

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЪЕМА МЕТАЛЛА ДЛЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ С ЧПУ

*П.П. Переверзев*

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

В условиях автоматизированного машиностроения до сих пор остается нерешенной задача проектирования оптимальных циклов режимов резания для операций, выполняемых на станках с ЧПУ. На практике технологу по-прежнему приходится вручную корректировать проектируемые циклы при помощи различных CAD/CAM-систем, имеющих в качестве информационной базы данные из нормативно-справочной литературы, разработанной в 60–90-х годах для универсального оборудования. При этом технолог может опираться только на собственный опыт или же на имеющиеся по аналогичным операциям данные. В результате проектируемые таким образом циклы не могут гарантировать максимальность производительности и стойкость используемого оборудования, стабильность показателей точности и качества в партии деталей, а соответственно, и минимальность себестоимости выполняемой операции.

В качестве решения описанной выше проблемы предложена разработка цифрового двойника на примере операции круглого шлифования. Цифровым двойником процесса круглого шлифования может являться аналитическая модель послойного удаления металла с заготовки. Данная модель, помимо исходных условий обработки (основные параметры заготовки, инструмента, оборудования, оснастки и др.), оказывающих непосредственное влияние на процесс шлифования, должна учитывать кинематику и особенности съема металла, присущие различным видам шлифования. Цифровой двойник должен учитывать нестабильность процесса шлифования (затупление круга, колебания припуска, потеря диаметра круга, а соответственно, и площади контакта круга с заготовкой). В статье описаны основные этапы разработки аналитической модели съема металла на примере круглого шлифования с продольной подачей. Разработанный цифровой двойник операции круглого шлифования возможно применять не только при проектировании оптимальных циклов режимов резания, но и для прогнозирования надежности разрабатываемых циклов и качества обработки в нестабильных условиях обработки партии деталей.

*Ключевые слова:* круглое шлифование, модель послойного удаления металла, цифровой двойник.

### **Введение**

Современные шлифовальные станки с ЧПУ позволяют за одну установку заготовки обрабатывать различные поверхности (наружные и внутренние цилиндрические, конические и профильные поверхности, а также наружные и внутренние торцевые поверхности) за счет применения различных видов шлифования (круглого, торцевого и др.). При этом обработка ведется по заданным в управляющей программе круглошлифовального станка с ЧПУ режимам резания и ступенчатым циклам подач в зависимости от неснятого припуска. В результате в масштабах всего автоматизированного машиностроительного производства перед технологами ежедневно возникают сложные задачи по комплексному определению оптимальных значений нескольких десятков циклов подач и других режимов резания для различных условий шлифования и в условиях действия большого количества нестабильных технологических условий (затупления круга, колебания припуска, исходного радиального биения заготовки и др.).

Проектирование циклов управления режимными параметрами осуществляется в единой системе автоматизированной технологической подготовки производства при помощи CAD/CAM-систем различных производителей, в которых отсутствует возможность задавать оптимальные циклы двух и более программных подач. В данных системах полностью отсутствуют рекомендации по выбору последовательности обработки за одну установку заготовки различных поверхно-

стей (например, отверстия и наружного торца заготовки). К тому же CAD/CAM-системы опираются на усредненные данные из нормативно-справочной литературы 60–90-х годов выпуска, которая разработана для менее мощных универсальных станков. В результате проектируемые таким образом циклы требуют адаптации под конкретные условия резания путем обработки ряда пробных заготовок, что никак не укладывается в рамки концепции «Индустрия 4.0» [1–2]. При этом для обеспечения требования чертежа по точности и качеству проектируемые циклы назначаются заниженными, что не может не отразиться на производительности. Также отсутствуют гарантии стабильности показателей качества в партии деталей, так как в алгоритмах расчетов циклов CAD/CAM-систем отсутствует учет нестационарности процесса обработки.

Вопросами повышения производительности циклов и стабилизации параметров качества цикла в разное время занимались многие ученые. Среди последних наиболее значимых работ хотелось бы отметить следующих авторов [3–12]. Данные работы имеют ряд существенных недостатков, делающих невозможным их практическое применение в условиях современного цифрового производства. Перечислим общие недостатки названных выше работ:

- не все используют математические методы оптимизации и в итоге получают рациональные циклы;

- чаще всего рассматривают ограничение по качеству обрабатываемой поверхности, самое важное ограничение по точности не рассматривается;

- не учитывается влияние переменных технологических факторов (например, колебания степени затупления круга или же исходного радиального биения заготовки) как при обработке одной заготовки, так и при обработке партии.

