

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСЛОЙНОГО СЪЕМА МЕТАЛЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОПЕРАЦИИ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ С ЧПУ

А.В. Акинцева

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Современные круглошлифовальные станки с ЧПУ позволяют вести обработку по заданным циклам режимов резания, которые являются частью управляющей программы (УП). Несмотря на использование точных систем позирования, современные шлифовальные станки обладают податливостью технологической системы (ТС). Это объясняет колебания величины снимаемого припуска и возникновение различного рода погрешностей размеров, которые увеличиваются при обработке партии деталей, производимой в нестабильных условиях при действии большого количества переменных технологических факторов (колебания припуска, затупления зерен круга, изменения диаметра круга и др.).

Однако при наличии большого числа автоматизированных систем проектирования УП до сих пор отсутствует инструмент их контроля на обеспечение точности обработки партии деталей. К тому же при проектировании циклов режимов резания в данных системах используются базы данных, полученные для универсальных станков. В результате проектируемые циклы не гарантируют стабильность показателей точности при обработке партии детали, не обеспечивают максимальную производительность и требуют адаптации к заданным условиям обработки.

В данной статье представлено описание цифрового двойника (ЦД) на примере врезного круглого шлифования, который позволяет проводить симуляцию послойного съема металла на протяжении всего цикла шлифования путем расчета величины снимаемого припуска на каждом обороте заготовки при различных сочетаниях нестабильных условий обработки и переменной податливости технологической системы. При этом моделирование послойного удаления припуска осуществляется в нескольких сечениях, которые имеют различную податливость. После окончания моделирования съема металла (в конце цикла шлифования) становится возможным осуществить оценку точности по известным расчетным значениям радиусов во всех сечениях обрабатываемой поверхности. Отметим, что применение ЦД позволит ускорить и упростить процесс проектирования циклов, а также повысить производительность операций круглого шлифования с ЧПУ за счет оптимизации циклов режимов резания с обеспечением заданной точности.

Ключевые слова: цифровой двойник, круглое шлифование, цикл, точность обработки.

Введение

В автоматизированном машиностроении операции круглого шлифования с ЧПУ являются основными операциями финишной обработки деталей. Современные шлифовальные станки имеют технические возможности, позволяющие вести обработку по заданным циклам различных наружных и внутренних поверхностей детали за один установ заготовки [1]. При этом возникает необходимость ежемесячной разработки множества управляющих программ для операций круглого шлифования с ЧПУ. Однако по причине отсутствия в CAD/CAM-системах пакета для расчета оптимальных режимов резания в условиях реального автоматизированного производства режимы резания для всех видов операций круглого шлифования с ЧПУ назначаются технологом вручную. При этом технолог опирается на личный опыт или же на статистические данные предприятия по режимам резания аналогичных операций.

Назначение режимов резания для круглошлифовальных операций является сложной задачей из-за необходимости разработки ступенчатых циклов программных подач, по которым ведется

обработка поверхности. Для каждого цикла программной подачи надо назначить количество ступеней цикла, распределить снимаемый припуск по ступеням цикла и на каждую ступень назначить программную подачу и другие режимы резания. При этом технолог должен обеспечить максимальную производительность (или минимальную себестоимость, или максимальную стойкость) операции при одновременном обеспечении заданной точности обработки и других параметров качества обрабатываемой поверхности в условиях действия различных переменных технологических факторов, возникающих при обработке партии деталей. К числу таких факторов можно отнести неодинаковую податливость технологической системы (ТС) по длине обработки, колебание припуска и радиального биения заготовки в партии деталей, затупление зерен шлифовального круга, диаметральный износ круга, изменение площади контакта круга с заготовкой в процессе шлифования и др. Кроме того, в одной управляющей программе (УП) задаются циклы шлифования различных наружных и внутренних поверхностей (цилиндр, торец, конус) и синхронизируются циклы разных подач (например, циклы радиальной и осевой подач). Отметим, что управление ступенчатым циклом шлифования осуществляется прибором активного контроля (ПАК), который в процессе шлифования непрерывно измеряет диаметр детали и переключает программные подачи в зависимости от оставшейся части припуска.

