

# Численные методы моделирования

УДК 621.923.9

DOI: 10.14529/engin210404

## ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ЕДИНОЙ МЕТОДОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛОВ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ С ЧПУ

**А.В. Акинцева, П.П. Переверзев**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

В настоящее время отсутствие в САПР различных производителей методического, математического и программного обеспечения, позволяющего проектировать оптимальные циклы шлифования для операций с ЧПУ, приводит к тому, что назначение режимов осуществляется по оцифрованным данным нормативов 60-х... 80-х годов выпуска. При назначении других параметров обработки технолог вынужден обращаться к собственному опыту. В результате данные циклы шлифования требуют проведения процедуры адаптации к реальным производственным условиям при помощи обработки ряда пробных деталей. Это накладывает дополнительные временные и материальные затраты. Технолог не успевает спроектировать и отладить большой поток управляющих программ для различных деталей, и поэтому организует шлифование большого ассортимента деталей на универсальных станках. Все это сводит на нет усилия не только по автоматизации этапа технологической подготовки производства в плане проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ, но и по цифровизации машиностроительной отрасли России в целом.

Таким образом, существует острая необходимость в обосновании и реализации методологической платформы комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ, которая позволит провести оптимизацию режимов резания и параметров управления цикла с учетом переменных технологических факторов. Основой данной методологии служит цифровой двойник процесса круглого шлифования, моделирующий сьем припуска в цикле шлифования в условиях действия различных нестабильных факторов.

Математическое обеспечение методологической платформы включает в себя широкодиапазонные модели силы резания, формообразования технологического размера и его погрешности в заданном цикле шлифования с учетом переменной податливости технологической системы, припуска, затупления зерен круга. Оптимизация цикла шлифования базируется на методе динамического программирования с заданной целевой функцией и комплексом моделей ограничений по точности, по параметрам технологической системы, по характеристике шлифовального круга и т. д. с учетом переменных условий обработки партии деталей.

*Ключевые слова: круглое шлифование, ЧПУ, методология, оптимизация, цикл шлифования, режимы резания.*

Главной особенностью операции круглого шлифования с ЧПУ является факт того, что обработка каждой детали в партии ведется в одинаковом цикле переключения программного значения радиальной подачи, которая ступенчато изменяется за время съема припуска. Прочие сопутствующие параметры обработки (частота вращения заготовки, окружная скорость вращения круга, характеристика круга и др.) являются постоянными. Ступенчатое изменение программного значения радиальной подачи обеспечивается прибором активного контроля (ПАК), который непрерывно измеряет диаметр шлифуемой поверхности и переключает программную подачу в зависимости от оставшейся части припуска. Следовательно, ступенчатый цикл программной радиальной подачи характеризуется структурой и параметрами, которые надо оптимизировать при назначении режимов резания и их кодировании в управляющей программе (УП) станка с ЧПУ. Структура цикла характеризуется количеством ступеней переключения программной радиальной подачи. Параметры цикла характеризуют сочетание программной радиальной подачи и величины снимаемой части припуска на каждой ступени цикла. Например, для двухступенчатого цикла

## Численные методы моделирования

---

назначают четыре параметра, а для трехступенчатого – шесть параметров и т. д. Поэтому при проектировании цикла шлифования необходимо выполнить структурно-параметрическую оптимизацию, т.е. выбрать оптимальные значения количества ступеней цикла и значения для двух параметров каждой ступени.

Круглое шлифование является сложным процессом формообразования обрабатываемой поверхности, зависящим от множества геометрических, кинематических, динамических, тепловых факторов влияния. Данные факторы необходимо учитывать совместно при проектировании оптимального цикла круглого шлифования и сопутствующих режимов резания, обеспечивающих заданную точность обработки и другие параметры качества. Ступенчатое переключение радиальной подачи в большой степени усложняет не только модель формирования технологического размера и его погрешности, но и методология структурно-параметрической оптимизации цикла шлифования. Поэтому моделирование процессов обработки детали в цикле шлифования и структурно-параметрическая оптимизация цикла шлифования являются сложной научно-технической задачей, которая до сих пор полностью не решена.

В связи с вышеизложенным, становится понятным, почему на протяжении нескольких последних десятков лет, начиная с появления первых станков с ЧПУ, у различных производителей САПР до сих пор отсутствует функциональный инструмент, позволяющий автоматизировать процесс проектирования оптимального цикла радиальной подачи и других параметров обработки с учетом многочисленных факторов, влияющих на производительность и качество обрабатываемой поверхности. В лучшем случае современные САПР позволяют назначить только сопутствующие режимы резания, опираясь на рекомендации нормативно-справочной литературы, разработанной в 60-х... 80-х годах для универсальных станков. К тому же назначение режимов резания в САПР осуществляется для «идеальных условий обработки», в которых отсутствуют упругие деформации технологической системы, исходное радиальное биение заготовки, колебания припуска и другие переменные технологические факторы. Однако по этим нормативам невозможно спроектировать оптимальный цикл радиальной подачи, который является основной частью управляющих программ для операций круглого шлифования с ЧПУ. По этой причине технологи вынуждены вручную назначать параметры цикла шлифования только на основе собственного опыта. В этих условиях невозможно проводить структурно-параметрическую оптимизацию цикла шлифования, тем более в пределах всего нормативного пространства, характеризуемого диапазонами диаметров и длин шлифования, марок шлифуемых материалов, скоростей подач, оборотов заготовок, характеристик кругов, подагливостей технологических систем, чертежных требований по качеству обработки, колебаний переменных условий обработки партии деталей.

