

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЦИКЛА НА ПРОЦЕСС ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ**

*А.В. Акинцева, И.В. Баранов,  
И.И. Кротов, Т.А. Малева*

В данной статье рассмотрены особенности построения структуры цикла внутришлифовальной обработки, произведен анализ влияния таких этапов цикла, как выхаживание и правка круга, на производительность процесса, а также на точность и качество обработанной поверхности.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, цикл, выхаживание, правка круга.

Внутреннее шлифование позволяет обеспечить высокое качество обрабатываемого отверстия и прилегающих к нему поверхностей в режущих, мерительных и вспомогательных инструментах, втулках, кольцах шарико- и роликоподшипников, гильзах цилиндров двигателей внутреннего сгорания, шпинделях металлорежущих станков и т.п. Его применяют при обработке сквозных и глухих отверстий различной формы (цилиндрические, конические, сферические и фасонные), отверстий с пересеченной поверхностью (с выточкой, со шпоночным пазом), отверстий в деталях с неодинаковой толщиной стенок или неоднородной твердостью металла, ступенчатых отверстий, отверстий больших диаметров свыше 100 мм. Необходимо также отметить, что для термических обработанных деталей процесс обработки отверстий шлифованием является более производительным, чем другие методы обработки (развертывание, растачивание и т.д.), т.к. позволяет исправить геометрию отверстия, нарушенную в процессе термической обработки. Внутреннему шлифованию подвергаются детали из различных материалов: сталей с различными физико-механическими свойствами, чугуна, твердых и цветных сплавов, неметаллических материалов [1–2 и др.].

Структура цикла оказывает значительное влияние на точность и качество обрабатываемой поверхности, а также на производительность процесса внутреннего шлифования. В состав большинства структур циклов внутришлифовальной обработки входят следующие элементы: ускоренный подвод (отвод) круга, снятие черного припуска, первое выхаживание, правка круга, снятие чистового припуска, второе выхаживание и др. [2–3 и др.]. В результате сочетания между собой данных элементов можно получить различные структуры циклов (рис.). Например, в работе [4] выделены пять основных групп структур циклов внутришлифовальной обработки: без выхаживания, с выхаживанием, с двукратным выхаживанием, с двукратным выхаживанием и получистовым шлифованием, прочие.



Примеры циклов внутришлифовальной обработки

В первую группу входят структуры циклов, включающие в себя следующие элементы цикла: ускоренный подвод круга, снятие чернового припуска, правка круга, снятие чистового припуска, ускоренный отвод круга. Данная группа из-за своей простоты является наиболее распространенной. Вторая группа структур циклов отличается от первой наличием выхаживания после чистовой стадии обработки. Третья группа отличается от предшествующих двух наличием выхаживания после черновой и чистовой стадии обработки. В четвертую группу входят структуры циклов, характеризующихся двукратным выхаживанием, а также получистовым шлифованием после первого выхаживания или правки круга. В последнюю пятую группу сведены прочие рабочие циклы, применяемые на станках с автоматическими системами регулирования, с адаптивными системами.

Выхаживание значительно повышает геометрическую точность формы обрабатываемой поверхности, уменьшает овальность, конусность и неперпендикулярность образующей отверстия торцу детали на 20–25 % [5]. При этом радиальная составляющая силы резания постепенно убывает, в результате чего происходит снижение копирования исходной погрешности формы на обрабатываемую поверхность. За счет снижения интенсивности съема металла и упругих деформаций системы процесс выхаживания повышает частоту (в среднем на один класс). Выхаживание улучшает и другие физико-механические свойства: повышает микротвердость на 18–20 % [5], при этом уменьшая абразивный наклеп и концентрацию напряжения. Величина остаточных напряжений, создающихся в процессе выхаживания, сравнима с величинами напряжений, возникающих в результате специальных упрочняющих процессов. Время выхаживания возрастает с уменьшением жесткости системы, снижением режущей способности круга и с повышением требований к параметрам шероховатости обработанной поверхности.

