

УДК 621.923.01

## **ВИРТУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ НА ПРИМЕРЕ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ**

*А.В. Акинцева*

Виртуальное прогнозирование точности обработки является актуальной задачей не только для современного машиностроения, но и для создания эффективных производственных киберфизических систем на базе концепции «Индустрия 4.0». Прогнозирование точности возможно осуществить при помощи методики расчета погрешности обработки и более подробно представленной в данной статье модели съема металла, являющейся моделью формообразования шлифуемой поверхности, которая учитывает особенности обработки в реверсных и не реверсных зонах и позволяет вести расчет текущих значений радиусов в любом сечении обрабатываемой поверхности в течение всего цикла шлифования для заданных условий обработки. На основе расчетных значений радиусов обрабатываемой поверхности строится модель размеров поверхности, чтобы производить оценку погрешностей диаметрального размера и погрешности формы и расположения поверхностей с одновременной оценкой производительности операции внутреннего шлифования. Описанную в данной статье модель съема металла для процесса внутреннего шлифования возможно использовать не только для прогнозирования точности обработки для заданного цикла обработки, но и для проектирования оптимального по быстродействию цикла, т.е. модель служит основой для создания методологии проектирования оптимального цикла.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, погрешность, точность обработки.

К операциям внутреннего шлифования предъявляются высокие требования по точности обработки, которые нормируют не только погрешность диаметрального размера, но и погрешность формы и расположения поверхностей. Обеспечение стабильности точности обработки для партии заготовок является сложной задачей по ряду причин. Во-первых, наличие упругих деформаций технологической системы приводит к тому, что программная радиальная подача в значительной степени отличается от фактической подачи. Во-вторых, наличие реверсных зон, которые характеризуются нестабильностью процесса съема припуска во входном и выходном сечениях заготовки из-за мгновенной смены различных этапов и видов шлифования, что и обуславливает различную точность обработки по всей длине заготовки. В-третьих, наличие нестационарности технологического

процесса, как на протяжении цикла обработки детали (переменная площадь контакта круга с заготовкой, переменные режимы резания в реверсивных зонах), так и при обработке партии заготовок (затупление зерен круга, колебание припуска, исходное радиальное биение заготовки, изменение диаметра шлифовального круга).

Много научных работ выполнено в области повышения качества обработки в автоматических циклах шлифования [1–6 и др.]. Анализ литературных источников показал, что, несмотря на имеющуюся огромную теоретическую и практическую научную базу в области повышения точности и производительности операций шлифования, выполняемых на станках с ЧПУ в автоматических циклах, до сих пор отсутствуют научные разработки аналитических широкодиапазонных моделей сил резания, моделей съема припуска с обрабатываемой поверхности и методики прогнозирования точности изготовления для операций внутреннего шлифования. Следовательно, отсутствует теоретическая возможность создания производственных киберфизических систем на базе концепции «Индустрия 4.0» [7], т.к. без моделей невозможно решение задачи по виртуальному проектированию оптимальных циклов шлифования и прогнозированию обеспечиваемой ими точности обработки.

Для повышения стабильности показателей точности обработки в партии детали без потери производительности в рамках концепции «Индустрия 4.0» [7] на примере операций внутреннего шлифования разработана модель съема металла, которая позволяет прогнозировать процесс формообразования обрабатываемой поверхности по всей длине заготовки на протяжении всего цикла. Модель съема металла описывает изменение размеров радиусов обрабатываемой поверхности по всей длине заготовки, начиная от их начального значения в заготовке до конечного значения готовой детали в конце цикла шлифования.

