

- [15] Samsung, “Galaxy S23 Ultra Camera Features,” [Online]. Available: <https://www.samsung.com/galaxy>, 2023.
- [16] Raspberry Pi, “Camera Module v3 Documentation,” [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/camera>, 2023.
- [17] P. Grother et al., “Performance of Contactless Biometric Systems,” NIST Report, 2021.
- [18] Intel, “RealSense D435 Technical Specifications,” [Online]. Available: <https://www.intel.com/realsense>, 2023.
- [19] Artec Group, “Artec Eva 3D Scanner Overview,” [Online]. Available: <https://www.artec3d.com/eva>, 2023

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВРЕЗНОГО КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ

Сулюкова Лариса Фаритовна

*профессор кафедры «Цифровые технологии и искусственный интеллект» НИУ
«ТИИМСХ»
slf72@yandex.com*

Джумаев Синдор Нематович

*соискатель Самаркандского государственного университета им. Ш.Рашидова,
sindordjumayev@gmail.com*

Иминжонова Мавлудахон Авазбек кизи

*НИИ Развития цифровых технологий и искусственного интеллекта, стажёр-
исследователь
mavludaxon1420@gmail.com*

Аннотация: В статье рассмотрена роль цифровых моделей и систем на основе метаданных в анализе и оптимизации технологических процессов механообрабатывающей промышленности. На примере процесса круглого наружного врезного шлифования, смоделированного в программной среде, выполнен пошаговый анализ динамической системы процесса.

Ключевые слова: цифровая модель, метаданные, механообработка, процесс шлифования, динамическая система.

DIGITAL MODELING TECHNOLOGIES IN THE MACHINING INDUSTRY - A CASE OF CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING PROCESS

Abstract: This paper investigates the role of digital models and metadata-based systems in analyzing and optimizing technological processes in the machining industry. Using cylindrical plunge grinding as an example, modeled in the software environment, the study provides a step-by-step analysis of the dynamic system involved.

Keywords: digital model, metadata, machining, grinding process, dynamic system.

MEXANIK ISHLOV BERISH SANOATIDA RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR KESIB AYLANA SILLIQLASH JARAYONINI MODELLASHTIRISH MISOLIDA

Annotatsiya: Ushbu maqolada mexanik ishlov berish sanoatining texnologik jarayonlarini tahlil qilish va optimallashtirishda metama'lumotlarga asoslangan raqamli modellar va tizimlarning o'rni ko'rib chiqilgan. Dasturiy muhitda modellashtirilgan dumaloq tashqi o'yuma

silliqlash jarayoni misolida jarayonning dinamik tizimini bosqichma-bosqich tahlil qilish amalga oshirildi.

Kalit soʻzlar: raqamli model, metama'lumotlar, mexanik ishlov berish, silliqdash jarayoni, dinamik tizim.

Введение. Концепции индустрии 4.0 и цифровых двойников предполагают тесную интеграцию виртуальных моделей с реальными станками, что дает возможность в режиме реального времени наблюдать и оптимизировать технологические процессы [1]. Важную роль здесь играют метаданные цифровых моделей, то есть данные об основных характеристиках технологической системы в динамике. Благодаря метаданным цифровые модели становятся само описательными, они содержат сведения о себе и об условиях проведения виртуального эксперимента, что облегчает воспроизведение результатов и их сопоставление с физическими экспериментами [2]. В итоге комбинация цифровых моделей и систем, основанных на метаданных, дает инженерам мощные инструменты для анализа и оптимизации технологических процессов без необходимости дорогостоящих испытаний на реальном оборудовании.

Оптимизация шлифования через моделирование. Одним из примеров эффективности цифровых технологий является процесс круглого наружного врезного шлифования (plunge grinding). Это распространенный метод чистовой обработки цилиндрических поверхностей. Применение имитационного моделирования позволяет предсказывать динамическое поведение системы «станок-деталь-круг» и находить оптимальные режимы. Моделирование служит цифровым двойником процесса, имитируя взаимодействие в динамической системе с учетом упругих и инерционных характеристик станка. Особое внимание уделено выявлению и подавлению вибраций при шлифовании с помощью цифровых методов.

Динамическая модель системы шлифования. В качестве объекта исследования выбрана технология врезного шлифования (рис. 1). Данная система обладает собственными колебательными частотами (резонансами), которые могут возбуждаться при взаимодействии круга с деталью [3].

