

УДК 621.923.01 + 621.924

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИКЛОВ ВНУТРИШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.В. Акинцева, И.С. Власов, А.Д. Миляев, М.А. Кулёмина

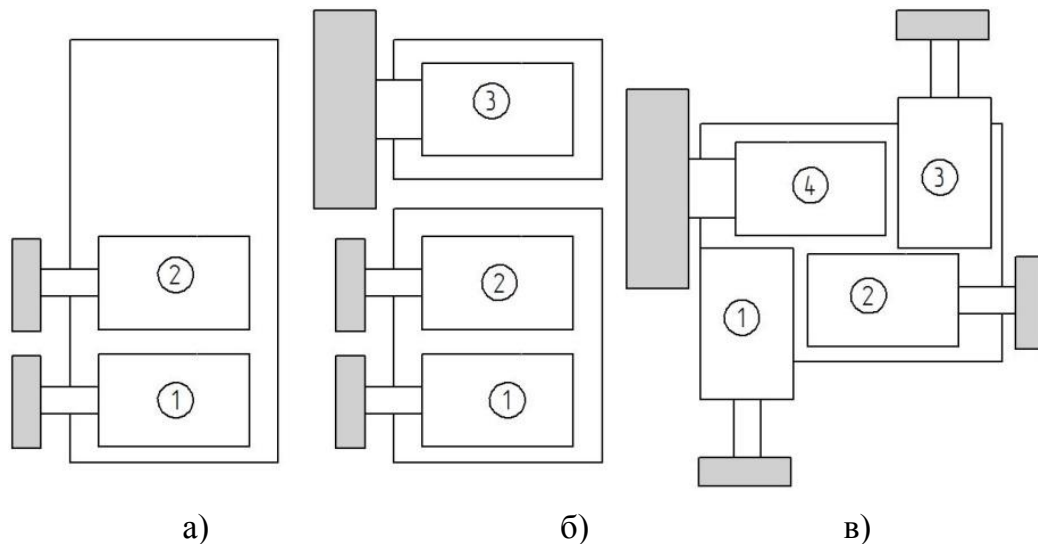
В данной статье произведен анализ современного оборудования, позволяющего осуществлять внутреннее шлифование, рассмотрены его технические возможности. Раскрыты проблемы проектирования оптимального цикла внутришлифовальной обработки в условиях современного автоматизированного производства: отсутствия рекомендаций по выбору структуры цикла, режимов резания, геометрических параметров круга и условий обработки (вылета шпинделя, величина перебега и т.д.) и др. В результате наблюдается неэффективное использование шлифовальных станков нового поколения, при этом коэффициент загрузки оборудования не превышает 40 %. В качестве решения данной проблемы предлагается использовать методику проектирования оптимальных циклов внутришлифовальной обработки.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, методика проектирования оптимальных циклов, режимы резания, структура цикла.

Внутреннее шлифование является распространенным методом чистовой обработки отверстий, который охватывает все типы производства. Например, единичное производство – обработка индивидуальной продукции в ремонтно-механическом цехе (посадочных отверстий режущего инструмента, деталей типа втулка). Крупносерийное, массовое производство – обработка колец подшипников, гильз цилиндров внутреннего сгорания, посадочных отверстий зубчатых колес, шкивов, отверстий под подшипники в корпусных деталях и др.

Одними из основных производителей станков, позволяющих выполнять внутреннее шлифование, являются: Studer (Швейцария), Okamoto (Япония), Voumard (Швейцария), JAINNHER (Тайвань), Morara (Италия), Nagel (Германия), Wolters (Германия) и др. Отметим, что общая классификация современных шлифовальных станков отсутствует. Каждый производитель маркирует и дает название на свое усмотрение. Для решения данного вопроса нами предложена следующая классификация в зависимости от расположения и количества шлифовальных шпинделей. Первая группа – шлифовальные шпиндели установлены в ряд (оси инструментов параллельны оси заготовки и друг другу). Возможны два варианта компоновки станка, при первом варианте на рабочий блок станка устанавливаются от 1 до 8 шпинделей, оснащенных внутришлифовальными кругами с различной характеристикой и формой профиля – рис. а.

