

№ 9.2545.2014/К, соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004.

Л и т е р а т у р а

1. **ISO 11562:1996.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Метрологические характеристики фильтров с коррекцией фазы.
2. **ISO 16610-21:2011.** Geometrical product specifications. Filtration. Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters.
3. **ГОСТ Р 8.652—2009.** Метрологические характеристики фазокорректированных фильтров.
4. **ISO 13565-1:1996.** Geometrical Product Specifications. Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties. Part 1: Filtering and general measurement conditions.
5. **Jiang X.** Robust solution for the evaluation of stratified surfaces // CIRP — Annals — Manufacturing Technology. 2010. V. 59. N 1. P. 573—576.
6. **Savitzky A., Golay M. J. E.** Smoothing and differentiation of data by simplified least-squares procedures // Anal. Chem. 1964. V. 36(8). P. 1627—1639.
7. **Seewig J.** Linear and robust gaussian regression filters // J. Physics: Conf. Ser. 2005. V. 13. P. 254—257.

8. **ISO/TS 16610-31:2010.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Филтрация. Часть 31. Фильтры робастного профиля: Гауссовы регрессионные фильтры.

9. **Krystek M.** Form filtering by splines // Measurement. 1996. V. 18. P. 9—15.

10. **Goto T., Miyakura J., Umeda K.** A robust spline filter on the basis of L2-norm // Precision Eng. 2005. V. 29. P. 151—161.

11. **ISO/TS 16610-22:2006.** Геометрические характеристики изделий (GPS). Филтрация. Часть 22. Фильтры линейного профиля: Сплайн-фильтры.

12. **ISO/TS 16610-32:2009.** Geometrical product specification. Filtration. Part 32: Robust profile filters: Spline filters.

13. **ISO/TS 16610-40:2006.** Geometrical product specifications. Filtration. Part 40: Morphological profile filters: Basic concepts.

14. **Латонов И. В., Шулепов А. В.** Способ бесконтактной оценки шероховатости поверхности по ее цифровому изображению, формируемому оптической системой измерительного микроскопа // Вестник МГТУ «Станкин». 2013. № 1. С. 141—145.

15. **Конов С. Г., Марков Б. Н.** Алгоритм коррекции погрешности от перспективных искажений изображений измерительных меток // Метрология. 2011. № 3. С. 8—15.

Дата принятия 15.04.2015 г.

621.914.1.004.58:621.9.06.529

Диагностика и контроль керамического инструмента при высокоскоростном фрезеровании закаленных сталей на станках с ЧПУ

С. Н. ГРИГОРЬЕВ, М. А. ВОЛОСОВА

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: science@stankin.ru, rector@stankin.ru

Показаны принципы работы алгоритма комплексного диагностирования и контроля состояния керамического инструмента при фрезеровании закаленных сталей. Алгоритм для распознавания износа инструмента основан на использовании силовых параметров, а для распознавания скалывания — виброакустического сигнала. Приведена обобщенная структура подсистемы диагностирования и контроля состояния керамического инструмента в составе системы ЧПУ фрезерного станка.

Ключевые слова: диагностика, керамический инструмент, фрезерование, износ инструмента, силовые параметры, виброакустический сигнал, система ЧПУ.

The principles of the algorithm for integrated diagnostics and control of ceramic tool state during milling of hardened steels are considered. The algorithm is based on the use of force parameters for detecting the wear and of vibro-acoustic signals for recognition of chipping. A generalized structure of subsystem for diagnostics and control of the state of ceramic tool as a part of CNC system of milling machine.

Key words: diagnostics, ceramic tool, milling, tool wear, force parameters, vibro-acoustic signal, CNC system.

В современном промышленном производстве особо актуальна проблема непрерывной эксплуатации прогрессивного технологического оборудования, т. е. простои из-за нарушения работы системы должны быть сведены к минимуму. Это возможно только при обеспечении высокой надежности всех компонентов автоматизированных систем, а также сокращения времени восстановления работоспособного состояния элементов технологической системы, которое,

в свою очередь, напрямую зависит от степени повреждения при несвоевременном отказе режущего инструмента. С внедрением диагностики состояния режущего инструмента и обработанных поверхностей в процессе резания связано развитие автоматизированного металлообрабатывающего производства. Диагностика особенно важна при эксплуатации высокотехнологического оборудования с ЧПУ, предназначенного для обработки сложных корпусных деталей, так как

внедрение систем диагностики помогает снижать количество брака, повышает технико-экономические показатели эксплуатации станков и надежность режущего инструмента.

