
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.9.014.5

**ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗАНИЯ
МАТЕРИАЛА МЕХАНИЧЕСКИМ СПОСОБОМ**

© 2023 г. А. В. Егоров^{1,3}, В. Г. Шрам^{2,*}, Ю. Ф. Кайзер², Р. Б. Желудкевич²,
А. В. Лысянников², Ю. Н. Безбородов², А. В. Кузнецов⁴, А. В. Кузьмин⁴

¹Саровский физико-технический институт, Саров, Нижегородская область, Россия

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

⁴Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

*e-mail: Shram18rus@mail.ru

Поступила в редакцию 09.11.2022 г.

После доработки 30.05.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

Решение задачи повышения эффективности работы материалорежущего оборудования является важнейшей задачей развития современного машиностроения и смежных направлений науки и техники. В настоящее время находят применения различные методы резания материалов: механические, гидромеханические (гидрообразивные), электроэрозионные, плазменные, лазерные и прочие. Дальнейшее повышение эффективности эксплуатации материалорежущего оборудования связано с разработкой быстродействующих методов и средств контроля эффективности процессов резания. Существующие тензометрические средства контроля мощности резания материалов ограничены по частоте выходного сигнала на уровне до 100 КГц. Быстродействующий контроль эффективности процессов резания можно осуществить на основе разработанного динамического метода и традиционных средств управления высокопроизводительного материалобрабатывающего оборудования с частотой выходного сигнала до 1 МГц.

Ключевые слова: материалорежущее оборудование, динамический метод, контроль, тензометрические средства

DOI: 10.31857/S0235711923050048, EDN: UVNYAE

Решение задачи повышения эффективности работы материалорежущего оборудования является важнейшей задачей развития современного машиностроения и смежных направлений науки и техники. В настоящее время находят применение различные методы резания материалов: механические, гидромеханические (гидрообразивные), электроэрозионные, плазменные, лазерные и др.

Доминирующим методом резания материалов является механическое резание. Постоянно выполняется большое количество работ, направленных на оптимизацию и повышение эффективности резания материалов в различных отраслях промышленности и строительства [1–8]. Действующие стандарты определяют допустимые скорости подачи и скорости резания материалов исходя из механической прочности и твердости режущего инструмента и обрабатываемого материала. Вопросы эффективности процессов резания рассматриваются в ограниченном объеме из-за недостаточного уровня развития методов и средств контроля. Это связано с тем, что процессы механического резания осуществляются быстровращающимся режущим инструментом и

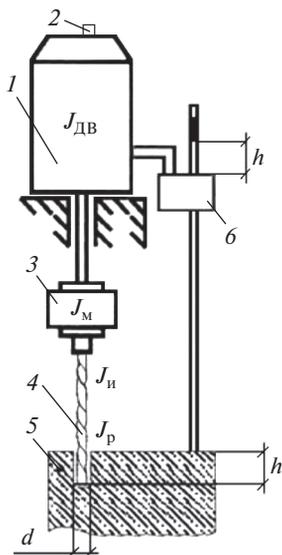


Рис. 1. Установка для контроля механического резания материала методом сверления: 1 – приводной двигатель материалорежущей установки; 2 – датчик положения вала двигателя; 3 – соединительная муфта; 4 – режущий инструмент; 5 – материал резания; 6 – датчик глубины резания; h – глубина резания; d – диаметр резания.

тензометрические методы измерения использовать нельзя. Для контроля эффективности резания применяют косвенные методы, основанные на вибрационных способах.

Целью настоящей статьи является разработка и научно-техническое обоснование динамического метода контроля эффективности механического резания материалов, который может служить в качестве одного из способов разрешения сложившегося противоречия.

Оценку эффективности механического резания материалов можно выполнить на основе разработанных методов контроля механических параметров механических передач вращательного действия [9, 10].

Рассмотрим процесс резания материала при его сверлении (рис. 1). Приводной двигатель 1, угловое ускорение ротора которого определяется посредством датчика 2, соединен посредством соединительной муфты 3 с режущим инструментом 4 для воздействия на материал резания 5. Глубина резания определяется с помощью датчика 6, жестко связанного с приводным двигателем 1.

Реализуется предлагаемый динамический метод контроля эффективности механического резания материала следующим образом. Ротор приводного двигателя 1 посредством соединительной муфты 3 соединяется с режущим инструментом 4.

К приводному двигателю 1 с рабочим телом подводится энергия, при этом в начальный момент времени режущий инструмент 4 не касается материала резания 5. С помощью органов регулирования устанавливается определенная угловая скорость ω ротора приводного двигателя 1, при которой развивается определенный крутящий момент M . Затем измеряется угловое ускорение ϵ_1 системы вращающихся масс “приводной двигатель–соединительная муфта–режущий инструмент”, имеющей момент инерции $J_{дв} + J_{м} + J_{и}$ при изменении угловой скорости вращения выходного вала в

