

УДК 621.923

ОСОБЕННОСТИ СЪЕМА МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ С ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ В РЕВЕРСНЫХ ЗОНАХ

А.В. Акинцева, П.П. Переверзев, М.К. Алсигар

Управление производительностью операции круглого шлифования с осевой подачей (например, внутреннее и наружное шлифование), выполняемой на станке с ЧПУ, осуществляется путем автоматического изменения радиальной и осевой подач по ступенчатому циклу, в зависимости от величины оставшейся части припуска. Но шлифование в реверсных и нереверсной зонах ведется при различных режимах резания из-за наличия круглого шлифования с радиальной подачей на этапе врезания в начале рабочего хода, необходимости реверсного переключения осевой подачи, отключения осевой подачи на этапе врезания и на этапах реверсного переключения. В результате динамика фактической радиальной подачи и силы резания во всех сечениях обрабатываемой поверхности существенно различается как по способам шлифования, так и по величине, что и обуславливает различную точность обработки по длине обрабатываемой поверхности. В статье описаны этапы обработки в зонах реверса и показана функциональная взаимосвязь между фактической радиальной подачей с программной радиальной и осевой подачами, а также другими деформациями оси круга на всех этапах.

Ключевые слова: зона реверса, перебег круга, цикл, режимы резания, наружное шлифование, внутреннее шлифование.

Шлифование является чистовым методом обработки ответственных поверхностей 6–7 качества, допуски на которые задаются не только для диаметральных размеров, но и для отклонений формы и расположения. Большинство современных шлифовальных станков с ЧПУ имеют возможность обработки по заданному циклу ступенчатого изменения радиальной и осевой подач. Управление режимами резания обрабатываемой поверхности осуществляется путем ступенчатого изменения программных подач в зависимости от снятой величины припуска, контролируемого прибором активного контроля (ПАК) только в одном сечении (в дальнейшем контрольное сечение). Съём припуска в остальных сечениях обрабатываемой поверхности во время цикла не контролируется. Данный момент особенно важен для внутреннего и наружного шлифования с осевой подачей, где наличие зоны реверса и перебега круга приводит к значительным колебаниям величины фактически снятого припуска из-за наличия этапа врезания (только у входного сечения на рабочем ходе), необходимости реверсного

переключения продольной подачи, отключения продольной подачи на время реверсного переключения и наличия перебега круга, которое существенно изменяет площадь контакта круга с заготовкой и силу резания из-за переменного контакта при перебеге круга.

В результате в конце цикла шлифования с осевой подачей диаметральные размеры в неконтролируемых сечениях обрабатываемой поверхности существенно отличаются от размеров контрольного сечения. Следствием всего вышеперечисленного является то, что погрешность обработки в различных сечениях существенно различается, что приводит к формированию повышенной погрешности не только диаметральной погрешности, но и к повышенному отклонению формы и расположению поверхностей. Поэтому для прогнозирования погрешности обработки необходима модель взаимосвязи этапов съема металла, учитывающая колебания силы резания и глубины резания, упругие деформации технологической системы и особенности шлифования с продольной подачей в различных сечениях обрабатываемой поверхности.

Рассмотрим более подробно особенности шлифования с осевой подачей в различных сечениях обрабатываемой поверхности. Выделим три основных сечения: входное сечение, среднее сечение и выходное сечение. Входное и выходное сечения расположены в реверсных зонах. Операция шлифования начинается с этапа ЭВ1 быстрого подвода круга (табл.).

Входное сечение (чаще всего оно же является и контрольным), в котором прямой рабочий ход круга начинается с этапа врезания ЭВ2 (см. табл.), которое ведется методом круглого шлифования с радиальной подачей (рис.). После окончания радиальной подачи круга начинается этап ЭВ3, необходимой для реверсного переключения радиальной подачи на осевую подачу. Хотя этот этап кратковременный, но шлифование поверхности все равно происходит методом выхаживания при круглом шлифовании с радиальной подачей, но без включения осевой подачи. После окончания реверса (см. рис.) начинаются этапы ЭВ4 и ЭВ5, соответственно рабочего хода (РХ) и холостого хода (ХХ) при включенной осевой подаче (см. табл.). После окончания ХХ начинается этап ЭВ6 реверсного переключения осевой подачи на радиальную подачу. Шлифование на этапе ЭВ6 происходит методом выхаживания при круглом шлифовании с радиальной подачей. В среднем сечении обрабатываемой поверхности шлифование ведется только с осевой подачей на РХ и ХХ.