Таким образом, в современном автоматизированном производстве с учетом отсутствия у имеющихся CAD/CAM-систем инструмента проектирования оптимальных циклов ежемесячно разрабатываются тысячи УП для круглошлифовальных операций с ЧПУ. При разработке данных УП технологом вручную назначаются циклы управления режимными параметрами для операций круглого шлифования с различными исходными данными (параметры обрабатываемой поверхности, параметры станков, параметры характеристики шлифовальных кругов, параметры партии деталей). Отметим, что при этом у технолога нет инструментария для проверки разработанных им УП на обеспечение заданной точности и других параметров качества обрабатываемой поверхности. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является разработка инструмента для CAD/CAM-систем (пакета программного обеспечения). Основной задачей данного инструмента будет являться контроль и оптимизация УП для всех видов операций круглого шлифования с ЧПУ в области назначения режимов резания и ступенчатых циклов программных подач, обеспечивающих заданную точность, шероховатость, твердость обрабатываемой поверхности в нестабильных условиях обработки партии деталей.

Над решением вышеописанной проблемы в разное время работали многие отечественные [2–7] и зарубежные ученые [8–18]. Большая часть исследований направлена на решение частной стороны проблемы проектирования оптимальных циклов, а именно на разработку силовой модели процесса и моделирование технологических ограничений, влияющих на производительность операций (ограничений по шероховатости, дефектному слою, износу и стойкости инструмента и др.). Результатом данных исследований могут являться только частные узконаправленные рекомендации по режимам резания для лимитированного числа ограничений. Отметим, что практически отсутствуют работы, позволяющие накладывать одно из самых главных ограничений по производительности цикла – ограничение по точности обработки. Также на данный момент практически не представлены исследования, направленные на развитие теории построения оптимальных циклов режимных параметров, которые одновременно учитывают весь комплекс технологических ограничений (по параметрам заготовки, режущего инструмента, нестабильным условиям организации производства и др.).

Несмотря на то, что круглошлифовальные станки с ЧПУ выпускаются уже несколько десятилетий, до сих пор прогнозирование точности обработки на операциях круглого шлифования с ЧПУ, в которых программные подачи изменяются в автоматическом ступенчатом цикле, является сложной и нерешенной научно-технической задачей. Это происходит по причине того, что прогнозирование точности обработки в автоматическом цикле шлифования с переключением программных скоростей подач невозможно выполнить с помощью одной формулы, так как обрабатываемая поверхность многократно формируется при изменяющихся на каждом обороте силах и глубинах резания по всей длине обрабатываемой поверхности в условиях действия нестабильных технологических факторов.

Решение вышеописанной задачи возможно только при помощи цифрового двойника (ЦД) операции круглого шлифования, в котором моделируется послойный съем припуска путем рас-

чета глубины резания в разных сечениях обрабатываемой поверхности на каждом обороте заготовки с учетом влияния переменных факторов. В ЦД контроль УП на обеспечение точности обработки производится следующим образом. В конце цикла шлифования, когда завершен съем припуска, определяются размеры обрабатываемой поверхности во всех сечениях. Расчетные размеры обрабатываемой поверхности сравниваются с допустимыми значениями размеров по чертежу детали, и строится размерная модель обработанной поверхности, по которой производится расчет прогнозных значений погрешностей диаметрального размера в разных сечениях, а также рассчитываются прогнозные значения отклонения формы и расположения поверхностей.

Создание ЦД стало возможным в результате реализации физико-математической модели съема припуска путем системного моделирования множества взаимосвязанных широкодиапазонных аналитических моделей процессов круглого шлифования (модель упругих деформаций ТС, модель силы резания, модель взаимосвязи программных и фактических подач, модель формирования погрешности обработки, модель формирования размеров обработанной поверхности и др.). Данные модели объединяются в единую аналитическую модель расчета значений фактических подач в нескольких сечениях обрабатываемой поверхности на каждом обороте заготовки в течение всего цикла шлифования для заданных условий шлифования при различных сочетаниях величин нестабильных факторов при обработке партии деталей [19].

Рассмотрим концепцию наиболее простого варианта использования ЦД для контроля цикла шлифования на операции круглого наружного врезного шлифования с ЧПУ.

