

## **ОБЗОР МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО КОНТРОЛЯ**

*А.С. Дегтярева*

В статье рассмотрены основные методы адаптивного контроля, применяемые при высокоскоростной обработке. Проведенный анализ положен в основу разработки системы адаптивного контроля для использования на производстве.

Ключевые слова: адаптивный контроль, шлифование, высокоскоростная обработка.

Операции шлифования благодаря своей высокой производительности являются одним из основных видов финишной обработки в современном машиностроении. Из-за сложной кинематики движения и высокой теплонапряженности процесса с целью предотвращения брака в производстве обработку производят на заниженных режимах резания, что приводит к снижению производительности. Для решения этой проблемы внедряют адаптивный контроль: предварительный, активный, послеоперационный.

Базовая теория построения рабочего цикла шлифования изложена в работах Г.Б. Лурье [7, 8, 9]. В основе этой теории лежит модель управления циклом шлифования, основанная на взаимосвязи радиальной составляющей силы резания с упругими перемещениями технологической системы, приведенной в работах Б.С. Балакшина [1].

Исследования Г.Б. Лурье в области автоматизации цикла обработки основаны на анализе условий съема припуска, а именно на переменной интенсивности съема металла на протяжении рабочего цикла. Автор объясняет это в первую очередь упругостью технологической системы. В начале цикла при врезании за счет упругого отжатия толщина снимаемого слоя металла меньше номинальной подачи на глубину, затем слой металла сни-

мается за счет образованного натяга силы, прижимающей круг к обрабатываемой детали. Работы Лурье позволили сформировать основу теории проектирования циклов шлифования.

В своей диссертационной работе Д.Е. Анельчик [4] исследовал закономерности формирования качества деталей с покрытиями при их обработке и эксплуатации и создание на этой основе теории управления ТП изготовления деталей с покрытиями. Автор с целью проектирования бездефектных циклов шлифования в качестве управляющего параметра указал подачу на глубину, определяющую глубину резания и имеющую наибольшую гибкость с практической реализации управления. Для заданной глубины по толщине покрытия, на которой температура не должна превышать предельного установленного значения, рассчитывается предельная подача на глубину через силы резания и интенсивность теплового источника. На этой основе автор разработал рекуррентную процедуру определения закона изменения предельной подачи на глубину для каждого рабочего хода по мере снятия припуска.

В диссертационной работе А.С. Медведев [10] также на основе структурно-параметрического синтеза системы автоматического управления тонкого шлифования для станка с ЧПУ разработал алгоритм управления технологической системой на основе контроля тока функции электродвигателя шлифовальной бабки. Основным ограничением автор указывает отсутствие прижога на поверхности заготовки. Полученный алгоритм позволяет производить проектирование процесса шлифования с учетом косвенной оценки параметра технологической системы.

Применение исследований данных авторов позволяет проектировать рациональные циклы по косвенной оценке параметров технологической системы, например, мощности главного привода. Недостаток заключается в том, что оценка условий обработки будет достаточно грубая.

В работе С.W. Lee [16] рассмотрено применение микроконтроллера, анализирующего параметры процесса шлифования (силу резания, нагрузку на главный привод, температуру в зоне обработки). Исследование направлено на минимизацию работы оператора станка с ЧПУ с целью сокращения стоимости нормо-часа работы станка. Микроконтроллер находится в состоянии испытания опытного образца и пока не получил широкого распространения.

В целом зарубежное направление по улучшению процесса шлифования направлено на модернизацию и автоматизацию программной и аппаратной составляющей станков с ЧПУ [13, 14, 17–23]. Принципиальная методика формирования режимов резания в виде ступенчатого изменения подачи шлифовального круга остается неизменной. Учет вибраций и колебаний в технологической системе производится на аппаратном уровне по результатам экспериментальных исследований конкретных схем шлифования.

Активный контроль – контроль деталей непосредственно в процессе обработки на станке или вне станка, дающий информацию о необходимости изменения режимов обработки или подналадки станка (изменение положения между инструментом и деталью) [2, 3]. Активный контроль может осуществляться методом косвенных измерений, когда контролируется положение элементов станка (шлифовального круга, суппорта и т.д.), определяющих размер детали, и чаще методом прямых измерений, когда контролируют непосредственно деталь.

Российские ученые также уделяют больше внимание разработке методов активного контроля [1–3, 6, 11]. Рассмотрим некоторые из них подробно.

В статье Н.Н. Попок и Ю.Е. Махаринского [12] рассматривается моделирование процесса плоского врезного шлифования с целью анализа затупления шлифовального круга в зависимости от числа проходов режущего инструмента и количества обработанных заготовок. Результатом данного исследования стало программное обеспечение для управления рабочим процессом с учетом затупления инструмента, что позволило повысить производительность и экономичность операции. Авторы не описывают, как разработанное программное обеспечение отслеживает и учитывает другие параметры процесса, например: температуру, жесткость системы.