В результате на машиностроительных производствах вынуждены вручную адаптировать назначенные с помощью САПР режимы резания к реальным технологическим условиям обработкой ряда пробных заготовок. Это ведет к дополнительным материальным и временным затратам, что зачастую приводит к тому, что технологи не успевают спроектировать и отладить большой поток управляющих программ ЧПУ для различных деталей, и поэтому организуют шлифование большого ассортимента деталей на универсальных станках. При разработке УП ЧПУ для гарантированного выполнения требований чертежа по точности и качеству технологом вручную назначаются заниженные режимы резания. Отсюда возникает низкая эффективность использования производственных мощностей современных станков с ЧПУ. В среднем современные шлифовальные станки с ЧПУ используются на 60... 80 % от их заложенной мощности. Это сводит на нет все усилия не только по автоматизации этапа технологической подготовки производства в плане проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ, но и по цифровизации всей машиностроительной отрасли России.

Таким образом, существует острая необходимость в обосновании и реализации методологической платформы комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ, которая позволит проводить комплексную оптимизацию режимов резания и параметров управления цикла с учетом переменных технологических факторов.

Вопросами повышения производительности циклов и стабилизации показателей точности и качества в проектируемых циклах занималось большое количество как отечественных ученых [1–5], так зарубежных [6–12]. Инженерные методики построения циклов круглого наружного и внутреннего шлифования рассмотрены в относительно небольшом количестве работ [3–4], кото-

рые имеют ряд общих недостатков, делающих невозможным их применение в условиях автоматизированного машиностроительного производства:

- не всегда используются математические методы оптимизации;
- не применяется одна из самых важных моделей ограничений производительности по точности обработки;
- не учитывается влияние переменных технологических факторов, таких как колебания припуска и исходного радиального биения в партии обрабатываемых заготовок, размерный износ шлифовального круга и затупление режущих зерен круга в процессе шлифования, переменные упругие деформации технологической системы по длине обрабатываемой поверхности и др.

В настоящее время в связи с появлением станков ЧПУ нового поколения и с бурным развитием САПР все больше стали появляться работы, направленные на оптимизацию циклов по нескольким режимным параметрам [3–5]. Однако в данных работах недостатки прежних инженерных методик сохранились. К числу работ, направленных на оптимизацию двух режимных параметров, можно отнести разработку методики проектирования оптимальных циклов управления радиальной и осевой подач на операциях внутреннего шлифования [13].

На данный момент вопрос комплексной оптимизации циклов режимов резания и других технологических параметров (параметров управления циклом), оказывающих влияние на производительность процесса и качество обрабатываемой поверхности (характеристика круга, величина перебега и т. д.) не рассматривался. Чаще всего в исследованиях приводят рекомендации по выбору того или иного технологического параметра для частных условий обработки. Примеры таких исследований: управление перебегом и формой круга при шлифовании глубоких отверстий [14], выбор характеристики шлифовального круга [15–17] и множество других работ.

В качестве решения вышеописанной проблемы нами впервые предложена методология комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ, позволяющая проводить комплексную оптимизацию режимов резания и параметров управления цикла с учетом переменных технологических факторов (колебания припуска, исходного радиального биения, степени затупления круга, изменения диаметра круга в процесс обработки). Рассмотрим основные этапы создания методологии комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ.

Основу методологии комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ составляет методическое и математическое обеспечение. Методическое обеспечение представляет собой общий алгоритм структурно-параметрической оптимизации цикла шлифования с указанием используемых математических моделей и методов оптимизации. Математическое обеспечение методологической платформы включает в себя широкодиапазонные модели силы резания, съема металла, модели формообразования технологического размера и его погрешности в заданном цикле шлифования с учетом переменной податливости технологической системы, припуска, затупления зерен круга. Базовой моделью математического обеспечения методологической платформы является модель процесса съема металла, которая основывается на известных фундаментальных закономерностях взаимосвязи жесткости технологической системы с ее упругими деформациями, возникающими под действием силой резания и учитывает кинематику и особенности формирования обрабатываемой поверхности для различных видов кругового шлифования [18]. Модель устанавливает взаимосвязи режимов резания со всеми параметрами процесса шлифования, в том числе и глубиной резания на протяжении всего цикла. В результате станет возможным поэтапное моделирование съема металла на каждом радиусе рассматриваемого сечения по всей длине заготовки и в течение всего цикла обработки с учетом нестабильности процесса обработки (колебания припуска, степени затупления круга и др.), что сделает возможным прогнозирование точности обработки. Модель процесса съема металла представляет собой цифровой двойник с многофакторной визуализацией процесса формообразования и параметров качества обрабатываемой поверхности на операциях круглого шлифования с ЧПУ [19].

Выделим основные этапы разработки методологии комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ:

- выбор математического метода оптимизации и разработка методики его применения для комплексной структурно-параметрической оптимизации цикла шлифования;
- выбор критерия (критериев) оптимальности (функции цели);

## Численные методы моделирования

---

- формирование комплекса технологических ограничений функции цели (подбор и разработка моделей для комплекса технологических ограничений: модель формирования точности обрабатываемой поверхности, модель получаемой шероховатости и др.);
- формирование перечня переменных технологических условий с учетом диапазона их варьирования;
- разработка общей методологии комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ.

В качестве математического метода оптимизации выбран метод динамического программирования (МДП) [20], так как данный метод позволяет разделять последовательность принятия решений на независимые шаги своего рода дискреты различного физического смысла, отличающиеся в широком понимании, но однотипные для конкретной задачи оптимизации. Особенностью МДП является его существенно большая асимптотическая временная мощность, особенно при рассмотрении многомерных случаев по сравнению с другими методами задач дискретной оптимизации, например, с простым перебором.