Отдельно отметим, что вопрос оптимизации более 2 режимов резания практически не рассматривался, поэтому чаще всего оптимизируют только один параметр – радиальную подачу и уже для готового цикла радиальной подачи находят полным перебором другой режим резания [13, 14]. Также не исследован вопрос комплексной оптимизации последовательности обработки различных поверхностей за одну установку заготовки совместно с оптимизацией циклов режимов резания и подбором параметров управления циклом (геометрических параметров и характеристик круга, количества правок круга в цикле и др.). Данные вопросы, несмотря на свою актуальность, пока открыты в силу отсутствия решения ряда следующих сложных научно-технических задач:

- разработка цифрового двойника процесса шлифования (единая цифровая модель процесса шлифования), который бы учитывал кинематику и особенности съема металла для различных видов шлифования, влияние переменных технологических факторов (колебание исходного радиального биения и припуска заготовки и др.), влияние на стабильность процесса съема припуска различных физических явлений, возникающих в процессе резания (трение, разрушение, упругие и пластические деформации, химические и тепловые явления, структурные изменения и др.);

- обоснование выбора математического метода оптимизации и доказательство возможности применения данного метода для оптимизации процесса шлифования в цифровом пространстве;

- создание комплекса технологических ограничений цикла(ов) с разработкой аналитических моделей основных ограничений по точности и качеству обрабатываемой поверхности, характеристикам абразивного инструмента, диапазонам режимов резания и др.;

- разработка методики учета влияния переменных технологических факторов, возникающих как при обработке партии деталей, так и непосредственно в процессе резания (исходное радиальное биение заготовки, колебания припуска в партии деталей, изменение степени затупления круга);

- методология проектирования оптимальных циклов подач и других режимов резания для меняющихся условий шлифования, присущих различным видам шлифования в процессе комплексной обработки различных поверхностей за одну установку.

Перечисленные выше компоненты в совокупности составят систему автоматического проектирования оптимальных циклов, которая позволит проектировать оптимальные циклы подач и других режимов резания с использованием математического метода оптимизации, проводить комплексную оптимизацию последовательности обработки различных поверхностей за одну установку заготовки, а также подбирать оптимальные параметры управления циклом (характери-

стику и геометрические параметры инструмента, величину перебега, длину шлифовальной оправки и многое др.).

К одной из самых сложных и объемных задач, требующих первоочередного решения, можно отнести разработку цифрового двойника процесса шлифования (единая цифровая модель процесса шлифования) [15]. Отметим, что ЦД операции механической обработки должен давать возможность моделировать процесс обработки заготовки с учетом исходных условий и переменных технологических факторов как для партии деталей (колебания припуска и исходного радиального биения), так и для технологического процесса в целом (колебания степени затупления и диаметра круга).

Для создания цифрового двойника (цифровой копии) процесса круглого шлифования необходимо разработать аналитическую модель съема металла в процессе шлифования. Сложность разработки данной модели заключается в следующем. Во-первых, разрабатываемая модель должна максимально учитывать входные данные – параметры заготовки, станка, приспособления, инструмента и условий обработки (например, характеристика и геометрические параметры абразивного круга, исходное радиальное биение заготовки и т. д.), оказывающие влияние на процесс обработки и на выходные данные (точность и качество обработки, себестоимость изготавливаемой продукции). Во-вторых, в разрабатываемой модели необходимо учитывать влияние всех физических явлений, присущих процессу резания (упругие и пластические деформации, трение и разрушение, тепловые и химические явления и др.), т. е. модель должна содержать функциональные составляющие физического содержания технологического процесса: температуру в зоне резания, износ инструмента, силу резания и др. В-третьих, немаловажно, чтобы, помимо кинематики процесса различных видов шлифования, разрабатываемая модель учитывала изменения взаимного положения детали и инструмента. Данный учет необходимо проводить через упругие деформации технологической системы, оказывающие значительное влияние на точность и качество обработки.

В-четвертых, разрабатываемая модель съема металла должна учитывать особенности съема металла для разных видов шлифования, применяемых при обработке на круглошлифовальном станке с ЧПУ разных видов поверхностей. Например, в процессе внутреннего шлифования под действием радиальной составляющей силы резания происходит выдавливание круга из зоны контакта с заготовкой, что приводит к изменению активной высоты круга в среднем сечении отверстия заготовки и оказывает значительное влияние на снимаемый припуск. Для моделирования съема металла в процессе круглого шлифования с продольной подачей необходимо учитывать две основные особенности съема металла:

- наличие перебега и переменной высоты круга во входном и выходном сечениях отверстия заготовки (реверсные зоны), приводящих к мгновенному изменению площади зоны контакта круга с заготовкой;
- чередование разных видов шлифования в реверсных зонах, а также наличие этапов врезания круга во входном сечении и выхаживания, возникающего в результате незаметных задержек в системе переключения подач станка.

