

УДК 621.923

В.В. ПОЛТАВЕЦ (канд. техн. наук, доц., vvardon@mail.ru)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

**РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО
МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ
ПУТЁМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРОЦЕССА**

Описано развитие экспериментально-теоретического метода оптимизации режимов шлифования путём использования обобщенного показателя процесса, которое позволило упростить математическую модель оптимального режима шлифования за счёт уменьшения количества математических выражений, описывающих совокупность технических ограничений.

Ключевые слова: Шлифование, оптимальный режим, техническое ограничение, целевая функция, режущая способность, глубина резания, подача на врезание

Введение

Среди всех используемых на практике методов определения оптимальных или рациональных режимов резания наибольшую научную ценность и наибольшее практическое применение имеет аналитический способ определения режимов. Этот способ основывается на использовании функциональных зависимостей между входными факторами и выходными параметрами, характеризующими процесс обработки. Совокупность этих зависимостей образует математическую модель процесса обработки.

С использованием математической модели процесса определение режимов резания аналитическим способом при шлифовании выполняется в три этапа [1]:

а) составление системы уравнений, описывающих технические ограничения, налагаемые на режим резания требованиями к детали, станком, инструментом и условиями производства;

б) математическое описание целевой функции, т.е. функции, выражающей цель оптимизации;

в) совместное рассмотрение технических ограничений и целевой функции и определение на этой основе оптимального режима шлифования.

Математические выражения, описывающие технические ограничения, однотипны и представляются в виде неравенств [1]:

$$Z^* < (>) Z(v, v_1, t, \dots),$$

в левой части которых приведено заданное (предельное) значение какой-либо ограничивающей величины или параметра Z^* , а в правой – фактическое значение этой величины или параметра при той или иной комбинации элементов режима резания и других условий обработки (v – скорость круга, v_1 – скорость подачи заготовки, t – глубина резания и др).

Технические ограничения, налагаемые на режим резания при шлифовании требованиями к изделию (ТИ), следующие [1]:

– предельно допустимая высота неровностей профиля обработанной поверхности Ra^* (ТИ1);

– требуемая точность детали после шлифования (допуск на размер шлифованной поверхности δ^*) (ТИ2);

– температура шлифуемой поверхности Θ_{\max}^* , предельно допустимая с точки зрения прижогов, остаточных напряжений или других показателей качества поверхностного слоя (ТИЗ).

Технические ограничения, налагаемые на режим резания станком (ТС) [1]:

- мощность привода шлифовального круга N^* (ТС1);
- наибольшая и наименьшая частоты вращения шпинделя (n_{\max}^* , n_{\min}^*) (ТС2);
- наибольшее и наименьшее значения продольной и поперечной подач ($v_{1\max}^*$, $v_{1\min}^*$, $S_{2\max}^*$, $S_{2\min}^*$) (ТС3).

Технические ограничения, налагаемые на режим резания шлифовальным кругом (ТК) [1]:

- требуемая стойкость инструмента T^* (ТК1);
- предельная температура на режущих зёрнах Θ_3^* (ТК2);
- прочность круга v_{\max}^* (ТК3).

Целевые функции представляют математическое описание цели, с которой производят оптимизацию режима шлифования. Такими целями (критериями оптимизации) могут быть: наименьшая себестоимость обработки, наибольшая производительность, минимальные затраты на эксплуатацию шлифовального инструмента и другие [2].

Математические выражения технических ограничений ТИ1 - ТИЗ, ТС1 - ТС3, ТК1 - ТК3 совместно с математической записью целевой функции представляют математическую модель классического поиска оптимального режима шлифования (рис. 1).

