

УДК 621.923

Ю.К. Новоселов, д-р техн. наук, профессор,**Э.Э. Ягьяев, аспирант***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: mash@SevGTU14.Sebastopol.ua***ДИАГНОСТИКА ОПЕРАЦИЙ ЧИСТОВОГО ШЛИФОВАНИЯ**

Предложен метод диагностики состояния технологической системы операций чистового шлифования при оптимальном управлении процессом обработки.

Накопленный к настоящему времени в результате теоретических и экспериментальных исследований обширный материал по технологическому обеспечению качества позволяет создавать математические модели управления процессами шлифования. Однако использование таких моделей не всегда дает удовлетворительный результат, так как они с недостаточной полнотой учитывают влияние на процесс изменений состояния самой технологической системы. Интенсификация использования возможностей операций может быть выполнена путем реализации двух подходов [1].

Первый заключается в поддержании параметров состояния технологических систем на достаточно высоком уровне. Однако это не всегда возможно. Так, например, невозможно править электроэрозионным методом абразивные круги на нетокопроводных органических и керамических связях, непрерывно заменять СОЖ, ремонтировать станок, устранять влияние на процесс возмущающих воздействий.

Второй подход заключается в оптимальном управлении процессами обработки с учетом изменений состояния технологической системы. Для этого необходимо разработать методы контроля и прогнозирования.

Цель данной публикации состоит в разработке методологии оценки изменений состояния технологической системы, учитывающей особенности операций чистового шлифования.

Данные по изменению параметров состояния подсистем операции шлифования, полученные на основе литературных источников, приведены на рисунке. Их анализ показывает, что параметры одних подсистем изменяются медленно в течение нескольких лет, других – быстро, их отклонения становятся заметными не только при обработке партии заготовок, но и при шлифовании одной поверхности.

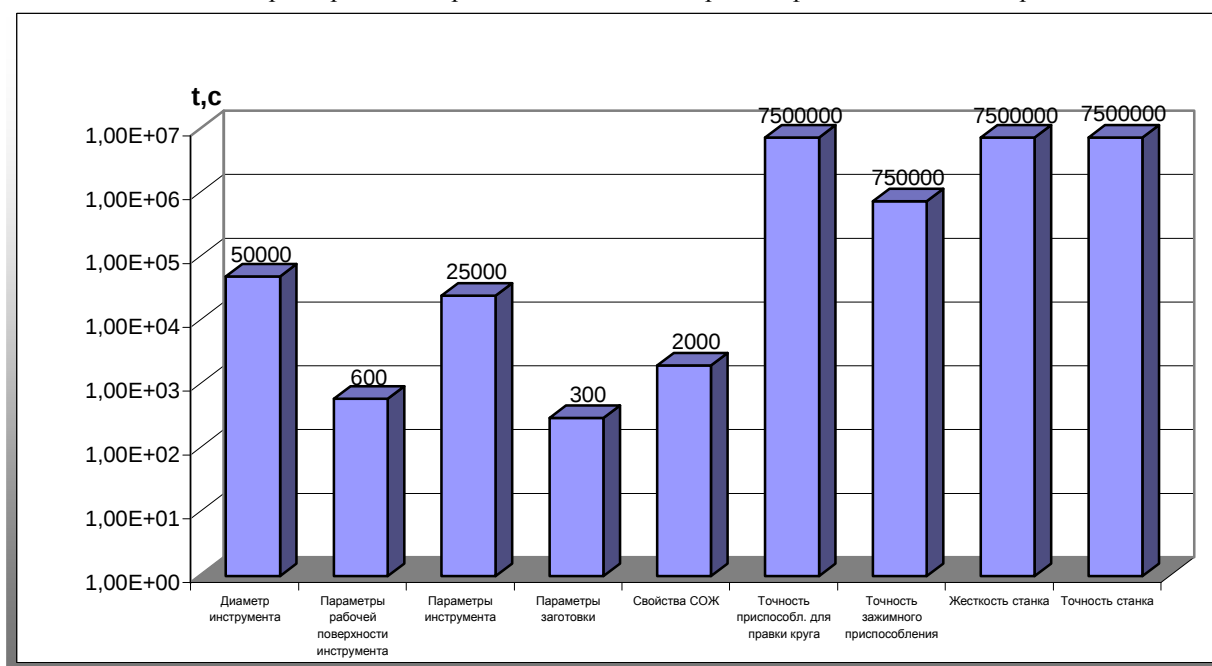


Рисунок 1 – Время до ремонта, восстановления или замены подсистем операции чистового шлифования

Учитывая многочисленность параметров состояния технической системы, для удовлетворительного описания процессов необходимо иметь информационную сеть, обеспечивающую оценку состояния подсистем в процессе работы.

