

УДК 621.923

С.М. Братан, профессор, д-р техн. наук,

Д.А. Каинов, доцент, канд. техн. наук,

Д.Е. Сидоров

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevastopol.ua

ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИЯХ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ С ПОЗИЦИЙ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Рассматривается стратегия обеспечения точности обработки поверхностей на операциях плоского шлифования.

При моделировании различных процессов широкое распространение получил системный анализ и системный подход. Такой подход позволяет вскрыть состав и внутреннюю структуру системы и на основе этого построить адекватную модель, удовлетворяющую заданным требованиям. Это особенно важно при разработке модели сложных стохастических объектов, к которым относятся операции абразивной обработки.

Для любой реальной системы существует множество вариантов ее декомпозиции на подсистемы. Критерием выбора варианта разложения является поставленные цели моделирования, простота структуры системы и удобство реализации ее математического описания.

При описании подсистем обычно задаются наборами входов в каждый из них и системы в целом, а также видом математических зависимостей, характеризующих связи между выходными и входными сигналами. При системном анализе эти зависимости обычно задаются в виде функции перехода и функции выходов.

Функция переходов системы задает отображение множества входных сигналов и параметров i -го состояния во множество других параметров k -го состояния. Например, если параметры системы в какой-либо момент времени τ зависят от состояния в предыдущий момент времени $\tau - \Delta\tau$ и от вектора входных параметров, то

$$S(\tau) = F[S(\tau - \Delta\tau), X(\tau)], \quad (1)$$

где $X(\tau)$ – вектор входных параметров системы; $S(\tau)$ – вектор параметров состояния системы; F – закон отображения.

Функция выходов системы задает отображение множества входных сигналов и параметров состояния во множество выходных сигналов

$$Y(\tau) = \Phi[S(\tau - \Delta\tau), X(\tau)], \quad (2)$$

где $Y(\tau)$ – вектор выходных параметров системы, Φ – закон отображения.

Методами системного анализа можно провести декомпозицию воздействий на технологический процесс со стороны окружающей среды на измеряемую и управляемую часть: вектор управления $U(\tau)$; измеряемую, но неуправляемую часть – вектор входных переменных $X(\tau)$; неизменяемую (и, тем более, неуправляемую часть) – вектор $\Omega(\tau)$. Внутри каждого из указанных векторов можно выделить компоненты, характеризующие факторы, воздействующие на технологический процесс.

Целью данной статьи является методологии обеспечения точности обработки заготовок на операциях плоского шлифования.

Состояние технологического процесса отображается вектором $Z(\tau)$. При этом доступная измерению часть $Z(\tau)$ является вектором выходных переменных $Y(\tau)$. Часть выходных переменных $Y(\tau)$ определяет единичные показатели качества $y_k(\tau)$, по которым целесообразно вести оценку стабильности технологического процесса. Следовательно,

$$|y_k(\tau_0) - y_k(\tau)| \leq \varepsilon_k \quad \forall \tau \in (\tau_0 \quad \tau_f), \quad (3)$$

где ε_k – заданный предел изменения k -го показателя качества; $(\tau_0 \quad \tau_f)$ – заданный интервал времени, в течение которого должны сохраняться показатели качества. Эти показатели должны находиться в пределах заданного поля допуска $y_{k \min} \leq y_k(\tau) \leq y_{k \max}$. Неравенство (3) гарантированно выполняется

при условии $\left| \frac{dy_k}{d\tau} \right| \leq \delta_k$. Здесь $\delta_k = \frac{\varepsilon_k}{\tau_f - \tau_0}$ – ограничение по скорости изменения параметра y_k .

Причинами, вызывающими изменение y_k , являются внешние воздействия на технологический процесс, т.е. векторов воздействий $U(\tau)$; $X(\tau)$, $\Omega(\tau)$ и начальные условия состояния $Z(\tau_0)$. В силу того, что $\Omega(\tau)$ является неизмеряемым, то его компоненты могут считаться случайными функциями, результат воздействия которых приводит к случайным отклонениям от номинальных значений y_k , и следовательно, появлению элементов случайности в показателях качества.