При числе оптимизируемых переменных больше двух визуализация графа состояний становится затруднительной, хотя, по сути, задача также сводится к анализу узлов и условных ветвей перехода, поэтому для упрощения реализации МДП целесообразно представить ее в виде плоского графа с заданными состояниями (вершинами графа) и условиями перехода (ребрами графа). Простой перебор возможных вариантов обхода такого графа предполагает степенной рост времени поиска оптимального пути, так как в этом случае асимптотическая мощность метода составляет  $O(s^p)$  [20–22], где  $s$  – максимальное число вершин на одном слое графа (в нашем случае – число «стартовых» точек входа),  $p$  – суммарное число значений всех оптимизируемых параметров. При увеличении числа исходных данных или размерности время работы алгоритма быстро выходит за рамки целесообразности, даже учитывая возможности современных суперкомпьютеров.

Для метода динамического программирования мощность тоже возрастает с увеличением размерности задачи, но при малом числе возможных вариантов изменения оптимизационных параметров, входящих в вектор управления, рост остается на уровне  $O(2^p)$  [20–21]. В этом случае многомерность и каждый новый параметр приводят к увеличению сложности в  $2^p$  раза, где  $p$  – число значений новой переменной, увеличивающей размерность системы на единицу. Таким образом, при большом числе переменных метод прямого перебора представляется в принципе нереализуемым за достижимое время, а метод динамического программирования дает рост вычислений не более чем в  $2^p$  раза. Таким образом, в силу большого количества оптимизируемых параметров, можно сделать вывод о возможности применения именно МДП для комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ.

При решении поставленной задачи целевой функцией может являться минимальное значение себестоимости операции или основное время, т. е. максимальная производительность операции. Основное время выбирают более часто в качестве целевой функции. Отметим, что она сводит задачу по оптимизации цикла к задаче оптимизации по быстродействию. В процессе поиска оптимального цикла осуществляется его проверка на ряд важных ограничений, среди которых выделим следующие: ограничения по шероховатости, точности и качеству поверхностного слоя (отсутствие прижогов, трещин и т. д.), которые определяются требованиями чертежа детали, и ограничения по техническим возможностям используемого оборудования, технологической оснастки и режущего инструмента (например, диапазоны подач, характеристика круга и т. д.). Применение цифрового двойника операции круглого шлифования с ЧПУ, разработанного на основе созданной модели съема металла, позволяет путем моделировать послойное удаление металла по всей длине обрабатываемой поверхности для разных условий шлифования. Это делает возможным визуализацию процесса формообразования обрабатываемой поверхности детали. В результате становится возможным расчет изменения текущих размеров на протяжении всего цикла шлифования и соответственно контроль обрабатываемой поверхности на обеспечение требований чертежа по точности не только диаметральных размеров, но и отклонения формы и взаимного расположения поверхностей (наложения ограничения по точности).

Отметим, что цифровая копия процесса круглого шлифования позволяет «проигрывать» варианты обработки детали для разных условий шлифования с учетом переменных технологиче-

ских факторов (степени затупления круга, колебания припуска и др.). Учет воздействия переменных технологических факторов позволяет стабилизировать показатели точности и качества обрабатываемой поверхности при изготовлении партии деталей. Для этого в описанной методологии проверка ограничений целевой функции осуществляется по двум группам предельных сочетаний значений технологических условий обработки – благоприятные (степень затупления круга, исходное радиальное биение, припуска – минимальная и диаметр круга – максимальный) и неблагоприятные (степень затупления круга, исходное радиальное биение, припуска – максимальная и диаметр круга – минимальный).

Для удобства восприятия рассмотрим применение методологии на примере оптимизации одного режимного параметра – радиальной подачи (например, круглого шлифования с продольной подачей). Рассмотрим координатную сетку с осями «Радиальная подача – Припуск», разделенную по вертикальной оси на диапазоны радиальной подачи ( $S_{рад\ m}$ , мм/дв.ход, где  $m$  – порядковый номер радиальной подачи) и по горизонтальной оси на дискреты припуска ( $\Pi_n$ , мм, где  $n$  – порядковый номер дискреты припуска) – рис. 1.

