

ВВЕДЕНИЕ

Механическая обработка деталей в ближайшей перспективе остается наиболее распространенным методом получения продукции машиностроительной, автомобилестроительной и других отраслей, позволяющим обеспечить выпуск изделий высокого качества и низкой стоимости в массовом количестве. Станок как техническое средство, осуществляющее "преобразование" заготовок металла в товарное изделие, претерпел сложный путь от примитивного устройства с ножным приводом до современных моделей станков с числовым программным управлением и обрабатывающих центров, сочетающих в себе возможности производственного участка или целого цеха.

Управление станком и отдельными его операциями все в большей степени переходят от рабочего к специальным системам управления, а на станках с ЧПУ - к бортовым ЭВМ.

В массовом производстве, каким, например, является производство автомобилей, механическая обработка деталей осуществляется так называемыми специальными станками, т. е. максимально приспособленными к интенсивному характеру массового производства. Важное место в парке станков массового производства занимает шлифовальное оборудование, особенно эффективное на конечных, финишных операциях, где при высокой производительности обеспечивается чистота обработки до $R_a \in [0,16 \dots 0,32]$ мкм. Здесь предъявляются жесткие требования ко всем компонентам и составляющим процесса обработки и, в первую очередь, к инструменту (шлифовальным кругам), заготовке (стабильность физико-технических свойств и начального припуска), смазочно-охлаждающей жидкости, жесткости технологической упругой системы станка. Несмотря на жесткую регламентацию параметров и свойств всех компонентов процесса обработки, достижение высокого качества деталей, высокой производительности и низкой себестоимости остается трудной инженерной задачей, где имеется достаточно резервов для повышения эффективности обработки.

Одним из наиболее важных направлений, открывающим широкие перспективы повышения эффективности шлифовальных операций, является разработка новых алгоритмов управления режимом шлифования, реализуемых на основе современных микропроцессорных систем. Применение компьютерных технологий позволяет непрерывно совершенствовать технологию "внеаппаратными", т. е. программными средствами за счет получения и использования априорной, текущей и апостериорной информации о параметрах процесса обработки и качестве деталей.

Переход от жестких программных циклов к адаптивным и оптимальным способен увеличить главные показатели обработки - производительность и качество, - в 1,5...2 раза, а в среднем - на 20...30 %.

Выбор между "простыми" и "сложными" системами, используемыми при механической обработке, во многом определяется возможностями предприятия, но следует всегда помнить, что первоначальная, может быть и значительная, экономия оборачивается впоследствии консервацией достигнутого технического уровня, отсутствием, в частности, оперативной реакции на технические требования, в конечном итоге - проигрышем в жесткой конкурентной борьбе.

Для массового производства и, особенно, для автомобильного производства главным показателем финишных операций механообработки является качество, т. к. производительность лимитирована ритмом сборочного конвейера. И в этом случае информационные, компьютерные технологии, базирующиеся на глубоком изучении объекта управления, получении и обработке измерительной информации методами математической статистики, будут иметь несомненные преимущества перед жесткими программными технологиями. В этих условиях будет значительно возрастать роль оператора станка, автоматической линии, перемещаясь от несложных, чисто механических функций до организатора стабильного, статистически подконтрольного процесса выпуска качественной массовой продукции.

ГЛАВА 1. ШЛИФОВАНИЕ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

§ 1.1. Механообработка и преобразование информации

Процесс обработки детали можно рассматривать как преобразование первоначального объема информации, принадлежащего заготовке детали, в некоторый конечный объем информации, характеризующий готовую деталь. Для заготовки детали этот первоначальный объем информации определяется через ряд параметров: материал заготовки, его твердость, припуск на обработку, отклонение формы, отсутствие трещин и раковин и т. д.

Технология изготовления самой заготовки строится так, чтобы гарантировать указанные параметры с допустимой для дальнейших целей погрешностью. Таким образом, информация о заготовке I_3 включает в себя априорные сведения I_{3c} , которые обозначим как детерминированную информацию, и некоторый объем информации $H_{3в}$, являющейся случайной величиной

$$I_3 = I_{3c} + H_{3в}. \quad (1)$$

Объем информации $H_{3в}$ называется энтропией и характеризует статистическую неопределенность указанной информации, возможные варианты ее реализации. Энтропию $H_{3в}$ можно уменьшить, если, например, перед обработкой определить конкретное значение твердости данной заготовки, точное значение припуска и т. д. В этом случае увеличится объем детерминированной информации I_{3c} , который позволит правильно определить режим обработки детали для достижения поставленной цели - например, повышение точности готовых деталей. Именно в этой связи заготовительные операции принимаются технологом во внимание при выборе параметров режима обработки. Для ответственных деталей вводится дополнительная операция чернового шлифования с тем, чтобы стабилизировать припуск на обработку перед операцией финишного шлифования.

Заготовка поступает на шлифовальный станок. В процессе обработки осуществляется преобразование исходной информации заготовки I_3 в информацию I_d конечного продукта - детали. Современный шлифовальный станок - это уникальное техническое сооружение. Основное направление при создании таких станков - это обеспечение долговременной стабильной работы всех систем и станка в целом. Достигается это тем, что параметры каждой системы станка варьируются как можно в более узких границах. Однако, предъявление чрезмерно жестких требований к указанным системам ведет к удорожанию станка и его обслуживания. Следует помнить и о том, что качество любого станка со временем ухудшается и требуются дополнительные капитальные затраты на ремонт или своевременную замену.

Станок как объект, осуществляющий преобразование входной информации о заготовке детали I_3 в информацию готовой детали I_d может быть представлен своим оператором $W_c(I, H)$, который и осуществляет это преобразование.

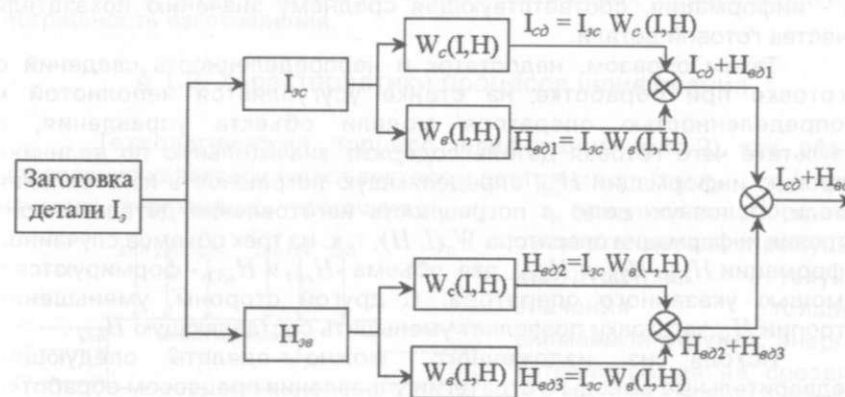


Рис. 1. Блок-схема преобразования информации при обработке детали на станке

В общем случае оператор $W_{oy}(I, H)$ должен представлять исчерпывающую математическую модель процесса обработки детали. Учитывая сложность объекта, наличие в нем многих взаимосвязанных систем, а также воздействие большого числа трудноконтролируемых возмущающих факторов, построение такой модели является чрезвычайно сложной задачей, а использование такой модели для целей управления и оптимизации процесса обработки - технически невозможным мероприятием. На рис. 1 представлена обобщенная блок-схема преобразования информации заготовки I_3 детали в информацию I_d готовой детали.

Для анализа процесса шлифования и использования в практических целях управления этим процессом модель объекта упрощают до степени полезности и пригодности указанной модели поставленной цели. В любом случае модель объекта управления $W_{oy}(I, H)$ может быть представлена суммой двух операторов

$$W_{oy}(I, H) = W_c(I, H) + W_g(I, H), \quad (2)$$

где $W_c(I, H)$ - оператор, включающий всю известную, в том числе, априорную информацию об объекте управления; $W_g(I, H)$ - оператор, характеризующий неопределенность и неполноту информации об объекте управления.

Преобразование информации I_3 о заготовке детали, осуществленное с помощью операторов $W_c(I, H)$ и $W_g(I, H)$, дает на выходе объекта управления информацию I_d об изготовленной детали

$$I_d = I_{cd} + H_{вд}, \quad (3)$$

где $H_{вд} = H_{вд1} + H_{вд2} + H_{вд3}$ - информация, определяющая случайные отклонения показателя качества готовой детали от среднего значения; I_{cd} - информация, соответствующая среднему значению показателя качества готовой детали.