В-пятых, разрабатываемая модель съема металла должна учитывать весь перечень переменных технологических факторов, к которым можно отнести колебания степени затупления зерен круга и износ диаметра круга, исходное радиальное биение и др. Это даст возможность для более широкого применения системы автоматического проектирования оптимальных циклов шлифования, разработанной на основе предложенного цифрового двойника процесса шлифования. Важно также отметить, что учет особенностей съема металла, кинематики, зоны контакта с заготовкой, присущих различным видам шлифования, позволит производить комплексную обработку шлифованием, т. е. обрабатывать за одну установку заготовки различные внутренние, наружные, торцевые поверхности, тем самым повысив точность и качество обрабатываемой поверхности.

Ниже представлено общее описание силовой модели, которая устанавливает функциональную взаимосвязь силы резания с режимами резания, геометрическими параметрами зоны контакта круга с деталью, прочностными свойствами обрабатываемого материала затуплением зерен круга [16]:

$$P_y = \frac{Q\sigma_i \varepsilon_i t g \beta}{V_p} + \frac{\sigma_i \eta F_g}{3}, \quad (1)$$

$$P_z = \frac{Q\sigma_i \varepsilon_i \cos \varphi}{V_p} + \frac{\sigma_i \eta \mu F_g}{3}, \quad (2)$$

$$P_x = \frac{Q\sigma_i \sin \varphi}{V_p} + \frac{\sigma_i \eta \mu F_g}{3}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм<sup>2</sup>;  $\eta$  – степень затупления круга;  $\mu$  – коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому материалу;  $V_p$  – скорость резания, м/мин;  $Q$  – интенсивность съема металла, м<sup>3</sup>/с;  $F_g$  – геометрическая площадь зоны контакта круга с заготовкой, мм<sup>2</sup>;  $\beta$  – угол между вектором скорости зерна и равнодействующей сил  $P_{yp}$  и  $P_{zp}$ , действующей в зоне стружкообразования при резании единичным острым зерном [17, 18];  $\varepsilon_i$  – среднее значение интенсивности степени деформаций;  $\varphi$  – угол между осевой скоростью движения заготовки и скоростью резания, град.

Предложенную силовую модель можно адаптировать под различные виды шлифования за счет учета зоны контакта круга с заготовкой, скорости резания и интенсивности съема металла, так как данные параметры находятся в зависимости от вида шлифования. Более подробно с силовой моделью можно ознакомиться в [16]. Силовая модель служит основой для разрабатываемой аналитической модели съема припуска, для которой нам понадобится радиальная составляющая силы резания (рассмотрим на примере наружного круглого шлифования с продольной подачей):

– врезное наружное шлифование:

$$P_y = \frac{\varepsilon_i \operatorname{tg} \beta \sigma_i V_{заг} T t_{rad}}{V_1} + \frac{\eta T \sigma_i}{3} \sqrt{\frac{d D t_{rad}}{d - D}}, \quad (4)$$

разработка силовой модели для врезного наружного шлифования обусловлена наличием этапа врезания круга в заготовку во входном сечении;

– наружное шлифование с продольной подачей:

$$P_y = \frac{\varepsilon_i \operatorname{tg} \beta \sigma_i \pi d V_{Soc} S_{rad}}{\sqrt{(V_1 + V_2)^2 + V_{Soc}^2}} + \frac{\sigma_i \eta T}{3} \sqrt{\frac{d D S_{rad}}{d + D}}, \quad (5)$$

где  $V_1$  – скорость вращения круга, м/с;  $V_2$  – скорость вращения заготовки, м/мин;  $V_{Soc}$  – скорость осевой подачи, м/мин;  $d$  – диаметр заготовки, мм;  $T$  – высота круга, мм;  $S_{rad}$  – радиальная подача на ход, мм/ход (программное значение);  $D$  – диаметр круга, мм;  $t_{rad}$  – врезная радиальная подача (программное значение), мм/об.

