

Измерение износа режущего инструмента фазохронометрическим методом в процессе обработки

А. Б. СЫРИЦКИЙ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: syritsky@bmstu.ru

Рассмотрены актуальные методы мониторинга износа токарного инструмента в процессе обработки. Исследованы возможности применения фазохронометрического метода диагностики для оценки износа инструмента.

Ключевые слова: фазохронометрический метод, мониторинг износа инструмента, процесс резания.

Actual monitoring methods of turning tool wear are described and the reasons of their mass introduction lack in production are specified. Researches results of phasechronometric method application possibility for tool wear diagnostics are given.

Key words: phasechronometric method, tool wear monitoring, cutting process.

Из-за отсутствия эффективных методов и систем мониторинга износа и поломки инструмента невозможно полностью автоматизировать процессы механообработки [1]. Важность создания подобных систем следует из фундаментального принципа: выход из строя инструмента обязательно приведёт к отказу всей технологической системы [2, 3]. Исследования в области диагностики состояния инструмента показывают, что внеплановые простои оборудования, вызванные поломкой инструмента, составляют 20 % времени [4].

Кроме финансовых потерь от простоя, износ инструмента может привести к ухудшению качества обрабатываемой поверхности и нарушению допустимых параметров заготовки. В то же время использование систем мониторинга состояния инструмента снижает риск возникновения брака, повышая метрологическую надёжность технологической системы и улучшая её характеристики, при которых обеспечивается обработка заготовок в рамках заданных технологических параметров. Если параметры обработанных поверхностей выходят за границы предельных значений (допуска), наступает метрологический отказ технической системы обработки. Он будет сопровождаться бракованием детали на стадии операционного контроля и соответственно расходами на повторную обработку в случае исправимого брака либо потерями, выраженными стоимостью предыдущих технологических этапов изготовления детали при неисправимом браке.

Несмотря на высокую актуальность, проблема создания эффективной системы мониторинга износа инструмента на сегодняшний день не решена. Недостатки существующих прямых и косвенных методов препятствуют их широкому применению в промышленности [5]. При прямых методах параметры износа измеряют контактными или бесконтактными (в основном оптическими) способами. Их применяют, останавливая обработку, что ведёт к увеличению операционного времени и, следовательно, снижению производительности. Большей эффективностью обладают косвенные методы, где измерения различных физических параметров коррелированы с состоянием инструмента. Известны методы диагно-

стики на основе измерений силы резания, мощности, потребляемой двигателем, анализа качества обработанной поверхности, траектории оси шпинделя станка, химического анализа поверхности инструмента. Существуют также методы вибро- и виброакустической диагностики и их всевозможные комбинации, например метод на основе анализа виброакустического сигнала в совокупности с измерением температуры в зоне резания [6]. Тщательный анализ этих методов выявляет существенные недостатки, препятствующие повсеместному внедрению мониторинга в производственный процесс. В частности, методу вибродиагностики свойственны проблемы с установкой первичных преобразователей. Датчик должен быть установлен так, чтобы все стыки, разделяющие зону резания и место установки акселерометра, были неподвижны. В противном случае часть данных о состоянии режущего инструмента может быть утрачена [7]. На сложность реализации метода, основанного на измерении силы резания, указывает непопулярность установки динамометрических приспособлений, что приводит к усложнению конструкции станка, снижению универсальности оборудования, проблемам с жёсткостью упругой системы и надёжностью работы устройств.

Компенсировать недостатки отдельных методов можно с помощью систем мониторинга, включающих модули измерения нескольких параметров одновременно. Такой подход позволяет получить больше информации о процессе обработки, хотя и несовершенен. Подобные системы состоят из большого количества датчиков, что серьёзно усложняет их установку на станок и снижает надёжность технологической системы в целом. Дополнительные сложности связаны с обработкой больших массивов измерительных данных.