Работа [5] посвящена адаптивному управлению циклом процесса шлифования колец подшипников при регулировании подачи в зависимости от величины припуска, скорости снятия припуска и уровня вибрации жесткой опоры. Реализация контроля происходит с помощью разработанного микропроцессорного прибора активного контроля. Недостатком данного изобретения является его узкая специализация – шлифование колец подшипников.

Описанные выше методы приводят к выводу, что тема адаптивного управления точностью изготовления деталей на станках актуальна и востребована. Хочется обратить особое внимание, что большинство работ носят чисто исследовательский характер и внедрения их методов адаптивного контроля в производственный цикл либо дорого, либо совсем не представляется возможным. Следовательно, разработка производственной системы адаптивного управления точностью высокоскоростной обработки, которая относительно проста в установке на уже эксплуатируемый станок и не требует много ресурсов, высоко востребована.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-932.2017.8.*

#### Библиографический список

1. Балакшин, Б.С. Адаптивное управление станками / Б.С. Балакшин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.

2. Педь, В.И. Активный контроль в машиностроении: справочник / В.И. Педь [и др.]. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
3. Волосов, С.С. Активный контроль размеров / С.С. Волосов, [и др.], – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
4. Анельчик, Д.Е. Повышение эффективности шлифования деталей с покрытиями: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.Е. Анельчик. – Тула, 1989. – 44 с.
5. Васин, М.П. Адаптивное управление процессом шлифования колец высокоточных подшипников / М.П. Васин, В.В. Горбунов, С.А. Игнатъев // Вестник СГТУ. – 2006. – № 1. – С. 129–136.
6. Ломова, О.С. Разработка адаптивной системы управления точностью круглошлифовальных станков / О.С. Ломова // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 2. – С. 313–315.
7. Лурье, Г.Б. Оптимизация цикла шлифования на основе адаптивного управления / Г.Б. Лурье // Машиностроитель. – 1979. – № 3. – С. 12–14.
8. Лурье, Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г.Б. Лурьев. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1984. – 103 с.
9. Лурье, Г.Б. Адаптивная система управления процессом круглого врезного шлифования / Г.Б. Лурье, В.В. Гичан // СТИН. – 1974. – № 7. – С. 5–7.
10. Михелькевич, В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение. – 1975. – 304 с.
11. Нуркенов, А.Х. Разработка алгоритма управления циклом шлифования для станка с ЧПУ NAXOS PMD 320 / А.Х. Нуркенов // Механика XXI века. – 2012. – № 11. – С. 205–212.
12. Попок, Н.Н. Адаптивное управление при плоском врезном шлифовании / Н.Н. Попок, Ю.Е. Махаринский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 2. – С. 49–53.
13. Guo G., Malkin S. Heat transfer in grinding // J. of Material Processing and Manufacturing Sciences. 1990. – Vol. 1. – P. 16–27.
14. Jen T.C., Lavine A.S. A variable heat flux model of heat transfer in grinding: model development // Trans. ASME. J. Heat Transfer. – 1995. – V. 117. – № 2. – P. 473–478.
15. König W., Lorts W. Properties of cutting edges related to chip formation in grinding // CIRP Ann – 1975. – V. 24. Is. 1. – P. 231–235.
16. Lee C.W. A control-Oriented Model for the Cylindrical Grinding Process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 44. – No. 7–8. – P. 657–666.
17. Lin B., Yu S.Y., Wang S.X. An experimental study on molecular dynamics simulation in nanometer grinding // J. of Materials Processing Technology. – 2003. – V. 138. – P. 484–488.
18. Malkin S. Grinding technology. Theory and application of machining with abrasives // New York: Society of Manufacturing Engineers. – 1989. – 275 p.
19. Malkin S., Attia M.H., Kops L. Thermal Aspects of Grinding, Thermal Aspects in Manufacturing // ASME RED. Vol.30. Presented at Symposium on Heat Transfer in Materials Processing ASME Winter Annual Meeting. Chicago. – 1988. – P. 145–256.

20. Matsui Seiki Statistical Approach to grinding mechanism the case where grain cutting edges take the shape of truncated cone // Technol. Repts. Tohoku Univ. – 1985. – V. 50. Issue 2. – P. 117–132.

21. Shibata J. Inasaki I., Yonetsu S. The relation between the wear or grain cutting edges and their metal removal ability in coated abrasive belt grinding // Wear. – 1979. – V. 55. Issue 2. – P. 331–344.

22. Xi F. Modeling and simulation of fine grinding/finishing processes // 17th International Conference on Composites or Nano Engineering. – 2009. – P. 1139–1140.

23. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process // Intern. J. of Machine Tools & Manufacture. – 2002. – V. 42. – P. 969–977.

[К содержанию](#)