В выходном сечении шлифование ведется в три этапа (см. табл.). Этапы ЭВВ1 и ЭВВ3 ведутся с осевой подачей на РХ и ХХ. Но между ними находится этап ЭВВ2, необходимый для реверсного переключения осевой подачи. Этот этап тоже кратковременный, но часть припуска сошлифовывается методом выхаживания при круглом шлифовании с радиальной подачей.

Таблица

Этапы обработки входного и выходного сечений
в процессе шлифования на проход

| Обозначение этапа | Название этапа | Описание этапа | Параметры управления |
|----------------------------------|----------------------|---|--|
| | | Вид шлифования | |
| Входное сечение (реверсная зона) | | | |
| прямой рабочий ход | | | |
| ЭВ1 | Быстрый подвод круга | Осуществляется быстрый подвод круга на величину гарантированного зазора, равного половине поля допуска детали. Съем металла не осуществляется. Данный этап присутствует только перед первым ходом | $V_{кр} \neq 0;$ $S_{подвода} \neq 0;$ $V_{дем} \neq 0;$ $S_{подвода}$ – скорость подвода круга к заготовке, мм/мин |
| ЭВ2 | Врезание | Круг врезается в заготовку | $V_{кр} \neq 0; V_{дем} \neq 0;$ $t_{Пz,i,j} \neq 0;$ $V_{Soc} = 0$ |
| | | Круглое шлифование с радиальной подачей (без осевой подачи) | |
| ЭВ3 | Реверс | Задержка для реверсного переключения подач | $V_{кр} \neq 0;$ $V_{дем} \neq 0;$ $t_{Пz,i,j} = 0;$ $V_{Soc} = 0$ |
| | | Круглое шлифование с радиальной подачей с выхаживанием (без осевой подачи) | |
| ЭВ4 | Шлифование на проход | Круг движется с осевой подачей | $V_{кр} \neq 0; V_{дем} \neq 0;$ $S_{рад,z,i} \neq 0; V_{Soc} \neq 0$ |
| | | Шлифование с осевой подачей | |
| обратный нерабочий ход | | | |
| ЭВ5 | Шлифование на проход | Круг движется с осевой подачей | $V_{кр} \neq 0; V_{дем} \neq 0;$ $S_{рад,z,i} = 0; V_{Soc} \neq 0$ |
| | | Шлифование с осевой подачей | |
| ЭВ6 | Реверс | Задержка для реверсного переключения подач | $V_{кр} \neq 0; V_{дем} \neq 0;$ $t_{Пz,i,j} = 0;$ $V_{Soc} = 0$ |
| | | Круглое шлифование с радиальной подачей с выхаживанием (без осевой подачи) | |
| Выходное сечение | | | |
| прямой рабочий ход | | | |
| ЭВВ1 | Шлифование на проход | Круг движется с осевой подачей | $V_{кр} \neq 0; V_{дем} \neq 0;$ $S_{рад,z,i} \neq 0; V_{Soc} \neq 0$ |
| | | Шлифование с осевой подачей | |
| обратный нерабочий ход | | | |
| ЭВВ2 | Реверс | Задержка для реверсного переключения подач | $V_{кр} \neq 0; V_{дем} \neq 0;$ $t_{Пz,i,j} = 0;$ $V_{Soc} = 0$ |
| | | Круглое шлифование с радиальной подачей с выхаживанием (без осевой подачи) | |
| ЭВВ3 | Шлифование на проход | Круг движется с осевой подачей | $V_{кр} \neq 0; V_{дем} \neq 0;$ $S_{рад,z,i} = 0; V_{Soc} \neq 0$ |
| | | Шлифование с осевой подачей | |

Как можно видеть из табл., каждый этап характеризуется одним из двух видов шлифования: непосредственно шлифованием с осевой подачей или же шлифованием с радиальной подачей с выхаживанием или без выхаживания. Взаимосвязь этапов с ЭВ2 по ЭВ6 при шлифовании в реверсной зоне входного сечения показана на графике (см. рис.) с координатами «Подача фактическая и программная, припуск, упругие деформации технологической системы, мм» – «Время, с».