Из изложенного выше следует, что необходимы иные методы диагностики износа инструмента в процессе его обработки. Такой альтернативой является фазохронометрический метод, апробированный на сложных технических объектах, таких как турбоагрегаты теплоэлектростанций [8, 9]. Ме-

тод перспективен для создания на его основе высокоэффективных систем измерений, мониторинга и диагностики роторных циклических систем. Он отличается низкой стоимостью, высокой помехозащищённостью и высочайшей точностью. В основе подхода, представленного в данной статье, лежит предположение, что измерив интервалы времени прохождения последовательных фаз оборота шпинделя станка при обработке, можно получить информацию о функционировании машины. В хронограмме вращения содержится информация о работе всех узлов станка, в том числе и о состоянии инструмента.

Фазохронометрическая система состоит из первичных преобразователей (ПП), которые устанавливают на шпиндель. Конструктивно ПП выполняют в виде шкал, разбивающих оборот ротора на фазы, количество которых в рассматриваемом случае равно 5000, что обеспечивает необходимую ширину спектральной функции. В прототипе измерительного канала системы используют угловые датчики ЛИР («СКБ ИС», Россия) с фотоэлектрическим принципом действия. Они отличаются точностью выполнения информационного элемента — измерительного лимба, делящего оборот на фазы, высокой надёжностью и приемлемой ценой. В блок обработки информации поступает импульсный выходной сигнал датчиков. В качестве блока представлено средство измерений (СИ) интервалов времени между импульсами сигнала ПП. Схема формирования измерений представлена на рис. 1. Интервалы времени определяют в два этапа. Сначала сигнал $f(x, t)$ оцифровывается, затем с помощью встроенных счётчика и высокочастотного генератора измеряется временной интервал. В результате формируется временной ряд $F(x, t)$, алгоритм обработки которого зависит от диагностических признаков износа. Графическое представление временного ряда называют хронограммой вращения. Пример конструктивной реализации измерительного канала приведён в [10].

Фазохронометрический метод принадлежит к фазовым методам измерений. В отличие от амплитудных методов возмущения $G(x, t)$, $H(x, t)$ вносят меньшую составляющую в общую погрешность измерений. Амплитудные шумы ПП не оказывают влияния на измерения длительности фазы, но при этом являются источником искажения результатов при нахождении амплитудных параметров сигнала.

Возможность получения информации о процессе резания на основе результатов измерений, проведённых фазохронометрической системой, требует подтверждения. На начальной стадии исследований с помощью фазохронометрии анализировали процесс врезания инструмента в заготовку на станке с ЧПУ G.D.W. 250 CNC. Во время эксперимента на станке обрабатывали детали типа тор радиусом 18 мм. Частота вращения шпинделя составляла $n=300$ мин⁻¹, подача материала $s = 0,02$ мм/об., глубина резания в начальный момент обработки $t = 1$ мм. Была обнаружена зависимость средней длительности прохождения фазы оборота от изменения силы резания. Чтобы информацию оптимизировать, по средним значениям интервалов времени за пять оборотов шпинделя построили хронограмму вращения (рис. 2). Курсивом выделена область резкого увеличения среднего значения интервалов времени, эффект притормаживания вращения шпинделя станка обусловлен моментом силы резания тормозящей вращение. Точка перегиба перед резким скачком на графике является моментом врезания. Затем глубина резания достигает стабильного значения, и момент

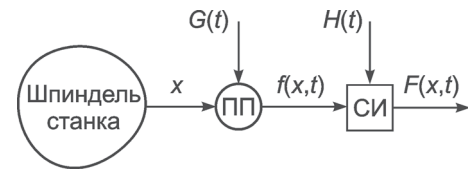


Рис. 1. Схема формирования измерений:

ПП — первичный преобразователь; СИ — средство измерений; x — условная измеряемая величина, характеризующая вращение шпинделя; $f(x, t)$ — сигнал датчика; $F(x, t)$ — совокупность результатов измерений интервалов времени; $G(x, t)$, $H(x, t)$ — случайные возмущения

силы резания начинает плавно нарастать. Время между двумя точками перегиба — время врезания, для данного случая составляет 3 с. Изучение характера процесса врезания с помощью фазохронометрического метода подтверждает рассматриваемую теорию.