В соответствии с ГОСТ 15895–77, для такого случая критерием стабильности служит среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра σ_{y_k} , т.е.

$$\sigma_{y_k} \leq \sigma_{y_k \max}, \quad (4)$$

где $\sigma_{y_k \max}$ – максимально допустимое среднеквадратическое отклонение.

Обеспечение стабильности соответствующих показателей производится за счет выбора компонентов вектора $U(\tau)$.

На операциях шлифования обработка заготовок также выполняется в условиях непостоянства параметров технологической системы обработки и окружающей среды. Изменяется состояние рабочей поверхности абразивного инструмента, состав и свойства СОЖ, параметры жесткости технологической системы, температура окружающей среды и т.д. Изменение одних параметров протекает за период обработки одной детали, других – в течение смены, третьих – в течение более длительного периода.

Изучение структуры операции плоского шлифования требует разбиения ее на элементы: отдельные подсистемы и блоки, описание связей между ними [1]. По отношению к объекту (детали и инструменту) технологические процессы выступают как преобразующие системы. Технологические процессы могут рассматриваться как средство обеспечения запланированных эксплуатационных свойств деталей, сборочных единиц и изделий. Разбиение на подсистемы определяется как непосредственно изучаемым объектом – технологической операцией, так и целью проводимого анализа, формализованным представлением которой являются соответствующие критерии.

Рассмотрим применение системного подхода к процессу плоского шлифования. На кафедре технологии машиностроения Севастопольского национального технического университета разработана структура и состав системы для анализа процессов абразивной обработки. При этом разбиение на подсистемы проведено в соответствии с традиционным делением технологической системы на “станок–приспособление, инструмент, деталь, СОЖ, правящий инструмент, заготовка, зона контакта. В предлагаемой работе произведена декомпозиция не по структурному, а по функциональному признаку. Такое разбиение на подсистемы позволяет упростить модель, выделить в ней наиболее главные и определяющие функционирование части, так как, в конечном счете, необходимо создать модель не шлифовального станка со всеми его агрегатами и узлами, а модель процесса плоского шлифования.

Основной комплекс явлений, характеризующий показатели шлифования, протекает в пределах зоны контакта инструмента с заготовкой. Действительно, микрогеометрические параметры круга вне зоны контакта практически не меняются, так как существенного разрушения поверхности инструмента при этом не происходит. Кроме того, амплитуда вибраций вне зоны контакта быстро убывает, и за время оборота форма поверхности практически устанавливается.

Состояние поверхности инструмента вне зоны контакта несколько изменяется. Так, П.И. Ящерицин отмечает наличие отрыва зерен и налипшего на них металла вне зоны контакта. Это явление особенно усиливается при высоких скоростях резания, вибрациях в технологической системе, внезонной подаче СОЖ (в том числе – через поры круга). Однако основные параметры поверхности инструмента, такие как распределение режущих кромок, по его объему, параметры отдельных зерен и т. п., в пределах оборота вне зоны контакта меняются незначительно. Выпадение нескольких десятков зерен не может существенно изменить характер расположения оставшихся режущих элементов.

Аналогичные выводы можно сделать и о состоянии поверхности заготовки вне зоны контакта. Шероховатость и дефектный слой на поверхности детали полностью определяются процессами в зоне контакта инструмента и изделия. Однако тепловыделение при шлифовании приводит к изменению толщины заготовки. Учет этого фактора необходим. Необходимо также учитывать и упругие деформации в системе под действием сил резания. Степень влияния этих факторов определяется жесткостью технологической системы, параметрами охлаждения и др.

Форма зоны контакта определяется перемещениями в пространстве круга, изделия и других элементов технологической системы. Эти перемещения непосредственно связаны с режимами обработки, такими как скорости круга и заготовки, продольная и поперечная подачи.

Износ узлов станка в процессе работы, их температурные деформации за время одного или даже нескольких циклов крайне незначительны. Поэтому эти явления не учитываются при моделировании.

Основываясь на этих положениях, структуру всей системы можно представить состоящей из подсистем "Процесс резания" и "ТС" – "Технологическая система" (рисунок 1). Подсистема "ТС"

реализует описанные выше функции, а в отношении микро- и макрорельефа круга и заготовки является как бы линией задержки. Эти параметры вновь поступают на вход подсистемы "Процесс резания" по истечении времени оборота, соответственно, круга или изделия. Тоже касается и физико-механического состояния поверхности заготовки. В таблице 1 приведено описание наборов входов и выходов каждой из подсистем.