Для скоростной обработки высокотвердых материалов перспективно использовать керамический инструмент, имеющий высокую твердость, термостойкость в широком диапазоне температур и химическую пассивность по отношению к большинству обрабатываемых материалов. Однако широкое применение такого инструмента ограничено из-за его недостаточно высокой надежности — непрогнозируемого скалывания режущей части в различные периоды эксплуатации.

Из всех видов механической обработки только для процесса фрезерования наиболее характерны нестационарные условия эксплуатации керамического инструмента, когда за один рабочий ход зуба фрезы параметры срезаемого слоя периодически изменяются [1]. Качество фрезерования высокотвердых материалов, в частности закаленных сталей, на станках с ЧПУ в режиме реального времени можно обеспечить с помощью системы диагностирования и контроля режущего инструмента, предназначенной для получения достоверной информации о текущем состоянии процесса резания и принятия на ее основе необходимых управляющих решений.

Исследования состояния инструмента из оксидно-карбидной керамики (пластин без покрытия и с покрытиями) в условиях обработки с переменными параметрами срезаемого слоя на примере торцевого фрезерования закаленных сталей показали, что основным критерием отказа инструмента принят износ h_3 по главной задней поверхности цилиндрической части пластины, ограниченной радиусом скругления режущей кромки. Наиболее адекватно критерий отказа h_3 отображается силовыми параметрами, которые используют как диагностические признаки в алгоритмах определения состояния инструмента. Покрытие пластин уменьшает хрупкое разрушение инструмента, однако вероятность его отказа из-за сколов до достижения предельного значения $[h_3]$ существенна. Остановка процесса резания приводит к браку изделий и снижению эффективности обработки керамическим инструментом.

В качестве диагностического признака состояния керамической пластины фрезы необходимо использовать виброакустический (ВА) сигнал, позволяющий отслеживать поломку в течение времени, которое меньше, чем время одного оборота фрезы из-за мгновенного локального изменения амплитудно-частотной характеристики ВА-сигнала в момент поломки [2, 3]. Использование силовых параметров для распознавания поломок режущих пластин менее оправдано, так как этот способ характеризуется большей инерционностью из-за необходимости математической обработки диагностического параметра за один период его изменения.

Таким образом, для обеспечения эффективности работы керамического инструмента в автоматизированном производстве требуется комплексный подход к созданию алгоритма диагностирования его состояния. На рис. 1 показан разработанный авторами алгоритм, отражающий комплексное диагностирование и контроль состояния керамического инструмента при фрезеровании закаленных сталей. Алгоритм работает следующим образом. После ввода исходных данных, предельных значений ВА-сигнала $[R_{BA}]$, оперативно найденных в процессе обработки, вычисляются мгновенные значения сил, с учетом которых назначается силовой диагностический параметр R_P , имеющий наибольший коэффициент чувствительности $\bar{K}$. Выбираются предельное значение $[R_P]$ из базы данных расчета мгновенных значений рассматриваемых силовых параметров с учетом резервного времени и предельное значение $[R_{BA}]$ из исходных данных.

После начала процесса резания начинаются измерения и обработка поступающей информации о R_{BA} и средних значениях $\bar{R}_P$. Получаемая информация сравнивается с предельно допустимыми значениями $[R_P]$, $[R_{BA}]$. Если после сравнения выдается сигнал «Нет», то инструмент находится в работоспособном состоянии, а если появляется сигнал «Да», то выполняется команда «Stop (прекращение) процесса резания», а затем — «Замена инструмента».