Таким образом, недостаток и неопределенность сведений о заготовке при обработке на станке усугубляется неполнотой и неопределенностью оператора модели объекта управления, в результате чего готовая деталь содержит значительную по величине энтропию информации $H_{вд}$, определяющую погрешность изготовления детали. Основную долю в погрешность изготовления детали вносит энтропия информации оператора $W_e(I, H)$, т. к. из трех объемов случайной информации $H_{вд1}$, $H_{вд2}$ и $H_{вд3}$, два объема $H_{вд1}$ и $H_{вд3}$ формируются с помощью указанного оператора. С другой стороны, уменьшение энтропии $H_{зв}$ заготовки позволяет уменьшить составляющую $H_{вд2}$.

Исходя из изложенного, можно сделать следующие предварительные выводы о стратегии управления процессом обработки при шлифовании:

1. Повышение эффективности шлифовальных операций должно основываться на уменьшении энтропии информации о свойствах заготовки и параметрах объекта управления (станка). Уменьшение энтропии достигается за счет получения дополнительной информации о процессе обработки и объекте управления.

2. Получение исчерпывающей информации о заготовке и параметрах объекта управления и их использование в целях оптимизации режима обработки связано со значительным усложнением системы управления, которая должна измерять и отслеживать большее количество информационных величин, обрабатывать большее количество информации в реальном масштабе времени.

Компромиссным путем является сочетание мер по стабилизации параметров процесса шлифования и получению дополнительной измерительной информации, позволяющей существенно уменьшить энтропию информации и тем самым улучшить эффективность управления путем адаптивного или оптимального управления процессом обработки.

3. Повышение качества станков, инструмента, заготовок, а также качества работы обслуживающего технологический процесс персонала - по своей сути является основным, принятым в современном станкостроении путем, для уменьшения энтропии процесса шлифования как объекта управления. Но энтропия информации при отсутствии целенаправленных мероприятий склонна к увеличению, что требует дополнительных затрат (ремонт, капремонт, смена оборудования) для поддержания уровня энтропии приемлемой величины.

4. С точки зрения управления технологический процесс обработки детали можно представить в виде "перетекания" начальной энтропии, характеризующей неопределенность сведений о детали до обработки, в объем информации после обработки. Готовая деталь обладает, в свою очередь, некоторой энтропией, определяющей ее погрешность изготовления.

§ 1.2. Характеристики процесса шлифования

Технологический процесс шлифования (рис.2) как объект управления характеризуется вектором состояния $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, где в качестве переменных состояния $x_1, x_2, \dots, x_n$ принимаются координаты

суппорта, детали и режущего инструмента, текущие значения толщины снимаемой стружки, энергии, затрачиваемая на срезание стружки, и др.

На объект управления действуют возмущающие факторы, которые можно подразделить на контролируемые $g_i(t)$ и неконтролируемые $f_i(t)$. К числу контролируемых возмущений можно отнести начальный припуск обрабатываемой детали, величину износа шлифовального круга и др. Неконтролируемыми возмущающими воздействиями являются, например, температура охлаждающей жидкости, физико-химические свойства материала обрабатываемой детали и др. Качество технологического процесса шлифования оценивается по вектору выходных координат $y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, составляющими которого могут быть скорость съема припуска, сила резания или ее составляющие, мощность шлифования и другие параметры, имеющие тесную корреляционную связь с показателями качества обрабатываемой поверхности - геометрическим размером, шероховатостью, погрешностью формы, наличием прижогов.

Управление технологическим процессом шлифования осуществляется с помощью вектора управляющих воздействий $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$, составляющими которого являются, как правило, рабочие движения станка - поперечная, продольная и круговая подачи, скорость вращения детали.

Задача автоматического управления заключается в определении управляющего воздействия U , которое переводит вектор состояния из некоторого начального положения $x = x(0)$ на заданное целевое множество $S = S(X)$ при выполнении ограничений на фазовые координаты. Для оптимального управления указанное преобразование



Рис.2. Функциональная схема многомерного объекта управления

вектора состояния x осуществляется наилучшим образом в смысле некоторого показателя эффективности

$$J = \int_{t_0}^{t_k} \hat{\Psi}[\hat{X}(t), \hat{U}(t), g(t), f(t)] dt \rightarrow \text{extr}, \quad (4)$$

- где $\hat{\Psi}$ векторная функция, отражающая эффективность ТПШ; $[t_0, t_k]$ - интервал времени функционирования процесса обработки.

Эффективное управление процессом шлифования детали требует знания информации об объекте управления. Это знание появляется только тогда, когда объект управления представлен математической моделью, позволяющей с достаточной для практических целей точностью прогнозировать текущее и будущее состояние реального объекта. В качестве модели ТПШ наибольшее распространение получили математические модели с одной входной ($\kappa=1$) и одной выходной ($m=1$) координатами объекта управления, описываемого дифференциальным уравнением n -го порядка (5)

$$(a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + a_0) = b_{\kappa} p^{\kappa} + b_{\kappa-1} p^{\kappa-1} + \dots + b_1 p + b_0) U,$$

где a_i и b_i - постоянные коэффициенты параметров модели.

Математическое описание процесса шлифования в виде (5) впервые представлено в 1960 г. Е. С. Железновым [39] на основе уравнения баланса скоростей

$$V_c = V_m + V_{ук} + V_{уд}, \quad (6)$$

где V_c - скорость перемещения суппорта; V_m - скорость съема припуска с обрабатываемой детали; $V_{ук}$ - скорость износа шлифовального круга; $V_{уд}$ - скорость изменения упругой деформации технологической системы (ТС) станка.

По экспериментальным данным были получены соотношения, связывающие скорости $V_{уд}$ и $V_{ук}$ со скоростью снятия припуска V_m

$$V_{ук} = C_1 V_m^n; \quad V_{уд} = C_3 \frac{dV_m}{dt} V_m^{m-1},$$

где $n \in [2 \div 2,5]$ для разных кругов; m - показатель степени, равный в опыте $\approx 1,2$; C_1, C_3 - постоянные коэффициенты.

Окончательно модель ТПШ, полученная Е.С. Железновым, имела вид

$$V_c = V_m + C_1 V_m^n + C_3 V_m^{m-1} \frac{dV_m}{dt}, \quad (7)$$

Уравнение (7) дает возможность определить изменение действительной скорости съема припуска во времени $V_m(t)$ и величину снимаемого при этом припуска $S(t)$.

Для врезного круглого шлифования с режимом затупления шлифовального круга модель ТПШ может быть получена на основе баланса перемещений как результат интегрирования (6) при $V_{ук} \approx 0$

$$S_c = S + S_{уд}, \quad (8)$$

где S - перемещение шлифовального суппорта; S - величина снимаемого припуска; $S_{уд}$ - упругая деформация технологической системы станка.

При этом величина износа круга в цикле обработки одной детали будет мала и в выражении (8) принята $S_{ук} \approx 0$.

Величину упругой деформации можно определить [31] через скорость съема припуска

$$S_{уд} = a_3 V_m, \quad (9)$$

где a_3 - коэффициент, имеющий размерность времени. Указанный коэффициент называется постоянной времени объекта управления $T_{oy} = a_3$.

Уравнение (8) с учетом (9) примет вид

$$T_{oy} \frac{dS}{dt} + S = S_c. \quad (10)$$

Несмотря на свою простоту, уравнение (10) достаточно адекватно отражает основные характеристики процесса шлифования и его динамику.

Основным параметром, характеризующим ТПШ в указанной модели, является постоянная времени T_{oy} . Физический смысл, вкладываемый в данный параметр, можно выразить следующим признаком: чем меньше значение постоянной времени, тем быстрее нарастает скорость съема припуска при шлифовании детали, тем выше производительность обработки. В этом отношении постоянная времени является косвенной характеристикой двух важнейших параметров ТПШ: режущей способности шлифовального круга $K_{реж}$ и жесткости технологической системы станка J , с которыми постоянная времени связана функциональной зависимостью

$$T_{oy} = \frac{1}{K_{реж} J}. \quad (11)$$

Жесткость J отражает как конструктивные особенности станка, так и характеристики обрабатываемой детали, в первую очередь, соотношение геометрических размеров (длины и диаметра), условия крепления, наличие дополнительных опор (люнетов). Изменение жесткости станка связано с его старением и интенсивностью эксплуатации, однако происходит оно в течение длительного промежутка времени, исчисляемого годами. Если отсутствуют явные конструктивные нарушения, например, потеря прочности крепления люнетов или их износ, то можно считать, что $J = const$.