Структура подсистемы "ТС" в предлагаемой работе не вскрывается. Выходные параметры 1 – 5 получаются из входных 1 – 5 простой задержкой на время оборота круга и изделия. Частота вращения инструмента и скорость нарезания изделия вычисляются по режиму резания. Параметры смазочно-охлаждающей жидкости определяются по задаваемому ее составу, способу подачи, расходу. Обычно эти параметры представляют собой эмпирические поправочные коэффициенты в формулах температуры и силы резания.

Для определения координат центра вращения круга необходимо решение уравнения баланса перемещений в технологической системе. Из анализа кинематики процесса [1] можно сделать вывод, что поперечная подача расходуется на приращение съема металла, износа шлифовального круга, упругие и температурные деформации в системе, а также на приращение фактической глубины микрорезания.

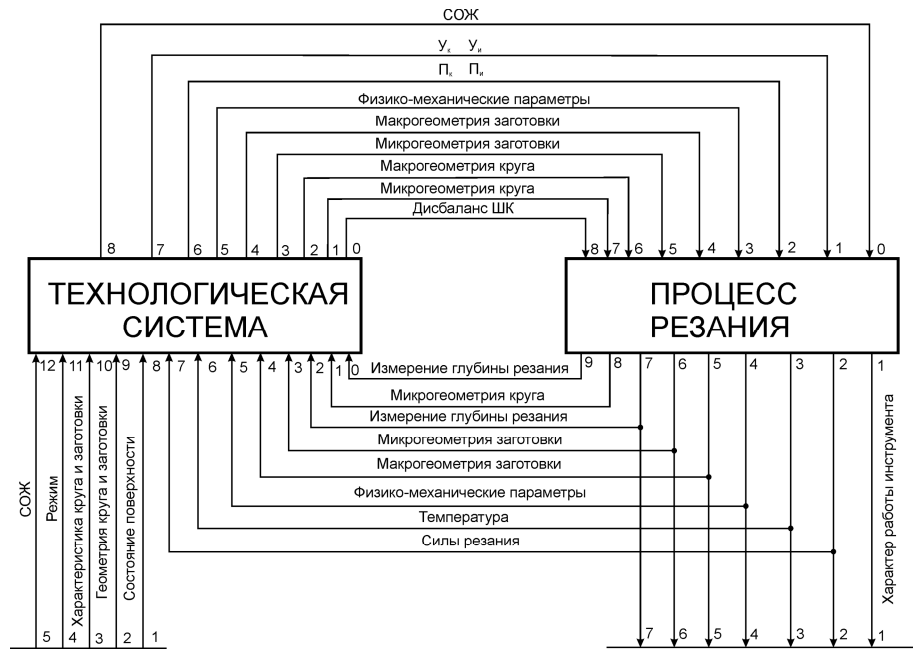


Рисунок 1 – Структура динамической системы процесса плоского шлифования

Уравнение баланса перемещений в технологической системе в непрерывной форме имеет вид [1]

$$dA = dt_f + dR + dr + dY_{yn} + dY_T, \tag{5}$$

где dA – изменение межцентрового расстояния, определяемое поперечной передачей; dt_f – изменение фактической глубины микрорезания; dR – изменение радиуса круга; dr – изменение радиуса заготовки; dY_{yn} – упругие деформации системы; dY_T – температурные деформации системы.

Уравнение баланса перемещений в технологической системе (5) показывает, на какие составляющие расходуется величина поперечной подачи. Оно же определяет геометрию зоны контакта шлифовального круга с заготовкой.

Таким образом, важнейшим параметром, характеризующим процессы в зоне контакта и ее форму, является фактическая глубина микрорезания t_f . Для ее определения необходимо решение уравнения (5) на каждом интервале времени Δt .

Однако вследствие того, что текущие параметры формы зерен и их расположения, как и всего шлифовального круга в целом являются случайными, то и процессы, определяемые взаимодействием зерен с материалом заготовки, являются стохастическими.