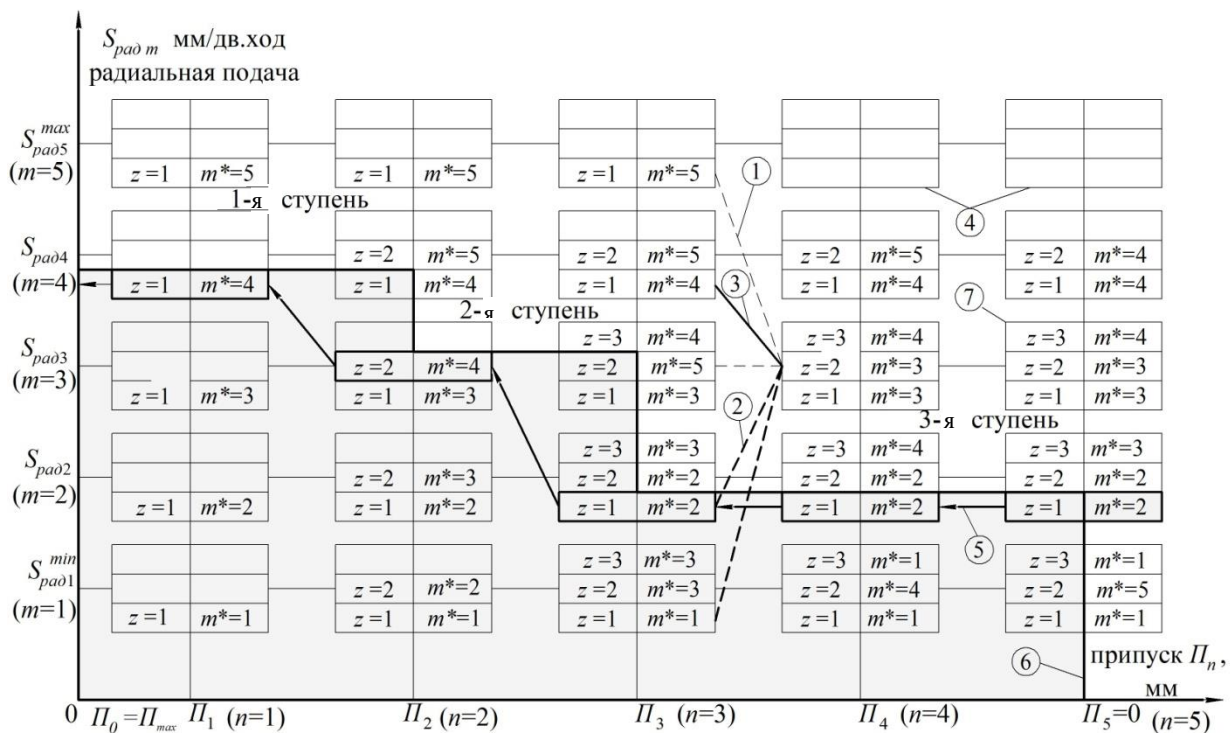


Рис. 1. Координатная сетка для оптимизации цикла шлифования с одной радиальной подачей:

1 – конкурирующие ходы; 2 – допустимые ходы;

3 – оптимальный ход; 4 – выбывшие из расчета информационные клетки;

5 – процедура обратного хода; 6 – траектория оптимального управления;

7 – информационная клетка для оптимизации одного параметра;

$n$  – номер дискреты припуска;  $m$  – номер дискреты программной радиальной подачи;

$m^*$  – координата узла, откуда сделан оптимальный ход;  $\Pi$  – припуск, мм

В узлах рассматриваемой координатной сетки расположены информационные клетки, имеющие координаты  $[n, m]$ . Каждую информационную клетку разделяют на количество ступеней цикла, на практике применяют от 2 до 5 ступеней цикла. Для каждой информационной клетки можно сделать несколько возможных вариантов переключения подачи в цикле, т. е. можно совершить некоторое количество конкурирующих ходов. Каждый из этих ходов необходимо проверить по ряду ограничений, связанных с настроечными параметрами технологического процесса, техническими возможностями используемого оборудования, оснастки и режущего инструмента, требованиям чертежа детали по качеству обрабатываемой поверхности. После проверки из прошедших ограничения конкурирующих ходов выбирается один оптимальный ход, имеющий минимальное время съема рассматриваемой дискреты припуска. Время съема рассматриваемой дискреты припуска рассчитывается при помощи моделирования съема металла в цикле шлифо-

## Численные методы моделирования

вания по всей длине обрабатываемой поверхности вала по вышеприведенным моделям. После чего в рассматриваемую информационную клетку записывается оптимальное время достижения состояния и в переменную  $t^*$  запоминается координата узла, откуда сделан оптимальный ход. При рассмотрении последней дискреты припуска процедурой обратного хода по координатам  $t^*$  восстанавливается оптимальная траектория цикла шлифования.

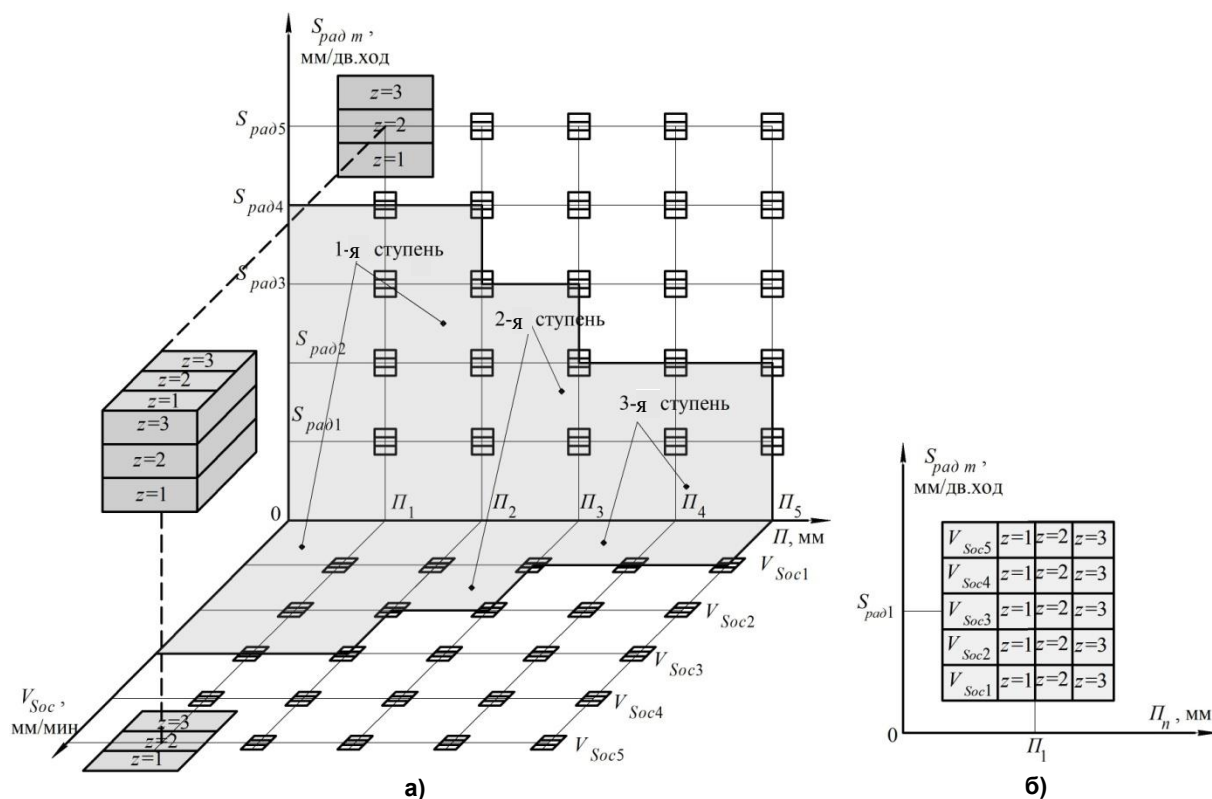


Рис. 2. Оптимизация цикла радиальной и осевой подач в трехмерном пространстве «Припуск, мм – Радиальная подача, мм/дв.ход – Скорость осевой подачи мм/мин» (а) и информационная клетка, используемая для оптимизации цикла радиальной и осевой подач в координатах «Припуск, мм – Радиальная подача, мм/дв.ход» (б)