Как уже было сказано ранее, разрабатываемая модель съема металла должна учитывать нестабильность условий обработки (учет степени затупления круга произведен в силовой модели). Поэтому для учета исходного радиального биения заготовки составим следующее размерное уравнение (замкнутый контур на рис. 1) на примере круглого внутреннего шлифования с продольной подачей:

$$\sum_z \sum_i S_{rad} = S_{radz,i,b}^* + y_{z,i,b} + \Delta_{z,i,b}, \quad (6)$$

где  $\sum_z \sum_i S_{rad}$  – накопленная радиальная подача, мм;  $S_{radz,i,b}^*$  – фактическая радиальная подача, мм;  $z$  – порядковый номер ступени цикла;  $i$  – порядковый номер хода шлифовального круга на  $z$ -й ступени;  $b$  – порядковый номер радиуса в рассматриваемом сечении;  $y_{z,i,b}$  – упругая деформация оси круга, мм;  $\Delta_{z,i,b}$  – исходное радиальное биение заготовки, мм.

$$y_{z,i,b} = P_{Yz,i} \gamma, \quad (7)$$

$$\Delta_{z,i,g,b} = R_{z,i-1,b} - R_{min}, \quad (8)$$

где  $\gamma$  – податливость технологической системы, Н/мм;  $R_{z,i-1,b}$  –  $b$ -й радиус заготовки на  $i$ -1-м ходе  $z$ -й ступени, мм;  $R_{min}$  – минимальный радиус заготовки, мм.

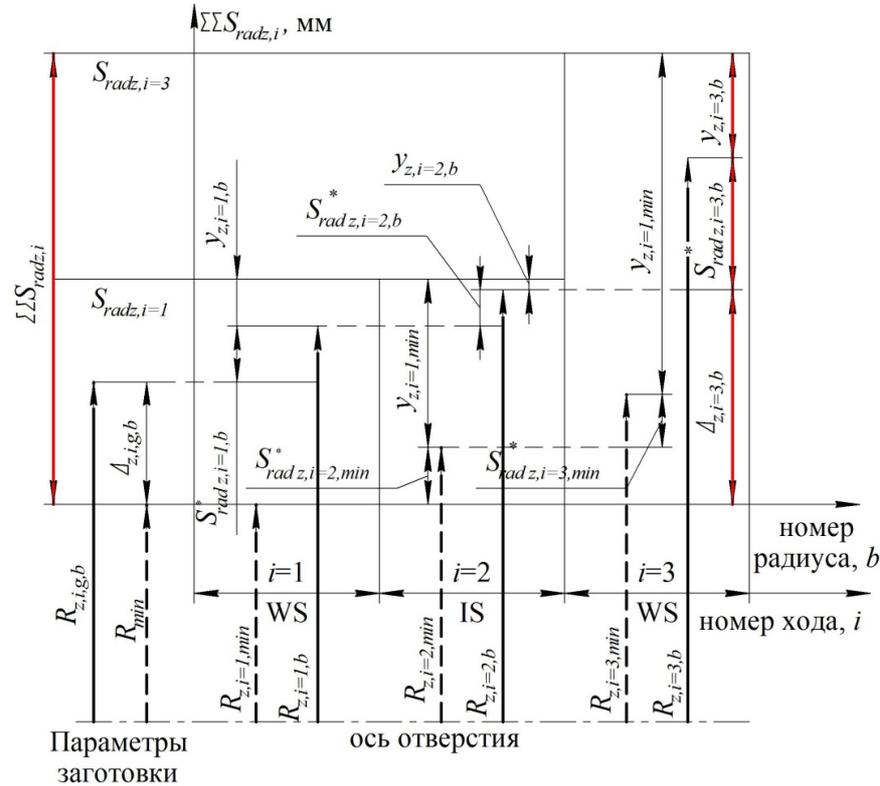


Рис. 1. Расчетная схема взаимосвязи подач и упругих деформаций оси круга с учетом исходного радиального биения

Получим выражение для определения фактической радиальной подачи на  $b$ -м радиусе  $i$ -го хода  $z$ -й ступени, учтя в уравнении (6) выражения (5), (7) и (8):

$$S_{radz,i,b}^* = \left[ \sqrt{\left( \frac{\gamma M_2}{2(1 + \gamma M_1)} \right)^2 + \frac{\sum_z \sum_i S_{rad} - R_{z,i-1,b} + R_{min}}{1 + \gamma M_1}} - \frac{\gamma M_2}{2(1 + \gamma M_1)} \right]^2, \quad (9)$$