диапазоне от ω до $\omega + d\omega$. Крутящий момент M для диапазона угловых скоростей от ω до $\omega + d\omega$ равен

$$M = \varepsilon_1 (J_{дв} + J_M + J_{И}). \quad (1)$$

Далее режущий инструмент с определенной скоростью подачи вводится в материал резания 5. С помощью органов регулирования устанавливается определенная угловая скорость ω ротора приводного двигателя 2, развивается определенный крутящий момент M . Затем измеряется угловое ускорение ε_2 системы вращающихся масс “электрический двигатель—соединительная муфта—режущий инструмент” с моментом инерции $J_{дв} + J_M + J_{И}$ с учетом приведенного момента инерции сил сопротивления резанию J_p при изменении угловой скорости вращения выходного вала в диапазоне от ω до $\omega + d\omega$, т.е. при том же начальном значении крутящего момента M . Крутящий момент M для диапазона угловых скоростей от ω до $\omega + d\omega$ равен

$$M = \varepsilon_2 (J_{дв} + J_M + J_{И} + J_p). \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) определяется приведенный момент инерции сил сопротивления резанию

$$J_p = \frac{(J_{дв} + J_M + J_{И})(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2}. \quad (3)$$

Умножив полученное в выражении (3) значение приведенного момента инерции сил сопротивления резанию J_p на угловое ускорение ε_2 и на среднее значение угловой скорости из диапазона от ω до $\omega + d\omega$, т.е. на $\omega + d\omega/2$, определяем среднюю для диапазона угловой скорости от ω до $\omega + d\omega$ динамически измеренная мощность резания материала

$$N_p = J_p \varepsilon_2 \left(\omega + \frac{d\omega}{2} \right) = (J_{дв} + J_M + J_{И})(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \left(\omega + \frac{d\omega}{2} \right). \quad (4)$$

Зная момент инерции вращающихся масс электрического двигателя (с учетом потерь на трение в опорах), момент инерции соединительной муфты и момент инерции режущего инструмента можно определить мощность резания материала.

В процессе изменения угловой скорости в диапазоне от ω до $\omega + d\omega$ режущим инструментом 5 будет срезан слой материала плотностью ρ диаметром d и глубиной h , что эквивалентно массе срезанного материала

$$m = \rho h \frac{\pi d^2}{4}. \quad (5)$$

Таким образом, удельная эффективность процесса резания материала определится как

$$\eta = \frac{N_p}{m}. \quad (6)$$

В качестве датчика положения вала двигателя 2 можно использовать оптический энкодер, генерирующий до 6000 отчетов за один оборот с частотой выдачи сигнала до 1 МГц, что значительно превышает частоту генерации сигнала тензометрическими датчиками крутящего момента (до 100 кГц).

Это делает возможным формирование высокочастотных сигналов для использования в быстродействующих адаптивных системах управления работой двигателя материалорежущего станка.

Внедрение разработанного метода на существующем материалорежущем оборудовании связан с разработкой и реализацией соответствующего алгоритма в составе действующих алгоритмов управления материалобработывающих станков.

Выводы. 1. Дальнейшее повышение эффективности эксплуатации материалорежущего оборудования связано с разработкой быстродействующих методов и средств контроля эффективности процессов резания. **2.** Существующие тензометрические средства контроля мощности резания материалов ограничены по частоте выходного сигнала на уровне до 100 КГц. **3.** Быстродействующий контроль эффективности процессов резания можно осуществить на основе разработанного динамического метода и традиционных средств управления высокопроизводительного материалобрабатывающего оборудования с частотой выходного сигнала до 1 МГц.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2021-674) и профильным центром “Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей” Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ly J., Jia S., Wang H., Ding K., Chan F.T.S.* Comparison of different approaches for predicting material removal power in milling process // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. V. 116 (1–2). P. 213.
2. *Gutnichenko O., Nilsson M., Lindvall R., Bushlya V., Andersson M.* Improvement of tool utilization when hard turning with cBN tools at varying process parameters // *Wear*. 2021. V. 477. 203900.
3. *Zhou B., Zhang J., Fu Y., Yu D., Wang J.* Research on power and vibration signal acquisition method and system of machine tool for tool wear monitoring // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1399 (1). 012114.
4. *Chen X., Li C., Tang Y., Li L., Li H.* Energy efficient cutting parameter optimization // *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2021. V. 16 (1–2). P. 221.
5. *Liu B., Wang Y., Zhao G., Huang D., Xiang B.* Intelligent decision method for main control parameters of tunnel boring machine based on multi-objective optimization of excavation efficiency and cost // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. V. 116. 104054.
6. *Li X., Zhang Y., Sun X.* Numerical analysis for rock cutting force prediction in the tunnel boring process // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021. V. 144. 104696.
7. *Brînaş I., Andraş A., Radu S.M., Marc B.I., Cioclu A.R.* Determination of the bucket wheel drive power by computer modeling based on specific energy consumption and cutting geometry // *Energies*. 2021. V. 14 (13). 3892.
8. *Tuninetti V., Alzugaray R., González J., Jaramillo A., Diez E. et al.* Root cause and vibration analysis to increase veneer manufacturing process efficiency: a case study on an industrial peeling lathe // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021. V. 79 (4). P. 951.
9. *Egorov A., Kozlov K., Belogusev V.* Experimental Identification of Bearing Mechanical Losses with the Use of Additional Inertia // *Procedia Engineering*. 2016. V. 150. P. 674.
10. *Egorov A., Kozlov K., Belogusev V.* Experimental identification of the electric motor moment of inertia and its efficiency using the additional inertia // *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. V. 11. Iss. 17. P. 10582.