой процесса, упругими деформациями ТС и др. технологическими параметрами (характеристикой круга, режимами резания и т. д.), получена формула для расчета глубины резания [20]:

$$S_{\phi z, i} = \left[\frac{-jK_2}{2(1 + jK_1)} + \sqrt{\left(\frac{jK_2}{2(1 + jK_1)} \right)^2 + \frac{S_{\Pi z, i} + jP_{y z, i} - jm(\ddot{y}_{z, i} - \ddot{y}_{z, i-1})}{(1 + jK_1)}} \right]^2, \quad (6)$$

где i – номер оборота детали; z – номер ступени цикла; $S_{\Pi z, i}(S_{\phi z, i})$ – программная (фактическая) радиальная подача, мм/об; m – масса заготовки, кг; K_3, K_4 – поправочные коэффициенты (формулы (7), (8)); j – податливость ТС, мм/Н; P_y – радиальная сила резания, Н; \ddot{y} – ускорение упругих деформаций, мм/мин² (формула (9)).

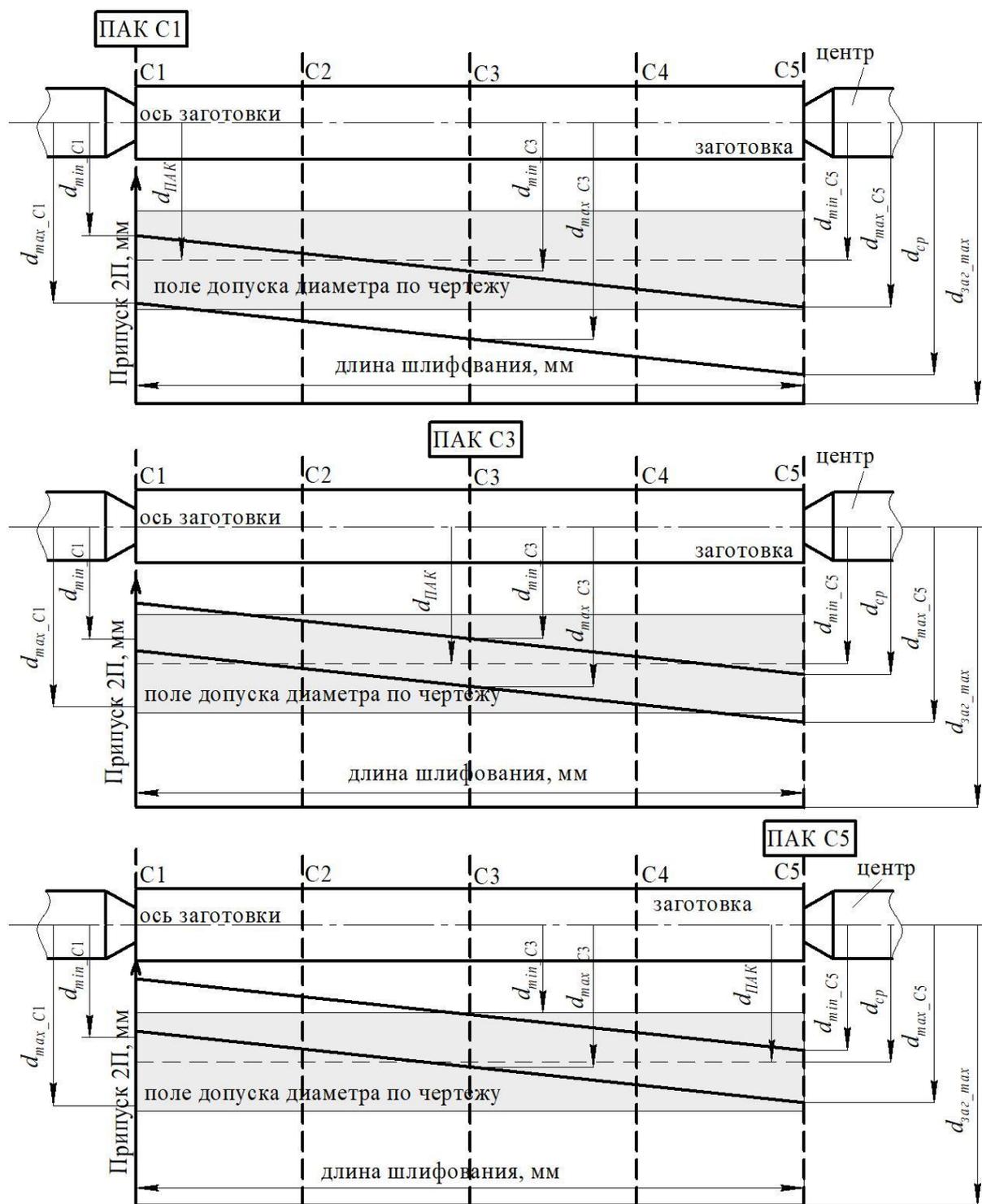


Рис. 1. Изменение величины снимаемого припуска при размещении ПАК в начальном, среднем и конечном сечении заготовки

Fig. 1. Change in the amount of stock removed when placing an active control device in the initial, middle, and final cross-sections of the workpiece



Рис. 2. Схема положения «зазора динамики» между кругом и заготовкой (величина зазора на рисунке сильно завышена для наглядности)

Fig. 2. Diagram of the “Dynamic Gap” position between the wheel and the workpiece (the gap size in the figure is greatly exaggerated for clarity)

$$K_3 = \pi dBn \frac{\sigma_i \varepsilon_i \operatorname{tg} \beta}{V_{кр}}, \quad (7)$$

$$K_4 = \eta B \frac{\sigma_i}{3} \sqrt{\frac{dD}{d+D}}, \quad (8)$$

$$\ddot{y}_\tau = -A\omega_n^2 \cos(\omega_n \tau) - B\omega_n^2 \sin(\omega_n \tau) - \frac{v_3}{\omega_n^3} - \frac{a^2 v_4}{\omega_n^3 + a^2} e^{-a\tau}, \quad (9)$$