где  $M_1, M_2$  – коэффициенты, находящиеся по формулам:

$$M_1 = \frac{1,86\sigma_i \pi d V_{Soc}}{\sqrt{(V_1 + V_2)^2 + V_{Soc}^2}}, \quad (10)$$

$$M_2 = \frac{\sigma_i \eta T}{3} \sqrt{\frac{dD}{d - D}}. \quad (11)$$

По аналогии получим формулу для нахождения фактической врезной радиальной подачи для врезного наружного шлифования:

$$t_{radz,j,b}^* = \left[ \sqrt{\left( \frac{\gamma K_2}{2(1 + \gamma K_1)} \right)^2 + \frac{\sum_z \sum_i t_{radz,j,b} - R_{z,j-1,b} + R_{min}}{1 + \gamma K_1}} - \frac{\gamma K_2}{2(1 + \gamma K_1)} \right]^2, \quad (12)$$

где  $\sum_z \sum_i t_{radz,i,b}$  – накопленная радиальная врезная подача, мм;  $j$  – порядковый номер оборота

заготовки;  $t_{radz,j,b}^*$  – фактическая радиальная врезная подача на  $j$ -м обороте заготовки, мм/об;  $R_{z,i-1,b}$  –  $b$ -й радиус заготовки на  $j-1$ -м обороте заготовки на  $i$ -м ходе  $z$ -й ступени, мм;  $K_1, K_2$  – коэффициенты, находящиеся по формулам:

$$K_1 = \frac{1,9\sigma_i V_2 T}{V_1}, \tag{13}$$

$$K_2 = \frac{\eta T \sigma_i}{3} \sqrt{\frac{dD}{d-D}}. \tag{14}$$

Как уже было сказано, в реверсных зонах (входное и выходное сечения заготовки), в отличие от среднего сечения (нереверсная зона), съем припуска осуществляется этапами (врезания, выхаживания, шлифования с продольной подачей и т. д.). Предложенные выражения (9) и (10) позволяют установить закономерности изменения в течение всего цикла обработки по всей длине заготовки значений фактической (врезной) радиальной подачи и радиальной составляющей силы резания при заданных значениях программной подачи с учетом податливости технологической системы и исходного радиального биения заготовки. В результате становится возможным расчет текущего значения радиуса заготовки в рассматриваемом сечении на  $i$ -м ходе шлифовального круга  $z$ -й ступени. На рис. 2 показано изменение фактической радиальной подачи (снимаемого припуска) в выходном сечении заготовки. Обработка входного сечения включает в себя следующие этапы:  $P_1$  – этап круглого шлифования с осевой подачей (CGOF) на рабочем ходе (WS);  $P_2$  – этап реверса (врезное круглое шлифование – CGRF), когда радиальная врезная и осевая подачи равны нулю, происходит выхаживание за счет натяга круга. За время реверсной остановки происходит подготовка к включению осевой подачи в режиме холостого хода (IS);  $P_3$  – 3-й этап ведется в режиме CGOF, но уже при обратном холостом ходе. На этом этапе включена осевая подача, она больше нуля [19].

