

## Проектирование оптимальных циклов внутришлифовальной обработки в многомерном пространстве управляющих параметров

© А.В. Акинцева, П.П. Переверзев

Южно-Уральский государственный национальный исследовательский университет,  
филиал, Кыштым, 456870, Россия

*Рассмотрены основные принципы проектирования оптимальных циклов внутреннего шлифования в многомерном пространстве управляющих параметров: скорость осевой подачи, радиальная подачи и др. Впервые для оптимизации процесса обработки используется такой математический метод оптимизации как метод динамического программирования. Применение его позволяет учитывать весь комплекс технологических ограничений (по допустимой погрешности размеров, по допустимой глубине прижога и др.), а также заменять полный перебор вариантов решений целенаправленным, тем самым сокращая расходы и время, которые затрачиваются на производстве на подбор оптимальных значений режимов обработки.*

**Ключевые слова:** внутреннее шлифование, оптимизация процесса обработки, цикл, динамическое программирование.

Один из основных методов получения точных отверстий — внутреннее шлифование. Оно позволяет получать отверстия 6–7-го качества с высоким качеством обрабатываемой поверхности. Существенным преимуществом внутреннего шлифования является возможность обработки отверстия в тех случаях, когда развертывание и растачивание применить невозможно, например, при обработке точных отверстий больших диаметров и отверстий в закаленных, высокотвердых деталях и т. п. Благодаря своей универсальности внутреннее шлифование охватывает все типы производства: от обработки единичной продукции в ремонтно-механическом цехе (единичное производство) до обработки гильз цилиндров внутреннего сгорания, посадочных отверстий для подшипников и зубчатых колес, отверстий корпусных деталей, колец шарико- и роликоподшипников (крупносерийное, массовое производства).

Появление современных станков с ЧПУ, производящих обработку с повышенными скоростями и по заданным циклам, выявило в отечественном машиностроении следующую проблему: отсутствие нормативов и методик, позволяющих спроектировать высокопроизводительный цикл для заданных условий обработки, обеспечивающий чертежные требования к обрабатываемой поверхности. Имеющаяся на машиностроительных предприятиях нормативно-справочная литература издана преимущественно в 1970–1980-х г. и разработана для уни-

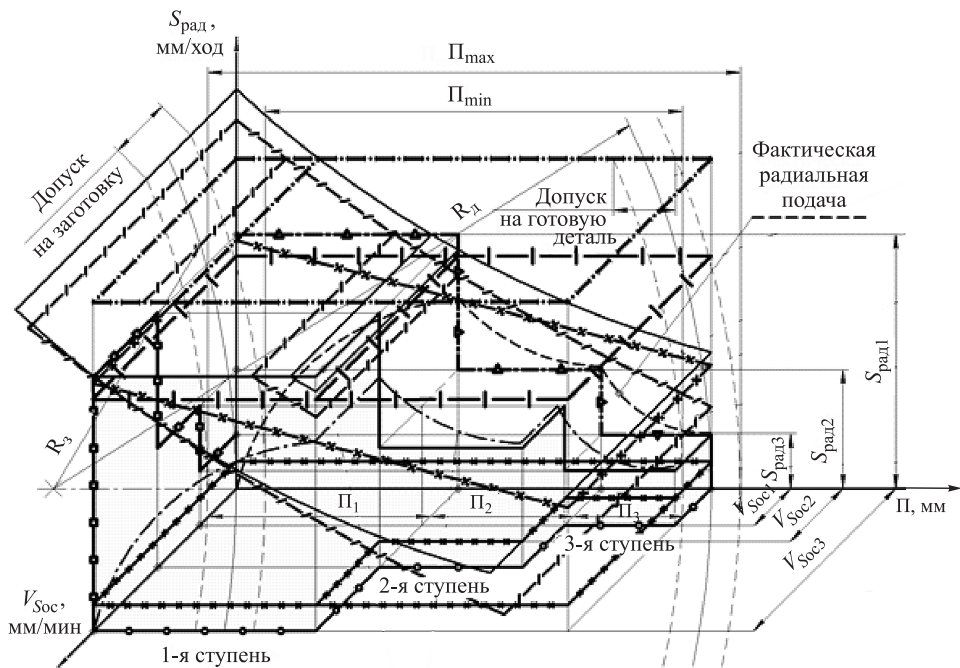
версальных станков на основании статистических данных тех лет. Основное назначение этой литературы — нормирование времени обработки. В условиях современного производства все это делает ее непригодной.