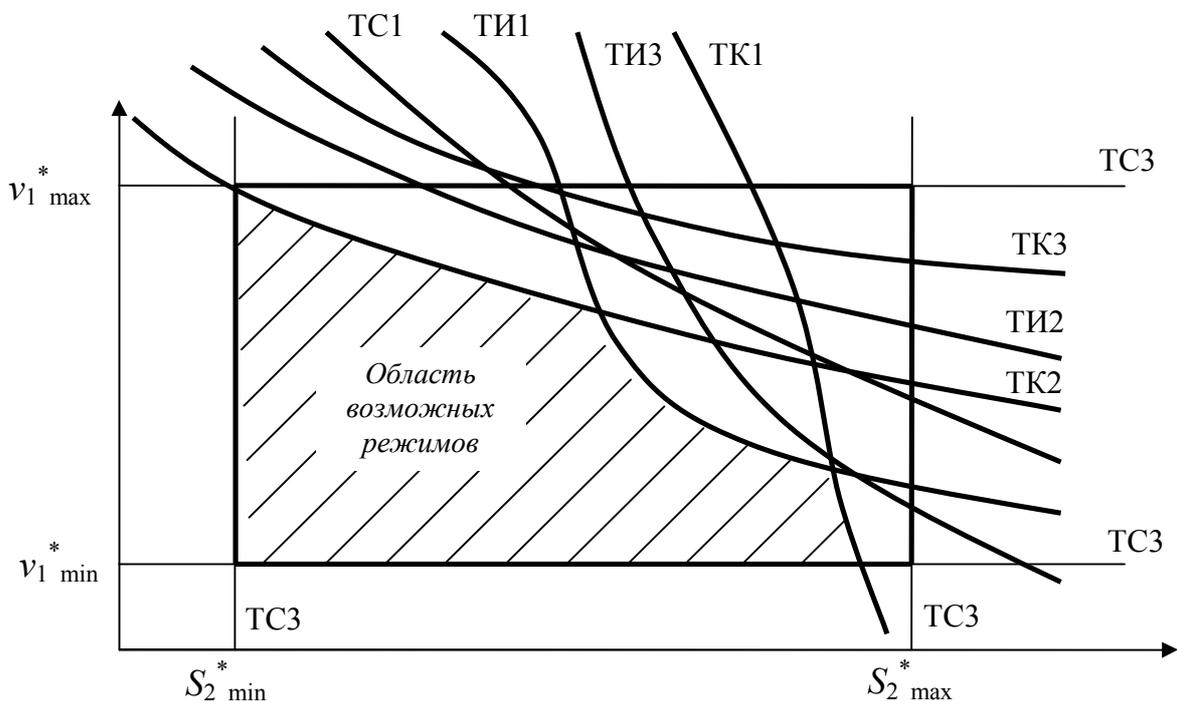


Рис. 1. Принципиальная схема области возможных режимов резания при шлифовании [1]

ТИ1-ТИЗ – технические ограничения, налагаемые на режим резания изделием;

ТС1, ТС3 – технические ограничения, налагаемые на режим резания станком;

ТК1-ТК3 – технические ограничения, налагаемые на режим резания шлифовальным кругом

Поскольку частота вращения шпинделя шлифовального станка и, соответственно, скорость круга чаще всего не являются управляемым параметром процесса обработки, то, как видно из рис. 1, техническое ограничение по частоте вращения шпинделя ТС2 в математическую модель поиска оптимального режима шлифования классическим методом не включено.

Если ограничения и целевая функция представлены в виде линейных многочленов, то решение этой системы выполняют методом линейного программирования [3]. Если же выражения для ограничений и целевой функции нельзя линеаризовать, используют нелинейные методы оптимизации, в частности, методы многофакторного планирования [4], теории функциональных определителей и метод множителей Лагранжа [2].

Методика определения режимов, изложенная в [1], подразумевает проведение комплекса экспериментальных исследований с целью получения зависимостей, описывающих технические ограничения ТИ1, ТИ2, ТИ3, ТК1, ТК2. Это обуславливает её высокую трудоёмкость.

Целью данной работы является развитие описанной выше классической экспериментально-теоретической методики оптимизации режимов шлифования на основе использования обобщенного показателя процесса обработки, включающего в себя сразу несколько технических ограничений из рассмотренной их совокупности, что приведёт к снижению трудоёмкости поиска оптимальных режимов.

Основное содержание работы

Сущность предлагаемого направления развития классической теоретико-экспериментальной методики оптимизации режимов алмазно-абразивной обработки состоит в уменьшении количества математических выражений, образующих математическую модель оптимального режима за счёт использования обобщенного показателя процесса шлифования. В качестве обобщенного показателя процесса шлифования нами предлагается новое понятие – мгновенная текущая лимитированная режущая способность шлифовального круга, которая представляет собой количество сошлифованного материала в любой момент времени работы круга на режимах, удовлетворяющих лимитирующему техническому ограничению [5].