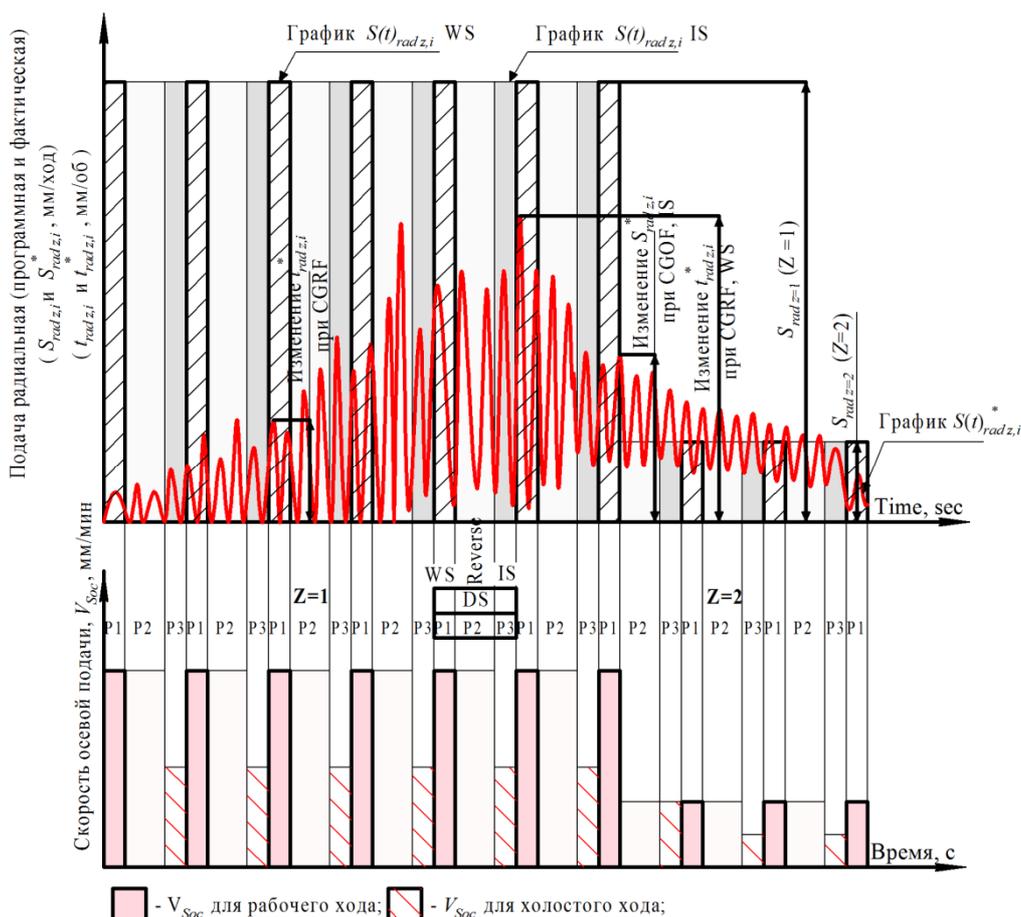


Рис. 2. Графики двухступенчатого цикла при круглом шлифовании с осевой подачей: (а) графики программных и фактических подач в сечении III и (б) график осевой программной подачи в сечении III\*

\* Краткие обозначения к рис. 2: CGRF – врезное круглое шлифование; CGOF – круглое шлифование с продольной подачей; DS – двойной ход; WS – рабочий ход; IS – холостой ход;  $Z = 1$  – первая ступень цикла;  $Z = 2$  – вторая ступень цикла.

Отдельно выделим возможные области применения цифрового двойника процесса круглого шлифования:

- комплексная оптимизация процесса шлифования, включающая в себя не только проектирование цикла управления режимами резания, но и подбор оптимальных параметров для управления процессом обработки (например, характеристики и геометрических параметров шлифовального круга, параметров СОТС и др.) [20];
- прогнозирование надежности разрабатываемых циклов и качества обработки в нестабильных условиях обработки партии деталей. Разработка паспорта качества цикла;
- проверка применяемых на практике циклов на надежность и стабильность показателей качества.

### Выводы

1. Для создания цифрового двойника (цифровой копии) процесса круглого шлифования разработана аналитическая модель съема металла в процессе шлифования, которая учитывает:

- входные данные (параметры заготовки, станка, приспособления, инструмента, условия обработки и т. п.);
- влияние всех физических явлений, присущих процессу резания (упругие и пластические деформации, трение и разрушение, тепловые и химические явления и др.);
- кинематику процесса шлифования, а также изменение взаимного положения детали и инструмента через упругие деформации технологической системы;
- особенности съема металла, присущие различным видам шлифования, применяемым при обработке комплексной детали (наличие перебега круга; чередование разных видов шлифования в реверсных зонах);
- переменные технологические факторы, к которым можно отнести колебания степени затупления и диаметра круга, исходного радиального биения и припуска заготовки.

2. Представленная в данной статье модель съема металла, которая является основой цифрового двойника процесса круглого шлифования, устанавливает закономерности изменения радиальной силы резания, глубины резания и др. параметров на протяжении всего цикла шлифования и по всей длине заготовки при известных исходных условиях (режимах резания, марках обрабатываемого материала, характеристиках абразивного инструмента и т. п.), а также с учетом податливости технологической системы и других переменных технологических факторов. Вследствие этого становится возможным определение текущих значений радиусов по всей длине заготовки на протяжении всего цикла шлифования.

3. К области применения цифрового двойника процесса круглого шлифования относится не только оптимизация процесса обработки, но и прогнозирование надежности разрабатываемых циклов и качества обработки в нестабильных условиях обработки партии деталей.