Во втором варианте к внутришлифовальным шпинделям добавляется шпиндель, позволяющий производить наружное и фасонное шлифования – рис. б. Во второй группе рабочий блок оснащен четырьмя шлифовальными шпинделями, расположенных через каждые 90 градусов (принцип револьверной головки) – рис. в. Шпинделя оснащены шлифовальным инструментом, различающимся по форме профиля, характеристикам и назначению (обработка внутренних, наружных, торцевых, фасонных поверхностей). Многие современные обрабатывающие центры имеют возможность внутришлифовальной обработки. Например, токарно-обрабатывающий центр Т-8, обрабатывающий центр для твердого точения и шлифования серия STRATOS, обрабатывающий центр Turnmill 1250, гибкий станок для шлифования и точения S242 (Studer) и др.



Примеры расположения шлифовальных шпинделей на современных станках с ЧПУ

Большинство современных шлифовальных станков с ЧПУ имеют возможность осуществлять обработку по заданному циклу. При этом можно управлять не только режимными параметрами обработки (скорость вращения круга, заготовки, радиальная, осевая подача и др.), но и создавать структуры цикла (количество ступеней цикла, положение в структуре правки круга, выхаживания и др.). Каждый из производителей современного внутришлифовального оборудования предлагает свою структуру цикла и соотношения распределения общей величины припуска по ступеням цикла. Отметим, что у некоторых производителей существует возможность коррекции структуры цикла на усмотрения потребителя. Например, станки фирмы JAINNHER (Тайвань) оснащены возможностью обработки

по трехступенчатому циклу, состоящему из ускоренного подвода круга, чернового и чистового шлифования, правки круга, выхаживания, ускоренного отвода круга.

Станки фирмы Okamoto (Япония) серии IGM имеют следующие технические возможности: выбор цикла обработки из набора готовых вариантов; специальные циклы коррекции и функции прерывания цикла шлифования для правки круга. Автоматические циклы обработки данной фирмы включают в себя черновое, тонкое шлифование, автоматическая остановка, отвод круга. Внутришлифовальные станки фирмы JAGURA (Китай) оснащены программным обеспечением, позволяющим производить обработку в автоматическом цикле, включающем в себя – ступенчатое черное и чистовое шлифование, правку круга.

Рекомендации по распределению общей величины припуска по ступеням цикла, на которые опираются производители современного оборудования, основываются на опыте, полученном в период с 60-е по 80-е года, где повышение производительности процесса механической обработки достигалось за счет деления процесса на стадии обработки: черновую и чистовую. Разделение общей величины припуска по стадиям обработки производилось технологом на основании его знаний и опыта, так как данные о соотношении черновой и чистовой части припуска в справочной литературе носят рекомендательный характер (черная стадия – 45–90 %, чистовая стадия – 10–55 % от общей величины припуска). «Условное деление» процесса обработки на стадии, несомненно, повышает точность и качество обработки, но при этом за счет увеличения вспомогательного времени и ввода дополнительных операций приводит к возрастанию штучного времени. В массовом производстве данный момент компенсируется созданием поточных и автоматических линий. В серийном производстве, являющемся на данный момент самым распространённым, с целью экономии материально-технических средств и времени вынуждены объединять черновые и чистовые переходы в один, теряя при этом точность, качество обрабатываемой поверхности.

Рекомендации по назначению режимных параметров обработке в цикле, предоставляемые производителями современного оборудования, основываются на данных, заимствованных из нормативно-справочной литературы 60-х, 70-х, 80-х годов выпуска. Данная литература составлялась для станков с ручным управлением и на основании статистических данных тех лет. Приведенные в нормативно-справочной литературе данные о режимах резания предназначены для расчета основного времени, а не для практического применения в процессе обработки. Отметим, что данные по режимам резания, полученные по различной нормативно-справочной литературе, зачастую противоречат друг другу. Например, значения радиальной подачи разнятся 2–4 раза, скорости осевой подачи в 1,5–3 раза и т.п. Таким об-

разом, данная нормативно-справочная литература износилась физически и достаточно устарела морально и, как следствие, не пригодна в условиях современного производства.