Основой модели съема металла является силовая модель процесса, которая устанавливает взаимосвязь силы резания с параметрами цикла через упругие деформации технологической системы. Анализ источников показал, что опубликовано достаточно много работ, посвященных разработке аналитической модели силы резания при шлифовании [8–9 и др.]. Однако в этих и многих других работах отсутствуют аналитические закономерности изменения силы резания и формообразования шлифуемой поверхности в автоматических циклах при управлении двумя подачами (радиальной и осевой). Не рассмотрены вопросы влияния переменных технологических факторов на силу резания в цикле шлифования. Поэтому была разработана силовая модель процесса внутреннего шлифования, которая основывается на принципе равенства работ действующих сил резания и сил сопротивления обрабатываемого металла пластической деформации [10]. Более подробно с силовой моделью процесса внутреннего шлифования можно озна-

комиться в [11]. В данной статье представлена только модель радиальной составляющей силы резания, необходимая для разработки модели съема металла:

$$P_{Yz,i} = M_1 S_{z,i} + M_2 \sqrt{S_{z,i}}, \quad (1)$$

где  $S_{z,i}$  – радиальная подача на  $i$ -м ходе  $z$ -й ступени, мм/дв.ход;  $z$  – порядковый номер ступени цикла;  $i$  – порядковый номер хода шлифовального круга;  $M_1$  и  $M_2$  – аналитические коэффициенты, рассчитываемые по следующим формулам:

$$M_1 = \frac{1,86\sigma_i\pi dV_{Soc}}{\sqrt{(V_1 + V_2)^2 + V_{Soc}^2}}, \quad (2)$$

$$M_2 = \frac{\sigma_i\eta T}{3} \sqrt{\frac{dD}{d-D}}, \quad (3)$$

где  $V_1$  – окружная скорость круга, м/с;  $V_2$  – скорость вращения заготовки, м/мин;  $\sigma_i$  – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр заготовки, мм;  $D$  – диаметр круга, мм;  $T$  – общая высота шлифовального круга, мм;  $\eta$  – степень затупления круга.

С целью учета исходного радиального биения рассматриваемое сечение заготовки принимается в форме эллипса, описанного массивом радиусов. При обработке некруглой заготовки в зависимости от исходного профиля на каждом радиусе будут изменяться радиальная составляющая силы резания, а соответственно и фактическая радиальная подачи. Отметим для того чтобы точка контакта круга с заготовкой совпадала с осью графиков, изображенных на рис., круг принимается условно повернутым.

Сумма радиальной подачи на  $i$ -м ходе  $z$ -й ступени (замкнутый контур на рис. выделен красной линией) находится по формуле:

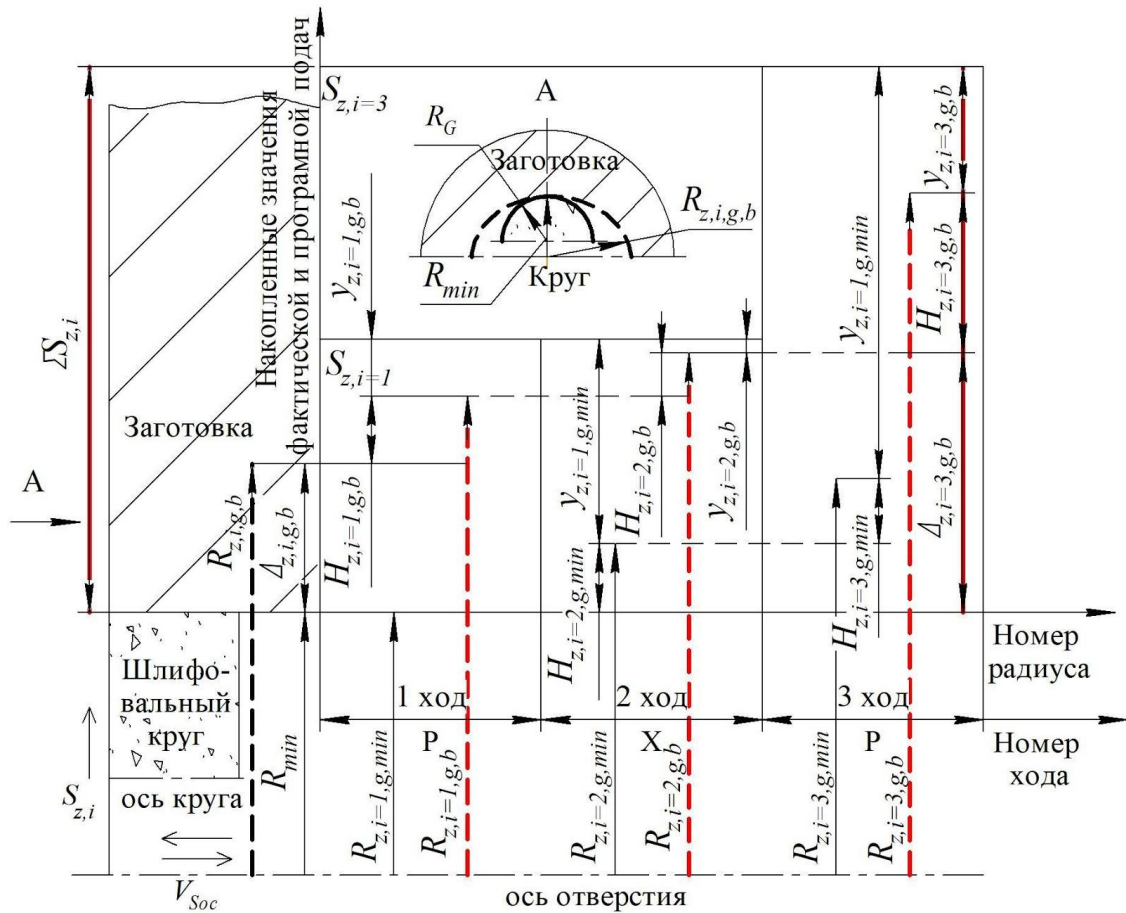
$$\sum S_{z,i} = H_{z,i,g,b} + y_{z,i,g,b} + \Delta_{z,i,g,b}, \quad (4)$$

где  $H_{z,i,g,b}$  – фактическая радиальная подача на  $b$ -м радиусе  $g$ -го сечения на  $i$ -м ходе  $z$ -й ступени, мм;  $g$  – порядковый номер сечения заготовки;  $b$  – порядковый номер радиуса в  $g$ -м сечении заготовки;  $y_{z,i,g,b}$  – упругая деформация оси круга на  $b$ -м радиусе  $g$ -го сечения на  $i$ -м ходе  $z$ -й ступени, мм.

Из уравнения упругой линии оси шлифовального шпинделя получена формула для нахождения упругих деформаций оси круга:

$$y_{z,i} = P_{Yz,i} A_s, \quad (5)$$

где  $A_s$  – параметр, определяющий жесткость технологической системы, мм/Н.



Расчетная схема взаимосвязи подач и упругих деформаций  
оси круга с учетом исходного радиального биения  
в цикле внутреннего шлифования

Исходное радиальное биение заготовки ( $\Delta_{z,i,g,b}$ , мм) для  $b$ -го радиуса  $g$ -го сечения на  $i$ -м ходе  $z$ -й ступени находится по формуле (6).

$$\Delta_{z,i,g,b} = R_{z,i-1,g,b} - R_{\min} \quad (6)$$

где  $R_{\min}$  – минимальное значение радиуса заготовки, мм;  $R_{z,i-1,g,b}$  – значение  $b$ -го радиуса  $g$ -го сечения на предшествующем ходе  $z$ -й ступени, мм.

Подставив в формулу (5) выражение (1), найдем упругую деформацию круга на  $b$ -ом радиусе  $g$ -го сечения на  $i$ -м ходе  $z$ -й ступени:

$$y_{z,i,g,b} = A_5 M_1 H_{z,i,g,b} + A_5 M_2 \sqrt{H_{z,i,g,b}} \quad (7)$$

Найдем фактическую радиальную подачу на  $b$ -м радиусе  $g$ -го сечения на  $i$ -м ходе  $z$ -й ступени, подставив в формулу (4) выражения (6) и (7).

$$H_{z,i,g,b} = \left[ \frac{-A_5 M_2}{2(1 + M_3 \lambda)} + \sqrt{\left( \frac{A_5 M_2}{2(1 + M_3 \lambda)} \right)^2 + \frac{\sum S_{z,i} - R_{z,i-1,g,b} + R_{\min}}{1 + M_3 \lambda}} \right]^2 \quad (8)$$

Таким образом, формула (8) устанавливает закономерности изменения в течение цикла обработки значений фактической радиальной подачи и радиальной составляющей силы резания при заданных значениях программной подачи с учетом податливости технологической системы и исходного радиального биения заготовки.