Стабильность параметров качества поверхностей при шлифовании в существенной степени зависит от изменения фактической глубины микрорезания t_f , которая с одной стороны, представляет связующее звено между выходными параметрами процесса и управляющими воздействиями, с другой стороны, определяет важнейшие ограничения, т.е.

$$0 \leq t_{fi} \leq \delta_{cej}. \tag{6}$$

Уравнения (5) и (6) характеризует изменение состояния технологической системы для любого момента времени и справедливы для схемы плоского шлифования. Его анализ показывает, что поперечная подача на j -ом обороте (проходе) расходуется на приращение глубины микрорезания, компенсацию радиального съема материала предшествующего оборота, износ круга, приращение упругих и температурных деформаций.

Таблица 1 – Наборы входов и выходов подсистем

Подсистема	Входные параметры	Выходные параметры
1	2	3
0. Внешняя среда	1. Характер работы инструмента. 2. Составляющие силы резания. 3. Температура элементов ТС. 4. Физико-механические параметры. 5. Макрогеометрия поверхности заготовки при выходе из зоны резания. 6. Микрогеометрия поверхности при выходе из зоны резания. 7. Макрогеометрия инструмента.	1. Начальное состояние поверхностей инструмента и заготовки. 2. Начальные геометрические размеры круга и заготовки. 3. Характеристика инструмента и обрабатываемого материала. 4. Режим резания. 5. Параметры СОЖ.
1. Процесс резания	1. Параметры СОЖ. 2. Расстояние от центра вращения шлифовального круга до базовой поверхности. 3. Скорость вращения инструмента и перемещения заготовки. 4. Физико-механические свойства при входе в зону резания. 5. Макрогеометрия поверхности заготовки при входе в зону резания. 6. Микрогеометрия поверхности заготовки при входе в зону резания. 7. Макрогеометрия инструмента при входе в зону резания. 8. Микрогеометрия поверхности инструмента при входе в зону резания. 9. Дисбаланс инструмента.	1. Характер работы инструмента. 2. Составляющие силы резания. 3. Температура элементов ТС. 4. Физико-механические свойства заготовки при выходе из зоны резания. 5. Микрогеометрия заготовки при выходе из зоны резания. 6. Микрогеометрия поверхности заготовки при выходе из зоны резания. 7. Измерение t_f . Изменение t_f .
2. Технологическая система	1. Микрогеометрия поверхности инструмента при выходе из зоны резания. 2. Макрогеометрия инструмента при выходе из зоны резания. 3. Микрогеометрия поверхности заготовки при выходе из зоны резания. 4. Макрогеометрия заготовки при выходе из зоны резания. 5. Физико-механические параметры поверхности заготовки при выходе из зоны резания. 6. Температура элементов ТС. 7. Сила резания. 8. Начальное состояние поверхностей инструмента и заготовки. 9. Начальные геометрические размеры инструмента и заготовки. 10. Марка инструмента и обрабатываемого материала. 11. Режим резания. 12. Параметры СОЖ.	1. Микрогеометрия поверхности инструмента при выходе из зоны резания. 2. Макрогеометрия инструмента при выходе из зоны резания. 3. Микрогеометрия поверхности заготовки при выходе из зоны резания. 4. Макрогеометрия заготовки при выходе из зоны резания. 5. Физико-механические параметры поверхности заготовки при выходе из зоны резания. 6. Температурные деформации элементов ТС. 7. Упругие деформации элементов ТС. 8. Координаты центра вращения инструмента и приложения заготовки. 9. Изменение состава и параметров СОЖ.

Анализ операции показывает [2], что существует ряд вариантов, обеспечивающих получение детали в соответствии с требованиями чертежа и технических условий.

При проектировании технологических процессов вынужденно задаются завышенными запасами по отношению к ограничениям, учитывающим возможное неконтролируемое влияние возмущающих факторов, неточности математических моделей и методик построения циклов управления операцией. При этом необходимое качество обработки изделий в настоящее время чаще всего обеспечивается избыточными затратами технологических ресурсов (времени обработки, применением дополнительных доводочных процедур, нерациональным расходования материала круга и т.п.) [2].

Повышение эффективности операций шлифования возможно за счет применения систем с обратной связью, компенсирующих воздействие на объект возмущающих факторов (таблица 2).