Мнения авторов по вопросу оптимальности расположений и количества стадий выхаживания в структуре цикла расходятся между собой. Например, по данным источника [4], циклы с одинарным выхаживанием улучшают качество обработанной поверхности по некруглости на 2–3 мкм и по чистоте на один класс. Циклы с двукратным выхаживанием не дают заметного улучшения качества обработанной поверхности. При этом значительно увеличивается продолжительность цикла, т.е. циклы являются неэффективными. В работе [6] отмечается, что введение выхаживания после черновой стадии обработки не оказывает существенного влияния на точность и качество обрабатываемой поверхности. Существуют и противоположные рекомендации по выбору местоположения выхаживания в структуре цикла. По данным, представленным в работе [5], наиболее совершенным циклом является цикл с двукратным выхаживанием, при этом его необходимо применять при шлифовании отверстий с жесткими допусками. Необходимо также отметить, что циклы, содержащие в своей структуре выхажива-

ние, имеют существенный недостаток. При построении цикла в зависимости от времени возрастет разброс размеров, а при построении в зависимости от величины снимаемого припуска возрастает разброс шероховатости [7].

Еще одним структурным элементом цикла, оказывающим значительное влияние на точность формы и шероховатость обрабатываемой поверхности, производительность операций, является правка круга. Она направлена на восстановление геометрической формы и режущей способности круга. Стойкость круга при внутреннем шлифовании не превышает трех минут [8]. Несвоевременная правка круга может привести к образованию дефекта на обрабатываемой поверхности либо к повышенному расходу шлифовальных кругов. Чаще всего правку круга осуществляют после определенного количества деталей [9].

Подбор количества деталей, после обработки которых необходимо проводить правку инструмента, осуществляется опытным путем. По данным, представленным в работе [4], наиболее приемлемым является непрерывный цикл с постепенно уменьшающейся подачей, обеспечивающей большую эффективность процесса шлифования. При этом возможно выносить правку круга из цикла, совмещая ее с установкой заготовки в приспособлении, что сокращает расход алмаза и абразивного материала в несколько раз.

На данный момент в известных источниках не существует рекомендаций по выбору количества стадий обработки (ступеней цикла) и распределению припуска между ними. Одним из способов повышения производительности процесса механической обработки в советское время считалось деление процесса на две стадии обработки (черновую и чистовую) [10–14 и др.]. Разделение общей величины припуска по стадиям обработки производилось технологом на основании его знаний и опыта, конкретные рекомендации по соотношению черновой и чистовой части припуска в нормативно-справочной литературе отсутствуют.

На черновой ступени обработки принимают максимально возможные значения припуска и радиальной подачи, исходя из прочности и жесткости системы СПИД, мощности станков и других ограничивающих факторов. В процессе черновой обработки стараются снять максимально возможный припуск за минимальное время на повышенных подачах. При этом на качество и точность обработанной поверхности, наличие прижогов не обращают внимания, считая, что данные параметры будут достигнуты на чистовой стадии обработки «по умолчанию». На черновых операциях не допускают лишь появления неисправимого брака – трещин. Обработка на чистовой стадии происходит в зависимости от требований к точности и качеству при пониженных режимах резания. При этом происходит значительное увеличение времени на чистовой операции.

«Условное деление» процесса обработки на черновые и чистовые стадии, несомненно, повышает точность и качество обработки, но при этом за счет увеличения вспомогательного времени и ввода дополнительных операций идет возрастание штучного времени. В массовом производстве данный момент компенсируется созданием поточных и особенно автоматических линий с автоматизацией межоперационного контроля и транспортирования заготовок на конвейерах, который исключает необходимость складирования и межоперационного пролеживания заготовок. В серийном производстве с целью экономии материально-технических средств и времени вынуждены объединять черновые и чистовые переходы в один, теряя при этом точность, качество обрабатываемой поверхности, либо проводить черновые и чистовые операции на одном оборудовании, одним и тем же инструментом.