Для испытаний прототипа системы мониторинга и поиска диагностических критериев износа инструмента провели исследования процесса обработки заготовки из нержавеющей стали токарным инструментом со сменными режущими пластинами треугольной формы из сплава T15K6. Была получена информация о неравномерности вращения шпинделя (частота вращения 315 мин⁻¹) станка УТ16П в режиме холостого хода при трёх условно различных режимах обработки. В каждом случае использовали сменные пластины с различной степенью износа режущей кромки: без видимых признаков износа (новая пластина), с износом по задней поверхности 100 мкм (средний износ) и более 400 мкм (катастрофический износ). Продольная подача и глубина резания оставались постоянными: 0,217 мм/об и 0,2 мм, соответственно. В результате математической обработки интервалов времени получили хронограммы вращения, соответствующие каждому режиму эксперимента (холостой ход, резание новой пластиной, резание пластиной со средним износом, резание пластиной с катастрофическим износом). Хронограммы вращения при обработке режущим инструментом без признаков износа и с катастрофическим износом представлены на рис. 3.

Неравномерность вращения зависит от множества факторов, которые влияют на непостоянство крутящего момента привода станка, изменения значений моментов сил сопротивления вращению в опорах и вариации момента силы резания. Одним из основных факторов изменения значений моментов сил является состояние инструмента. По мере износа режущей кромки в спектральной диаграмме изменяется амплитуда колебаний, напрямую связанных с резанием, например силы резания в процессе циклического стружкообразования. Сопротивление материала при его



Рис. 2. График изменения среднего значения интервалов времени за пять оборотов шпинделя станка

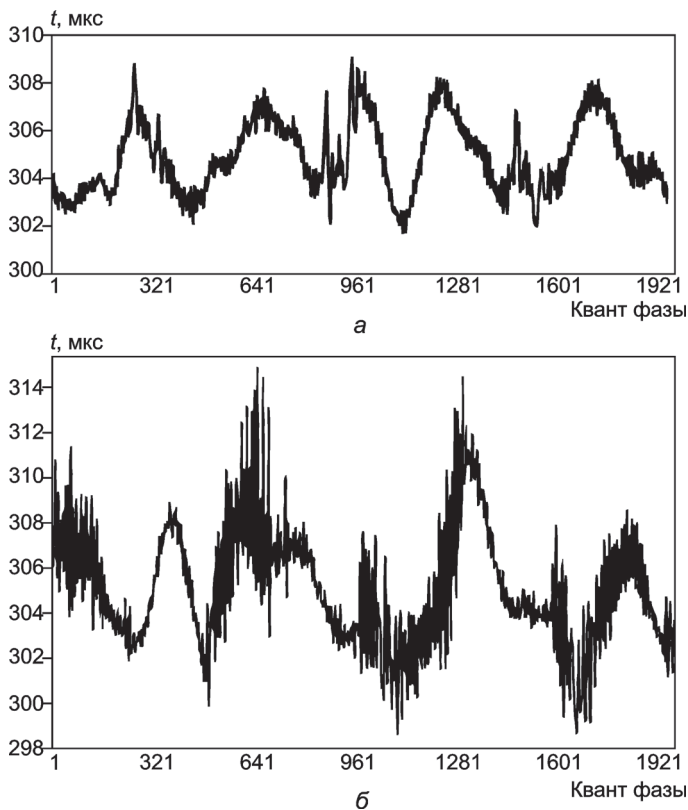


Рис. 3. Хронограммы вращения нового инструмента без признаков износа (а) и с признаками катастрофического износа (б)

обработке повышается с увеличением деформации срезаемого слоя. С момента скалывания первого дискретного элемента стружки напряжение резко падает. Затем усилие сопротивления вращению (усилие резания) снова растёт и вновь снижается по мере скалывания следующего элемента стружки. Частота цикла ν при этом соответствует количеству скалываний в единицу времени [11]:

$$\nu = L/\alpha,$$

где L — длина стружки, снимаемой в единицу времени; α — расстояние между двумя соседними дискретными элементами стружки, определяемое при исследовании стружки на измерительном микроскопе.