где σ_i – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм²; η – степень затупления круга; $V_{кр}$ – скорость вращения круга, м/с; d – диаметр заготовки, мм; B – высота круга, мм; D – диаметр круга, мм; β – угол между вектором скорости зерна и равнодействующей силы, действующей в зоне стружкообразования при резании единичным острым зерном, град.; ε_i – среднее значение интенсивности степени деформаций; A и B – составляющие амплитуды вибрации, мм (формулы (10), (11)); ω_n – угловая собственная частота технологической системы, 1/с (12); a – частота колебания – формула (13), Гц; v_1, v_2, v_3, v_4 – коэффициенты, находящиеся по формулам (14)–(17):

$$A = \frac{v_4}{\omega_n^2 + a^2} - \frac{v_3}{\omega_n^4} - \frac{v_1}{\omega_n^2}, \quad (10)$$

$$B = \frac{S_{\Pi z, i}}{\omega_n} - \frac{v_2}{\omega_n^3} - \frac{av_4}{\omega_n(\omega_n^2 + a^2)}, \quad (11)$$

$$w = \frac{1}{\sqrt{jm}}, \quad (12)$$

$$a = \frac{1}{T}, \quad (13)$$

$$v_1 = \frac{K_1 S_{\Phi z, i} + 0,414 K_2 \sqrt{S_{\Phi z, i}}}{m}, \quad (14)$$

$$v_2 = \frac{0,531 K_2 \sqrt{S_{\Phi z, i}}}{mT}, \quad (15)$$

$$v_3 = \frac{0,3 K_2 \sqrt{S_{\Phi z, i}}}{mT^2}, \quad (16)$$

$$v_4 = \frac{K_1 S_{\phi z, i}}{m}, \quad (17)$$

где T – постоянная времени, определяющаяся по формуле

$$T = j \left(K_1 + \frac{K_2}{2\sqrt{S_{\Pi z, i}}} \right). \quad (18)$$

Моделирование съема материала при обработке партии деталей должно учитывать изменчивость технологических условий, таких как колебания припуска и степени затупления круга, как с учетом динамики процесса, так и без нее. Для этого необходимы расчеты для всех возможных сочетаний этих переменных при каждом варианте размещения прибора активного контроля (ПАК) вдоль заготовки.