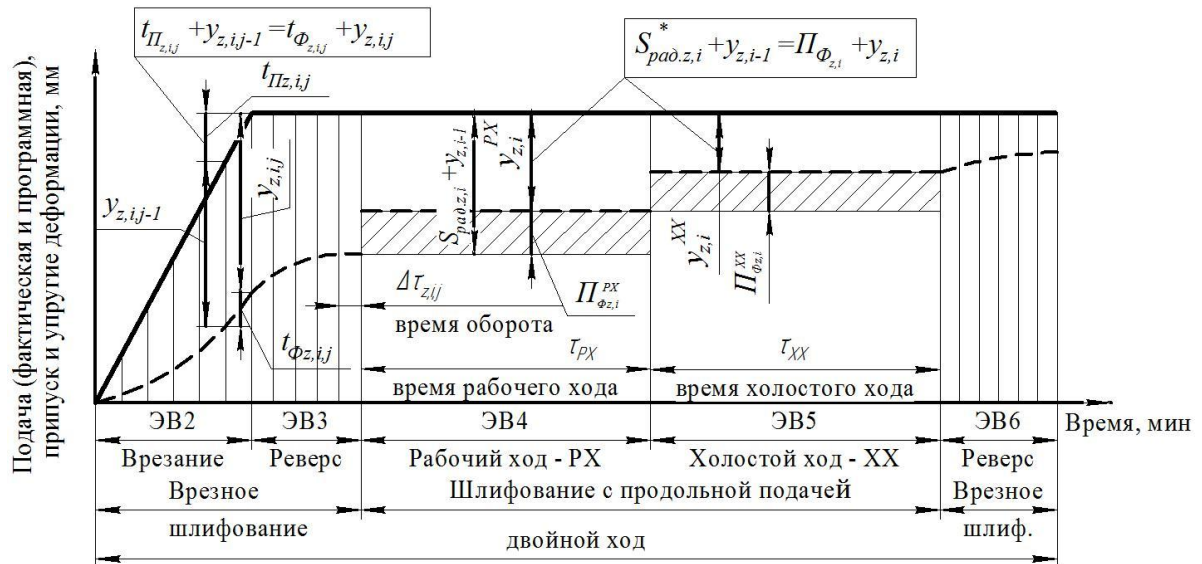


График взаимосвязи упругих деформаций технологической системы с программными и фактическими подачами на всех этапах процесса круглого шлифования с осевой подачей в реверсной зоне входного сечения: $\tau_{ХХ}$ – время холостого хода шлифовального круга, с; $\tau_{РХ}$ – время рабочего хода шлифовального круга, с; $\Delta\tau_{z,i,j}$ – время j -го оборота шлифовального круга на i -м ходе z -й ступени, с

Рассмотрим взаимосвязь [1–3] упругих деформаций технологической системы с программными и фактическими подачами на всех этапах процесса круглого шлифования с осевой подачей в реверсной зоне входного сечения. В соответствии с графиком на рис. величину фактической радиальной подачи можно найти из замкнутого размерного контура (рассмотрим на примере внутреннего шлифования с продольной подачей):

$$S_{рад.z,i}^* + y_{z,i-1} = П_{Фz,i} + y_{z,i}, \quad (1)$$

где $S_{рад.z,i}$ – радиальная подача на i -м ходе z -й ступени цикла, мм/дв.ход; $y_{z,i}$ – упругая деформация оси оправки на i -м ходе z -й ступени цикла, мм; $П_{Фz,i}$ – фактическая радиальная подача на i -м ходе z -й ступени цикла, мм; z – порядковый номер ступени цикла управления радиальной подачей; i – порядковый номер хода шлифовального круга на z -й ступени.

Отметим, что в формуле (1) программное значение радиальной подачи учитывается в том случае, когда рассматриваемый ход является рабочим ($S_{рад.z,i}^* \neq 0$ – рабочий ход; $S_{рад.z,i}^* = 0$ – холостой ход).