Таким образом, постоянная времени может служить характеристикой режущей способности шлифовального круга. Режущая способность шлифовального круга оценивается несколькими способами, которые связаны с возможностью получения измерительной информации. Для исследовательских целей наиболее распространена [31] зависимость, связывающая режущую способность шлифовального круга с радиальной составляющей силы резания F_y и скоростью съема припуска V_v .

$$K_{\text{рез}} = \frac{V_M}{F_v} \quad (12)$$

Формула (12) отражает физический смысл режущей способности круга как достижение полезного эффекта (скорости снятия металла) на единицу прикладываемой силы резания.

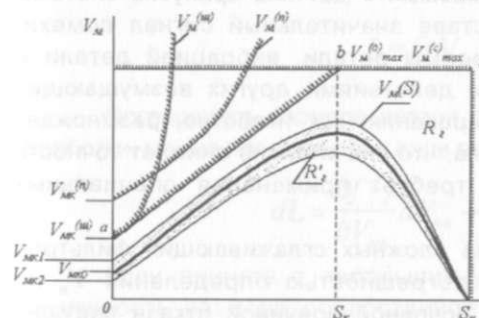
Аналогичный смысл имеет и другая зависимость [26]

$$K_{\text{рез}} = \frac{Q}{F_v}, \quad (13)$$

где Q - объем металла, снимаемый в единицу времени.

§ 1.3. Фазовые траектории ТПШ

Динамику ТПШ удобно исследовать в фазовой плоскости, где координатами являются скорость съема металла V_M и текущий припуск S . Алгоритм управления движением шлифовального суппорта $V_c(S)$ и соответствующие ему траектории скорости снятия металла $V_M(S)$ могут осуществляться только в пределах некоторой "разрешенной" области фазовой плоскости, которая определяется конструктивными, технологическими и системными ограничениями. На рис.3 изображена



область $R_\epsilon(o-a-b-c-s_n)$ в фазовой плоскости $V_M - S$ которой принадлежит множество возможных траекторий - управления ТПШ. Среди ограничений на фазовые координаты наиболее существенными являются:

Рис. 3. Конструктивно - технологические и системные ограничения на управление ТПШ

шлифовальный круг или допустимым значениям силовых параметров (силы резания, упругих деформаций):

- на этапе чистового шлифования (линия $a-b$) - по отсутствию прижогов на обрабатываемой поверхности и значению шероховатости обработанной поверхности. Значение припуска $S=S_k$ соответствует критическому, при котором обеспечивается темп снижения скорости съема припуска в соответствии с постоянной времени T_n .

$$T_n = \frac{S_k}{V_{Mk} - V_{M \max}^{(\partial)}} \quad (14)$$

Реальная траектория $V_m(S)$, представленная на рис.3, должна располагаться с необходимым запасом от предельных значений области ограничения R_z . Чем меньше этот "запас", тем выше быстродействие алгоритма управления при выполнении ограничений на качество обработки. Такие алгоритмы управления, учитывающие предельные возможности, содержащиеся в области ограничения, называются граничными и характеризуются максимальной производительностью обработки.

На практике реализация граничных алгоритмов сопряжена с значительными трудностями, обусловленными, главным образом, отсутствием необходимой измерительной информации о конкретных значениях параметров области ограничения R_c и достоверной информации о значении

скорости съема припуска V_m , особенно, в момент окончания обработки.

Получение информации о значении скорости съема припуска $V_m(S)$ в принципе не вызывает технических трудностей для систем управления, имеющих в своем составе датчик текущего припуска S , и получается простым дифференцированием исходного сигнала $S(t)$

$$V_m(t) = \frac{dS(t)}{dt} \quad (15)$$

Однако, сигнал $S(t)$, снимаемый с датчика припуска системы управления, имеет в своем составе значительный сигнал помехи, обусловленный погрешностью формы детали, вибрацией детали и измерительных щупов датчика и действиями других возмущающих факторов. Операция дифференцирования, как известно, размножает спектр гармоник исходного сигнала, что значительно снижает точность измерительной информации и требует применения специальных сглаживающих фильтров [60].

Однако, даже применение сложных сглаживающих фильтров сопровождается относительной погрешностью определения V_m на уровне 15...20%, что послужило основной причиной отказа ведущих приборостроительных фирм от широкого использования скорости съема припуска в алгоритмах управления шлифованием. Вместе с тем, скорость съема припуска до настоящего времени остается чрезвычайно информативным параметром, который позволяет оценивать в цикле шлифования и, особенно, в момент его окончания важнейшие характеристики ТПШ и прогнозировать качество готовой детали.

Действительно, скорость съема припуска в процессе обработки детали при прочих равных условиях определяет величину шероховатости обрабатываемой поверхности

$$R_z = c_1 V_m^k, \quad (16)$$

где c_1, k - постоянные коэффициенты, определяемые конструктивно-технологическими и режимными параметрами ТПШ.

В момент окончания обработки при $S=0$ формируется шероховатость готовой детали R_{zk}

$$R_{zk} = c_1 V_{mk}^k. \quad (17)$$

Из условий ограничения, представленных на рис.3, следует, что для готовой детали, удовлетворяющей по качеству обработанной поверхности, необходимо выполнить условие

$$V_{mk} \leq V_{mk}^{(m)} < V_{mk}^{(n)}. \quad (18)$$

В момент окончания обработки значение скорости V_{mk} определяет не только микрогеометрию и термическую поврежденность поверхности детали, но и ее точность. Дело в том, что при достижении $S=0$, обработка детали еще продолжается некоторое время t_ε , обусловленное запаздыванием отвода шлифовального круга от детали. В зависимости от типа станка и параметров ТПШ указанное запаздывание составляет величину порядка $t_\varepsilon \in [0,1...0,7]с$. Таким образом, размер готовой детали L является функцией конечной скорости съема припуска V_{mk} и времени запаздывания t_ε

$$L = f(V_{mk}, t_\varepsilon). \quad (19)$$

Погрешность размера детали, возникающую в момент окончания обработки, можно представить в виде полного дифференциала

$$dL = \frac{\partial f(\cdot)}{\partial V_{mk}} dV_{mk} + \frac{\partial f(\cdot)}{\partial t_\varepsilon} dt_\varepsilon. \quad (20)$$

Если принять с небольшим допущением, что $t_\varepsilon = const$, то погрешность размера обработанной детали практически полностью определяется первым слагаемым. Переходя к малым приращениям и линеаризуя выражение (20) в окрестности точки $V_{mk} = V_{mk0}$, получим

$$\Delta L = c_2 \Delta V_{mk}. \quad (21)$$

где
$$c_2 / V_{mk} = V_{mk0} = \frac{\partial f(\cdot)}{\partial V_{mk}}.$$

Анализируя выражения (17)...(21), можно сделать полезные для производственной практики выводы:

- 1) движение объекта управления в фазовой плоскости может производиться только в "разрешенной" области R_z . Соблюдение этих ограничений в производственной практике достигается разработкой технологии изготовления детали для конкретного станка, которая учитывает влияющие на технологический процесс факторы: состояние станка и его жесткость, свойства материала детали и свойства инструмента, состав СОЖ, наличие люнетов и многое другое;
- 2) граничные алгоритмы управления обладают наибольшей производительностью при допустимых показателях качества обработки. Однако, работа в граничном режиме сопряжена с опасностью получения брака по составляющим показателям качества: прижогам, шероховатости, геометрическим размерам. Кроме того, может оказаться, что высокопроизводительные режимы, обеспечивая "вал",

невыгодны экономически, вследствие повышенного износа оборудования, необходимости более частой правки и замены шлифовального круга и т. п;

3) о качестве обработанной детали и производительности ТПШ можно судить по характеру "поведения" выходных координат (V_m , F_y и др.) ТПШ в момент окончания обработки. В этой связи на фазовой плоскости рис.3 можно выделить интервал значений конечной скорости съема припуска $V_{mk} \in [V_{mk1}, V_{mk2}]$, удовлетворяющий заданному показателю качества и производительности. При этом максимальное значение $V_{mk} = V_{mk1}$ соответствует граничному значению по шероховатости и максимальной производительности ТПШ.