Аналитические зависимости, полученные в работе [20], в том числе зависимость (6), лягут в основу цифрового двойника процесса шлифования. Они позволяют рассчитывать силы резания, глубину резания и изменение размеров заготовки в течение всего цикла. Это создает основу для прогнозирования стабильности показателей точности поверхности с учетом переменных условий, упругих деформаций, динамики технологической системы и положения ПАК. Подробное описание модели расчета глубины резания представлено в [20].

С помощью разработанной модели расчета глубины резания в ступенчатом цикле подачи круглого врезного шлифования с учетом массы заготовки, переменной податливости ТС и позиционирования ПАК построены графики, показанные на рис. 3. Из графиков видно, как увеличение массы увеличивает фактическую радиальную подачу до 16 % (по сравнению с ситуацией без динамики) и что её увеличение влияет попеременно на фактическую скорость подачи до $\pm 46\%$ (по сравнению без динамики) и по радиальной силе резания попеременно также до $\pm 34\%$ (по сравнению без динамики). Упругая деформация уменьшается до 9 % (по сравнению без динамики) с увеличением массы.

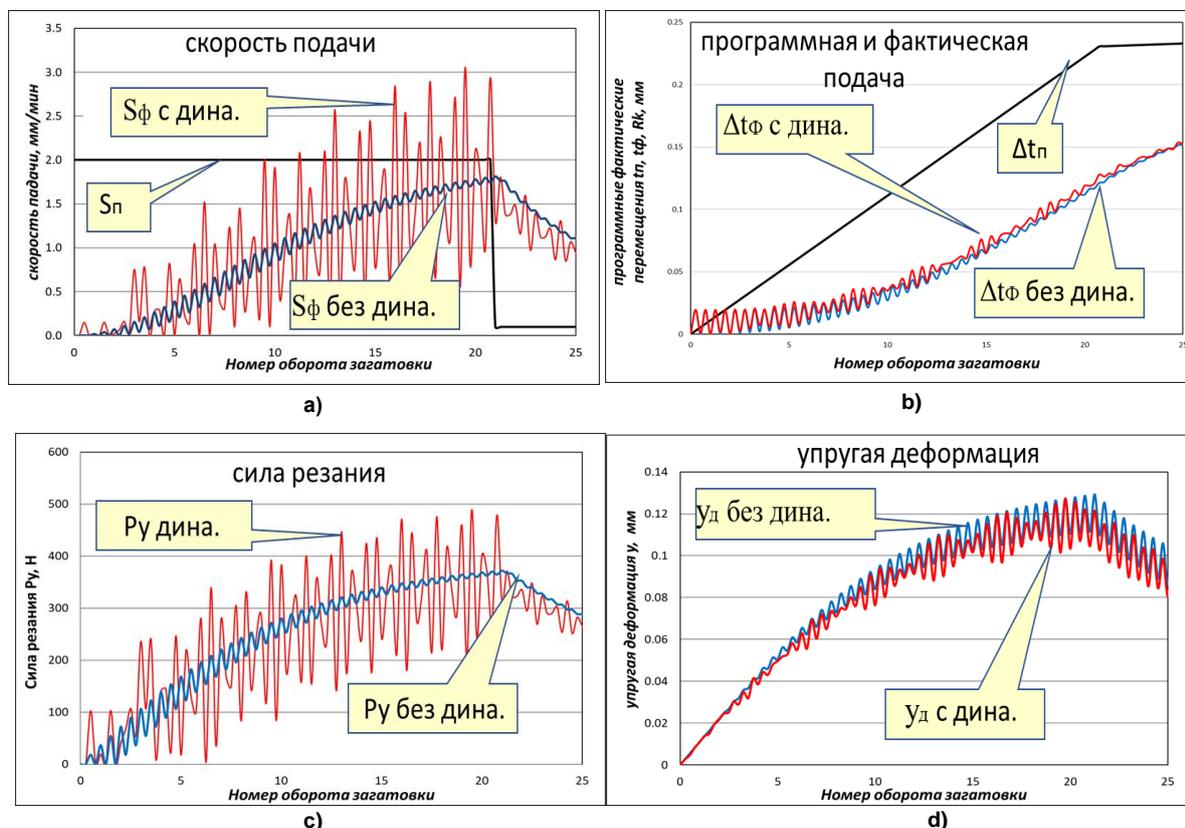


Рис. 3. График изменения скорости врезной подачи (а), программной и фактической подачи (б), силы резания (с) и упругих деформаций технологической системы (д) с учетом динамики и без учета динамики