### Литература

1. Roblek, V. *A complexity view of Industry 4.0* / V. Roblek, M. Meško, A. Krapež // *SAGE Open*, 2016. – P. 1–11.
2. Schumacher, A. *Industry 4.0 Operationalization based on an Integrated Framework of Industrial Digitalization and Automation* / A. Schumacher, C. Schumacher, W. Sihn // *ICPR1 2019, LNME*. 2020. – P. 301–310.
3. Михелькевич, В.Н. *Автоматическое управление шлифованием* / В.Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
4. Исаков, Д.В. *Оптимизация автоматических циклов шлифования, выполняемых на плоскошлифовальных станках, методом динамического программирования* / Д.В. Исаков, А.С. Коваленко // *Обработка металлов резанием*. – 2009. – № 4(52). – С. 2–12.
5. Михайлов, А.Н. *Многокритериальная оптимизация режимов резания при точении инструментами с покрытиями* / А.Н. Михайлов, Т.Г. Ивченко, И.А. Петряева // *Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки*. – 2016. – № 8. – С. 159–166.
6. Popova, A.V. *Design of Optimal Internal Grinding Cycles* / A.V. Popova // *Russian Engineering Research*. – 2015. – Vol. 35, № 5. – P. 378–380.

7. *Optimization of Manufacturing Time in Internal Grinding* / X.H. Le, H.K. Le, T.H. Tran et al. // ICERA 2019, LNNS 104. 2020. – P. 557–565.
8. *Jiajian, G. Optimization of internal plunge grinding using collaboration of the air-grinding and the material removal model based on the power signal* / G. Jiajian, H. Li // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 105. – P. 7–8.
9. *Gupta, R. Optimization of grinding parameters using enumeration method* / R. Gupta, K.S. Shishodia, G.S. Sekhon // *J. Mater. Process. Technol.* – 2001. – Vol. 112. – P. 63–67.
10. *Optimization for internal traverse grinding of valves based on wheel deflection* / S. Gao, C. Yang, J. Xu et al. // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 92. – P. 1105–1112.
11. *A Study on Optimization of Manufacturing Time in External Cylindrical Grinding* / L. Tung, T. Hong, N. Cuong, N. Vu // *J. Materials Science Forum*. – 2019. – Vol. 977. – P. 18–26.
12. *Stability analysis and optimization algorithms for the Set-Up of Infeed Centerless Grinding* / D. Barrenetxea, J. Alvarez, J.I. Marquinez et al. // *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2014. – Vol. 84. – P. 17–32.
13. *Shipulin, L. Three-Stage Cycle in Plane Grinding by the Wheel Periphery* / L. Shipulin, I. Shmidt // *J. Russian Engineering Research*. – 2020. – № 4 (40). – С. 347–350.
14. *Designing high-speed CNC-operations* / A. Nurkenov, V.I. Guzeev, P.G. Mazein, I.P. Deryabin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 450, no. 032014.
15. *Designing optimal automatic cycles of round grinding based on the synthesis of digital twin technologies and dynamic programming method* / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar, D.V. Ardashev // *Inter. J. Mechanical Sciences*. – 2019. – Vol. 1. – P. 1–11.
16. *Yudin, S. Generalized cutting force model for grinding* / S. Yudin, K. Smolyanoy, P. Pereverzev // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 709, no. 033005.
17. *Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей* / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 297 с.
18. *Ardashev, D.V. Calculation of blunting ranges of the grinding wheels with different characteristics between dressings* / D.V. Ardashev, V.I. Guzeev // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37 (2). – P. 164–166.
19. *Akintseva, A.V. Modelling of correlation of actual and program feeds in the automatic cycle* / A.V. Akintseva, A.V. Prokhorov, S.V. Omelchenko // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 709, no. 033003.
20. *Akintseva, A.V. Methodology for designing optimal internal grinding cycles resistant to varying processing conditions* / A.V. Akintseva, A.V. Prokhorov, S.V. Omelchenko // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 709, no. 033004.

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

Поступила в редакцию 28 августа 2020 г.

## FEATURES OF DEVELOPING THE MATHEMATICAL MODEL OF METAL REMOVAL FOR THE DIGITAL TWIN OF PROCESS OF CIRCULAR GRINDING WITH CNC

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

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

In conditions of the automated mechanical engineering the task of designing optimal cutting cycles for operations performed on CNC machines still remains unsolved. In practice, the technologist still has to manually adjust designed cycles using various CAD/CAM-systems, which have an information base based on the data from the normative reference literature developed in the 60–90's for universal equipment. At that the technologist relies on personal experience or on the existing data in similar operations. As a result, the cycles designed in this way cannot guarantee maximum productivity and durability of the equipment used, stability of accuracy and quality indicators in a batch of parts and, accordingly, the minimum cost price of the operation performed.