На рис. 1 изображена координатная сетка для случая, когда оптимизируется цикл для одной – радиальной подачи. Если оптимизация ведется для двух подач (рис. 2, а), то используется трехмерная оптимизационная матрица «Радиальная подача – Осевая подача – Припуск». Для проведения процедуры оптимизации МДП необходимо выполнить свертку объемной матрицы на плоскость. В результате информационная клетка, расположенная в узлах координатной сетки, усложнится из-за добавления нового оптимизируемого параметра – осевой подачи. В этом случае информационная клетка будет выглядеть, как показано на рис. 2, б. При этом процедура оптимизации изменится незначительно. Более подробно с методикой оптимизации циклов управления радиальной и осевой подач на операциях внутреннего шлифования можно ознакомиться в статье [13]. Аналогично будет формироваться информационная клетка при оптимизации более чем двух управляющих параметров – рис. 3, а (где  $b$  и  $d$  ширина и диаметр шлифовального круга). При этом графическое представление оптимального цикла радиальной и осевой подачи будет аналогично рис. 2, а, но уже будут известны оптимальные размеры шлифовального круга. Для большей наглядности и удобства визуализации перечня оптимизируемых параметров информационную клетку при графическом представлении на координатной сетке можно задать в виде совокупности концентрических окружностей («точки») – рис. 3, б и в (для наглядности выделен сегмент концентрической окружности).



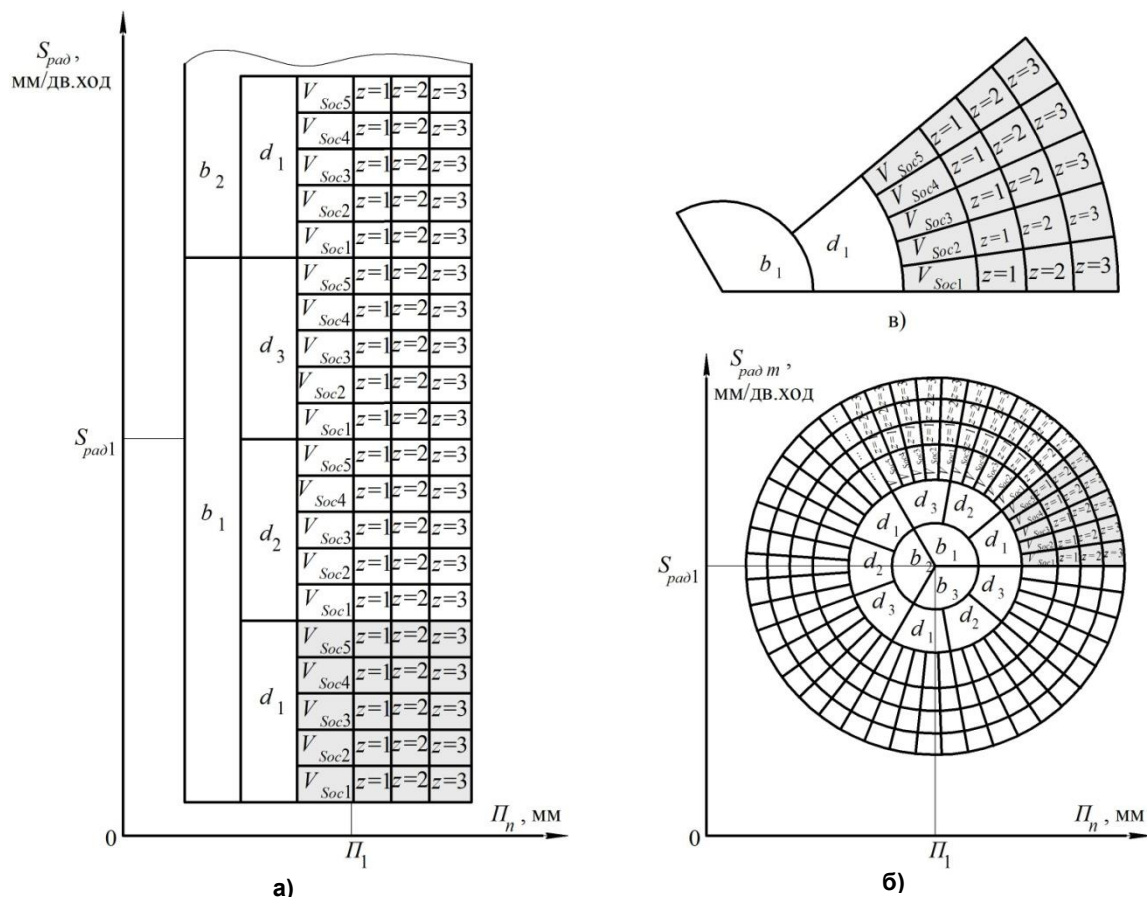


Рис. 3. Информационная клетка, используемая для оптимизации цикла радиальной и осевой подач, ширины и диаметра шлифовального круга (параметры  $b$  и  $d$ ) в координатах «Припуск, мм – радиальная подача, мм/дв.ход» в матричном виде (а) и концентрическом виде (б), выделенный сегмент информационной клетке в концентрическом виде с оптимизируемыми параметрами (в)