Если реализуется «Да» по силовому диагностическому параметру, то диагностируется новый класс состояний «Последний проход», характеризующий не инструмент, а деталь, которая может быть последней, или на детали проводится последний проход, что наиболее характерно для обработки фрезерованием простых и сложных поверхностей. Распознаванием состояния «Последний проход» измерение силового диагностического параметра прекращается. В этом случае используется зарезервированное время на выпол-

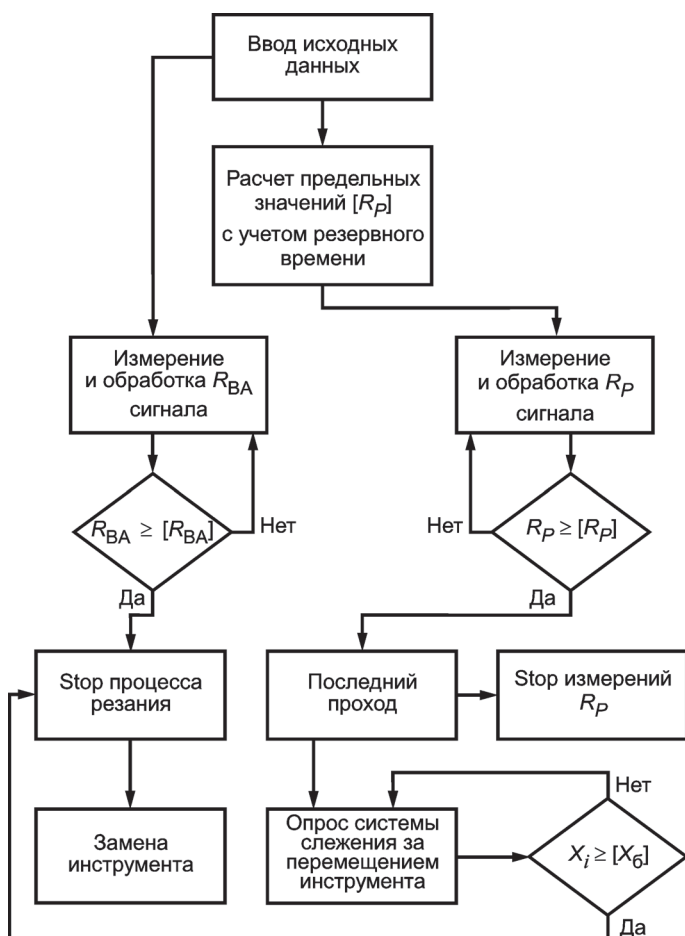


Рис. 1. Алгоритм комплексного диагностирования и контроля состояния керамического инструмента при фрезеровании закаленных сталей

нение последнего прохода при занижении предельного значения $[h_3]$ на величину Δh_3 , которая сформировалась в течение последнего прохода. Исполняется команда «Stop измерений R_p » и одновременно опрашивается система слежения за перемещением инструмента. Если координата положения инструмента по соответствующей оси X_i не превышает заданного предельного значения (базового) $[X_6]$, то обработка продолжается. Как только окажется, что $X_i \geq [X_6]$, то формируется сигнал «Да» и обрабатываются команды «Stop процесса резания» и «Замена инструмента».

Особенность разработанного комплексного алгоритма диагностирования и контроля состояния режущего инструмента — обеспечение с его помощью надежной работы керамического инструмента в условиях периодического нестационарного резания вследствие резервирования времени фрезерования последнего прохода и занижения предельного значения $[h_3]$ на определенную величину Δh_3 . Чрезвычайно важной и нетривиальной задачей является встраивание в систему ЧПУ модуля диагностирования керамического инструмента для реализации алгоритма, приведенного на рис. 1, и своевременного принятия решения о необходимости замены инструмента. Наиболее оптимально применение открытого решения, базирующегося на возможности наращивания функций модуля диагностики без перекомпиляции ядра системы ЧПУ [4—6].

На рис. 2 представлена обобщенная структурная схема подсистемы для диагностирования и контроля состояния керамического инструмента в составе системы ЧПУ. Модуль диагностики запускается в режиме реального времени как отдельный процесс (диагностирование), работающий параллельно с ядром, что позволяет обезопасить ядро при возникновении каких-либо ошибок при функционировании модуля. Автономный алгоритм диагностирования получает необходимую информацию от датчиков и выдает управляющие команды в ядро системы ЧПУ. Графическая часть модуля диагностики реализована в виде компонента, интегрируемого в интерфейс оператора. Подсистема диагностики через ядро системы ЧПУ, используя формат xml, передает данные в графический компонент, который их интерпретирует и отображает на экране в графическом и текстовом видах.