Приведём обоснование использования текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга в качестве обобщенного показателя процесса. Сущность этого показателя в явном виде проявляется при упругой схеме обработки, когда величина съёма обрабатываемого материала является переменной во времени.

Известно, что, с одной стороны, закономерность изменения режущих свойств круга при обработке по упругой схеме отражает изменение производительности обработки в условиях нестационарности процесса. С другой стороны, лимитированная режущая способность круга отражает усилие поджима заготовки к рабочей поверхности круга (РПК), которое выступает одновременно в качестве технического ограничения ТИ3, налагаемого на режимы обработки деталью (температура фазово-структурных превращений в поверхностном слое заготовки или другие показатели качества поверхностного слоя), а также ограничений ТК2 и ТК3, налагаемых на режимы обработки инструментом (температура окисления алмазов при алмазном шлифовании, прочность зёрен сверхтвёрдых материалов (СТМ), прочность шлифовального круга).

Усилие поджима заготовки к РПК при обработке по упругой схеме, удовлетворяющее перечисленным ограничениям, рассчитывается аналитически или же

определяется экспериментально.

Как видно из вышесказанного, текущая лимитированная режущая способность круга аккумулирует в себе сразу три технических ограничения, которые в классическом методе поиска оптимальных режимов шлифования описывают несколькими отдельными уравнениями (ограничения ТИЗ, ТК2, ТК3). На основе этого можно утверждать, что текущая лимитированная режущая способность шлифовального круга при описании процесса алмазно-абразивной обработки и оптимизации его режимов выступает в качестве обобщенного (интегрального) показателя процесса.

Техническое ограничение ТИ2 по требуемой точности детали после шлифования для упругой схемы обработки можно не учитывать, так как эта схема более часто применяется для таких видов обработки, при которых требования по точности размеров изделия не предъявляются (например, затачивание инструмента), а определяющими являются требования по состоянию обработанной поверхности (например, отсутствие дефектов поверхностного слоя).

При шлифовании с управляющими воздействиями на рабочую поверхность шлифовального круга для поддержания его высокой режущей способности структура комплекса используемых технических ограничений существенно изменяется, так как оптимизации подвергаются как режимы шлифования, так и режимы управляющих воздействий. Наличие управляющих воздействий даёт возможность исключить из совокупности ограничений ограничение по стойкости круга (ТК1), так как появляется возможность варьировать этой величиной в зависимости от вида и условий обработки.

Прочность современных кругов из сверхтвёрдых материалов такова, что условия превышения допустимых напряжений в корпусе круга за счёт высоких режимов на подавляющем большинстве современных шлифовальных станков практически недостижимы. Если же в процессе обработки возникнут большие силы резания, то это в первую очередь приведёт к невыполнению технических ограничений, налагаемых на режим резания требованиями к изделию (ТИ1, ТИ2, ТИ3). Соответственно, кривая ТК3 в оптимизационном поле (см. рис. 1) заведомо будет расположена выше любой из кривых ТИ1, ТИ2, ТИ3, и ограничение по прочности круга ТК3 также можно исключить из комплекса включаемых в модель ограничений.

Таким образом, при шлифовании кругами из СТМ по упругой схеме с управляющими воздействиями на рабочую поверхность круга математическая модель процесса определения режимов резания аналитическим способом будет иметь следующий вид (рис. 2):

1. Совокупность технических ограничений, состоящая из трёх компонентов:

а) технические ограничения, налагаемые на режим резания при шлифовании требованиями к изделию (ТИ), которые включают в себя предельно допустимую высоту неровностей профиля обработанной поверхности Ra (ТИ1);

б) технические ограничения, налагаемые на режим резания станком (ТС):

– мощность привода шлифовального круга N^* (ТС1);

– наибольшая и наименьшая частоты вращения шпинделя (n_{\max}^* , n_{\min}^*) (ТС2);

– наибольшее и наименьшее значения продольной и поперечной подач ($v_{1\max}^*$, $v_{1\min}^*$, $S_{2\max}^*$, $S_{2\min}^*$) (ТС3).