В общем случае различают три типа задач по определению состояния технического объекта [2]:

задача диагноза заключается в определении состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени;

задача прогноза состоит в предсказании состояния, в котором окажется технический объект в некоторый последующий момент времени;

задача генезиса заключается в определении состояния, в котором находился технический объект ранее.

Для операций чистового шлифования с целью использования данных при оптимальном управлении необходимо решить первую и вторую задачи. Проанализируем некоторые особенности рассматриваемых операций.

1. Все металлорежущие системы работают в циклическом режиме. В серийном производстве по заданной программе обрабатывается партия заготовок. Затем система перестраивается на обработку детали другого типоразмера или вида. В массовом производстве за каждой операцией закреплена одна деталь.
2. Наблюдается тесная связь выходных переменных с входными переменными, алгоритмом управления и параметрами технологической системы. Параметры качества детали зависят не только от условий выполнения заключительной части процесса, но и всего цикла обработки.
3. На процесс обработки оказывает воздействие большое число возмущающих факторов, что нарушает функциональные связи выходных переменных с входными, а также параметрами технологической системы.
4. В процессе шлифования изменяются не только параметры объекта производства, но и технологической системы. При обработке каждой новой заготовки система приобретает новое исходное состояние.

При проектировании технологического процесса, как правило, учитывают первую и вторую особенности операций и недостаточно внимания уделяют четвертой. Изменения же параметров состояния системы могут быть столь значительны, что при обработке некоторой j -й заготовки она не может выполнять свое служебное назначение и требует реставрации или замены. В связи с этим для полноценного функционирования диагностическая система должна обеспечивать получение оценок о состоянии системы в целом, на основании которых строится прогноз. Это позволяет повысить эффективность управления, производительность и качество обработки. Реализация данного подхода требует дополнительных исследований структурно-функциональных связей и закономерностей с целью получения теоретических зависимостей между элементами технической системы и формированием систематических составляющих погрешностей размера и отклонений формы, шероховатости поверхности обрабатываемых деталей.

Учитывая первую и четвертую особенности операций шлифования, представим связь выходных переменных с входными и параметрами состояния в виде зависимости

$$Y_j(t) = F_j(X_j; Z_j(t); U_j(t)), \quad (1)$$

где $Y_j(t)$ – вектор выходных переменных при j -м цикле в момент времени t ; X_j – соответствующий вектор входных переменных; $Z_j(t)$ – вектор параметров состояния технологической системы при j -м цикле в момент времени t ; $U_j(t)$ – соответствующий вектор управляющих воздействий.

$$Y_j(t) = (r; \varepsilon; T; W; R_a),$$

где r – радиус (размер) обрабатываемой поверхности; ε – эксцентриситет; T – глубина дефектного слоя; W – волнистость; R_a – шероховатость поверхности; P_y, P_z – силы резания.

Анализ зависимости (1) показывает, что при изменении вектора параметров состояния технологической системы не только изменяются численные значения выходных переменных, но в общем случае могут измениться и зависимости, отражающие закон преобразования параметров объекта. Это означает, что алгоритм изменения управляющих воздействий должен корректироваться для каждого j -го цикла работы системы. Учитывая инерционность технологических систем и систем управления, в ряде случаев, необходим прогноз на момент времени $t + k$.

Проведенный анализ входных, выходных переменных и параметров состояния подсистем в комплексе с априорной информацией литературных источников позволяет выделить из каждой подсистемы, наиболее существенно изменяющиеся параметры и оценить их влияние на выходные переменные, таблица. Так, для станка за период его эксплуатации между капитальными ремонтами наиболее существенно изменяются точность перемещения исполнительных механизмов, жесткость, частота вращения шпинделя круга, частота вращения шпинделя заготовки. Все четыре параметра могут иметь как закономерные, так и случайные компоненты. Точность исполнительных механизмов и жесткость узлов закономерно изменяются вследствие износа контактных поверхностей трения. Например, с износом направляющих станины увеличиваются отклонения от прямолинейности движения стола и шлифовальной бабки, с износом подшипников – биение исполнительных поверхностей шпинделя относительно оси его вращения. Жесткость элементов станка изменяется вследствие

увеличения зазоров в сопряжениях и контактной жесткости поверхностей при их износе. Случайные отклонения вызваны попаданием в узлы сопряжений инородных частиц. Частоты вращения шпинделя круга и шпинделя заготовки могут отклоняться от средних значений как вследствие износа передаточных механизмов, так и вследствие случайных отклонений напряжения и частоты тока, питающего электродвигатели. Закономерные изменения точности и жесткости могут быть замерены при проведении технического обслуживания оборудования. В процессе же эксплуатации они являются неустраняемыми и должны быть учтены при управлении процессом обработки.