Большинство современных шлифовальных станков с ЧПУ имеют возможность осуществлять обработку по автоматическому циклу. Например, станки фирмы JAINNHER (Тайвань) моделей JHI-150CNC, JHI-150BCNC, JHI-3012NC оснащены возможностью обработки по трехступенчатому циклу, состоящему из: ускоренного подвода круга, чернового шлифования, правки круга, чистового шлифования, выхаживания, ускоренного отвода круга. Внутришлифовальные станки с ЧПУ JAG-IG150, JAG-IG3510 (Китай) имеют полностью автоматические циклы шлифования, которые включают в себя: шлифование, правку круга, ступенчатое чистовое шлифование, выхаживание. При ступенчатом чистовом шлифовании оператор может выставить количество проходов и величину радиальной подачи. Станки фирмы Okamoto (Япония) серии IGM имеют следующие технические возможности: автоматические циклы обработки (черновое шлифование, тонкое шлифование, автоматическая остановка, отвод круга), выбора цикла обработки из набора готовых циклов, специальные циклы коррекции и функции прерывания цикла шлифования для правки круга.

В известных на данный момент источниках отсутствуют рекомендации по выбору структуры оптимального цикла (количества ступеней цикла, распределение припуска по ступеням, положение правки круга и выхаживание в структуре цикла), т.е. цикла, гарантирующего выполнения требований чертежа по точности и качеству за минимальное время обработки. Предлагаются лишь частные решения проблемы. Например, число ступеней цикла принимается константной величиной, которая не учитывает влияния основных технологических факторов. Аналогичная ситуация происходит и с рекомендациями по выбору режимов обработки (скорости круга, числа оборотов заготовки, скорости осевой подачи и радиальной подачи). В результате чего на предприятиях вынуждены подбирать вручную параметры циклов обработки, теряя при этом время и материальные ресурсы. Отметим, что с целью выполнения заложенных требований чертежа по точности и качеству циклы, полученные методом подбора, принимаются с

существенно заниженными режимами резания, т.е. циклы являются неоптимальными. Поэтому производственная мощность современных станков используется всего лишь на 30–40 %. Часто производительность данных станков ниже, чем на универсальных станках, особенно при малых партиях деталей.

Решением вышеописанной проблемы является разработка методики проектирования оптимальных циклов внутришлифовальной обработки. Основой данной методики служит математическая модель, адекватно описывающая процесс съема металла как при всех возможных сочетаниях основных технологических факторов, так и во всех диапазонах их допустимого варьирования [15–16]. Модель съема металла по сути своей является моделью управления процессом, которая отражает зависимость между программной, фактической подачами и упругими деформациями системы.

Из-за наличия упругих перемещений в технологической системе и инерционности перемещающихся масс фактическая подача не равна программной. При ступенчатом переключении программной подачи значение фактической подачи приближается к ней по экспоненциальному закону. На протяжении всего цикла текущее значение фактической подачи ограничивается комплексом технологических ограничений, включающих в себя ограничения по точности получаемого размера, шероховатости, стойкости режущего инструмента, мощности привода станка и др. Для обеспечения максимальной производительности операции необходимо стремиться к тому, чтобы текущее значение фактической подачи на протяжении всего пути снятия припуска максимально приближалось к области ограничений. В результате величина фактической подачи будет максимально допустимой тем или иным ограничением, а цикл производительней. Управление траекторией фактической подачи осуществляется путем ступенчатого изменения программной. В статье [17–18] можно увидеть разработанную нами модель съема металла для процесса внутреннего шлифования.

Задача оптимизации цикла для обработки конкретной партии заготовок требует нахождения детерминированных режимных параметров цикла при нестабильных значениях ряда технологических ограничений и условий обработки. Такая постановка задачи оптимизации является наиболее сложной и относится к области нелинейного программирования. Анализ методов дискретной оптимизации показал, что наиболее приемлемым для оптимизации циклов является метод динамического программирования (МДП) [19]. Применение МДП обусловлено тем, что данный метод не требует предварительного построения границ области допустимых ограничений и не является чувствительным к свойствам моделей управления и ограничений. Оптимизация цикла проводится МДП по аналогии с оптимизацией транспортной задачи, требующей нахождения оптимального маршрута на разветвленной сети дорог из начального пункта в конечный [19]. Применительно к оптимизации цикла обработки дорожная схема аналогична «вари-

антам состояния процесса». В нашем случае начальный пункт – это исходное состояние процесса (параметры заготовки, характеристика инструмента и т.д.), конечный пункт – это конечное состояние процесса (параметры готовой детали по точности и качеству, основное время и т.д.). В результате возникает задача нахождения цикла, имеющего минимальное основное время среди различных возможных вариантов циклов. МДП не ограничивает ни количество оптимизируемых параметров управления, ни количества ограничений целевой функции. В результате становится возможным не только проектировать структуру оптимального цикла, но проводить многопараметрическую оптимизацию в многомерном пространстве управляющих параметров, т.е. расширить количество оптимизируемых параметров (диаметр и ширина круга, величина перебега, число оборотов заготовки и др.).