б) закон изменения во времени текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга (ТЛРСШК) для конкретных условий обработки, выступающий в качестве обобщенного параметра процесса обработки, который аккумулирует технические ограничения по температуре шлифуемой поверхности ТИЗ и температуре на зёрнах сверхтвёрдого материала ТК2.

2. Целевая функция, в качестве которой в большинстве случаев удобнее всего принять удельную технологическую себестоимость процесса шлифования, т.е. затраты на осуществление процесса обработки, приходящиеся на единицу изготавливаемой продукции или на единицу объема сошлифованного материала.

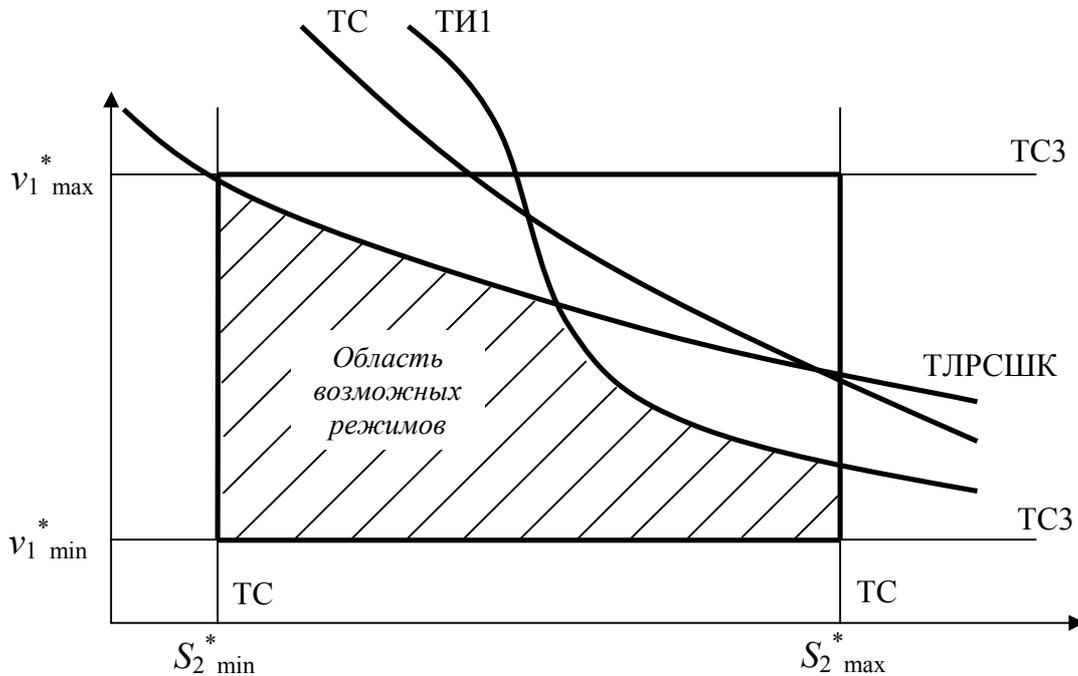


Рис. 2. Схема области возможных режимов резания при шлифовании по упругой схеме с управляющими воздействиями на РПК

ТИ1 – техническое ограничение по предельно допустимой высоте неровностей профиля обработанной поверхности

ТС1, ТС3 – технические ограничения, налагаемые на режим резания станком

ТЛРСШК – техническое ограничение, определяемое законом изменения во времени текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга

Ограничения, налагаемые требуемыми параметрами шероховатости обработанной поверхности, можно найти как теоретически [6], так и экспериментальным путем. Ограничения, налагаемые на режим резания станком, полностью определяются его паспортными данными.

При шлифовании по упругой схеме с поддержанием постоянной радиальной силы поджима заготовки к шлифовальному кругу, которая уравнивает радиальную составляющую силы резания (сила поджима $P_n = P_y$), снижение со временем режущей способности РПК проявляется через изменение глубины шлифования. Таким образом, эволюция подсистемы резания технологической системы алмазно-абразивной обработки во времени в результате ухудшения режущих свойств РПК при обработке по упругой схеме однозначно описывается изменением во времени фактической глубины шлифования $t_\phi = f(\tau)$.