1. Этапы контроля цикла шлифования в ЦД по обеспечению точности обработки

При контроле цикла шлифования на точность использование ЦД осуществляется поэтапно:

1) ввод исходных данных по обрабатываемой детали, по параметрам станка и характеристикам круга, по параметрам цикла шлифования (количество ступеней программных радиальных подач и их значения для каждой ступени, распределение снимаемого припуска по ступеням) и др.;

2) расчет значений податливости ТС в разных поперечных сечениях заготовки, равномерно распределенных по обрабатываемой поверхности;

3) выбор сечения заготовки, контролируемого ПАКом, по которому, по сути, осуществляется управление циклом;

4) определение количества сценариев действия переменных технологических факторов и их численных значений, при которых в ЦД будет тестироваться цикл шлифования на обеспечение точности обработки;

5) моделирование послыонного съема металла в цикле шлифования для заданного сценария;

6) определение диаметральных размеров заготовки в различных сечениях по всей длине в конце цикла шлифования;

7) расчет погрешности обработки;

8) тестирование проектируемого цикла для всех заданных сценариев действия переменных технологических факторов (повторение пунктов 5–7);

9) определение рассеивания погрешности при обработке партии деталей;

10) формирование заключения о годности цикла шлифования и подготовка прогнозных значений точности обработки в виде документа «Паспорт точности обработки цикла шлифования».

Ввиду ограниченности объема статьи более подробно рассмотрим только часть основных этапов на примере круглого врезного наружного шлифования.

2. Расчет значений податливости ТС в разных поперечных сечениях вала, равномерно распределенных на обрабатываемой поверхности

Важнейшим фактором, напрямую влияющим на точность обработки, является переменная податливость ТС по длине обрабатываемой поверхности. Из-за переменной податливости ТС под действием силы резания происходит неравномерный прогиб участков заготовки относительно шлифовального круга, что обуславливает разную глубину резания, а значит разные значения радиусов и погрешность размеров, формы и расположения по всей обработанной поверхности.

В ЦД используется следующая методика расчета податливости ТС, позволяющая проводить расчеты упругих перемещений в ТС станка и оценивать их влияние на размеры обрабатываемой поверхности и точность обработки. На рис. 1 а приведена расчетная схема силового нагружения

вала при круглом врезном шлифовании с габаритными размерами. Вал закреплен в нежестких переднем и заднем центрах с разной податливостью. Поэтому опоры вала, которыми являются центры станка, на схеме показаны в виде пружин, которые символизируют, что опоры нежесткие и могут совершать упругие перемещения под действием силовой нагрузки.

Радиальная сила резания P_y , возникающая при круглом врезном шлифовании, показана на рис. 1 в виде распределенной нагрузки q , действующей на вал по длине обрабатываемой поверхности B , от которой возникают реакции опор R_A и R_B . Силовая нагрузка на вал и реакции опор вызывают упругие деформации самого вала, а также упругие деформации переднего и заднего центров станка. Эюра податливости γ_c технологической системы, приведенная на рис. 1 б, рассчитана стандартными методами, взятыми из курса сопротивления материалов. Как видно из рис. 1 б, податливость ТС γ_c для данной расчетной схемы изменяется от минимального значения до максимального на длине обрабатываемой поверхности. Поэтому можно предположить, что после обработки получится коническая поверхность.

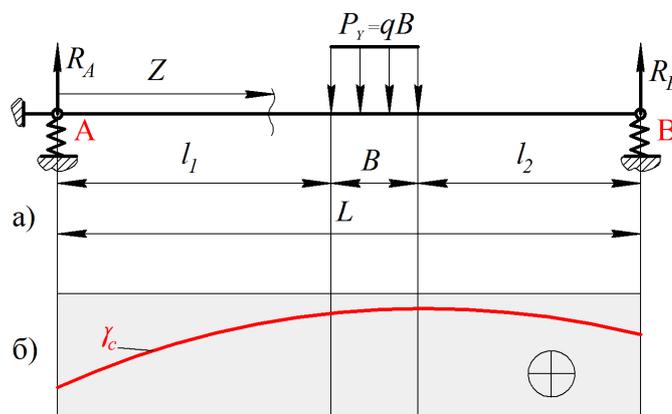


Рис. 1. Схема силового нагружения и эюра податливости ТС при круглом врезном шлифовании: а – схема силового нагружения вала; б – эюра податливости ТС

3. Определение сечения вала, контролируемого ПАКом

Обработка на современных станках с ЧПУ ведется при помощи ПАКа, который в течение всего цикла шлифования измеряет обрабатываемый диаметр заготовки в одном сечении и подает команды на ступенчатое изменение программной подачи в зависимости от оставшейся части припуска.