Упругую деформацию оси шлифовального шпинделя можно найти по формуле [3] (мм):

$$y_{z,i} = P_{Yz,i} \gamma, \quad (2)$$

где γ – жесткость технологической системы, мм; $P_{Yz,i}$ – радиальная составляющая силы резания, Н.

Радиальная составляющая силы резания для внутреннего шлифования с продольной подачей находится по формулам [3]:

$$P_{Yz,i} = M_1 \Pi_{\Phi z,i} + M_2 \sqrt{\Pi_{\Phi z,i}}, \quad (3)$$

где M_1 и M_2 – аналитические коэффициенты, характеризующие взаимосвязь различных технологических параметров процесса внутреннего шлифования, определяемые по формулам:

$$M_1 = \frac{1,86 \sigma_i \pi d_{заг} V_{Soc}}{\sqrt{(V_{кр} + V_{заг})^2 + V_{Soc}^2}},$$

$$M_2 = \frac{\sigma_i \eta T_{общ}}{3} \sqrt{\frac{d_{заг} D_{кр}}{d_{заг} - D_{кр}}}.$$

где $V_{кр}$ – окружная скорость круга, м/с; $V_{заг}$ – скорость вращения заготовки, м/мин; σ_i – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм²; $d_{заг}$ – диаметр заготовки, мм; $D_{кр}$ – диаметр круга, мм; $T_{общ}$ – общая высота шлифовального круга, мм; η – степень затупления круга; μ – коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому материалу.

Подставив в формулу (1) выражения (2) и (3), найдем величину фактической радиальной подачи на i -м ходе z -й ступени:

$$\Pi_{\Phi z,i} = \left[\sqrt{\left[\frac{M_2 \gamma}{2(1 + M_1 \gamma)} \right]^2 + \frac{S_{рад.z,i}^* + \gamma M_1 \Pi_{\Phi z,i-1} + \gamma M_2 \sqrt{\Pi_{\Phi z,i-1}}}{1 + M_1 \gamma} - \frac{\gamma M_2}{2(1 + M_1 \gamma)}} \right]^2. \quad (4)$$

Аналогично была получена формула для врезного внутреннего шлифования:

$$t_{\Phi z,i,j} = \left[\sqrt{\left[\frac{K_2 \gamma}{2(1 + K_1 \gamma)} \right]^2 + \frac{t_{\Pi z,i,j-1} + \gamma K_1 t_{\Phi z,i,j-1} + \gamma K_2 \sqrt{t_{\Phi z,i,j-1}}}{1 + K_1 \gamma} - \frac{\gamma K_2}{2(1 + M_1 \gamma)}} \right]^2, \quad (5)$$

где $t_{\Pi z,i,j}$ – программное значение радиальной врезной подачи на j -ом обороте i -го хода z -й ступени, мм/об; $t_{\Phi z,i,j}$ – фактическая врезная радиальная подача на j -м обороте i -го хода шлифовального круга z -й ступени, мм; j –

порядковый номер оборота шлифовального круга на этапе врезания i -го хода z -й ступени; K_1 и K_2 – аналитические коэффициенты, характеризующие взаимосвязь различных технологических параметров процесса внутреннего врезного шлифования, определяемые по формулам:

$$K_1 = \frac{1,9\sigma_i V_{заг} T_{номинал,i,j,g,b}}{V_{кр}},$$
$$K_2 = \frac{\eta T_{номинал,i,j,g,b} \sigma_i}{3} \sqrt{\frac{d_{заг} D_{кр}}{d_{заг} - D_{кр}}}.$$

где $T_{номинал,i,j,g,b}$ – номинальная высота круга на b -м радиусе g -го сечения отверстия на j -м обороте i -го хода z -й ступени, мм.

Модель съема металла (4) и (5), учитывающая особенности обработки в различных сечениях по длине заготовки, является моделью управления процессом, описывающей изменения фактической радиальной подачи при заданных режимных параметрах с учетом переменных технологических факторов (исходного радиального биения заготовки, степени затупления круга и др.). Модель управления процессом совместно с методом динамического программирования использованы при разработке методики проектирования оптимальных циклов. Более подробно с методикой проектирования оптимальных циклов управления радиальной и осевой подачами для операций внутреннего шлифования можно ознакомиться в следующих статьях [4–5].