Подсистема диагностики включает следующие модули:

- сбора информации — отвечает за взаимодействие алгоритма диагностирования с физическими датчиками сбора информации о процессе обработки, проводит конфигурирование алгоритмов работы с ними, считывание и интерпретацию полученной информации;

- обработки информации — реализует алгоритм расчета остаточного времени работы до отказа режущего инструмента и выдает прогноз об остаточном ресурсе инструмента;

- вывода результатов — передает результаты работы диагностического алгоритма в систему управления верхнего уровня.

Разбиение на модули позволяет отделить алгоритмы диагностики от специфики общения с датчиками и способов взаимодействия с системой ЧПУ. Такой процесс делает систему диагностики гибкой и легко адаптируемой для использования различных типов датчиков и подключения к другим системам ЧПУ.

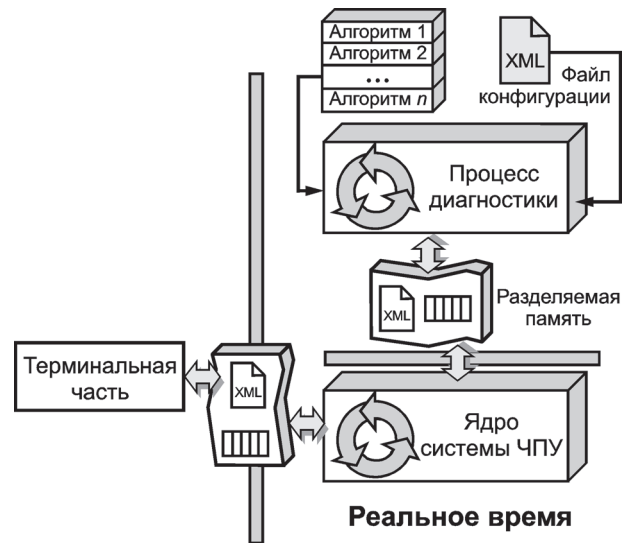


Рис. 2. Обобщенная структурная схема подсистемы для диагностирования и контроля состояния керамического инструмента

Процедуры, связанные с диагностированием и контролем состояния инструмента на станках с ЧПУ, можно осуществить, применив универсальное решение (т. е. пригодное для различных систем ЧПУ без изменения их архитектуры) с помощью внешнего вычислительного устройства, реализованного на базе промышленного персонального компьютера. Для поступления управляющих сигналов в систему ЧПУ использован контроллер электроавтоматики. Система построена на прямом измерении ВА-сигнала и косвенном измерении силовых параметров, по которым распознается состояние инструмента.

Разработанный алгоритм комплексной диагностики и контроля состояния торцевых фрез, оснащенных керамическими пластинами, при обработке закаленных сталей был интегрирован в систему ЧПУ Siemens Sinumerik 840D (Германия) и прошел стендовые испытания на базе фрезерного станка в Центре коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН».

Упрощенная схема интеграции подсистемы диагностики и контроля на базе внешнего вычислительного устройства в систему ЧПУ станка показана на рис. 3. Внешнее автономное вычислительное устройство сопрягается с входами и выходами контроллера электроавтоматики S7-300 через специальное устройство преобразования информации, переводящее входной сигнал с внешнего вычислителя в сигнал уровня 24 В. Управляющая программа электроавтоматики приспособлена к поставленной задаче. Интегрирование в ПК системы ЧПУ новой версии управляющей программы реализовано с помощью специального программно-аппаратного комплекса.

Тестовые испытания разработанной на основе описанного выше комплексного подхода системы диагностики и контроля состояния торцевых фрез, оснащенных пластинами из оксидно-карбидной керамики, при обработке закаленных сталей типа ШХ15 показали снижение процента брака обработанных изделий с 10—15 до 2—3 % и повышение производительности резания на 21 % вследствие получения достоверной информации о текущем состоянии керамического инструмента и принятия на ее основе необходимых управляющих решений.