В существующих в настоящее время методиках расчета режимов обработки [1–3] не используются математические методы оптимизации, т. е. не обеспечивается максимальная производительность цикла при выполнении всех технологических ограничений (по точности, качеству обрабатываемой поверхности и др.). К существенным недостаткам данных методик можно отнести: отсутствие модели ограничения производительности операции по точности обработки; отсутствие учета изменения условий обработки (степени затупления и износа круга, исходного биения заготовки и др.); значительные затраты по времени на расчет (до 2–4 недель); отсутствие учета фактически снятого припуска и, как следствие, неверный расчет времени обработки и числа ходов (оборотов), необходимых для снятия заданной величины припуска и др. В результате этого на предприятиях вынуждены подбирать режимы резания путем обработки ряда пробных заготовок, что неприемлемо для единичного и серийного типа производства. При этом существенно занижаются параметры режимов резания и производительность операции (до 2–5 раз), чтобы гарантированно получить заданную точность и качество обрабатываемой поверхности отверстия.

Для решения данной проблемы разработана теория и методика расчета оптимальных циклов внутришлифовальной обработки, базирующаяся на моделировании съема металла с  $b$ -го радиуса на  $i$ -м ходе круга  $z$ -й ступени цикла при заданных режимах обработки, с учетом упругих деформаций и особенностей кинематики резания. Разработанная модель позволяет накладывать ограничения по допустимой погрешности диаметральных размеров обрабатываемой поверхности. По всей длине обрабатываемого отверстия выделяются три сечения — начальное, среднее и конечное. Для учета исходного биения заготовки принимается, что сечение обрабатываемой поверхности имеет форму эллипса. Каждое сечение описывается массивом радиус-векторов, текущие значения которых рассчитываются для каждого сечения в течение всего цикла обработки на основании методики, представленной в [4]. Погрешности обработки рассчитываются на основании данных о значениях радиусов для каждого сечения. Необходимо также отметить, что модель съема металла позволяет рассчитать число ходов (время обработки), необходимое для обработки, удовлетворяющей требованиям чертежа детали по качеству и точности.

В качестве метода оптимизации выбран метод динамического программирования, не требующий предварительного построения области допустимых значений управляющих параметров, не чувствительный к характеру целевой функции и ее ограничениям [5], что, в свою очередь, позволяет наложить на процесс ограничения, определение которых возможно только в конце цикла (ограничения по точности, шероховатости, безприжоговости). Использование данного метода позволяет в значительной мере сократить время обработки данных: полный перебор вариантов решений заменяется целенаправленным.

Пространственное представление управляющей программы трехступенчатого цикла внутришлифовальной обработки в 3-мерном пространстве: «радиальная подача  $S_{\text{рад}}$  (мм/ход), скорость осевой подачи  $V_{\text{Сос}}$  (мм/мин) и припуск  $\Pi$  (мм)» представлено на рис. 1. Траектория управляющей программы цикла показана штриховой линией в виде

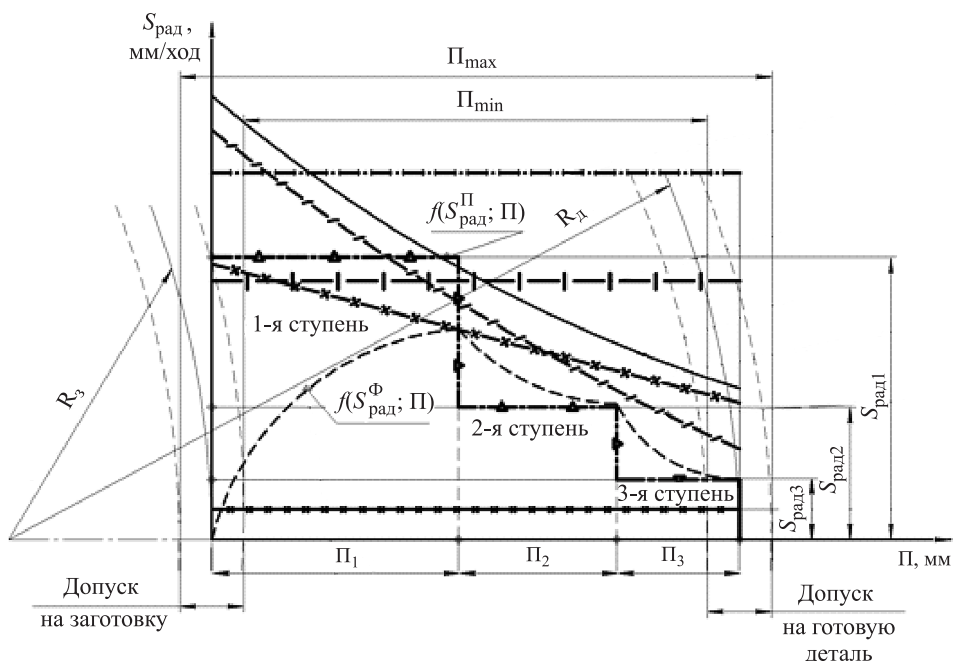


**Рис. 1.** Пространственное представление трехступенчатого цикла внутришлифовальной обработки с наложением областей ограничений:

- $f(S_{\text{рад}}; \Pi)$ ; —○—  $f(S_{\text{рад}}; V_{\text{Сос}})$ ; —○—  $f(V_{\text{Сос}}; \Pi)$ ; - - - пространственная траектория управляющей программы циклов; - - - - пространственное представление фактической радиальной подачи; —•—•— ограничение по максимальной подаче станка; —|— ограничение по осепаемости круга; —|— ограничение по прижогу; —×— ограничение по точности размеров; —/— ограничение по шероховатости; —•—•— ограничение по минимальной подаче станка

пространственного ступенчатого изменения радиальной и осевой подач (задаваемых с пульта управления станком) в зависимости от снимаемой части припуска. Оптимизация цикла шлифования состоит в подборе оптимального сочетания таких значений подач (радиальной и осевой) и снимаемой части припуска на всех ступенях цикла, при которых основное время минимально при условии обеспечения заданной точности и качества обрабатываемой поверхности. Изменения величины фактически снятого припуска из-за упругих деформаций технологической системы показано штрихпунктирной линией. Различные технологические ограничения, накладываемые на пространственную область допустимых значений фактически снятого припуска, показаны на рис. 1 в виде криволинейных поверхностей, разграниченных разноструктурными линиями.

Для упрощения визуализации взаимосвязи подач, технологических ограничений и припуска со ступенчатой структурой цикла внутреннего шлифования на рис. 2 приведена их проекция на плоскость радиальная подача  $S_{\text{рад}}$  (мм/ход) — припуск  $\Pi$  (мм). На рис. 2 видно, что на протяжении всего цикла шлифования текущее значение фактически снятого припуска ограничивается комплексом технологических огра-



**Рис. 2.** Двухмерное представление трехступенчатого цикла внутришлифовальной обработки с наложением областей ограничений:

- — фактическая радиальная подача; — — — — ограничение по максимальной подаче станка; —|— — ограничение по осыпаемости круга; — — — — ограничение по прижогу;
- \*— — ограничение по точности размеров; —/— — ограничение по шероховатости; — — — — ограничение по минимальной подаче станка

ничений (требуемая точность получаемого размера, шероховатость, неприжоговость обрабатываемой поверхности, осыпаемость круга и др.). Границы областей этих ограничений для разных деталей с различными параметрами поверхности отверстия заготовки (по точности, исходному радиальному биению) и готовой детали (по точности диаметрального размера, неприжоговости и шероховатости обрабатываемой поверхности) могут иметь самое разнообразное взаиморасположение и разные очертания [6].

Максимальное значение фактически снятого припуска зависит от разных ограничений. Например, ограничение по осыпаемости круга работает на первой ступени цикла, устанавливая максимально допустимое значение фактически снятого припуска. Ограничение по шероховатости проверяется на последней ступени цикла, при этом определяется величина конечной подачи. Ограничение по требуемой точности обработки действует на протяжении всех ступеней цикла, снижая фактически снятый припуск до значений, удовлетворяющих требованиям чертежа по точности детали [7, 8]. При проектировании цикла шлифования для обеспечения максимальной производительности операции необходимо стремиться к тому, чтобы на протяжении всего цикла текущее значение фактически снятого припуска было максимально допустимым. Для этого следует использовать ближайшее к области ограничений значение фактически снятого припуска. В этом случае фактически снятый припуск будет наибольшим, а цикл производительнее. Такое приближение осуществляется ступенчатым изменением радиальной и осевой подач.

Применение метода динамического программирования в методике проектирования оптимальных циклов позволяет:

- с математической точностью проектировать оптимальные циклы внутреннего шлифования;

- учитывать любое количество технологических ограничений целевой функции;

- проводить многопараметрическую оптимизацию управляющей программы для станков с ЧПУ на операциях внутреннего шлифования. Результатом оптимизации являются оптимальные значения радиальной подачи  $S_{\text{рад}}$  на всех ступенях цикла; оптимальные значения осевой подачи  $V_{\text{ос}}$  на всех ступенях цикла; оптимальное распределение снимаемого припуска по ступеням цикла для радиальной подачи  $S_{\text{рад}}$  и осевой подачи  $V_{\text{ос}}$ , при которых обеспечивается минимальное время цикла (или другой целевой функции);