Аналогичные рассуждения можно привести и при анализе точностных параметров приспособлений для закрепления заготовки и правки абразивного инструмента. Увеличение погрешностей при движении алмазного карандаша относительно вращающегося шлифовального круга при правке приводит к увеличению на его поверхности отклонений формы, которые отображаются на обрабатываемой поверхности. Силы резания и шероховатость поверхности при этом увеличиваются незначительно. Износ алмазного карандаша влияет на величину диаметра круга, что необходимо учитывать при шлифовании без прибора активного контроля (возникает систематическая погрешность размера обрабатываемой поверхности). При шлифовании с прибором активного контроля эта погрешность устраняется системой управления станком.

Из параметров характеристики абразивного инструмента на процесс шлифования наибольшее влияние оказывают: материал абразивного зерна, связка, зернистость, структура круга, состояние его рабочей поверхности после правки и в процессе работы, дисбаланс круга. Наиболее устойчивыми являются материал абразивного зерна, связка, зернистость инструмента, которые регламентируются соответствующими стандартами. Структура круга обеспечивается выбором соотношений объемов абразивного зерна, связки и пор.

Таблица 1 – Влияние изменений параметров состояния технологической системы на выходные переменные операции чистового шлифования

Подсистема	Вид изменений	Выходные переменные	Влияние на выходную переменную, %	Относительная скорость изменения параметра, %/с
Станок	Точность перемещения исполнительных механизмов	W	100	$1,3 \cdot 10^{-5}$
	Жесткость станка	P_y, P_z	40	$5,3 \cdot 10^{-6}$
	Частота вращения шпинделя круга	$\Delta r, R_a$	100	$1,3 \cdot 10^{-5}$
	Частота вращения заготовки	$\Delta r, R_a$	100	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Приспособление	Точность закрепления заготовки	W	80	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Приспособление для правки круга	Точность перемещения алмаза	W	80	$1,0 \cdot 10^{-5}$
	Износ алмазного карандаша	$\Delta r, R_a$	100	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Заготовка	Отклонения:			
	- размера	T	30	0,10
	- расположения поверхностей	ε	80	0,26
	- формы поверхностей	W, ε	80	0,26
	- скорости изделия при съеме припуска	Δr	100	0,33
	- жесткости	P_y, P_z	40	0,13
Инструмент	Изменения:			
	- диаметра при износе и правке	$\Delta r, T$	100	$2,0 \cdot 10^{-3}$
	состояния рабочей поверхности	$\Delta r, T, R_a$		
	отклонения формы	$\Delta r, R_a, W$	80	0,13
	- дисбаланса	W	60	$2,4 \cdot 10^{-3}$
	Отклонения:			
	- твердости	$\Delta r, P_y, P_z, R_a$	100	$4,1 \cdot 10^{-3}$
	- дисбаланса	W	60	$2,4 \cdot 10^{-3}$
	- однородности по высоте	$\Delta r, P_y, P_z$	80	$3,2 \cdot 10^{-3}$
СОЖ	Состав	$\Delta r, R_a$	100	$4,8 \cdot 10^{-4}$
	Уровень загрязнения	R_a	40	0,02

Твердость для одной партии инструментов может меняться в пределах одной степени, что существенно влияет на выходные переменные процесса шлифования. Фактическое значение твердости может быть определено заводом-потребителем при наличии соответствующих приборов, что доступно

только крупным предприятиям. Отклонения твердости для одних предприятий является контролируемым параметром, для других – неконтролируемым. Изменение твердости вызывает закономерные отклонения выходных переменных, которые проявляются за период работы круга до полного износа. Состояние рабочей поверхности абразивного инструмента определяется формой, числом, распределением режущих кромок, формой рабочей поверхности инструмента. Все исходные параметры зависят от технических данных станка, правящего инструмента, режима правки. Например, с увеличением твердости круга увеличивается число единичных режущих кромок, а с увеличением вибрации в технологической системе соответственно – отклонения формы круга.

В процессе обработки все параметры состояния рабочей поверхности инструмента изменяются закономерно. Их текущее состояние может быть определено только при использовании достаточно сложных методик и аппаратуры, что не приемлемо для производственных условий. Однако современный уровень развития теории шлифования позволяет прогнозировать эти параметры.

Отклонения параметров заготовки, могут носить как закономерный, так и случайный характер. Параметры заготовки целенаправленно преобразуются в процессе обработки. Часть из них изменяется непрерывно, часть – периодически. К первым относится, например, размер обрабатываемой поверхности при шлифовании с прибором активного контроля. Случайные отклонения параметров заготовки влияют на все параметры процесса шлифования и на выходные переменные этой важной технологической операции.