Минимальное значение скорости съема припуска $V_{mk} = V_{mk2}$ соответствует минимально допустимой производительности ТПШ, удовлетворяющей изготовителя данной продукции. Диапазон изменения конечной скорости съема припуска, равный $\Delta V_{mk} = V_{mk1} - V_{mk2}$, должен отвечать условию допустимой погрешности по размеру L готовой детали. Чем больше диапазон вариаций конечной скорости ΔV_{mk} , тем больше погрешность размера ΔL готовой детали. Семейство (ансамбль) фазовых траекторий в периоде стойкости шлифовального круга для заданных условий обработки детали должно находиться в заштрихованной области R'_z фазовой плоскости $V_m - S$.

§ 1.4. Традиционные циклы шлифования

Наибольшее распространение в производственной практике получили, так называемые, традиционные циклы шлифования, представленные на рис.4. Каждый из этих циклов, в силу его

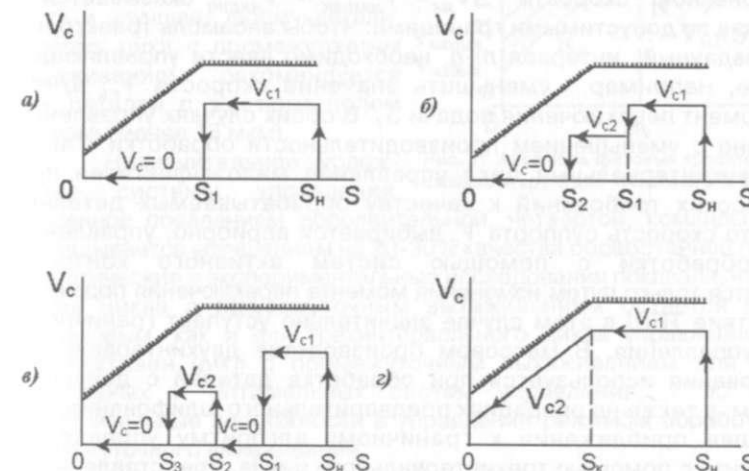


Рис. 4. Традиционные циклы шлифования: двухинтервальный (а), трехинтервальный (б), с промежуточным выхаживанием (в), граничный (г)

особенностей, имеет предпочтительную область применения. Самым простым является двухинтервальный цикл, состоящий из этапа чернового шлифования, выполняемого со скоростью суппорта V_{c1} , и этапа выхаживания при $V_c=0$. В зависимости от физического параметра, с помощью которого задается длительность выхаживания, последнее подразделяется на временное и размерное. Наибольшее распространение получило размерное выхаживание, осуществляемое в функции контролируемого перемещения S .

На рис.5 представлен алгоритм управления вида $V_c(S)$ для двухинтервального цикла шлифования. Кривые $V_{m1}(S)$ и $V_{m2}(S)$

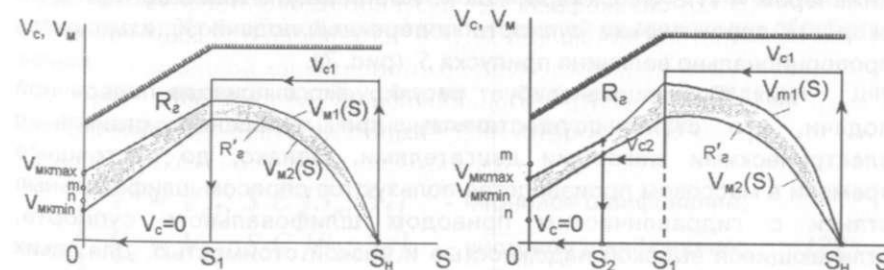


Рис. 5. Ансамбль фазовых траекторий для двухинтервального цикла управления шлифованием

Рис. 6. Ансамбль фазовых траекторий в периоде стойкости круга для трехинтервального ТПШ

обозначают границы ансамбля фазовых траекторий, соответствующих периоду стойкости шлифовального круга, т. е., полученных в течение шлифования от очередной правки круга до другой.

Если предположить, что интервал $m-n$ на рис.5 обозначает разрешенный интервал конечных скоростей, то реальный разброс значений конечной скорости $\Delta V_{mk} = V_{mkmax} - V_{mkmin}$ оказывается в данном случае за допустимыми границами. Чтобы ансамбль траекторий попадал в заданный интервал $m-n$, необходимо ввести управляющее воздействие, например, уменьшить значение скорости V_{c1} и/или изменить момент переключения подачи S_1 . В обоих случаях управление будет связано с уменьшением производительности обработки. Таким образом, двухинтервальный цикл управления малоэффективен при наличии высоких требований к качеству обрабатываемых деталей. Учитывая, что скорость суппорта V_c выбирается априорно, управление режимом обработки с помощью систем активного контроля осуществляется только путем изменения момента переключения подачи S . Быстродействие ТПШ в этом случае значительно уступает граничному алгоритму управления. В массовом производстве двухинтервальный цикл шлифования используется при обработке деталей с допуском более 20 мкм, а также на операциях предварительного шлифования.

Лучшее приближение к граничному алгоритму управления можно получить с помощью трехинтервального цикла, представленного на рис.6. Дополнительная, чистовая подача, осуществляемая со скоростью $V_c = V_{c2}$, приближает траекторию движения ТПШ к области ограничения на заключительной стадии процесса обработки.

Из рис.6 видно, что трехинтервальный цикл позволяет эффективнее использовать разрешенную область R_z , а введение дополнительной подачи V_{c2} значительно сужает ансамбль фазовых траекторий и улучшает условия попадания в интервал допустимых значений конечных скоростей $m-n$.

В массовом производстве трехинтервальный цикл обработки обеспечивает получение деталей с допуском 10...15 мкм и высокой производительностью обработки ($t_{\text{маш}} = 15...25$ с). В наибольшей степени граничному алгоритму управления отвечает разработанный инженером 4 ГПЗ (г. Самара) В. К. Ростовцевым цикл, при котором скорость перемещения суппорта поперечной подачи V_c изменяется пропорционально величине припуска S (рис. 7).

Цикл Ростовцева требует регулируемого привода поперечной подачи, что стало осуществимым при появлении станков с электрическими шаговыми двигателями. Однако, до настоящего времени в массовом производстве пользуются спросом шлифовальные станки с гидравлическим приводом шлифовального суппорта, отличающиеся высокой надежностью и низкой стоимостью. Для таких станков управляемый привод может быть осуществлен с помощью регулируемого дросселя [5].

Наиболее перспективным для массового производства является цикл шлифования с промежуточным выхаживанием (рис.4, в). Как известно, выхаживание уменьшает шероховатость и улучшает форму детали, поэтому цикл с промежуточным выхаживанием рекомендуется для деталей с жестким полем допуска (менее 15 мкм).

Незначительное усложнение системы управления, вызванное появлением дополнительной, четвертой, команды, полностью оправдывается улучшением на 20-30% качества обработанной поверхности. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что машинное время цикла с промежуточным выхаживанием остается практически одинаковым, как и для трехинтервального цикла управления. Особенно перспективен цикл с промежуточным выхаживанием для построения адаптивных и оптимальных систем управления, т. к. появляются дополнительные возможности в управлении режимом обработки на этапе промежуточного выхаживания.

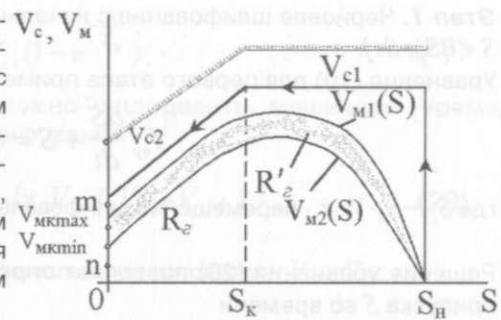


Рис. 7. Ансамбль фазовых траекторий в периоде стойкости круга для граничного ТПШ

§ 1.5. Моделирование трехинтервального цикла ТПШ

В качестве основной математической модели ТПШ как объекта управления используется дифференциальное уравнение первого порядка (10). Несмотря на свою простоту, указанная модель позволяет с достаточной для практики точностью производить анализ ТПШ на любом этапе обработки, определять производительность обработки и оценивать качественные показатели.