As a solution to the problem described above, development of the digital twin on the example of a circular grinding operation is proposed. Analytical model of the layer-by-layer metal removal from the workpiece can be the digital twin of the circular grinding process. In addition to the initial processing conditions (main parameters of the workpiece, tool, equipment, tooling, etc.) which have a direct impact on the grinding process, this model must consider kinematics and features of the metal removal inherent in various types of grinding. Digital twin must consider instability of the grinding process (blunting of the wheel, allowance fluctuations, loss of the wheel diameter and, accordingly, the contact area of the wheel with the workpiece). The article describes the main stages of developing the analytical model of metal removal on the example of the circular grinding with longitudinal feed. The developed digital twin of the circular grinding operation can be used not only for designing optimal cycles of the cutting modes, but also for predicting the reliability of the developed cycles and the quality of processing in unstable conditions of processing the batch of parts.

*Keywords: cylindrical grinding, metal removal model, digital twin.*

### References

1. Roblek V., Meško M., Krapež A. A complexity view of Industry 4.0. *SAGE Open*, 2016, pp. 1–11.
2. Schumacher A., Schumacher C., Sihn W. Industry 4.0 Operationalization based on an Integrated Framework of Industrial Digitalization and Automation. *ICPRI 2019, LNME*, 2020, pp. 301–310.
3. Mikhel'kevich V.N. *Avtomatičeskoe upravlenie shlifovaniem* [Automatic control of grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 304 p.
4. Isakov D.V., Kovalenko A.S. [Optimization of automatic grinding cycles performed on flat grinding machines by dynamic programming method]. *Obrabotka metallov rezaniem* [Processing of metals by cutting], 2009, no. 4(52), pp. 2–12 (in Russ).
5. Mikhailov A.N., Ivchenko T.G., Petryaeva I.A. [Multicriterion Optimization of the Cutting Regimes at Turning by the Tools with Coverages]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical sciences], 2016, no. 8, pp. 159–166. (in Russ).
6. Popova A.V. [Design of Optimal Internal Grinding Cycles]. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 5, pp. 378–380.
7. Le X.H., Le H.K., Tran T.H., Nguyen V.C., Do D.T., Nguyen H.P., Luu A.T., Ngoc P.V. Optimization of Manufacturing Time in Internal Grinding. *ICERA 2019, LNNS 104*, 2020, pp. 557–565.
8. Jiajian G., Li H. Optimization of internal plunge grinding using collaboration of the air-grinding and the material removal model based on the power signal. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 105, pp. 7–8.

9. Gupta R., Shishodia K.S., Sekhon G.S. Optimization of grinding parameters using enumeration method. *J. Mater. Process. Technol.*, 2001, vol. 112, pp. 63–67.
10. 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.
11. Tung L., Hong T., Cuong N., Vu N. A Study on Optimization of Manufacturing Time in External Cylindrical Grinding. *J. Materials Science Forum*, 2019, vol. 977, pp. 18–26.
12. 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. *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, vol. 84, pp. 17–32.
13. Shipulin L., Shmidt I. Three-Stage Cycle in Plane Grinding by the Wheel Periphery. *J. Russian Engineering Research*, 2020, no. 4 (40), pp. 347–350.
14. 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.
15. Pereverzev P.P., Akintseva A.V., Alsigar M.K., Ardashev D.V. Designing optimal automatic cycles of round grinding based on the synthesis of digital twin technologies and dynamic programming method. *Inter. J. Mechanical Sciences*, 2019, vol. 1, pp. 1–11.
16. Yudin S., Smolyanoy K., Pereverzev P. Generalized cutting force model for grinding. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, no. 033005.
17. Korchak S.N. *Proizvoditel'nost' processa shlifovaniya stal'nyh detalej* [The Productivity of the Grinding of Steel Part]. Moscow, Mashinostroenie, 1974. 297 p.
18. Ardashev D.V., Guzeev V.I. Calculation of blunting ranges of the grinding wheels with different characteristics between dressings. *J. Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, pp. 164–166.
19. Akintseva A.V., Prokhorov A.V., Omelchenko S.V. Modelling of correlation of actual and program feeds in the automatic cycle. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, no. 033003.
20. Akintseva A.V., Prokhorov A.V., Omelchenko S.V. Methodology for designing optimal internal grinding cycles resistant to varying processing conditions. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, no. 033004.

**Received 28 August 2020**

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Переверзев, П.П. Особенности разработки математической модели съема металла для цифрового двойника процесса круглого шлифования / П.П. Переверзев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 72–81. DOI: 10.14529/engin200307

#### FOR CITATION

Pereverzev P.P. Features of Developing the Mathematical Model of Metal Removal for the Digital Twin of Process of Circular Grinding with CNC. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 72–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200307