Необходимость разработки методики проектирования оптимальных циклов шлифования возникла по причине отсутствия средств проектирования циклов (нормативно-справочной литературы, САПР ТП, методик), удовлетворяющих требованиям современного производства. Используемая на предприятиях нормативно-справочная литература 60–80-х годов выпуска разработана для универсальных станков и на основании статистических данных того периода. Основой практически всех САПРов ТП является упомянутая выше нормативно-справочная литературы, что также делает их неприемлемыми для современных станков с ЧПУ. Известные на данный момент расчетные методики проектирования циклов [6–11] имеют один общий существенный недостаток – они не используют математические методы оптимизации. Поэтому получаемые по данным методикам циклы являются рациональными, а не оптимальными, что в свою очередь приводит опять же к неэффективному использованию производственных ресурсов: оборудования, инструмента и др. Необходимо также отметить, что в упомянутых выше методиках отсутствует одна из самых важных моделей ограничений производительности операции – модель точности обработки.

Выводы

1. Операция круглого шлифования с осевой подачей на станке с ЧПУ осуществляется путем автоматического изменения радиальной и осевой подач по ступенчатому циклу, в зависимости от величины оставшейся части припуска.

2. В реверсных зонах обрабатываемой поверхности шлифование ведется с использованием различных видов шлифования с частичным включением осевой подачи.

3. В реверсной зоне входного сечения обрабатываемой поверхности шлифование ведется с использованием трех видов шлифования: круглое шлифование с радиальной подачей; круглое шлифование с радиальной подачей методом выхаживания; круглое шлифование с осевой подачей.

4. В реверсной зоне выходного сечения обрабатываемой поверхности шлифование ведется с использованием двух видов шлифования: круглое шлифование с радиальной подачей методом выхаживания; круглое шлифование с осевой подачей.

5. В нереверсной зоне обрабатываемой поверхности шлифование ведется с использованием одного вида шлифования: круглое шлифование с осевой подачей.

6. Различные условия шлифования в реверсных и нереверсных зонах обрабатываемой поверхности оказывают решающее значение на точность и производительность процесса шлифования.

7. Расчет основных параметров обработки (фактическую радиальную подачу, наколенный снятый припуск, текущие значения радиусов, время обработки и др.) необходимо вести по моделям съема металла [1–5], учитывающим основные факторы процесса шлифования.

8. Разработанная модель съема металла для процесса шлифования с продольной подачей (например, внутреннего и наружного шлифования) является основой для методики проектирования оптимальных циклов шлифования, обеспечивающих стабильность выполнения требований чертежа по точности и качеству за минимально возможное время обработки [4–5].

Библиографический список

1. Pereverzev, P.P. Modeling of Metal Removal during an Internal Grinding in View of Kinematics Cutting Feature / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – No. 10. – Pp. 888–893.

2. 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.

3. Pereverzev, P.P. Model of Cutting Force While Managing Two Regime Parameters in the Process of Internal Grinding / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva // Procedia Engineerin. – 2016. – Vol. 150. – Pp. 1113–1117.

4. Pereverzev, P.P. Optimal internal grinding cycles in multidimensional control-parameter space / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – No. 11. – Pp. 974–978.

5. 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.

6. Rowe, W.B. Principles of Modern Grinding Technology: Second Edition / W.B. Rowe. – Liverpool: Elsevier Inc, 2013. – 420 p.

7. Horiuchi, O. Computer simulations of cylindrical plunge grinding – Influence of work stiffness on grinding accuracy / O. Horiuchi, T. Shibata // Key Engineering Materials. – 2007. – Vol. 329. – Pp. 51–56.

8. 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.

9. Inasaki, I. Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process / I. Inasaki // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1991. – Vol. 400. – Pp. 359–363.

10. Improvement of accuracy in internal grinding with shape modification on high aspect ratio wheel / T. Onishi, K. Ohashi, Y. Yamamoto, M. Sakakura, S. Tsukamoto // Proceedings of the 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century. – 2011. – Vol. 8. – Pp. 482-487.

11. Malkin, S. Practical grinding optimization, Proceedings – Abrasive Engineering Society Conference / S. Malkin, D. Stephen // Exhibition. – 1986. – Vol. 180. – Ph. 93–103.