В качестве примера рассмотрим наиболее распространенный в производственной практике трехинтервальный цикл управления при врезном круглом шлифовании в режиме преимущественного затупления круга. При этом можно пренебречь износом круга в цикле обработки детали, а режущую способность круга считать постоянной на всех этапах обработки детали.

В аналитической форме алгоритм управления для трехинтервального цикла записывается в следующем виде

$$\begin{cases} V_c = V_{c1}; S \in [S_n; S_1] & \text{- черновое шлифование;} \\ V_c = V_{c2}; S \in [S_1; S_2] & \text{- чистовое шлифование;} \\ V_c = V_{c3}=0; S \in [S_2; 0] & \text{- выхаживание.} \end{cases} \quad (22)$$

В соответствии с (22) движение объекта управления рассмотрим как поэтапную задачу со своими начальными условиями.

Этап 1. Черновое шлифование с начальными условиями: $V_c = V_{c1}$; $S \in [S_n; S_1]$.

Уравнение (10) для первого этапа примет вид

$$T_{oy} \frac{dS}{dt} + S = S_{c1}, \quad (23)$$

где $S_{c1} = S_n - V_{c1}t$ - перемещение шлифовального суппорта на первом этапе.

Решение уравнения (23) позволяет определить изменение снимаемого припуска S во времени

$$S = S_n - V_{c1}t + V_{c1}T_{oy}(1 - e^{-\frac{t}{T_{oy}}}). \quad (24)$$

Следует отметить, что и исходное уравнение (23), и уравнение для первого этапа (24), отражают баланс перемещений, имеющий место в объекте управления и представленный уравнением (8).

Значение текущей упругой деформации S_{yd} здесь представлено в виде

$$S_{yd} = V_{c1}T_{oy}(1 - e^{-\frac{t}{T_{oy}}}). \quad (25)$$

Максимальное значение упругой деформации, как следует из (25), может быть получено при $t \rightarrow \infty$

$$S_{yd \max} = V_{c1}T_{oy}.$$

Из (24) можно получить значение выходной координаты ТПШ - скорости съема припуска V_m

$$V_m = -\frac{dS}{dt} = V_{c1}(1 - e^{-\frac{t}{T_{oy}}}). \quad (26)$$

В момент времени $t=t_1$ значение текущего припуска S достигнет величины S_1 , при которой черновой этап обработки заканчивается и осуществляется переход на чистовое шлифование. При этом величины снятого припуска и скорости съема металла достигнут значений

$$S_1 = S_n - V_{c1}t_1 + V_{c1}T_{oy}(1 - e^{-\frac{t_1}{T_{oy}}}); \quad (27)$$

$$V_{m1} = V_{c1}(1 - e^{-\frac{t_1}{T_{oy}}}). \quad (28)$$

Из уравнения (28) можно определить машинное время, затрачиваемое на черновое шлифование

$$t_{m1} = t_1 = T_{oy} \ln V_{c1}(V_{c1} - V_{m1})^{-1}. \quad (29)$$

Этап 2. Чистовое шлифование с начальными условиями: $V_c = V_{c2}$; $S \in [S_1; S_2]$.

Уравнение движения объекта управления на этом этапе имеет вид

$$T_{oy} \frac{dS}{dt} + S = S_{c2}, \quad (30)$$

где $S_{c2} = S_n - V_{c1}t_1 - V_{c2}(t - t_1)$.

Решение уравнения (30) для второго этапа шлифования по своей структуре аналогично уравнению (24) для чернового шлифования

$$S = S_n - V_{c1}t_1 + V_{c1}T_{oy}(1 - e^{-\frac{t_1}{T_{oy}}})e^{-\frac{t-t_1}{T_{oy}}} - V_{c2}T_{oy}(1 - e^{-\frac{t-t_1}{T_{oy}}}); \quad (31)$$

$$V_{m2} = V_{c2} + (V_{m1} - V_{c2})e^{-\frac{t-t_1}{T_{oy}}}. \quad (32)$$

Машинное время для второго этапа шлифования можно определить из уравнения (32) при $t = t_2$

$$t_{m2} = t_2 - t_1 = T_{oy} \ln \frac{V_{m1} - V_{c2}}{V_{m2} - V_{c2}}. \quad (33)$$

Этап 3. Выхаживание с начальными условиями: $V_c = 0$; $S \in [S_2; 0]$.

Уравнение движения объекта управления на этапе выхаживания имеет вид

$$T_{oy} \frac{dS}{dt} + S = S_{c3}. \quad (34)$$

Шлифовальный суппорт на этапе выхаживания не перемещается, поскольку $V_c = 0$, а его координата определяется как результат перемещений суппорта на двух предыдущих этапах

$$S_{c3} = S - V_{c1}t_1 - V_{c2}t_2 = \text{const}. \quad (35)$$

Решение (34) позволяет определить величину припуска, снимаемого в процессе выхаживания и скорость снятия припуска V_M

$$S = S_M - V_{c1}t_1 - V_{c2}t_2 + [V_{c1}T_{oy}(1 - e^{-\frac{t_1}{T_{oy}}}) + V_{c2}T_{oy}(1 - e^{-\frac{t_2}{T_{oy}}})] e^{-\frac{t_1+t_2}{T_{oy}}}; \quad (36)$$

$$V_M = [V_{c2} + (V_{M1} - V_{c2})e^{-\frac{t_2}{T_{oy}}}] e^{-\frac{t_1+t_2}{T_{oy}}}. \quad (37)$$

Максимальное время, затрачиваемое на этап выхаживания, определяется из (37)

$$t_{M3} = T_{oy} \ln \frac{V_{M2}}{V_{MK}}, \quad (38)$$

где $t_{M3} = t_3 - t_1 - t_2$; $V_{M2} = V_{c2} + (V_{M1} - V_{c2})e^{-\frac{t_1}{T_{oy}}}$ - скорость снятия припуска в момент завершения второго этапа обработки; V_{MK} - конечная скорость снятия припуска.

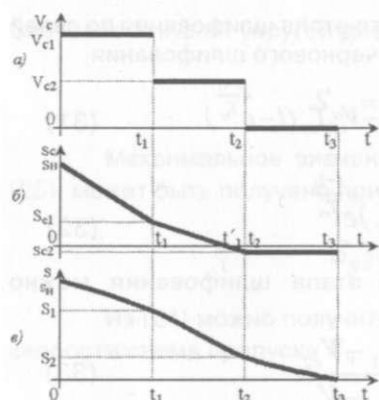


Рис.8. Диаграмма состояния ТПШ в трехинтервальном цикле шлифования:
а) - диаграмма скоростей шлифовального суппорта;
б) - диаграмма перемещения шлифовального суппорта;
в) - диаграмма изменения текущего припуска детали

На рис.8 представлены временные диаграммы, иллюстрирующие состояние ТПШ в течение цикла шлифования. Следует только отметить, что в момент времени t_1' шлифовальный суппорт проходит расстояние $S_c = S_n$, однако само снятие припуска в полной мере не завершено из-за наличия упругих деформаций и поэтому движение шлифовального суппорта осуществляется до момента времени t_2 . В точке t_2 суппорт останавливается и оставшийся припуск снимается только благодаря имеющемуся натягу в упругой системе станка.

Чтобы использовать приведенные уравнения для расчета трехинтервального цикла, необходимо

помнить, что все используемые параметры под воздействием возмущающих факторов варьируют в определенном интервале своих значений и в уравнениях используются средние значения этих величин, а в пределе - математические ожидания

$$S_n = M[S_n]; T_{oy} = M[T_{oy}]; V_c = M[V_c]; \\ V_M = M[V_M]; V_{MK} = M[V_{MK}]. \quad (39)$$

Другой вывод, который следует из анализа уравнений трехинтервального цикла ТПШ заключается в том, что оптимизация цикла является достаточно сложной задачей, которая требует сложных вычислений и достаточно мощной вычислительной аппаратуры в составе системы управления.