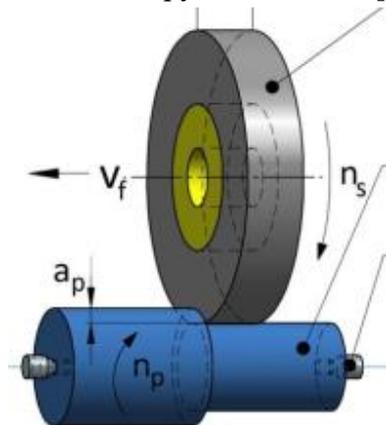


Рис. 1. Схема процесса наружного врезного шлифования.

Модель учитывает три степени свободы системы, соответствующие: колебаниям детали в центрах, колебаниям узла шпиндель-круг, и колебаниям шлифовальной бабки относительно станины. Кроме механических параметров, в модель введены характеристики процесса резания.

Моделирование и вычислительные методы. Динамическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих колебания связки масс с упругими связями под воздействием переменной силы резания:

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + cx(t) = F(t, x, \dot{x}),$$

где: m — масса элемента системы; b — коэффициент демпфирования; c — жёсткость элемента системы; $x(t)$ — перемещение масс во времени; $F(t, x, \dot{x})$ — внешняя переменная сила резания, зависящая от текущей глубины резания и предыдущего профиля поверхности [4].

Сила резания моделируется исходя из глубины резания. На каждый шаг вращения вычисляется мгновенная толщина снимаемого слоя и, соответственно, сила шлифования. Важно отметить, что сила резания зависит не только от текущей глубины резания, но и от наличия волнистости на детали – т.е. от профиля поверхности, оставшегося после предыдущего оборота. Именно за счет этого реализуется регеративный эффект (эффект самовозбуждения): колебания, возникшие в предыдущем обороте, влияют на текущее резание через неровности на поверхности детали [5].

Имитационное моделирование выполнено численным интегрированием системы дифференциальных уравнений во времени, использован метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Шаг интегрирования выбирался достаточным для точного отслеживания высокочастотных составляющих. Контрольные точки (результаты) собирались с дискретностью, соответствующей угловому шагу 1° вращения детали, что позволило с высокой детализацией построить графики сигналов за каждый оборот шлифования. На рис. 2, показаны четыре сигнала: деформация упругой системы станка $d = dh - x_2$ и далее, по мере уменьшения сигналов упругого отжатия: x_1 – детали, L – шлифовального круга со шпинделем, x_3 –шлифовальной бабки. Все вышеперечисленные сигналы регистрировались в ходе виртуального эксперимента.