Наличие реверсных зон при обработке входного и выходного сечений заготовки приводит к значительным колебаниям силы резания, а значит и фактической радиальной подачи. Поэтому для прогнозирования точности обработки по всей длине заготовки была разработана модель съема металла, которая учитывала особенности съема припуска в реверсных зонах: мгновенную смену различных этапов и видов обработки, наличие перебега круга, наличие этапов «вынужденного выхаживания» при реверсе круга за счет упругих деформаций технологической системы и др. [12]. Для моделирования съема металла на таких этапах, как врезание и выхаживание, возникающих из-за задержки во времени между реверсными переключениями подач, используется модель силы резания и формула фактической радиальной подачи для процесса внутреннего врезного шлифования [12].

Таким образом, можно сказать, что совокупность формулы (8) и формул, представленных в работе [12], представляет собой широкодиапазонную аналитическую модель процесса съема припуска на операции внутреннего шлифования, позволяющей вести расчет текущих значений всех видов подач, силы, упругих деформаций и радиусов поверхности для любого заданного цикла шлифования, а также заданных условий обработки и переменных технологических факторов. Отметим, что модель съема металла для процесса внутреннего шлифования служит основой в методологии проектирования оптимального цикла [13]. Результатом применения разработанной методологии являются оптимальные значения радиальной подачи и скорости осевой подачи на всех ступенях цикла, оптимальное распределение снимаемого припуска по ступеням цикла управления для радиальной подачи и осевой подачами, при которых обеспечивается минимальное основное время.

При виртуальном прогнозировании точности обработки для заданного цикла шлифования проводится сравнение расчетных значений показателей погрешности с соответствующими допустимыми значениями, указанными на чертеже детали. По расчетному профилю каждого сечения в конце цикла шлифования определяются прогнозные значения погрешностей формы и расположения (отклонение от круглости, радиальное биение и др.), а по суммарному профилю обрабатываемой поверхности определяется отклонение от цилиндричности, полное радиальное биение и др. Методика расчета погрешности обработки приведена в статье [14]. Полученные значения показателей погрешности обработки сравниваются с соответствующими допустимыми значениями, указанными на чертеже детали:

$$D_{z,i,g}^{\max} - D_{z,i,g}^{\min} \leq [\delta], \quad (9)$$

$$R_{z,i,g,b}^{\max} - R_{z,i,g,b}^{\min} \leq [\delta_p], \quad (10)$$

$$\Delta_{откл} + \Delta_{проф} \leq [\delta_k], \quad (11)$$

$$\Delta_{откл}^* + \Delta_{проф}^* \leq [\delta_u], \quad (12)$$

$$R_{z,i}^{\max} - R_{z,i}^{\min} \leq [\delta_{прб}], \quad (13)$$

$$\delta_{оннс} \leq [\delta_{оннс}]. \quad (14)$$

где  $\delta$ ,  $\delta_p$ ,  $\delta_k$ ,  $\delta_u$ ,  $\delta_{прб}$ ,  $\delta_{оннс}$  – расчетные значения погрешности диаметров, радиального биения, отклонения от круглости, от цилиндричности, полного радиального биения, отклонения профиля продольного сечения, мм;  $[\delta]$ ,  $[\delta_p]$ ,  $[\delta_k]$ ,  $[\delta_u]$ ,  $[\delta_{прб}]$ ,  $[\delta_{оннс}]$  – допустимые значения погрешности обработки, указанные на чертеже детали, мм;  $D_{z,i,g}^{\max}$  – максимальное значение диаметра  $g$ -го сечения, мм;  $D_{z,i,g}^{\min}$  – минимальное значение диаметра  $g$ -го сечения, мм;  $R_{z,i,g,b}^{\max}$  – максимальное значение  $b$ -го радиуса  $g$ -го сечения, мм;  $R_{z,i,g,b}^{\min}$  – минимальное значение  $b$ -го радиуса  $g$ -го сечения, мм;  $\Delta_{откл}$  – абсолютное значение наибольших отклонений;  $\Delta_{проф}$  – абсолютные значения точек реального профиля по обе стороны от среднего элемента, мм;  $\Delta_{откл}^*$  – абсолютное значение наибольших отклонений;  $\Delta_{проф}^*$  – абсолютные значения точек реального профиля по обе стороны от среднего элемента.

## Выводы

1. Виртуальное прогнозирование точности обработки на внутришлифовальных операциях возможно благодаря разработанной аналитической модели силы резания и модели процесса съема металла, учитывающей кинематические особенности и описывающей формообразование шлифуемой поверхности.

2. Модель силы резания охватывает большую часть основных технологических параметров в широком диапазоне их варьирования и учитывает особенности съема металла в реверсных и нереверсных зонах, наличие которых обуславливает разную точность обработки по всей длине обрабатываемой поверхности.

3. Модель съема металла поверхности носит аналитический характер, т.к. получена на основе математической взаимосвязи силы резания, упру-

гих деформаций технологической системы, глубины резания, программных и фактических подач и размеров радиусов обрабатываемой поверхности. Она позволяет рассчитывать глубину резания, фактическую радиальную подачу, силы резания и текущие значения радиусов в любом сечении обрабатываемой поверхности в течение всего цикла шлифования для заданных условий обработки.

4. На основе расчетных значений радиусов обрабатываемой поверхности производится оценка погрешностей диаметрального размера и погрешности формы и расположения поверхностей по методике [14].

#### Библиографический список

1. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 286 с.
2. Михелькевич, В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
3. Братан, С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового тонкого шлифования: дис. ... д-ра тех. наук: 05.02.08 / С.М. Братан. – Одеса, 2006. – 550 с.
4. Zhou, S.S. Improving workpiece roundness through centerless grinding cycle optimization / S.S. Zhou, G.C. Petrosky // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1997. – Vol. 460. – Pp. 217–248.
5. Inasaki, I. Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process / I. Inasaki // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1991. – Vol. 400. – Pp. 359–363.
6. Переверзев, П.П. Моделирование и оптимизация управляющих программ в автоматизированном машиностроительном производстве / П.П. Переверзев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение»*. – 2012. – № 12 (271). – С. 152–157.
7. Roblek, V. A complexity view of Industry 4.0 / V. Roblek, M. Meško, A. Krapež // *SAGE Open*. – 2016. – Vol. 6(2). DOI:10.1177/2158244016653987.
8. Королев, А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1987. – 160 с.
9. Переверзев, П.П. Модель силы резания при круглом врезном шлифовании с учетом затупления режущих зерен абразивного круга / П.П. Пименов, Д.Ю. Пименов // *Трение и износ*. – 2016. – № 1(37). – С. 76–82.
10. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 297 с.
11. 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.
12. Переверзев, П.П. Моделирование съема металла в зонах реверса в процессе внутреннего шлифования / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // *СТИН*. – 2017. – № 9. – С. 29–33.

13. Переверзев, П.П. Методика проектирования оптимальных циклов внутреннего шлифования в многомерном пространстве управляющих параметров / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // СТИН. – 2016. – № 5. – С. 26–31.

14. Переверзев, П.П. Моделирование ограничений по точности обработки при проектировании оптимальных циклов / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // Вестник ЮУрГУ. – 2016. – № 2. – С. 61–71.

[К содержанию](#)