ГЛАВА 2. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ И СТРУКТУРЫ ТПШ

§ 2.1. Преобразование Лапласа при моделировании ТПШ

Моделирование ТПШ на основе дифференциальных уравнений является, как это было показано выше, достаточно сложной задачей, оправданной только при значительном упрощении математической модели и только на этапе теоретических исследований.

В ряде случаев полезно отвлечься от анализа внутренней структуры объекта управления и рассматривать его как "черный ящик", на вход которого поступает входная величина, управляющие воздействия, а на выходе присутствует регулируемая, управляемая величина. Для рассматриваемого класса объектов - процессов шлифования, - в качестве входной величины могут быть использованы перемещение суппорта шлифовальной бабки S_c или его скорость V_c , окружные скорости шлифовального круга V_k или обрабатываемой детали V_d . Выходными, регулируемыми величинами могут быть значение снимаемого припуска S , скорость снятия припуска V_m , сила резания F_y , мощность шлифования $P_{ш}$ и др.

Отношение выходной и входной величин при нулевых начальных условиях, представленных в виде изображений по Лапласу, является передаточной функцией рассматриваемого объекта.

Требование преобразования входной и выходной величин в изображения по Лапласу связано с тем, что в этом случае математическая модель, представленная дифференциальным уравнением, переводится в алгебраическое, что существенно упрощает исследование объекта и поиск решений. Формула преобразования по Лапласу, как известно, имеет вид

$$f(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt, \quad (40)$$

где $p = \sigma + j\omega$ - оператор Лапласа, комплексное число; $f(t)$ - начальная функция времени t (оригинал); $f(p)$ - изображение функции $f(t)$ в комплексной плоскости.

С информационной точки зрения преобразование по Лапласу интересно тем, что оно переводит процессы, происходящие на объекте управления по временной координате, в некоторую "виртуальную" плоскость комплексных параметров. При этом каждой точке координаты времени t соответствует две координаты σ и $j\omega$ комплексной плоскости. Косвенно это свидетельствует о том, что информация двойственна в своей сущности и представляется, как известно, двумя характеристиками - энтропией и неэнтропией или, другими словами, спонтанной и детерминированной составляющими информации [48]. Течение информации, описываемое оригиналом - функцией $f(t)$, происходящее и зависящее от изменения времени t , теперь в комплексной плоскости зависит от изменения похожего параметра

- частоты ω . Последнее обстоятельство открывает дополнительные возможности в исследовании объекта управления, позволяя анализировать его свойства по амплитудно-частотным и фазочастотным характеристикам, определять область устойчивости и обеспечивать при необходимости желаемые динамические свойства.

Следует отметить, что подобный прием переноса "места действия" из реального мира в особый "виртуальный" мир широко использовался в технике вычислений и был даже в основе конструкции логарифмической линейки, применявшейся в инженерных расчетах вплоть до появления первых калькуляторов.

Используя преобразование Лапласа, модель объекта управления (10) в алгебраической записи примет вид

$$T_{oy} p S + S = S_c. \quad (41)$$

Уравнение (10) после дифференцирования можно также представить в виде

$$T_{oy} \frac{dV_m}{dt} + V_m = V_c. \quad (42)$$

Применяя к (42) преобразование Лапласа, получим

$$T_{oy} p V_m + V_m = V_c. \quad (43)$$

Передаточная функция для уравнений (41) и (43) имеет одинаковый вид

$$W(p) = \frac{V_m(p)}{V_c(p)} = \frac{S(p)}{S_c(p)} = \frac{1}{T_{oy} p + 1}. \quad (44)$$

Таким образом, модель объекта управления - технологического процесса врезного шлифования, - в режиме затупления шлифовального круга может быть представлена апериодическим (инерционным) звеном первого порядка.

Уравнение (44) справедливо только для ТПШ, в котором можно пренебречь износом шлифовального круга за один цикл обработки. В других случаях (особенно это характерно для внутреннего шлифования) передаточная функция содержит дополнительный параметр

$$W(p) = \frac{\kappa_c}{T_{oy} p + 1}, \quad (45)$$

где κ_c - коэффициент передачи эквивалентной упругой системы станка, включающей в себя станок, приспособление, инструмент и деталь. Физический смысл коэффициента κ_c заключается в соотношении скоростей шлифовального суппорта и съема металла в установившемся режиме. Для ТПШ с преимущественным затуплением круга, а также в

случаях использования алмазных кругов вследствие незначительного износа круга за цикл обработки детали можно считать $\kappa_c \approx 1$. На рис. 9 представлена структурная модель ТПШ в соответствии с передаточной функцией (45).

Как и всякое комплексное число передаточную функцию (45) можно представить в показательной форме

$$W = A(\omega) e^{j\psi(\omega)}, \quad (46)$$

где $A(\omega)$, $\psi(\omega)$ - модуль и аргумент передаточной функции соответственно.

Для передаточной функции (46) модуль и аргумент определяются из выражений

$$A(\omega) = \frac{\kappa_c}{\sqrt{1 + \omega^2 T_{oy}^2}}; \quad \psi(\omega) = -\arctg(T_{oy} \omega). \quad (47)$$

Частотные характеристики (47) свидетельствуют о том, что объект управления обладает фильтрующими свойствами: низкие частоты он пропускает, а высокие частоты быстро ослабляются.

Частотные характеристики используются как на стадии проектирования систем управления, так и при исследовании свойств уже изготовленных систем. Например, амплитудно-частотные характеристики используются при оценке воспроизведения гармонического задающего воздействия, а также гашения гармонического возмущения на различных частотах. Логарифмические амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики используются для проверки устойчивости систем и выбора элементов, обеспечивающих требуемые динамические характеристики.

§ 2.2. ТПШ в режиме затупления круга

Модель ТПШ, представленная на рис.9, является наиболее простой, но отражающей в то же время самые главные свойства объекта управления, в силу чего часто используется в практических инженерных расчетах и алгоритмах систем управления.

Однако, возможности структурного метода позволяют уже на стадии проектирования систем управления производить более глубокий анализ объекта управления, принимать во внимание более тонкие свойства данного объекта, которые могут быть использованы в решении конкретной технологической задачи.

В качестве примера рассмотрим структурную модель ТПШ врезного круглого шлифования в режиме преимущественного затупления режущего инструмента. Режим затупления широко применяют при

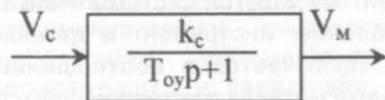


Рис. 9. Упрощенная структурная модель ТПШ

финишной обработке автомобильных деталей в массовом производстве, позволяя получить высокое качество обрабатываемой поверхности и стабильность геометрических размеров детали.

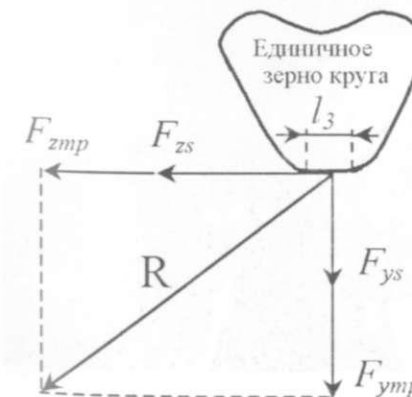
В этом режиме абразивные зерна за непродолжительное время работы приобретают площадки износа l_3 (рис.10), что вызывает радиальный износ шлифовального круга. При неизменном режиме обработки рост площадок износа замедляется и это состояние по длительности времени является основным в работе шлифовального круга. Дальнейший рост площадок износа сопровождается ухудшением процесса стружкообразования, увеличением силы трения, дополнительным выделением тепла и возможностью появления прижогов.