Как уже было сказано ранее, МДП позволяет оптимизировать неограниченное количество управляющих параметров, но сдерживающим фактором в данном случае является вычислительная мощность используемых ЭВМ. Оценку вычислительной мощности необходимо проводить с учётом сегодняшних реалий в области электроники. Тенденции таковы, что рост вычислительной мощности ЭВМ достигается на данном этапе за счёт увеличения количества вычислительных узлов – ядер. Таким образом, если алгоритм расчётов может быть распараллелен, то ресурсы для решения задачи будут использоваться оптимально. Реализация МДП поддаётся распараллеливанию, но требует больших объёмов памяти. Анализ объёмов обрабатываемых данных позволяет утверждать, что решение задачи на современной персональной ЭВМ с многоядерным процессором возможно за приемлемое время счёта. Так в среде Visual Studio 2019 на языке C++ разработано программное обеспечение для проектирования оптимальных циклов круглого шлифования с ЧПУ, получены два свидетельства государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663488 и 2021663381.

Экспериментальная проверка предложенной методологии производилась путем сравнения производительности заводского и «расчетного» циклов на примере ряда деталей. Используемое оборудование – внутришлифовальный станок 3К228А и круглошлифовальный станок 3М151, используемые инструменты – 50x40x63 25AF60M7V35A1 и 600x203x80 92А 32Н. Требования по точности и качеству обрабатываемой поверхности: Ra 0,16...0,32 мкм, класс точности 6... 7. Материал обрабатываемой заготовки – 12ХН3А ГОСТ 4543-71 (твердость 57... 63 HRC), Сталь 15Х и 20ХГНР ГОСТ 4543-2016 (твердость 52...55 HRC). В результате повышение производительности разработанного цикла круглого шлифования по отношению к циклу, применяемому на заводе, составило 30 %, также наблюдалось повышение стабильности показателей качества и точности операции круглого шлифования.

### Выводы

1. На данный момент ввиду отсутствия у различных производителей САПР цифрового инструмента, позволяющего проектировать оптимальные циклы, возникает острая необходимость в обосновании и реализации методологической платформы комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ, которая позволит проводить комплексную оптимизацию режимов резания и параметров управления цикла с учетом переменных технологических факторов. Отсутствие данной платформы сводит на нет все усилия не только по автоматизации этапа технологической подготовки производства в плане проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ, но и по цифровизации машиностроительной отрасли России в целом.

2. Реализация представленной в данной статье методологии возможна только на основе разработки методического и математического обеспечений, позволяющих связать в едином алгоритме последовательность оптимизации цикла шлифования, математическое обеспечение, метод оптимизации, целевую функцию и ее ограничения. Методическое обеспечение представляет собой общий алгоритм структурно-параметрической оптимизации цикла шлифования с указанием используемых математических моделей и методов оптимизации. Математическое обеспечение методологической платформы включает в себя: широкодиапазонные модели силы резания, глубины резания, модели формообразования технологического размера и его погрешности в заданном цикле шлифования с учетом переменной податливости технологической системы, припуска, затупления зерен круга.

3. Базовой моделью математического обеспечения методологической платформы является модель процесса съема металла, которая устанавливает взаимосвязи режимов резания со всеми параметрами процесса шлифования, в том числе и с глубиной резания, на протяжении всего цикла. Это дает возможность вести расчет текущих размеров обрабатываемой поверхности с учетом переменных технологических факторов и прогнозировать точность обработки. Модель процесса съема металла представляет собой цифровой двойник с многофакторной визуализацией процесса формообразования и параметров качества обрабатываемой поверхности на операциях круглого шлифования с ЧПУ.

4. Структурно-параметрическая оптимизация цикла круглого шлифования базируется на методе динамического программирования с заданной целевой функцией и комплексом моделей ограничений по требованиям чертежа, по технологическим возможностям используемого оборудования, оснастки и режущего инструмента, по настроечным параметрам с учетом переменных условий обработки партии деталей.

5. Предложенные разработки возможно использовать не только для проектирования оптимального цикла круглого шлифования, но и для решения обратной задачи – определения стабильности показателей точности и качества обрабатываемой поверхности для применяемых на производстве циклов (действующих). Также отметим, что в разработанной методологии заложены теоретические основы для масштабных исследований в рамках данного направления для всех видов механической обработки (точения, фрезерования и др.).

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Челябинской области в рамках научного проекта №20-48-740006.**

### Литература

1. Братан, С.М. Управление операцией плоского шлифования с динамической стабилизацией параметров технологического цикла / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая // *Вестник современных технологий*. – 2019. – № 4. – С. 42–48.
2. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
3. Nurkenov, A. *Designing high-speed CNC-operations* / A. Nurkenov A., V. I. Guzeev, P.G. Mazein, I.P. Deryabin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 450, no. 032014. DOI: 10.1088/1757-899X/450/3/032014
4. Alsigar, M.K. *Mathematical Model to Predict Material Removal Rate of Reverse Zones* / M.K. Alsigar // *Journal of advanced research in technical science*. – 2018. – No. 9. – P. 27–30.