Погрешность обработки зависит от выбора сечения, в котором установлен ПАК. Если ПАК установлен в сечении с минимальной податливостью, то во всех сечениях по длине обработки диаметральный размер будут больше, чем в сечении, в котором установлен ПАК. Поэтому может возникнуть погрешность диаметрального размера по верхнему предельному чертежному размеру. И наоборот, при установке ПАК в сечении с максимальной податливостью возможен выход размера диаметра за нижний допустимый предел в сечении с минимальной податливостью. При установке ПАК в сечении со средней податливостью колебания диаметров будут в большую и меньшую сторону. Следует отметить, что выбор сечения ПАК зависит также от наличия прерывистых поверхностей, к которым относятся шлицевые поверхности, шпоночные пазы и др.

На рис. 2 приведена схема распределения четырех сечений вала по длине обработки. Сечения распределены равномерно по длине обрабатываемой поверхности. Сечение 1 расположено в левой части распределенной нагрузки, в котором податливость γ_1 имеет минимальное значение, т. е. $\gamma_1 = \gamma_{min}$ в соответствии с эюрой податливости ТС, приведенной на рис. 1. Сечение 3 расположено в правой части распределенной нагрузки, в котором податливость γ_3 имеет максимальное значение, т. е. $\gamma_3 = \gamma_{max}$. Сечение 2 расположено в середине распределенной нагрузки и имеет среднюю податливость γ_2 . Между сечениями 2 и 3 расположено сечение, в котором расположен ПАК, с податливостью в сечении равной $\gamma_{ПАК}$, которая $\gamma_2 < \gamma_{ПАК} < \gamma_3$. Поскольку податливости в сечениях 1, 2 и 3 не равны податливости в сечении ПАК, то и диаметры во всех четырех сечениях будут разными. Следовательно, в сечениях 1 и 2 диаметры вала будут меньше диаметра в сечении ПАК, а диаметр вала в сечении 3 будет больше. Соответственно, диаметральный погрешность в разных сечениях тоже будет разной. Докажем эти утверждения на модели съема припуска.

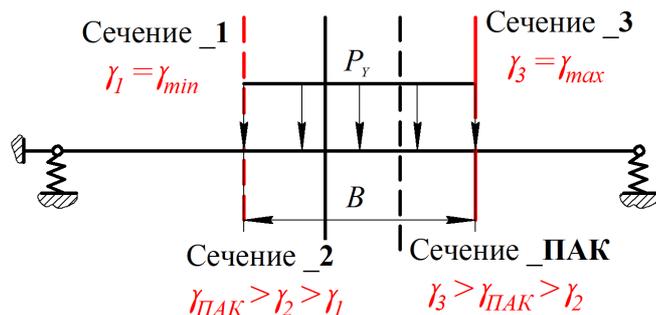


Рис. 2. Расчетная схема нагружения вала и распределения податливости технологической системы по сечениям обрабатываемой поверхности на участке В

4. Расчет послойного съема металла в цикле шлифования для заданного сценария

Расчет послойного съема металла в цикле круглого врезного шлифования детали сводится к расчету глубины резания за оборот заготовки, которую в дальнейшем будем называть скоростью фактической подачи Δt_f (рассматриваем на примере круглого врезного наружного шлифования). В связи с тем, что податливость ТС в различных сечениях обрабатываемой поверхности неодинакова, то и скорость фактической подачи тоже будет разной. Необходимо отметить, что круглошлифовальная операция с ЧПУ управляется путем ступенчатого изменения скорости программной подачи Δt_p в цикле шлифования одной детали. Величина Δt_p одинакова для всех сечений обрабатываемой поверхности, но значения Δt_f будут разными из-за неодинаковой податливости ТС по длине обработки.

На рис. 3 а приведен график двухступенчатого цикла шлифования с программными скоростями подачи Δt_{p_1} и Δt_{p_2} на первой и второй ступени соответственно. Графики скоростей фактических подач Δt_{f_1} , Δt_{f_2} , Δt_{f_3} показаны для сечений 1, 2 и 3, а график $\Delta t_{f_ПАК}$ показан для сечения ПАК. Расчет скоростей фактических подач выполнен по методике, приведенной в работах [14], в которой учитывается взаимосвязь программных и фактических скоростей подач с податливостью ТС, силой резания и технологическими условиями шлифования.