Исследования процесса стружкообразования с помощью единичного зерна [26] обнаружили сложную картину пластичного деформирования металла, сопровождающуюся действием напряжений сдвига, сжатия, а также сил трения. Одновременный учет всех действующих сил при построении модели затруднителен, поэтому ограничиваются наиболее значимыми в процессе резания. На рис.10 равнодействующая сила резания R является результатом сложения двух сил: тангенциальной F_z и радиальной составляющей F_y . В свою очередь тангенциальная и радиальная составляющие являются суммой двух сил

$$F_z = F_{zs} + F_{zmp}; \quad (48)$$

$$F_y = F_{ys} + F_{ymp}, \quad (49)$$

где F_{zs} - тангенциальная сила от напряжений пластического сдвига;

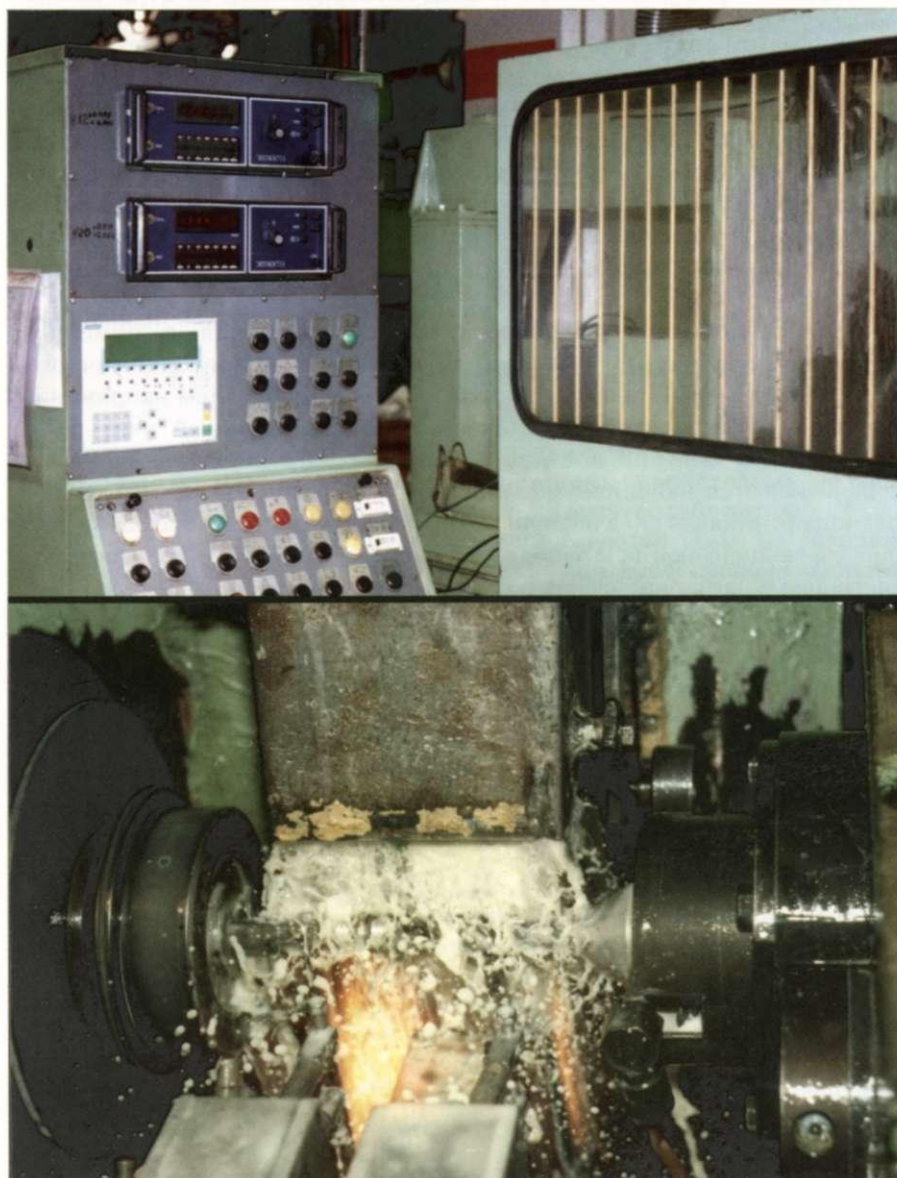


F_{zmp} - тангенциальная сила от трения металла и задней грани единичного зерна;

F_{ys} - радиальная сила от нормальных напряжений;

F_{ymp} - радиальная сила от напряжений, вызывающих трение площадки зерна l_3 о металл.

Рис. 10. Диаграмма составляющих сил резания при работе единичного зерна круга



Активный контроль: высокая точность в экстремальных условиях

Радиальная сила резания F_{ys} обуславливает срезание стружки металла толщиной α_{∂} , а сила F_{ymp} отражает процесс затупления, пропорциональный площадке износа l_3 зерен круга

$$F_y = F_{ys} + F_{ymp} = \kappa_1 \alpha_{\partial}(t) + \kappa_2 l_3(t), \quad (50)$$

где κ_1, κ_2 - постоянные коэффициенты.

Как видно из уравнения (50), сложный и многофакторный процесс шлифования в режиме затупления круга в наиболее простом виде может быть представлен двумя сторонами: снятием металла множеством единичных зерен и затуплением этих зерен в течение времени шлифования.

Снятие стружки толщиной $\alpha_{\partial}(t)$ можно представить [31] как результат перемещения режущей кромки шлифовального круга в течение одного оборота детали

$$\alpha_{\partial}(t) = y(t) - y(t - \tau_{\partial}),$$

где $y(t)$ - положение кромки шлифовального круга в текущий момент; $y(t - \tau_{\partial})$ - положение кромки шлифовального круга в момент времени $(t - \tau_{\partial})$ предшествующего оборота детали; τ_{∂} - время одного оборота детали. Положение кромки режущего круга в текущий и предшествующий моменты времени можно представить на основе баланса перемещений (8)

$$y(t) = S_c(t) - S_{y\partial}(t); \quad (51)$$

$$y(t - \tau_{\partial}) = S_c(t - \tau_{\partial}) - S_{y\partial}(t - \tau_{\partial}). \quad (52)$$

Так как, $S_c(t) = \int_0^t V_c(t) dt$; $S_c(t - \tau_{\partial}) = \int_0^{t - \tau_{\partial}} V_c(t - \tau_{\partial}) dt$ то

$$\alpha_{\partial}(t) = \int_0^t V_c(t) dt - \int_0^{t - \tau_{\partial}} V_c(t - \tau_{\partial}) dt - S_{y\partial}(t) + S_{y\partial}(t - \tau_{\partial}). \quad (53)$$

Записывая (51) в операторной форме, получим

$$\alpha_{\partial}(p) = \frac{1}{p} V_c(p) (1 - e^{-p\tau_{\partial}}) - S_{y\partial}(p) (1 - e^{-p\tau_{\partial}}). \quad (54)$$

С учетом (55) составляющую радиальной силы резания можно представить в виде

$$F_{ys} = \kappa_1 \left[\frac{1}{p} V_c(p) (1 - e^{-p\tau_{\partial}}) - S_{y\partial}(p) (1 - e^{-p\tau_{\partial}}) \right]. \quad (55)$$

Коэффициент $\kappa_1 = \kappa_{рез}$ имеет размерность кгс/мм и является коэффициентом передачи процесса резания по координате y . По своей физической сути он отражает жесткость процесса резания.

Силу резания F_{ymp} можно определить из уравнения, связывающего скорость износа зерен круга с силой резания F_y [47]

$$\frac{dl_z(t)}{dt} = \kappa_3 F_y^{\beta_3+1}(t) dt, \quad (56)$$

где κ_3, β_3 - постоянные коэффициенты. Так как $F_{ymp} = \kappa_2 l_z$, то с учетом (56) имеем

$$F_{ymp} = \kappa_2 \int_0^{t_{ш}} \kappa_3 F_y^{\beta_3+1}(t) dt, \quad (57)$$

где $t_{ш}$ - длительность шлифования. Функцию $F_y(t)$ линеаризуем в точке $F_y = F_{y0}$ по методу малых отклонений

$$\kappa_3(\beta_3 + 1) F_{y0}^{\beta_3} \Delta F_y - \Delta \left(\frac{dF_{ymp}}{dt} \right) = 0. \quad (58)$$

Выражение (58) представим в операторной форме

$$F_{ymp}(p) = \frac{b}{p} F_y(p), \quad (59)$$

где $b = \kappa_3(\beta_3 + 1) F_{y0}^{\beta_3}$

С учетом (55) и (59) выражение для радиальной силы резания (50) примет вид

$$F_y(p) = \kappa_{рез} \left[\frac{V_c(p)}{p} (1 - e^{-p\tau_d}) - \kappa_{yc} F_y(p) (1 - e^{-p\tau_d}) \right] + \frac{b}{p} F_y(p), \quad (60)$$

где $\kappa_{yc} F_y(p) = S_{y\partial}(p)$; κ_{yc} - коэффициент передачи упругой системы шлифовального станка по координате y .