Влияние внешней периодической силы (в данном случае — это сила резания) на колебательную систему выражается в появлении обертона и гармоник комбинационных частот колебаний. Следовательно, частота ν должна присутствовать в спектре хронограммы вращения.

Проанализировав результаты измерений, можно сделать вывод, что при повышении износа режущего инструмента на хронограмме проявляются высокочастотные составляющие колебаний интервалов времени. Данное наблюдение было подтверждено результатами частотного анализа. Изменения в хронограмме соответствуют увеличению на порядок амплитуды колебаний на метках 100 и 200 Гц спектральной диаграммы, что может являться проявлением гармоник частоты ν . Отметим, что никакие параметры, кроме степени износа инструмента в процессе эксперимента не изменялись, а время его проведения не превысило 10 мин.

Из рис. 3 следует, что процессы износа инструмента влияют на параметры вращения шпинделя станка. Влияние выражается в изменении амплитуды парциальных колебаний, соответствующих отдельным частотам спектра. Механизм зависимости гармоник колебаний вращения шпинделя от малого нелинейного возмущения (силы резания) до конца не изучен, работы в этом направлении продолжают. Получение взаимосвязей между вариациями амплитуды конкретной частоты в спектре и изменением состояния режущей кромки токарного инструмента в процессе обработки зависит от результатов построения математической модели колебаний шпинделя станка в фазохронометрическом представлении.

На данном этапе исследований разработана принципиально новая измерительная технология изучения процессов деградации отдельных элементов системы обработки детали станком непосредственно в процессе его функционирования. Данная технология позволяет реализовать системы диагностики и мониторинга технического состояния инструмента.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 9.1265.2014/К на выполнение научно-исследовательской деятельности в сфере научной деятельности (код проекта 1265).

Литература

1. **Ghasempoor A., Moore T. N., Jeswiet J.** On-line wear estimation using neural networks // *Proc. Inst. Mech. Eng.* 1998. V. 212. P. 105—112.
2. **Синопальников В. А., Григорьев С. Н.** Надёжность и диагностика технологических систем: Учебник. М.: Высшая школа, 2005.
3. **Altintas Y.** Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design (2nd ed.). Cambridge, 2012.
4. **Silva R. G., Reuben R. L., Baker K. J., Wilcox S. J.** Tool wear monitoring of turning operations by neural network and expert system classification of a feature set generated from multiple sensors // *Mech. Syst. Signal Pr.* 1998. V. 12. P. 319—332.
5. **Ромашев А. Н.** Классификация способов мониторинга состояния режущего инструмента // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2014. № 1. С. 178—186.
6. **Макаров В. Ф., Шохрин А. В., Потягало О. Н.** Исследование влияния режима резания и износа режущего инструмента на изменение физических параметров процесса резания на станках с ЧПУ // *СТИН*. 2010. № 9. С. 30—32.
7. **Козочкин М. П., Сабиров Ф. С.** Аттракторы при резании и перспективы их использования в диагностике // *Измерительная техника*. 2009. № 2. С. 37—41.
8. **Киселёв М. И., Пронякин В. И.** Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода // *Измерительная техника*. 2001. № 9. С. 15—18.
9. **Пронякин В. И.** Проблемы диагностики циклических машин и механизмов // *Измерительная техника*. 2008. № 10. С. 9—13.
10. **Потапов К. Г., Сырицкий А. Б.** Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков // *Приборы*. 2014. № 5. С. 13—18.
11. **Колёв К. С.** Вопросы точности при резании металлов. Киев: Машгиз, 1961.

Дата принятия 15.02.2016 г.