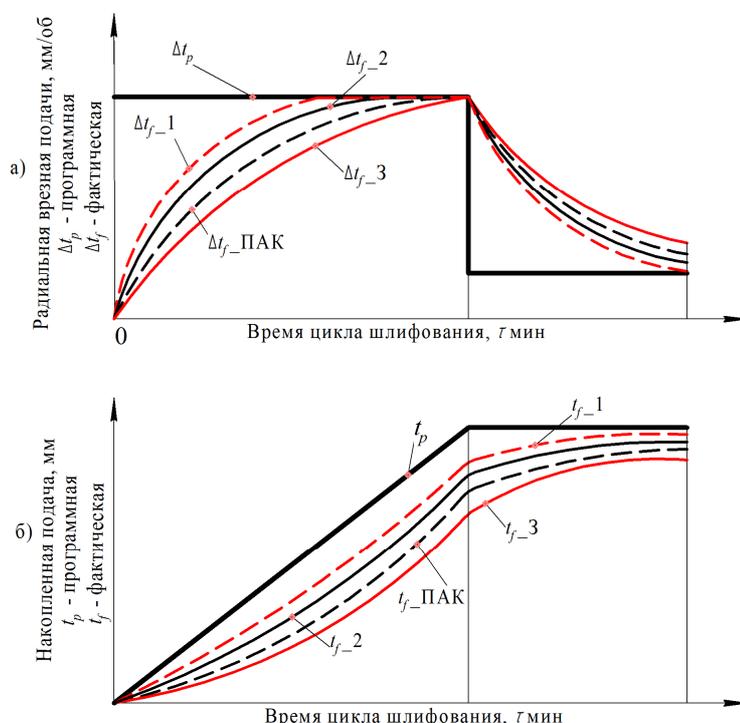


Рис. 3. Графики параметров двухступенчатого цикла круглого врезного шлифования вала с переменной податливостью по длине обрабатываемой поверхности: а – графики радиальной программной и фактической подачи; б – графики накопленных программной и фактической подач при двухступенчатом цикле шлифования

На основании графика скоростей программных и фактических подач (см. рис. 3 а) построен график (рис. 3 б) программной накопленной подачи t_p и графики фактических подач t_f в каждом сечении вала обрабатываемой поверхности. Графики скоростей фактических подач t_{f1}, t_{f2}, t_{f3} показаны для сечений 1, 2 и 3, а график $t_{f\text{ПАК}}$ показан для сечения ПАК (см. рис. 3 б). Графики программных накопленных подач Δt_{p1} и Δt_{p2} показаны для ступеней 1 и 2 соответственно. Таким образом, получены графики накопленных программных и фактических подач в каждом сечении обрабатываемой поверхности (см. рис. 3 б). Разница между накопленными фактическими подачами на текущем и предыдущем оборотах заготовки равна глубине резания или фактической скорости подачи за оборот заготовки. Поэтому если построим графики накопленных фактических подач в каждом сечении по длине обработки (рис. 4 и 5) путем наложения графиков друг на друга с перекрытием, то получим графики слоев припуска, снимаемых в течение цикла шлифования.

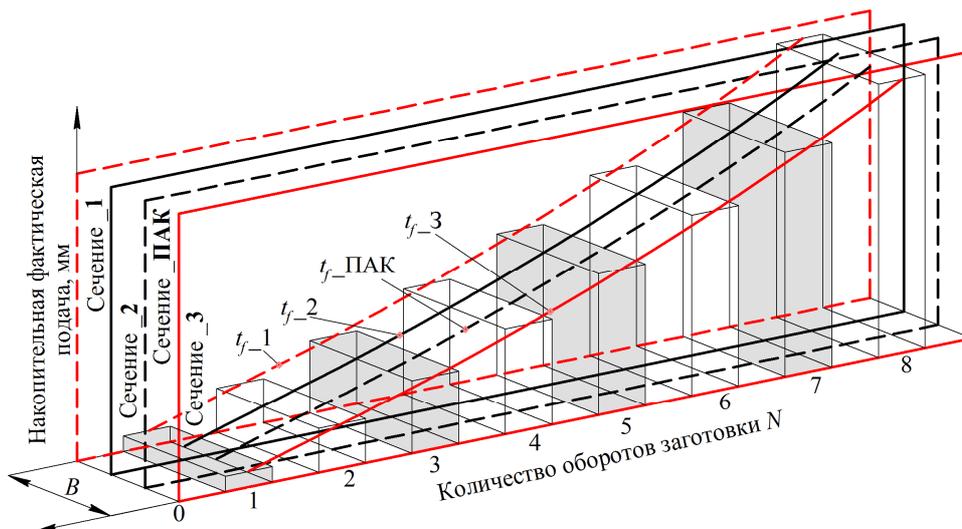


Рис. 4. Трехмерный график фактической накопленной подачи, построенный для нескольких оборотов заготовки в четырех сечениях вала