Fig. 3. Graph of changes in the feed rate (a), programmed and actual feed (b), cutting force (c) and elastic deformations of the technological system (d) taking into account the dynamics and without taking into account the dynamics

Результаты и обсуждения

1. Актуальность. В настоящий момент в машиностроительной отрасли отсутствует цифровой инструмент, позволяющий заранее (до запуска изделия в производство) прогнозировать стабильность показателей точности обрабатываемой поверхности в цифровой среде. Зачастую назначенные технологом режимы резания с целью достижения заданных требований чертежа являются заниженными и требуют адаптации к реальным производственным условиям, что приводит к дополнительным материальным и временным затратам, повышению количества выпускаемого брака, снижению производительности операций шлифования и другим негативным последствиям для производства.

2. Ключевой фактор. Динамика процесса круглого врезного шлифования существенно влияет на технологические параметры, поэтому расчет глубины резания должен учитывать динамические свойства технологической системы.

3. Предложенное решение. Разработана модель расчета глубины резания, которая интегрирует влияние переменных условий обработки, упругих деформаций, динамики ТС и положения прибора активного контроля (ПАК) для расчета сил резания, глубины резания и текущих размеров заготовки.

4. Возможности модели. Модель позволяет визуализировать процесс формообразования поверхности путем расчета текущих радиусов на протяжении всего процесса шлифования, что дает возможность прогнозировать итоговые показатели точности детали на основе данных симуляции.

5. Области применения. Возможным направлением применения данных разработок может быть не только проверка уже применяемых на производстве циклов на количество выпускаемого брака (стабильность показателей точности), но и оптимизация циклов круглого врезного шлифования.

Список литературы

1. Gong Y.D., Wang B., Wang W.S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology // *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 129. P. 123–126. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00589-7.

2. Hecker R.L., Liang S.Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2003. Vol. 43. P. 755–759. DOI: 10.1080/10910344.2015.1018535.

3. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2002. Vol. 42. P. 969–977. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00011-1.

4. Chen B., Zha J., Cai Z., Wu M. Predictive modelling of surface roughness in precision grinding based on hybrid algorithm // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2025. Vol. 59. P. 1–17. DOI: 10.1016/j.cirpj.2025.02.004.

5. Hadad M., Attarsharghi S., Abyaneh M.D. et al. Exploring New Parameters to Advance Surface Roughness Prediction in Grinding Processes for the Enhancement of Automated Machining // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024. Vol. 8, no. 1. P. 1–16. DOI: 10.3390/jmmp8010041.

6. Zhang Z., Li J., Lu L. et al. Intelligent modeling and detection in grinding: a review of advances, challenges, and prospects // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol. 138. P. 4995–5055. DOI: 10.1007/s00170-025-15711-8.

7. Ломова О.С., Сорокина И.А. Исследование точности процесса круглого шлифования имитационным моделированием // *Омский научный вестник*. 2013. № 2 (120). С. 99–102.

8. Братан С.М., Рощупкин С.И., Сидоров Д.Е., Новиков П.А. Анализ формы шлифованных поверхностей при круглом шлифовании // *Учёные записки Крымского инженерно-педагогического университета*. 2020. № 1 (67). С. 259–262.

9. Никитин С.П. Влияние колебаний динамической системы станка на точность и температуру при шлифовании // *Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2010. № 12. С. 31–47.

10. Leonasio M., Parenti P., Cassinari A. et al. A Time-Domain Surface Grinding Model for Dynamic Simulation // *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 4. P. 166–171. DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030.