### **Выводы**

1) помимо режимных параметров обработки (количества ступеней цикла, распределение припуска по ступеням, положение правки круга и выхаживание в структуре цикла) на точность, качество обрабатываемой поверхности и производительность процесса внутреннего шлифования оказывает значительное влияние структура цикла (количества ступеней цикла, распределение припуска по ступеням, положение правки круга и выхаживание в структуре цикла);

2) большинство современных шлифовальных станков с ЧПУ имеют возможность осуществлять обработку «по заданным» (введенным с пульта) циклам. При этом можно управлять не только режимными параметрами обработки, но и проектировать структуры цикла;

3) на данный момент в известных источниках нет единых рекомендаций по выбору режимов обработки и структуры оптимального цикла. В результате на предприятиях вынуждены подбирать режимы обработки вручную, неся при этом дополнительные затраты на время и производственные ресурсы;

4) методика проектирования оптимальных циклов внутришлифовальной обработки [15–16] позволяет с математической точностью проектировать оптимальные циклы, учитывая при этом изменения условий обработки и любое количество технологических ограничений целевой функции.

### **Библиографический список**

1. Ваксер, Д.Б. Внутреннее шлифование / Д.Б. Ваксер. – Л.: Машиностроение, 1967. – 99 с.
2. Акимов, В.Л. Внутреннее шлифование / В.Л. Акимов, В.А. Иванов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 128 с.
3. Манохин, Ю.И. Повышение эффективности внутреннего врезного шлифования на основе оптимального управления: дис. ... канд. техн. наук / Ю.И. Манохин. – Челябинск, 1977. – 223 с.

4. Казаков, Н.В. Анализ рабочих циклов внутришлифовальных автоматизированных станков / Н.В. Казаков, А.В. Автономов // Станки и инструмент. – 1974. – № 6. – С. 12–23.
5. Ящерицын, П.И. Влияние структуры рабочего цикла внутришлифовальных станков на качество обрабатываемых поверхностей / П.И. Ящерицын // Станки и инструмент. – 1965. – № 10. – С. 18–24.
6. Лурье, Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машгиз, 1969. – 172 с.
7. Михелькевич, В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
8. Исаев, П.П. Обработка металлов резанием (резание металлов, режущий инструмент, металлорежущие станки): учебное пособие для вузов / П.П. Исаев, А.А. Богданов А.А. – М.: Оборонгиз, 1959. – 658 с.
9. Лурье, Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г.Б. Лурье. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
10. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.
11. Харламов, Г.А. Припуски на механическую обработку: справочник / Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2013. – 256 с.
12. Гаврилов, А.Н. Современное состояние и направления развития технологии машиностроения и приборостроения / А.Н. Гаврилов. – М.: Машгиз, 1960. – 564с.
13. Справочник металлиста. В 3 т. / под ред. И.С. Черкан. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машгиз, 1966. – 812 с.
14. Лоскутов, В.В. Шлифовальные автоматы и полуавтоматы / В.В. Лоскутов. – М.: Машиностроение, 1959. – 292 с.
15. Переверзев, П.П. Моделирование и оптимизация циклов внутреннего шлифования в условиях автоматизированного машиностроительного производства / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – № 3. – С. 44–53.
16. Pereverzev, P.P. Automatic cycles' multiparametric optimization of internal grinding / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – Pp. 121–126.
17. Переверзев, П.П. Моделирование процесса съема металла при внутреннем шлифовании с учетом особенностей кинематики резания / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // СТИН. – 2016. – № 4. – С. 23–28.
18. Переверзев, П.П. Моделирование ограничений по точности обработки при проектировании оптимальных циклов внутреннего шлифования / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – № 2. – С. 61–71.
19. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 400 с.

[К содержанию](#)