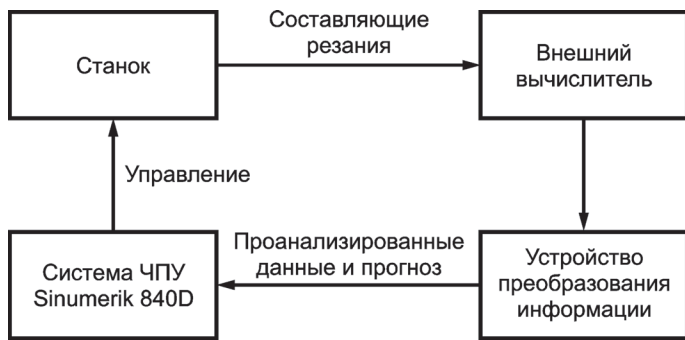


Рис. 3. Схема интеграции подсистемы диагностики и контроля в систему ЧПУ станка

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 11.1052.2014/К и государственного контракта № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г.

Л и т е р а т у р а

1. Григорьев С. Н., Синопальников В. А., Терешин М. В., Гурин В. Д. Контроль параметров процесса резания на основе диагностирования инструмента и заготовки // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 46—48.

2. Grigoriev S. N., Gurin V. D., Volosova M. A., Cherkasova N. Y. Development of residual cutting tool life prediction algorithm by processing on CNC machine tool // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2013. V. 44. N. 9. P. 790—796.

3. Григорьев С. Н., Гурин В. Д., Черкасова Н. Ю. Повышение производительности фрезерования с помощью диагностирования состояния инструмента с учетом достоверности отображения состояния объекта по критерию его отказа // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 3(15). С. 44—48.

4. Мартинова Л. И., Григорьев А. С., Соколов С. В. Диагностика и прогноз износа режущего инструмента в процессе обработки на станках с ЧПУ // Автоматизация в промышленности. 2010. № 5. С. 46—50.

5. Мартинов Г. М., Нежметдинов Р. А., Никишечкин П. А. Разработка средств визуализации и отладки управляющих программ для электроавтоматики, интегрированных в систему ЧПУ // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 4(23). С. 134—138.

6. Мартинов Г. М., Мартинова Л. И. Формирование базовой вычислительной платформы ЧПУ для построения специализированных систем управления // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 1(28). С. 92—97.

Дата принятия 15.04.2015 г.

539.3, 537.29

Интерпретация данных сканирующей туннельной микроскопии

А. М. МАНДЕЛЬ, А. И. ЛОСКУТОВ, В. Б. ОШУРКО, Г. И. СОЛОМАХО,
С. В. ВЕСЕЛКО

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: arkadimandel@mail.ru

Рассмотрены явления, нарушающие однозначную связь силы туннельного тока с шириной туннельного промежутка при измерениях профиля поверхности в сканирующем туннельном микроскопе. Основное внимание уделено влиянию структуры поверхностных электронных состояний на туннельный ток.

Ключевые слова: сканирующая туннельная микроскопия, туннельный ток, поверхностные электронные состояния.

The phenomenon violating of unique relationship between the tunnel current strength and the width of tunnel gap at the surface profile measurements in a scanning tunnel microscope are discussed. The discussion has been focused on the influence of surface electronic states on tunnel current.

Key words: scanning tunnel microscopy, tunnel current, surface electronic states.

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) имеет два режима сканирования поверхности: при заданной силе туннельного тока I , которая поддерживается постоянной в цепи обратной связи, и при постоянном расстоянии между образцом и зондом. При втором режиме требуются достаточно гладкие поверхности, поэтому он применяется сравнительно редко. Первый режим работы используют чаще, и именно поэтому в данной работе будут рассмотрены особенности измерений этим способом и интерпретации получаемых результатов.

Теоретической предпосылкой для успешной реализации первого режима является простая и однозначная связь между силой туннельного тока I при постоянном напряжении U на зонде и промежутком туннелирования — расстоянием d между острием зонда и поверхностью. Известны и нередко обсуждаются факторы, нарушающие указанную связь: вариации площади области сканируемой поверхности, возникающие из-за ее сложной геометрии и морфологии; влияние осцилляций кантилевера; локальные изменения плотностей поверхностных электронных состояний и т. д. По мнению авторов характер поверхностных электронных состояний,