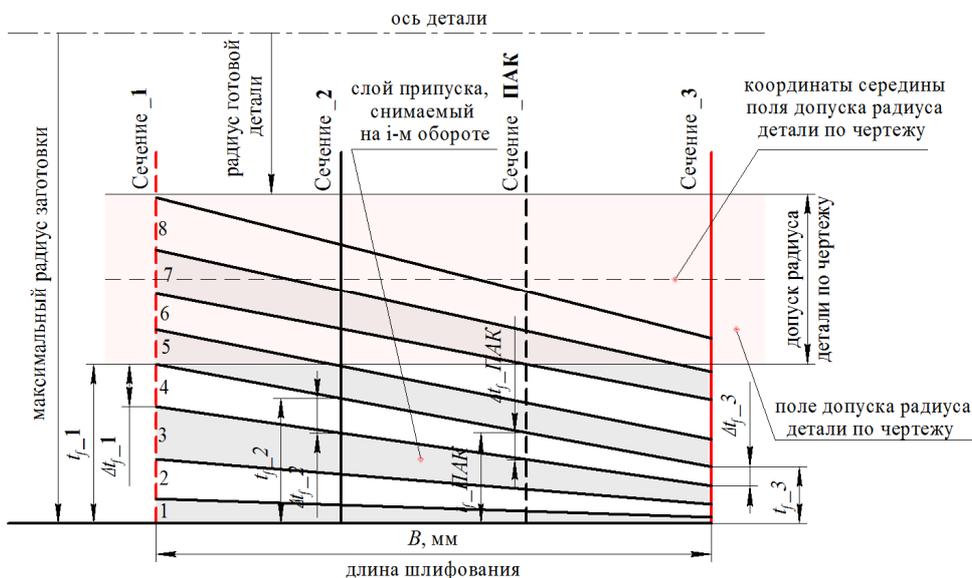


Рис. 5. График распределения слоев металла по длине обрабатываемой поверхности B, построенный на каждом обороте заготовки в четырех сечениях вала

На рис. 4 представлен трехмерный график фактической накопленной подачи, построенный на каждом обороте заготовки в четырех сечениях вала. Осями этого графика являются фактические накопленные подачи $t_{f1}, t_{f2}, t_{f3}, t_{f\text{ПАК}}$ в четырех сечениях, длина обрабатываемой поверхности B и номер оборота заготовки N. Графики накопленных фактических подач соответствуют

графикам одноименных подач на рис. 3 б. Перепады графиков по высоте соответствуют глубине резания по длине обрабатываемой поверхности.

Если графики фактических накопленных подач являются аддитивными и не снижаются с течением времени, то при их проекции друг на друга получим графики слоев металла (рис. 5), снимаемых по длине обрабатываемой поверхности на каждом обороте заготовки. Каждый слой, показанный на рис. 5, соответствует глубине резания за оборот заготовки. Первый нижний слой снимается на первом обороте заготовки. Последний верхний слой снимается на последнем обороте заготовки. Суммарная высота слоя характеризует величину снятого припуска за время шлифования в разных сечениях вала. Для связи снимаемого припуска и размеров вала в верхней части графика показана ось детали и радиусы в начале и в конце цикла шлифования.

Определение фактической радиальной подачи для круглого врезного шлифования осуществляется по формуле (внутреннего шлифования со знаком минус, наружного шлифования со знаком плюс), мм/об:

$$\Delta t_{fz,n} = \left[\sqrt{\frac{\Delta t_{pz} \Delta \tau_{z,n} + \gamma \Delta t_{fz,n-1} + \gamma K_4 \sqrt{\Delta t_{fz,n-1}}}{1 + K_3 \gamma}} - \frac{\gamma K_4}{2(1 + K_3 \gamma)} \right]^2, \quad (1)$$

где $\Delta t_{fz,n}$ ($\Delta t_{fz,n-1}$) – фактическая радиальная врезная подача на n -м ($n-1$ -м) обороте на z -й ступени, мм/об; z – порядковый номер ступени цикла; n – порядковый номер оборота заготовки на z -й ступени; Δt_{pz} – программная радиальная врезная подача на n -м ($n-1$ -м) обороте на z -й ступени, мм/об; $\Delta \tau_{z,n}$ – время одного оборота заготовки, мин; γ – жёсткость ТС, Н/мм; K_3, K_4 – коэффициенты, которые находятся по формулам:

$$K_3 = \pi d B n_o \frac{1,9 \sigma_i}{V_k}, \quad (2)$$

$$K_4 = \pi B \frac{\sigma_i}{3} \sqrt{\frac{dD}{d \pm D}}, \quad (3)$$

где B – ширина круга, мм; D – диаметр круга, мм; d – диаметр заготовки (отверстия), мм; σ_i – среднее значение интенсивности напряжений, характеризующее сопротивление металла пластической деформации при степени, скорости деформации и температуре, присущих процессу шлифования, Н/мм²; n_o – число оборотов заготовки, об/мин; V_k – скорость круга, м/сек.