Влиянию изменений в смазочно-охлаждающей жидкости в литературе уделяется меньше внимания, чем другим подсистемам. С целью устранения таких изменений на машиностроительных предприятиях вводится система централизованной подачи СОЖ с введением непрерывной ее регенерации.

Выполненный анализ показывает на многочисленность параметров технологической системы, которые могут меняться при ее работе. Изменения могут носить как закономерный, так и случайный характер, часть из них периодически или непрерывно могут быть проконтролированы, большая часть в ходе выполнения операции не контролируется. Многие из изменений являются прогнозируемыми.

С целью моделирования изменений и возмущений введем систему функционалов, определяющих текущие параметры состояния системы. Для закономерных изменений можно записать, что

$$z_{i,j}(\tau) = z_{i,j-1} + A_i(j) + A_{zi}(\tau - (j-1)\tau_u), \quad (2)$$

где j – номер цикла работы системы; $z_{i,j-1}$ – параметр системы после завершения j -1-го цикла; A_i – оператор, учитывающий неполное восстановление i -го параметра системы после j -1-го цикла (начало j -го цикла); A_{zi} – оператор, определяющий изменение параметра z при работе системы; τ_u – время одного цикла работы системы.

Для случайных отклонений справедливо следующее выражение:

$$z_{i,j}(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{kj}(\tau) \sin(k \frac{\tau - (j-1)\tau_u}{\tau_u} 2\pi + \Psi_k), \quad (3)$$

Здесь A_k – случайная амплитуда отклонений k -той гармоники; Ψ_k – фаза k -той гармоники.

Для изменений, имеющих как закономерные, так и случайные отклонения, зависимость текущих значений параметров примет вид:

$$z_{i,j}(\tau) = z_{i,j-1} + A_i(j) + A_{zi}(\tau - (j-1)\tau_u) + \sum_{k=0}^{\infty} A_k(\tau) \sin(k \frac{\tau - (j-1)\tau_u}{\tau_u} 2\pi + \Psi_k). \quad (4)$$

Анализируя данные таблицы, можно сделать заключение, что изменение каждого из нескольких параметров состояния приводит к одинаковым отклонениям контролируемых параметров качества обработанной детали. Так, например, до 80 ... 100 % могут изменяться в процессе эксплуатации системы шероховатость и волнистость обработанной поверхности, как вследствие изменения параметров станка, так и вследствие изменения диаметра круга, образования на его поверхности волнистости, загрязнения СОЖ.

Таким образом, имея данные о значении выходных переменных в фиксированный момент времени t , часто бывает невозможно определить изменившийся параметр технологической системы. Прямой же замер параметров состояния часто бывает либо невозможен, либо трудоемким и не отвечает требованиям задач оптимального управления. Выявить причину отклонений можно, если иметь данные не только по значениям выходных переменных, но и по скоростям их изменения, которые для разных подсистем могут отличаться на несколько порядков. Так, скорости изменения выходных переменных при изменении параметров станка (таблица 2) составляют $1,3 \cdot 10^{-5} \dots 5,3 \cdot 10^{-6}$ процентов за 1 секунду, а при изменении параметров рабочей поверхности круга – 0,13. Следовательно, для качественной диагностики необходимо иметь данные не только по значениям $Y(t)$, но и по скоростям их изменения в процессе

эксплуатации системы. Если выявлена причина и имеются зависимости вида (1), определение текущих значений $Z_j(t)$ значительно упрощается. Задача сводится к решению зависимостей вида

$$F_z(Z_j(t), Z'_j(t), Z''(t)...) = F_y(X_j, U_j(t), Y_j(t), Y'_j(t), Y''_j(t)...) \quad (5)$$

На практике при решении зависимостей вида (5) часто бывает достаточным ограничиться первыми и вторыми производными.

Таким образом, выполненный анализ показывает на существенное влияние изменений параметров технологической системы на выходные переменные при обработке заготовок на операциях шлифования. Он подтвердил необходимость разработки системы диагностики процесса чистового шлифования, позволяющей производить оценку этих изменений. В отличие от известных подходов предложено проводить диагностику не только по значениям выходных переменных в фиксированные моменты времени, но и по скоростям их изменений в процессе эксплуатации системы.

При выполнении дальнейших исследований необходимо получение параметрических зависимостей, отражающих взаимосвязь изменений параметров состояния технологической системы и выходных переменных (уравнения (2), (3), (4)).

Библиографический список

1. Новоселов К.Ю. Анализ возмущений при обработке заготовок на станках с ЧПУ / К.Ю. Новоселов // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. — Севастополь, 1997. — Вып. 6. — С. 87–93.
2. Сапожников В.В. Основы теории технической диагностики / В.В. Сапожников, В.В. Сапожников. — М.: Изд-во «Основы технической диагностики», 2004. — 316 с.

Поступила в редакцию 13.07.2007 г.