Известные на данный момент расчетные методики проектирования цикла [1–5 и др.] имеют ряд существенных недостатков: не используются математические методы оптимизации; не учитываются изменения условий обработки (затупление зерен круга, колебание припуска и исходной точности обрабатываемой поверхности в партии заготовок); отсутствует модель ограничений производительности операции по точности обработки и др. Циклы, проектируемые по данным методикам [1–5 и др.], являются рациональными и не всегда гарантируют точность и качество обработки.

Внутреннее шлифование является одним из наиболее сложных процессов абразивной обработки, накладывающей ограничения на геометрические параметры круга и условия обработки (длина вылета шпинделя, величина перебега и др.). Например, использование кругов малых диаметров приводит к их быстрому изнашиванию и ухудшению шероховатости обрабатываемой поверхности, так как абразивные зерна более часто вступают в контакт с заготовкой. Увеличение диаметра круга приводит к увеличению площади контакта круга с заготовкой, что в свою очередь затрудняет отвод тепла и подачу СОТС в зону обработки. Все это способствует увеличению процесса теплообразования. Рекомендации по выбору диаметра круга по различным источникам находятся в пределах 0,5–0,95 от диаметра обрабатываемого отверстия. Например, для обработки отверстия диаметром 100 мм может использоваться круг диаметром от 50 до 95 мм. При этом длина дуги контакта изменяется в 2 раза, скорость круга в 1,5 раза.

На равномерность радиального износа круга значительное воздействие оказывает высота круга. Она зависит от многих факторов: диаметра круга, формы обрабатываемой поверхности, мощности станка, длины обрабатываемого отверстия и др. На данный момент в известных источниках существуют только рекомендации, учитывающие перечисленные выше факторы по отдельности. Отсутствуют рекомендации по выбору высоты круга, учитывающие прерывистость обрабатываемой поверхности (наличие шпоночного паза, канавки, шлицевых поверхностей и т.п.). Внутришлифовальная обработка прерывистых поверхностей оказывает влияние на стабильность процесса, приводит к значительному увеличению радиальной силы резания, неравномерному износу круга. На конечную точность готовой детали во внутреннем шлифовании значительное влияние оказывает величина перебега. При величине перебега, превышающего половину высоты круга, вследствие наличия упругих деформаций режущей кромки круга происходит образование выпуклости обрабатываемой поверхности. Если же величина перебега не превышает $1/3$ высоты круга, происходит образование конусности. В нормативно-справочной литературе представлены

лишь общие, полученные экспериментальным путем рекомендации по выбору величины перебега круга, которая находится в пределах от $1/3$ до $1/2$ от высоты круга.

Из всех элементов технологической системы в процессе внутреннего шлифования наибольшей податливостью обладает шлифовальная оправка с кругом. В результате действия радиальной силы резания, оказывающей влияние на оправку, происходит копирование исходной погрешности заготовки на обрабатываемую поверхность. На данный момент в известных источниках представлены рекомендации по выбору длины шлифовальной оправки только для узкого диапазона условий обработки.

Отсутствие нормативно-справочной литературы, рекомендаций от производителей оборудования и инструмента, расчетных методик проектирования циклов приводит к тому, что в условиях современного автоматизированного производства вынуждены подбирать структуру цикла, режимы резания, геометрические параметры круга и др. параметры обработки вручную, существенно занижая их до безопасного уровня, гарантирующего обеспечение требований чертежа. Практика использования на производстве современных станков с ЧПУ показывает, что их возможности по производительности используются всего лишь на 40–60 % и зачастую ниже, чем на универсальных станках, особенно при малых партиях деталей.

Для решения данной проблемы разработана методика проектирования оптимальных циклов внутришлифовальной обработки [6, 7], которая позволяет с математической точностью оперативно рассчитывать оптимальные параметры цикла внутришлифовальной обработки, т.е. такие параметры при которых достигаются требования чертежа по точности и качеству за минимально возможное время обработки. В основе данной методики находится разработанная силовая модель [8] и модель съема металла [9, 10] процесса внутреннего шлифования. Модель сил резания разработана с учетом кинематики и особенности процесса внутреннего шлифования и на основе фундаментальных закономерностей механики пластической деформации металла в зоне резания. Она связывает силы резания с режимами резания (радиальной и осевой подачей, скоростью вращения заготовки и круга и т.д.) и основными технологическими параметрами (физико-механическими свойствами шлифуемого металла, геометрическими параметрами зоны контакта круга и заготовки, характеристикой круга, степенью его затупления и т.д.) [8]. Разработанная силовая модель служит основой модели съема металла, описывающая процесс удаления фактически снятого припуска с b -го радиуса g -го сечения на i -м ходе z -й ступени.