Более подробно моделирование взаимосвязи фактической и программной радиальной подачи с радиальной составляющей силой резания, упругими деформациями ТС и другими технологическими параметрами, оказывающими влияние на точность обработки, описано в работе [19], а силовая модель процесса шлифования – в [20].

Накопленная фактическая (программная) радиальная подача находится по формуле, мм:

$$t_{fz,n}(t_{pz,n}) = \sum_{z=1}^Z \sum_{n=1}^N \Delta t_{fz,n}(\Delta t_{pz,n}), \quad (4)$$

где Z – общее число ступеней в цикле; N – общее число оборотов заготовки на z -й ступени цикла.

Необходимо отметить, что все представленные выше графики (см. рис. 3, 4) и формулы (1)–(4) получены при шлифовании круглой заготовки без исходного радиального биения. В работе продемонстрирован расчет погрешности обработки, возникающей только от влияния неравномерной упругой деформации ТС без влияния исходного биения заготовки и колебания припуска и др.

5. Расчет погрешности обработки

Для расчета погрешности обработки необходимо сравнить размеры детали после обработки с допустимыми значениями по чертежу. На рис. 5 показано поле допуска радиуса детали по чертежу. Радиусы готовой поверхности, представленные на рис. 5, изменяются в пределах последнего снятого слоя металла, так как при круглом врезном шлифовании съём слоя металла осуществляется по спирали.

Диаметр готовой детали в сечении ПАК настроен на координату середины поля допуска детали. Как видно из примера на рис. 5, в допуске оказались только радиусы сечения 2 и сечения ПАК. Радиусы в сечении 1 вышли за верхний допустимый предел, а радиусы сечения 3 вышли за

нижний допустимый размер. Продольная погрешность представляет собой конусообразность, которую можно легко оценить по расчетному графику.

Графики послойного съема металла, показанные на рис. 5, соответствуют одному сценарию условий шлифования. В ЦД рассчитываются графики послойного удаления металла для множества различных сценариев обработки партии деталей. Поэтому разброс размеров и погрешностей обработанных поверхностей будет гораздо больше. После расчета в ЦД погрешности обработки для всей совокупности сценариев шлифования дается прогноз по точности обработки для тестируемого цикла шлифования.

Выводы

1. Из-за отсутствия у современных CAD/CAM-систем инструмента для проектирования оптимальных циклов шлифования в реальных производственных условиях режимы резания для всех видов операций круглого шлифования с ЧПУ назначаются технологом вручную. При этом технолог опирается только на личный опыт или же имеющиеся статистические данные предприятия по режимам резания аналогичных операций. Отдельно отметим, что на данный момент в условиях автоматизированного производства отсутствует инструментарий для тестирования разработанных циклов шлифования для управляющих программ на обеспечение заданной точности и других параметров качества обрабатываемой поверхности. Поэтому прогнозирование точности обработки на операциях круглого шлифования с ЧПУ, в которых программные подачи изменяются в автоматическом ступенчатом цикле, является сложной и нерешенной научно-технической задачей.

2. Для решения вышеописанной проблемы разработан цифровой двойник операции круглого врезного шлифования с ЧПУ, который позволяет выполнять трехмерную визуализацию процесса формообразования обрабатываемой поверхности детали путем моделирования послойного удаления металла по всей длине обрабатываемой поверхности для разных условий шлифования. ЦД позволяет проигрывать варианты обработки детали для разных условий шлифования, корректировать режимы резания и повышать точность обработки. В результате становится возможным использование разработанного ЦД в качестве прикладного инструмента для верификации и предварительного тестирования проектируемого цикла на обеспечение им точности обработки для заданных условий обработки путем моделирования послойного съема припуска на каждом обороте заготовки с учетом влияния переменных факторов. Внедрение контроля УП по обеспечению точности обработки снижает брак и повышает производительность операции, сокращает сроки разработки и внедрения УП в производство.