11. Amon G., Jin W., Uwimbabazi A. Modeling of Vibration Condition in Flat Surface Grinding Process // *Shock and Vibration*. 2020. Vol. 12. P. 1–12. DOI: 10.1155/2020/3069895.
12. He X., Zhang Q., Li R. et al. Priority Analysis and Optimization for Accuracy Allocation of Precision Grinding Machine Considering Manufacturing Accuracy and Cost // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2024. Vol. 26. P. 599–612. DOI: 10.1007/s12541-024-01117-1.
13. Li Y., Tian Z., Zhang Y., Zhang D. Sensitivity analysis of error term of machine tools considering randomness // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025. Vol. 47, article number 189. DOI: 10.1007/s40430-025-05485-1.
14. Chen Z., Li X., Zhu Z. et al. The optimization of accuracy and efficiency for multistage precision grinding process with an improved particle swarm optimization algorithm // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2020. Vol. 17, no. 1. P. 1–13. DOI: 10.1177/1729881419893508.
15. Hu L., Li Y., Zha J., Chen Y. A “Double Accuracy Theory” and Experimental Research on Precision Grinding // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 6. P. 1–16. DOI: 10.3390/app10062030.
16. Rowe W. Towards High Productivity in Precision Grinding // *Inventions*. 2018. Vol. 3, no. 2. P. 1–16. DOI: 10.3390/inventions3020024.
17. You T., Han J., Tian X. et al. Multi-objective optimization of grinding process parameters for improving gear machining precision // *Journal of Central South University*. 2025. Vol. 32. P. 538–551. DOI: 10.1007/s11771-025-5877-7.
18. Meng Q., Guo B., Li K. et al. Stability prediction and optimization of multi-regenerative weak stiffness grinding system based on microstructured tool // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024. Vol. 208, article number 111010. DOI: 10.1016/j.ymssp.2023.111010.
19. Zhang Z., Jiang F., Luo M. et al. Geometric error measuring, modeling, and compensation for CNC machine tools: A review // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2023. Vol. 37, no. 2. P. 163–198. DOI: 10.1016/j.cja.2023.02.035.
20. Акинцева А.В., Алмаващ А.Д., Переверзев П.П., Прохоров А.В. Влияние динамических перемещений технологической системы станка на точность обработки на примере круглого врезного шлифования // *СТИН Станки Инструмент*. 2021. № 7. С. 23–27.
21. Sidorov D. Building a dynamic model of the internal cylindrical grinding process // *International Conference on Industrial Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 400–405. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.739.

References

1. Gong Y.D., Wang B., Wang W.S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 129, pp. 123–126. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00589-7
2. Hecker R.L., Liang S.Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, vol. 43, pp. 755–759. DOI: 10.1080/10910344.2015.1018535
3. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, vol. 42, pp. 969–977. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00011-1
4. Chen B., Zha J., Cai Z., Wu M. Predictive modelling of surface roughness in precision grinding based on hybrid algorithm. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2025, vol. 59, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.cirpj.2025.02.004
5. Hadad M., Attarsharghi S., Abyaneh M.D., Narimani P., Makarian J., Saberi A., Alinaghizadeh A. Exploring New Parameters to Advance Surface Roughness Prediction in Grinding Processes for the Enhancement of Automated Machining. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.3390/jmmp8010041
6. Zhang Z., Li J., Lu L., Wang Z., Liang X., Zhang Y. Intelligent modeling and detection in grinding: a review of advances, challenges, and prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 138, pp. 4995–5055. DOI: 10.1007/s00170-025-15711-8
7. Lomova O.S., Sorokina I.A. [Investigation of the accuracy of the cylindrical grinding process by simulation modeling]. *Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 2(120), pp. 99–102. (In Russ.)

8. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Sidorov D.E., Novikov P.A. [Analysis of the shape of ground surfaces during cylindrical grinding]. *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*, 2020, no. 1(67), pp. 259–262. (In Russ.)
9. Nikitin S.P. [Influence of oscillations of the machine dynamic system on the accuracy and temperature during grinding]. *Bulletin of the Perm State Technical University. Mechanical Engineering, Materials Science*, 2010, no. 12, pp. 31–47. (In Russ.)
10. Leonesio M., Parenti P., Cassinari A., Bianchi G., Monn M. A Time-Domain Surface Grinding Model for Dynamic Simulation. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 4, pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030
11. Amon G., Jin W., Uwimbabazi A. Modeling of Vibration Condition in Flat Surface Grinding Process. *Shock and Vibration*, 2020, vol. 12, pp. 1–12. DOI: 10.1155/2020/3069895
12. He X., Zhang Q., Li R., Tang W.Y., Peng Y. Priority Analysis and Optimization for Accuracy Allocation of Precision Grinding Machine Considering Manufacturing Accuracy and Cost. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2024, vol. 26, pp. 599–612. DOI: 10.1007/s12541-024-01117-1
13. Li Y., Tian Z., Zhang Y., Zhang D. Sensitivity analysis of error term of machine tools considering randomness. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2025, vol. 47, article number 189. DOI: 10.1007/s40430-025-05485-1
14. Chen Z., Li X., Zhu Z., Zhao Z., Wang L., Jiang S., Rong Y. The optimization of accuracy and efficiency for multistage precision grinding process with an improved particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 1–13. DOI: 10.1177/1729881419893508
15. Hu L., Li Y., Zha J., Chen Y. A “Double Accuracy Theory” and Experimental Research on Precision Grinding. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 6, pp. 1–16. DOI: 10.3390/app10062030
16. Rowe W. Towards High Productivity in Precision Grinding. *Inventions*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 1–16. DOI: 10.3390/inventions3020024
17. You T., Han J., Tian X., Tang J., Lu Y., Li G., Xia L. Multi-objective optimization of grinding process parameters for improving gear machining precision. *Journal of Central South University*, 2025, vol. 32, pp. 538–551. DOI: 10.1007/s11771-025-5877-7
18. Meng Q., Guo B., Li K., Wu G., Zhao H., Jia N.J., Guo Z., Zhao Q. Stability prediction and optimization of multi-regenerative weak stiffness grinding system based on microstructured tool. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, vol. 208, article number 111010. DOI: 10.1016/j.ymssp.2023.111010
19. Zhang Z., Jiang F., Luo M., Wu B., Zhang D., Tang K. Geometric error measuring, modeling, and compensation for CNC machine tools: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 37, no. 2, pp. 163–198. DOI: 10.1016/j.cja.2023.02.035
20. Akintseva A., Almavash A.M., Pereverzev P., Prokhorov A.V. Influence of Dynamic Displacement of the Machining System on the Accuracy of Plunge Grinding. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 10, pp. 957–961. DOI: 10.3103/s1068798x21110004x
21. Sidorov D. Building a dynamic model of the internal cylindrical grinding process. *International Conference on Industrial Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 400–405. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.739

Информация об авторах

Акинцева Александра Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; akintsevaav@susu.ru

Переверзев Павел Петрович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры технологий автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; pereverzevpp@susu.ru

Некрутов Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nekrutovvg@susu.ru

Моисеев Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, доцент, директор инновационного образовательного центра «Центр искусственного интеллекта СевГУ», декан факультета информационных технологий, заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы», Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия; dvmoiseev@sevsu.ru

Шаламов Виктор Георгиевич, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shalamovvg@susu.ru

Лопатин Борис Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, Златоуст, Россия; lopatinba@susu.ru

Морозов Алексей Валентинович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Владимирский государственный университет, им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия; ntk_2005@rambler.ru

Information about the authors

Alexandra V. Akintseva, PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Mechanical Engineering Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; akintsevaav@susu.ru

Pavel P. Pereverzev, DSc (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Mechanical Engineering Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; pereverzevpp@susu.ru

Vladimir G. Nekrutov, PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Mechanical Engineering Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nekrutovvg@susu.ru

Dmitry V. Moiseev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Innovative Educational Center ЭCenter for Artificial Intelligence of SevSUЭ, Dean of the Faculty of Information Technology, Head of the Department of Information Technology and Systems, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia; dvmoiseev@sevsu.ru

Viktor G. Shalamov, Doctor of Technical Sciences, Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shalamovvg@susu.ru

Boris A. Lopatin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machines, and Tools, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russia; lopatinba@susu.ru

Alexey V. Morozov, doctor of science, professor of machine building technology department, Vladimir State University named after A. and N. Stoletovs, Vladimir, Russia; ntk_2005@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 23.10.2025; принята к публикации 30.10.2025.

The article was submitted 23.10.2025; accepted for publication 30.10.2025.