- сократить расходы и время, затрачиваемые на подбор оптимальных значений режимов обработки на производстве, так как полный перебор вариантов решений заменяется целенаправленным поиском.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] D'yakov A.A., Shipulin L.V. Selecting the cutting conditions for plain grinding by the periphery of wheel. *Russian Engineering Research, Allerton Press, Inc*, 2014, vol. 34, no. 12, pp. 804–816.
- [2] Новоселов Ю.К. *Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке*. Севастополь, СевНТУ, 2012, 286 с.
- [3] Nathan R.D., Vijayaraghavan L., Krishnamurthy R. Intelligent estimation of burning limits to aid in cylindrical grinding cycle planning. *Heavy Vehicle Systems*, 2001, vol. 8, iss. 1, pp. 48–59.
- [4] Переверзев П.П., Попова А.В., Пименов Д.Ю. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с упругими деформациями технологической системы. *СТИН*, 2014, № 9, с. 23–27.
- [5] Беллман Р. *Динамическое программирование*. Москва, Изд-во иностранной литературы, 1960, 400 с.
- [6] Переверзев П.П. Моделирование и оптимизация управляющих программ в автоматизированном машиностроительном производстве. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение*, 2012, № 12 (271), с. 152–157.
- [7] Попова А.В. Принципы проектирования высокопроизводительных циклов на примере внутреннего шлифования. *СТИН*, 2014, № 6, с. 17–22 с.
- [8] Переверзев П.П., Попова А.В. Разработка методики оптимизации циклов внутришлифовальной обработки в многомерном пространстве. *Современные проблемы теории машин*, 2015, № 3, с. 22–25.

Статья поступила в редакцию 12.10.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Акинцева А.В., Переверзев П.П. Проектирование оптимальных циклов внутришлифовальной обработки в многомерном пространстве управляющих параметров. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/meng/1421.html>

**Акинцева Александра Викторовна** — ассистент кафедры технологии обработки материалов, филиал Южно-Уральского государственного университета в г. Кыштыме. e-mail: [akintseva\\_av@mail.ru](mailto:akintseva_av@mail.ru)

**Переверзев Павел Петрович** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения Южно-Уральского государственного университета. e-mail: [dnpppp@yandex.ru](mailto:dnpppp@yandex.ru)

## Designing optimal processing cycles of intragrinding in a multidimensional space of controlling parameters

© A.V. Akintseva, P.P. Pereverzev

South Ural State University (national research university),  
Branch in Kyshtym town, 456870, Russia

*The article considers basic principles for designing optimal cycles for internal grinding in a multidimensional space of controlling parameters: axis feed rate, radial feed, etc. For the first time in order to optimize machining process we used such mathematical optimization method as a method of dynamic programming. Its application allows to take into account the full range of technological limitations (on the allowable error of size, on the allowable depth of burn mark and etc.), as well as to replace the exhaustive search of solutions by the targeted one. This reduces the costs and time it takes at manufacture for selection of the optimal characteristics of processing conditions.*

**Keywords:** internal grinding, optimization of machining process, cycles, dynamic programming.

### REFERENCES

- [1] D'yakonov A.A., Shipulin L.V. Selecting the cutting conditions for plain grinding by the periphery of wheel. *Russian Engineering Research*, Allerton Press, Inc, 2014, vol. 34, no. 12, pp. 804–816.
- [2] Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke* [The dynamics of shaping surfaces during abrasive processing]. Sevastopol, Sevastopol State University, 2012, 286 p.
- [3] Nathan R.D., Vijayaraghavan L., Krishnamurthy R. Intelligent estimation of burning limits to aid in cylindrical grinding cycle planning. *Heavy Vehicle Systems*, 2001, vol. 8, iss. 1, pp. 48–59.
- [4] Pereverzev P.P., Popova A.V., Pimenov D.Yu. *STIN — Russian Engineering Research*, 2014, no. 9, pp. 23–27.
- [5] Bellman R. (1957) *Dynamic programming*. [in Russian: Bellman R. Dinamicheskoe programmirovaniye. Moscow, Izdatelstvo inostranoi literatury, 1960, 400 p.].
- [6] Pereverzev P.P. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Mashinostroyeniye — Bulletin of the South Ural State University, Series "Mechanical engineering industry"* 2012, № 12 (271), c. 152–157.
- [7] Popova A.V. *STIN — Russian Engineering Research*, 2014, no. 6, pp. 17–22 c.
- [8] Pereverzev P.P., Popova A.V. *Sovremennyye problemy teorii mashin — Modern problems of the theory of machines*, 2015, no. 3, pp. 22–25.

**Akintseva A.V.**, assistant lecturer of the Department “Technologies of Material Processing” at the Branch of the South Ural State University in Kyshtym town. e-mail: akintseva\_av@mail.ru

**Pereverzev P.P.**, Dr. Sci. (Eng.), professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at the South Ural State University. e-mail: dtntppp@yandex.ru