Вышеперечисленный анализ показывает, что основной причиной неравномерного съема материала, образования волнистости и шероховатости на обработанной поверхности является нестационарность фактической глубины резания, вызванная отклонениями формы и дисбалансом шлифовального круга, которая недоступна прямому измерению. Вследствие относительной малости зоны контакта, непосредственное измерение в этой зоне фактической глубины резания t_f прямыми методами весьма затруднительно, что приводит к необходимости косвенных или совокупных измерений.

Таблица 2 – Основные возмущения на операциях шлифования

СТАНОК		
Возмущающие воздействия	Характер и степень влияния	Методы компенсации
Колебания жесткости	Систематические Существенна	Увеличение жесткости узлов станка
Люфт в механизме поперечной подачи	Систематические Существенна	Применение безлюфтовых передач
Упругие и температурные деформации	Систематические Не существенна	Предварительный прогрев, компенсация в комплексе текущих размерных отклонений
Изменение состава и расхода СОЖ	Случайный Не существенна за время обработки одной детали	Стабилизация состава СОЖ
ПРИСПОСОБЛЕНИЕ		
Упругие деформации	Систематические	Увеличение жесткости
Температурные деформации	Систематические Не существенна	Предварительный прогрев, компенсация в комплексе текущих размерных отклонений
Неточность установки	Случайный Не существенна	Компенсация в комплексе текущих размерных отклонений
ИНСТРУМЕНТ		
Колебания твердости круга	Случайный Не существенна	Компенсация отклонений по результатам оценки
Линейный и размерный износ шлифовального круга	Систематические Не существенна	Компенсация отклонений по результатам оценки
Колебание режущей способности шлифовального круга	Случайный Существенна	Изменяются в пределах 1,5...2 раза Стабилизация режима, компенсация отклонений по результатам оценки
Отклонения формы и дисбаланс круга вследствие неравномерного износа	Периодический за время обработки одной детали Существенна	Правка круга, компенсация отклонений по результатам оценки
ДЕТАЛЬ		
Отклонение геометрии заготовки от заданной	Случайный Не существенна	Компенсация отклонений по результатам оценки
Изменение физико-химических свойств заготовки	Случайный Не существенна	Компенсация отклонений по результатам оценки

Одним из путей оценки (диагностики) t_f является определение координат центра круга относительно поверхности детали при известном начальном значении расстояния от базовой плоскости до центра вращения шлифовального круга и скорости его изменения.

Такие измерения невозможно осуществить точно, вследствие того, что ряд факторов воздействующих на процесс обработки, не имеющих закономерного характера, оказывает существенное влияние на погрешность измерений. В частности, случайным оказывается текущее отклонение радиус-вектора шлифовального круга.

Для учета влияния статистических свойств текущих отклонений радиуса-вектора шлифовального круга и толщины заготовки необходимо дополнительно к входному сигналу подавать на вход модели системы случайный процесс с такими же стохастическими характеристиками, как и у текущего отклонения радиус-вектора шлифовального круга. Соответствующий случайный входной сигнал может быть получен при помощи формирующего фильтра [3].

Таким образом, для решения проблемы обеспечения точности обработки износостойких покрытий при плоском наружном шлифовании необходимо в дальнейшем решать следующие задачи:

- на основе изучения процессов, происходящих в технологической системе при взаимодействии детали и круга разработать модель динамического объекта, характеризующую отклонения от статического режима;
- для учета статистических свойств текущих отклонений радиус-векторов шлифовального круга целесообразно построить формирующий фильтр и определить его параметры;
- на основе разработанных моделей построить динамические оценки текущих параметров технологической системы;
- использовать полученные оценки текущих параметров при построении автоматической системы для стабилизации параметров технологического в процесса плоского шлифования при обработке износостойких покрытий в реальном масштабе времени.

Библиографический список

- Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. — Изд-во Сарат. ун-та, 1979. — 232 с.
- Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / А.Н. Резников. — М.: Машиностроение, 1977. — 391 с.
- Братан С.М. Экспериментальные исследования случайных размерных параметров шлифовального круга и построение аналитических зависимостей для оценки влияния его рельефа на входные шумы операции шлифования / С.М. Братан // Нові матеріали і технології в металургії: Науч. жур. ЗДТУ. — Запоріжжя, 2000 г. — Вып. 1 — С. 83 – 86.

Поступила в редакцию 10.10.2006 г.