Передаточная функция объекта управления в окрестности точки линеаризации будет определяться выражением

$$W_{oy}(p) = \frac{F_y(p)}{V_c(p)} = \frac{\frac{\kappa_{рез}}{p} (1 - e^{-p\tau_d})}{1 + \kappa_{рез} \kappa_{yc} (1 - e^{-p\tau_d}) - \frac{b}{p}}. \quad (61)$$

Разлагая функцию $e^{-p\tau_d}$ в ряд Паде с двумя членами разложения, получим

$$W_{oy}(p) = \frac{\kappa_{oy} p}{T_{oy2}^2 p^2 + T_{oy1} p - 1}, \quad (62)$$

где $\kappa_{oy} = \frac{\kappa_{рез} \tau_d}{b}$; $T_{oy1} = b^{-1} - \frac{\tau_d}{2}$; $T_{oy2} = b^{-1} \tau_d (\kappa_{рез} \kappa_{yc} + 0,5)$.

Как видно из (62) передаточная функция имеет положительный полюс, что свидетельствует о неустойчивости процесса резания в режиме затупления круга.

На рис.11 представлена структурная схема, соответствующая

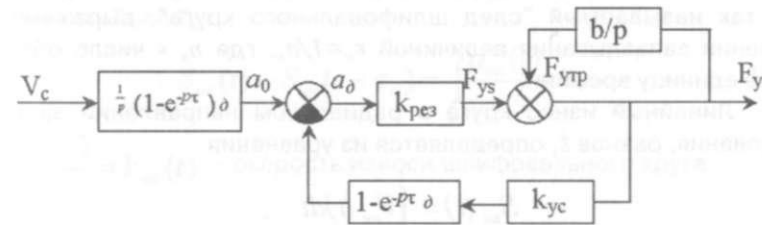


Рис.11. Структурная схема ТПШ в режиме затупления шлифовального круга

передаточной функции (62). Структурная схема позволяет наглядно представить механизм функционирования модели ТПШ, а, следовательно, и динамику движения реального объекта. Как видно из структурной схемы управляющее воздействие - скорость перемещения суппорта $V_c(p)$, - вызывает снятие металла толщиной $a_0(p)$, которое имеет место при отсутствии упругих деформаций $S_{y\partial}(p)$ и которое устанавливается за время одного оборота детали τ_d .

Влияние упругих деформаций учитывается звеньями в цепи обратной связи, которые преобразуют радиальную составляющую силы резания $F_y(p)$ в упругую деформацию $S_{y\partial}(p)$. На выходе сравнивающего устройства получается значение толщины срезаемого металла $a_0(p)$ с учетом воздействия упругих деформаций $S_{y\partial}(p)$. Составляющая $F_{ys}(p)$ образуется на выходе безынерционного звена с коэффициентом передачи $\kappa_{рез}$. Составляющая силы трения $F_{yтр}$ с выхода интегрирующего звена поступает в сравнивающее устройство, где алгебраически суммируется с составляющей силы резания F_{ys} и на выходе имеем выходную регулируемую величину - радиальную составляющую силы резания F_y .

§ 2.3. ТПШ в режиме износа круга

Рассмотрим еще один пример, который интересен тем, что широко распространен в массовом производстве и требует учета в модели ТПШ износа шлифовального круга. Последнее имеет место, например, на операциях внутреннего шлифования.

Модель внутреннего врезного шлифования для различных технологических ситуаций и с учетом влияния различных возмущающих факторов с исчерпывающей полнотой представлена в работах В.Н. Михелькевича и его школы [31].

В процессе снятия слоя металла при внутреннем шлифовании имеет место износ круга $S_{ук}(t)$, который вносит в динамическую модель ТПШ так называемый "след шлифовального круга", выраженный в появлении запаздывания величиной $\tau_k = 1/n_k$, где n_k - число оборотов круга в единицу времени.

Линейный износ круга в радиальном направлении за время шлифования, равное t , определяется из уравнения

$$S_{ук}(t) = \int_0^t V_{ук}(t) dt, \quad (63)$$

где $V_{ук}(t)$ - функциональная зависимость скорости износа круга, которая через коэффициент $\kappa_{ук}$ линейно связана с радиальной силой резания $F_y(t)$

$$V_{ук}(t) = \kappa_{ук} F_y(t). \quad (64)$$

С учетом (64) выражение (63) примет вид

$$S_{ук}(t) = \int_0^t \kappa_{ук} F_y(t) dt. \quad (65)$$

Износ круга в момент предыдущего оборота равен

$$S_{ук}(t - \tau_k) = \int_0^{t - \tau_k} \kappa_{ук} F_y(t - \tau_k) dt. \quad (66)$$

Таким образом, за время, равное τ_k , шлифовальный круг изнашивается на величину

$$a_{ук}(t) = S_{ук}(t) - S_{ук}(t - \tau_k) = \int_0^{\tau_k} \kappa_{ук} F_y(t) dt - \int_0^{\tau_k} \kappa_{ук} F_y(t - \tau_k) dt. \quad (67)$$

Переходя к операторной форме и используя теорему запаздывания, из уравнения (67) получим

$$a_{ук}(p) = \frac{1}{p} \kappa_{ук} (1 - e^{-p\tau_k}) F_y(p). \quad (68)$$

По аналогии с выражениями (51) и (52) запишем положение кромки шлифовального круга теперь уже с учетом его износа

$$y(t) = S_c(t) - S_{y\partial}(t) - S_{ук}(t); \quad (69)$$

$$y(t - \tau_\partial) = S_c(t - \tau_\partial) - S_{y\partial}(t - \tau_\partial) - S_{ук}(t - \tau_\partial). \quad (70)$$

Толщина срезаемого металла при этом равна

$$a_\partial(t) = \int_0^t V_c(t) dt - \int_0^{t - \tau_\partial} V_c(t - \tau_\partial) dt - [S_{y\partial}(t) - S_{y\partial}(t - \tau_\partial)] - [S_{ук}(t) - S_{ук}(t - \tau_\partial)]. \quad (71)$$

Износ круга следует определять за время одного оборота детали, т. е. $\tau_\partial \gg \tau_k$

$$S_{ук}(t) - S_{ук}(t - \tau_\partial) = \int_0^{\tau_\partial} \frac{a_{ук}(t)}{\tau_k} dt, \quad (72)$$

где $\frac{a_{ук}(t)}{\tau_k} = V_{ук}(t)$ - скорость износа шлифовального круга.

Представляя выражения (71) и (72) в операторной форме, получим

$$a_\partial(p) = \frac{1}{p} (1 - e^{-p\tau_\partial}) V_c(p) - S_{y\partial}(p) (1 - e^{-p\tau_\partial}) - \frac{a_{ук}(p)}{p\tau_k} (1 - e^{-p\tau_\partial}). \quad (73)$$

Толщина срезаемого слоя $a_\partial(p)$ и возникающие при этом упругие деформации $S_{y\partial}(p)$ пропорциональны силе резания $F_y(p)$

$$a_\partial(p) = \kappa_{рез} F_y(p); \quad (74)$$

$$S_{y\partial}(p) = \kappa_{yc} F_y(p), \quad (75)$$

где $\kappa_{рез}$, κ_{yc} - коэффициенты передачи процесса шлифования и упругой системы станка по направлению силы $F_y(p)$ соответственно.

Подставляя (68), (74) и (75) в выражение (73), получим передаточную функцию ТПШ:

$$W(p) = \frac{F_y(p)}{V_c(p)} = \frac{\frac{1}{p} (1 - e^{-p\tau_\partial})}{\kappa_{рез} + \kappa_{yc} (1 - e^{-p\tau_\partial}) + \frac{\kappa_{ук}}{p^2 \tau_k} (1 - e^{-p\tau_k}) (1 - e^{-p\tau_\partial})}. \quad (76)$$