Закономерность изменения глубины шлифования t_ϕ во времени обработки τ по упругой схеме вследствие ухудшения режущих свойств РПК в результате процессов изнашивания зёрен, засаливания межзёренного пространства, засаливания микрорельефа зёрен и т.п. описывается экспоненциальным выражением вида:

$$t_{\phi}(\tau) = t_{ycm} + \Delta t \cdot \exp(\alpha \tau), \quad (1)$$

где t_{ycm} – установившаяся глубина шлифования;

$\Delta t = t_0 - t_{ycm}$ – амплитуда снижения глубины шлифования;

t_0 – исходная глубина шлифования рельефом РПК, параметры которого сформированы после подготовки шлифовального круга к работе (например, электроэрозионной правкой);

α – эмпирический коэффициент.

Уравнение (1) отражает закон изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга во времени при обработке по упругой схеме. Этот закон имеет аналогичный вид и отличается от зависимости (1) только размерностью. В дополнение к этому уравнение (1) является также передаточной функцией, позволяющей обеспечить одинаковые условия работы зёрен шлифовального круга при упругой и кинематически аналогичной жёсткой схемах обработки.

Для кинематически аналогичной жёсткой схемы шлифования оптимальными будут режимы, при которых обеспечивается изменение во времени подачи на врезание, соответствующее закономерности (1) или (при отсутствии технической возможности добиться идентичности подачи на врезание с глубиной резания для упругой схемы) достаточно близкое к этой закономерности [7].

Выводы

1. Текущая лимитированная режущая способность шлифовального круга является обобщенным показателем процесса шлифования, который аккумулирует в себе несколько технических ограничений, используемых при поиске оптимальных режимов шлифования аналитическим способом.

2. Шлифование с одновременными управляющими воздействиями на рабочую поверхность шлифовального круга даёт возможность исключить из совокупности ограничений ограничение по стойкости круга, так как появляется возможность варьировать стойкостью в зависимости от вида и условий обработки.

3. Развитие теоретико-экспериментальной методики оптимизации режимов алмазно-абразивной обработки путём использования обобщенного показателя процесса позволяет упростить математическую модель оптимального режима шлифования за счёт уменьшения количества математических выражений, описывающих совокупность технических ограничений.

Список литературы

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник/ Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

2. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.

3. Книппер Э.Е. Назначение режимов резания с применением ЭВМ / Э.Е. Книппер. – Брянск: БГТУ, 1997. – 179 с.

4. Ящерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Минск: Вышэйшая школа, 1990. – 512 с.

5. Полтавец В.В. Описание процесса алмазного шлифования ванадиевых инструментальных сталей по упругой схеме с использованием понятия текущей лимитированной режущей способности круга/ В.В. Полтавец // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і

машинознавство. Випуск 92. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – С. 92-98.

6. Матюха П.Г. Исследование высоты неровностей профиля поверхности резания при шлифовании / П.Г. Матюха, Л.К. Терехова // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1990. – Вып. 44. – С. 114-121.

7. Матюха П.Г. Обобщенные режимы процесса шлифования, обеспечивающие стабильные показатели качества / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 7 (166). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – С. 39-45.

Рецензент: Калафатова Л.П.

Надійшла до редколегії: 09.04.2011р.

В.В. ПОЛТАВЕЦЬ

Донецький національний технічний університет

РОЗВИТОК ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНОГО МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ШЛІФУВАННЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО ПОКАЗНИКА ПРОЦЕСУ

Описано розвиток експериментально-теоретичного методу оптимізації режимів шліфування шляхом використання узагальненого показника процесу, який дозволив спростити математичну модель оптимального режиму шліфування за рахунок зменшення кількості математичних виразів, що описують сукупність технічних обмежень.

**Шліфування, оптимальний режим, технічне обмеження, цільова функція,
різальна здатність, глибина різання, подача на врзання**

V.V. POLTAVETS

Donetsk National Technical University

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL METHOD OF GRINDING CONDITIONS OPTIMIZATION BY USE OF INTEGRATED PROCESS INDICATOR

Development of experimental and theoretical method of grinding conditions optimization by use of integrated process indicator is described. This development has allowed to simplify the mathematical model of optimum grinding condition by means of reduction of quantity of mathematical expressions describing the set of technical restrictions.

**Grinding, optimum condition, technical restriction, criterion function,
cutting capacity, cutting depth, straight-in down feed**