Модель съема металла учитывает переменные условия обработки (затупление зерен круга, колебание припуска и исходной точности обрабатываемой поверхности в партии заготовок) и различные технологические факторы, связанные со станком, с параметрами шлифовального круга и за-

готовки (диапазоны подач, упругие деформаций технологической системы, мощности приводов, геометрические размеры и характеристика круга, физико-механические свойства материала, геометрия заготовки и детали, др.).

Данная модель позволяет рассчитывать величины фактически снятого припуска, текущих значений радиусов обрабатываемого отверстия, силы резания, времени съема дискретности припуска, времени достижения состояния и др. [9, 10].

Для выбора оптимального решения используется метод динамического программирования, не требующий построения заранее границ области допустимых ограничений и не являющийся чувствительным к свойствам (дифференцируемости и непрерывности) моделей управления и ограничений [11]. Метод динамического программирования не ограничивает ни количество технологических ограничений целевой функции, ни количество оптимизируемых параметров. В результате становится возможным проводить многопараметрическую оптимизацию управляющей программы для станков с ЧПУ на операциях внутреннего шлифования, т.е. оптимизировать параметры управления циклом, оказывающее значительное влияние на процесс обработки (геометрические параметры круга, режимы резания, структура цикла и др.). При этом за критерий оптимальности принимается минимальное время цикла шлифования, так как оно является переменной частью затрат, зависящих от режимов обработки.

Выводы

1) появление большого ассортимента шлифовальных станков нового поколения, позволяющих производить обработку на более высоких скоростях и по заданным циклам, выявило в машиностроительной отрасли России проблему отсутствия нормативно-справочной литературы, рекомендаций от производителей оборудования и инструмента, расчетных методик проектирования циклов, как следствие, наблюдается неэффективное использование шлифовальных станков нового поколения, при этом коэффициент загрузки оборудования не превышает 40 %;

2) разработка методики проектирования оптимальных циклов позволит с математической точностью оперативно рассчитывать оптимальные параметры цикла внутришлифовальной обработки, т.е. такие параметры при которых достигаются требования чертежа по точности и качеству за минимально возможное время обработки;

3) использование в качестве математического метода оптимизации метода динамического программирования позволяет не ограничивать количество оптимизируемых параметров управления (геометрические параметры и характеристика круга, величина перебега, вылет шлифовального шпинделя и др.). В результате чего становится возможным проводить оптимизацию цикла в многомерном пространстве управляющих параметров.

Библиографический список

1. Михелькевич, В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
2. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 286 с.
3. Дьяконов, А.А. Комплексное моделирование процесса плоского шлифования периферией круга / А.А. Дьяконов, Л.В. Шипулин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – № 6 (24). – С. 14–18.
4. Lee, C.W. Dynamic optimization of the grinding process in batch production / C.W. Lee // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. – 2009. – Vol. 131. – Pp. 61–66.
5. Cycle optimization in cam-lobe grinding for high productivity / P. Krajinik, R. Drazumeric, J. Badger, F. Hashimito // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 630. – Pp. 333–336.
6. Pereverzev, P.P. Automatic cycles' multiparametric optimization of internal grinding / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – Pp. 121–126.
7. Попова, А.В. Принципы проектирования высокопроизводительных циклов на примере внутреннего шлифования / А.В. Попова // СТИН. – 2014. – № 6. – С. 17–23.
8. Переверзев, П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с основными технологическими параметрами / П.П. Переверзев, А.В. Попова // Металлообработка. – 2013. – № 3. – С. 24–30.
9. Переверзев, П.П. Моделирование процесса съема металла при внутреннем шлифовании с учетом особенностей кинематики резания / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // СТИН. – 2016. – Вып. 4. – С. 23–28.
10. Переверзев, П.П., Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с упругими деформациями технологической системы / П.П. Переверзев, А.В. Попова, Д.Ю. Пименов // СТИН. – 2014. – Вып. 9. – С. 23–27.
11. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 400 с.

[К содержанию](#)