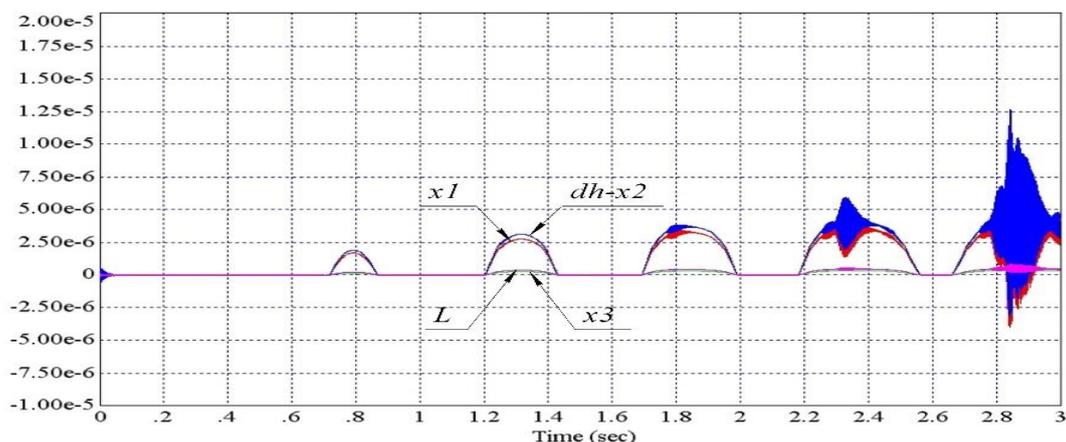


Рис. 2. Деформация упругой системы станка

Результаты. Имитационная модель позволила отследить эволюцию глубины резания с течением времени. На рис. 2 показаны сигналы, характеризующие упругую систему станка во время шлифования: суммарная деформация d и ее составляющие по узлам станка (x_1 , L , x_3). Сигнал $d = dh - x_2$ представляет разность между положением подвижки подачи и фактической глубиной резания, то есть величину упругого отжатия инструмента за счет деформаций станка. Анализ вклада отдельных компонентов показал, что основная часть упругого смещения приходится на прогиб детали x_1 . Несколько меньшей является амплитуда колебаний узла шпиндель-круг L , и еще меньшей – прогиб массивной бабки x_3 . Таким образом, для выбранной схемы станка наиболее слабым звеном по жесткости является заготовка (вал) в центрах – она обладает наименьшей жесткостью c_1 , что и приводит к заметным упругим колебаниям именно детали. В стационарном режиме резания значение d стабилизируется, отражая постоянное упругое смещение порядка $(8 - 4,2) \approx 3,8$ мкм – именно столько подачи «теряется» на прогиб системы

На основе результатов моделирования предложен эффективный метод подавления регенеративной волнистости при шлифовании. Проведенное исследование демонстрирует, как цифровая модель позволяет выявить скрытые проблемы и опробовать методы их решения без длительных физических экспериментов.

Список литературы

1. Кисиленко К.С., Евтухов А.В. *Имитационное моделирование процесса круглого врезного шлифования*// Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали наук.-техн. конф. СумДУ, 2011. Ч.1. С. 43.
2. Hao Bai, Yuli Wang, Digital power grid based on digital twin: Definition, structure and key technologies, *Energy Reports*, Volume 8, Sup.16, 2022, P. 390-397, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.328>.
3. Mohsen Soori, Behrooz Arezoo, Roza Dastres, Digital twin for smart manufacturing, A review, *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, Vol. 2, 2023, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017>.
4. Yan Y., Xu J., Wiercigroch M. *Non-linear analysis and quench control of chatter in plunge grinding* // *Int. J. Mech. Sci.* – 2014. – V. 89. – p. 389–401. (механизмы чаттера при шлифовании и методы подавления путем изменения параметров резания).
5. Дан Хэ и др. *On-line Grinding Chatter Detection Based on Minimum Entropy Deconvolution and Autocorrelation Function* // *Chinese Journal of Mechanical Engineering.* – 2021. – V. 34. – Art. 20. (методы онлайн-мониторинга чаттера по вибросигналам).

TERMOELASTIKLIK NAZARIYASI MASALALARINI KUCHLANISHLARDAGI MODEL TENGLAMASI

Tilovov Otajon O'ktamovich

O'zMU Mexanika va matematik modellashtirish kafedrasida katta o'qituvchisi
otajontilovo95@gmail.com.

Bobanazarov Akmal

O'zMU Mexanika va matematik modellashtirish kafedrasida tayanch doktoranti

Annotatsiya. Termoelastiklik nazariyasi masalalarini odatda kuchlanishlarda yechishda Eri kuchlanish funksiyasi kiritib yechilgan lekin biz bu ishda hech qanday qo'shimcha funksiya kiritmasdan to'g'ridan tog'ri kuchlanishlarga nisbatan termoelastiklik nazariyasi masalasini fazoviy holatda qo'yilishi va yechish algoritmi ko'rsatib o'tilgan.

Kalit so'zlar. Beltrami-Mitchell tenglamalari, iteratsiya, kuchlanish, kuchlanish funksiyasi.

MODEL EQUATION OF THERMOELASTICITY THEORY PROBLEMS IN TERMS OF STRESS

Abstract. In the theory of thermoelasticity, problems are typically solved in terms of stress by introducing Airy's stress functions. However, in this work, the problem of thermoelasticity is formulated and solved directly in terms of stresses in a spatial setting, without introducing any additional functions. The algorithm for the solution is also presented.

Keywords: Beltrami-Mitchell equations, iteration, stress, stress function.

МОДЕЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ТЕРМОУПРУГОСТИ В НАПРЯЖЕНИЯХ

Аннотация. В теории термоупругости задачи обычно решаются в напряжениях с введением функции напряжений Эри. Однако в данной работе задача теории термоупругости формулируется и решается непосредственно в напряжениях в пространственной постановке без введения каких-либо дополнительных функций. Также представлен алгоритм решения.