5. Shipulin, L.V. *Concept of Designing High-Speed Processing Operations based on Complex Process Simulation* / L.V. Shipulin, D.V. Ardashev // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 1. – P. 1–18. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.011
6. Tung, L.A. *Study on Optimization of Manufacturing Time in External Cylindrical Grinding* / L.A. Tung, T.T. Hong, N.V. Cuong, N Vu // *Advances in Engineering Research and Application, Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications*. – 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-37497-6\_14
7. Gao, S *Optimization for internal traverse grinding of valves based on wheel deflection* / S. Gao, C. Yang, J. Xu, Y. Fu, H. Su, W. Ding // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 92. – P. 1105–1112. DOI: 10.1007/s00170-017-0210-8
8. Dong, S. *Continuous optimal in feed control for cylindrical plunge grinding. Part I. Methodology* / S. Dong, K. Danai, S. Malkin, A. Deshunukh // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2004. – Vol. 126(2). – P. 327–333. DOI: 10.1115/1.1751423
9. Alagumurthi, N. *Optimization of grinding process through Design of Experiment (DOE) – a comparative study* / N. Alagumurthi, K. Panairadja, V. Soundararajan // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2006. – 21(1). – pp. 19–21. DOI: 10.1080/AMP-200060605
10. Phan, A.M. *Optimization device for grinding media performance parameters* / A.M. Phan, M.P. Summers, J.P. Parmigiani // *Int. Mechan. Eng. Congr. Expos (IMECE)*. – 2011. – Vol. 3. – P. 915–923. DOI: 10.1115/IMECE2011-64210
11. Barrenetxea, D. *Stability analysis and optimization algorithms for the Set-Up of Infeed Centerless Grinding* / D. Barrenetxea, J. Alvarez, J.I. Marquinez, I. Gallego, I.M. Perello, P. Krajnik // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2014. – Vol. 84. – P. 17–32. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2014.04.005.
12. Choi, J. *Development of the process model for plunge grinding and optimization of grinding process* / J. Choi, C.W. Lee, J-H Park // *J. Mechanical Engineering Science*. – 2011. – Vol. 225. – P. 2628–2637. DOI: 10.1177/0954406211406201
13. Akintseva, A.V. *Complex Optimization of Parameters for Controlling the Cycle of Internal Grinding by the Method of Dynamic Programming* / A.V. Akintseva, P.P. Pereverzev // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 129, no. 01019. DOI: 10.1051/mateconf/201712901019
14. Салов, П.М. *Совершенствование технологий шлифования за счет управления формой кругов* / П.М. Салов, А.Ф. Денисенко, Д.П. Салова и др. // *Известия Самарского центра Российской академии наук*. – 2018. – № 4(2). – С. 298–303.
15. Исаков, Д.В. *Методика построения информационной базы для проектирования шлифовальных операций* / Д.В. Исаков // *Металлообработка*. – 2009. – № 2 – С. 9–15.
16. Ardashev, D.V. *Variative designing of grinding operations* / D.V. Ardashev, V. I. Guzeev // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37. – P. 459–461. DOI: 10.3103/S1068798X17050045
17. Курдюков, В.И. *Комплекс технологических ограничений целевой функции при проектировании оптимального режимно-инструментального оснащения шлифовальных операций* / В.И. Курдюков // *Вестник Курганского государственного университета*. – 2005. – № 2. – С. 111–114.
18. Akintseva, A.V. *Influence of Instrument Position in Active Monitoring on the Accuracy and Productivity of CNC Plunge Grinding* / Akintseva A.V., P.P. Pereverzeva, A.V. Prokhorova, S.N. Yudina // *Russian Engineering Research*. – 2021. – Vol. 41, no. 10. – P. 952–956. DOI: 10.3103/S1068798X21100038
19. Akintseva, A.V. *Digital Twins and Multifactorial Visualization of Shaping in CNC Plunge-Cut Grinding* / A.V. Akintseva, P.P. Pereverzeva, S.V. Omel'chenko, A.A. Kopyrkina // *Russian Engineering Research*. – 2021. – Vol. 41, no. 7. – P. 671–67. DOI: 10.3103/S1068798X21070030
20. Беллман, Р. *Динамическое программирование* / Р. Беллман. – М.: Из-во иностр. лит., 1960. – 400 с.
21. Кормен, Т. *Алгоритмы: построение и анализ* / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2012. – 1296 с.
22. Book, R.V. *Comparing complexity classes* / R.V. Book // *Journal of Computer and System Sciences*. – 1974. – Vol. 9, iss. 2. – P. 213–229.

**Акинцева Александра Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техники, технологии и строительства», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, akintsevaav@susu.ru

**Переверзев Павел Петрович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, pereverzevpp@susu.ru

*Поступила в редакцию 10 ноября 2021 г.*

---

DOI: 10.14529/engin210404

## MAIN STAGES OF CREATION OF A UNIFIED METHODOLOGY OF INTEGRATED STRUCTURAL AND PARAMETRIC OPTIMIZATION OF CIRCULAR GRINDING CYCLES WITH CNC

*A.V. Akintseva, akintsevaav@susu.ru*

*P.P. Pereverzev, pereverzevpp@susu.ru*

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

At present, there are no various manufacturers of methodological and mathematical support and software in CAD-systems, which allows designing optimal grinding cycles for CNC operations, what leads to the fact that the assignment of modes is carried out according to digitized data of the standards of the 60s... 80s. When assigning other processing parameters, the technologist is forced to turn to his own experience. As a result, these grinding cycles require the procedure of adaptation to real production conditions by processing a number of test parts. This entails additional time and material costs. The technologist does not have time to design and adjust a large stream of control programs for various parts, and, therefore, organizes the grinding of a large assortment of parts on universal machines. All this negates all efforts not only to automate the stage of technological preparation of production in terms of designing control programs for CNC machines, but also to digitalize the entire machine-building industry in Russia.

Thus, there is an urgent need to substantiate and implement a methodological platform of complex structural and parametric optimization of circular grinding cycles with CNC, which allows to perform the complex optimization of cutting modes and cycle control parameters considering variable technological factors. The basis of this methodology is a digital twin of the circular grinding process, which simulates the removal of the allowance in the grinding cycle under the effect of various unstable factors.

The mathematical support of the methodological platform includes wide-range models of the cutting force, the shaping of the technological dimension and its errors in a given grinding cycle, considering variable compliance of the technological system, allowance, blunting of the wheel grains. The optimization of the grinding cycle is based on the method of dynamic programming with a given objective function and a complex of models of restrictions on accuracy, on the parameters of the technological system, on the characteristics of the grinding wheel, etc., considering variable processing conditions of the batch of parts.

*Keywords: circular grinding, CNC, methodology, optimization, grinding cycle, cutting modes.*

### *References*

1. Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A. [Control of the flat grinding operation with dynamic stabilization of the technological cycle parameters]. *Vestnik sovremennykh tekhnologij* [Вестник современных технологий], 2019, no. 4, pp. 42–48. (in Russ.)
2. Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke* [Dynamics of surface shaping during abrasive processing]. Sevastopol', izdatel'stvo SevNTU, 2012, 304 p. (in Russ.)

3. Nurkenov A., Guzeev V.I., Mazein P.G., Deryabin I.P. Designing high-speed CNC-operations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 450, no. 032014. DOI: 10.1088/1757-899X/450/3/032014
4. Alsigar M.K. Mathematical Model to Predict Material Removal Rate of Reverse Zones. *Journal of advanced research in technical science*, 2018, no. 9, pp. 27–30.
5. Shipulin L.V., Ardashe D.V. Concept of Designing High-Speed Processing Operations based on Complex Process Simulation. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.011
6. Tung L.A. Hong T.T., Cuong N.V., Vu N. Study on Optimization of Manufacturing Time in External Cylindrical Grinding. *Advances in Engineering Research and Application, Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications*, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-37497-6\_14
7. Gao S., Yang C., Xu J., Fu Y., Su H., Ding W. Optimization for internal traverse grinding of valves based on wheel deflection. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 92, pp. 1105–1112. DOI: 10.1007/s00170-017-0210-8
8. Dong S., Danai K., Malkin S., Deshunukh A. Continuous optimal in feed control for cylindrical plunge grinding. Part 1. Methodology. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, vol. 126(2), pp. 327–333. DOI: 10.1115/1.1751423
9. Alagumurthi N., Panairadja K., Soundararajan V. Optimization of grinding process through Design of Experiment (DOE) – a comparative study. *Materials and Manufacturing Processes*, 2006, 21(1), pp. 19–21. DOI: 10.1080/AMP-200060605
10. Phan A.M., Summers M.P., Parmigiani J.P. Optimization device for grinding media performance parameters. *Int. Mechan. Eng. Congr. Expos (IMECE)*, 2011, vol. 3, pp. 915–923. DOI: 10.1115/IMECE2011-64210
11. Barrenetxea D., Alvarez J., Marquinez J.I., Gallego I., Perello I.M., Krajnik P. Stability analysis and optimization algorithms for the Set-Up of Infeed Centerless Grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, vol. 84, pp. 17–32. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.04.005
12. Choi J. Lee C.W., Park J-H. Development of the process model for plunge grinding and optimization of grinding process. *J. Mechanical Engineering Science*, 2011, vol. 225, pp. 2628–2637. DOI: 10.1177/0954406211406201
13. Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Complex Optimization of Parameters for Controlling the Cycle of Internal Grinding by the Method of Dynamic Programming. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, no. 01019. DOI: 10.1051/mateconf/201712901019
14. Salov P.M., Denisenko A.F., Salova D.P., Saykin S.S., Mulyukhin N.V. [Improvement of grinding technologies by controlling the shape of wheels]. *Izvestiya Samarskogo centra Rossijskogo akademii nauk* [Известия Самарского центра Российской академии наук], 2018, no 4(2), pp. 298–303. (in Russ.)
15. Isakov D.V. [Methodology for acquisition an information base for the designing of grinding operations]. *Metalloobrabotk* [Металлообработка], 2009, no 2, pp. 9-15. (in Russ.)
16. Ardashev D.V., Guzeev V.I. Variative designing of grinding operations. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, pp. 459–461. DOI: 10.3103/S1068798X17050045
17. Kurdyukov V.I. [Комплекс технологических ограничений целевой функции при проектировании оптимального режимно-инструментального оснащения шлифовальных операций]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta* [Вестник Курганского государственного университета], 2005, no. 2, pp. 111–114.
18. Akintsevaa A.V., Pereverzeva P.P., Prokhorova A.V., Yudina S.N. Influence of Instrument Position in Active Monitoring on the Accuracy and Productivity of CNC Plunge Grinding. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 10, pp. 952–956. DOI: 10.3103/S1068798X21100038
19. Akintsevaa A.V., Pereverzeva P.P., Omel'chenkoa S.V., Kopyrkina A.A. Digital Twins and Multifactorial Visualization of Shaping in CNC Plunge-Cut Grinding. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 7, pp. 671–67. DOI: 10.3103/S1068798X21070030
20. Bellman R. *Dinamicheskoe programmirovani*e [Dynamic Programming]. Moscow, Foreign Literature Publishing House Publ., 1960, 400 p.

## Численные методы моделирования

---

21. Kormen T., Leyzerson Ch., Rivest R., Shtayn K. *Algoritmy: postroenie i analiz* [Algorithms: development and analysis]. M.: Izdatel'skij dom "Vil'yams", 2012, 1296 p. (in Russ.)

22. Book R.V. Comparing complexity classes. *Journal of Computer and System Sciences*, 1974, vol. 9, iss. 2., pp. 213–229.

*Received 10 November 2021*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Акинцева, А.В. Основные этапы создания единой методологии комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов круглого шлифования с ЧПУ / А.В. Акинцева, П.П. Переверзев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 37–48. DOI: 10.14529/engin210404

### FOR CITATION

Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Main Stages of Creation of a Unified Methodology of Integrated Structural and Parametric Optimization of Circular Grinding Cycles with CNC. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 37–48. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin210404

---