Литература

1. Никифоров, И.П. *Современные тенденции шлифования и абразивной обработки* / И.П. Никифоров. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 560 с.
2. Михелькевич, В.Н. *Автоматическое управление шлифованием* / В.Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
3. Переверзев, П.П. *Моделирование и оптимизация управляющих программ для станков с ЧПУ с использованием динамического программирования* / П.П. Переверзев, Д.Ю. Пименов // СТИН. – 2014. – № 8. – С. 16–24.
4. Шипулин, Л.В. *Проектирование трехступенчатого цикла плоского шлифования периферией круга* / Л.В. Шипулин, И.В. Шмидт // СТИН. – 2019. – № 11. – С. 28–31
5. *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.
6. 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.
7. 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.
8. Nathan, R.D. *Intelligent estimation of burning limits to aid in cylindrical grinding cycle planning* / R.D. Nathan, L. Vijayaraghavan, R. Krishnamurthy // *Heavy Vehicle Systems*. – 2001. – Vol. 80. – P. 48–59.

9. 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. – P. 51–56. DOI 10.4028/0-87849-416-2.51
10. *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.
11. 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.
12. 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.
13. *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.
14. *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.
15. *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.
16. Agarwal, S. *Optimizing machining parameters to combine high productivity with high surface integrity in grinding silicon carbide ceramics* / S. Agarwa // *Ceram. Int.* – 2016. – Vol. 42(5). – P. 6244–6262.
17. *Cost optimization of internal grinding* / V.N. Pi, L.X. Hung, L.A. Tung, B.T. Long // *J. Mater. Sci. Eng.* – 2016. – Vol. 6. – P. 291–296.
18. *Determination of optimal exchanged grinding wheel diameter when internally grinding alloy tool steel 9CrSi* / L.X. Hung, V.N. Pi, L.A. Tung et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 417. – P. 012–026.
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. 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.

Акинцева Александра Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника, технологии и строительство», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, akintsevaav@susu.ru.

Поступила в редакцию 28 августа 2020 г.

DOI: 10.14529/engin200305

MAIN MODELING STAGES OF LAYER-BY-LAYER METAL REMOVAL WITH DIGITAL TWIN OF THE CIRCULAR GRINDING OPERATION WITH CNC

A.V. Akintseva, akintsevaav@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Modern circular grinding machines with CNC allow processing according to the specified cycles of cutting modes, which are part of a control program (CP). Despite the use of precise positioning systems, modern grinding machines have a compliance of a technological system (TS). This explains the fluctuations in a value of the allowance removal and occurrence of various errors in dimensions, which increase when processing a batch of parts performed in unstable condi-

tions under the influence of a large number of variable technological factors (allowance fluctuation, blunting of the wheel grains, changes of the wheel diameter, etc.).

However, in the presence of a large number of automated systems of CP designing there is still no tool for their control to ensure the processing accuracy of the parts batch. In addition, when designing cycles of the cutting modes the database obtained for universal machines is used in these systems. As a result, the designed cycles do not guarantee the stability of the accuracy indicators when processing a batch of parts, do not provide maximum productivity and require adaptation to the specified processing conditions.

This article presents a description of the digital twin (DT) on the example of the plunge circular grinding, which allows simulating layer-by-layer metal removal during the whole grinding cycle by calculating the value of the removed allowance on each revolution of the workpiece under various combinations of unstable processing conditions and variable compliance of the technological system. Herewith, modeling of layer-by-layer allowance removal is performed in several sections which have different compliance. After the end of the metal removal modeling (at the end of the grinding cycle) it becomes possible to evaluate the accuracy by known calculated values of radii in all sections of the treated surface. It should be noted that the use of DT will speed up and simplify the process of cycles designing, as well as increase the productivity of CNC circular grinding operations by optimizing the cycles of cutting modes with ensuring the specified accuracy.

Keywords: digital twin, circular grinding, cycle, processing accuracy.

References

1. Nikiforov I.P. *Sovremennye tendencii shlifovaniya i abrazivnoj obrabotki* [Modern trends in grinding and abrasive processing]. Stary Oskol, TNT Publ., 2012. 560 p.
2. Mikhel'kevich V.N. *Avtomaticheskoe upravlenie shlifovaniem* [Automatic control of grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 304 p.
3. Pereverzev P.P., Pimenov D.Y. [Optimization of Control Programs for Numerically Controlled Machine Tools by Dynamic Programming]. *Russian Engineering Research*, 2015, no. 2(35), pp. 135–142. (in Russ.)
4. Shipulin L., Shmidt I. [Three-Stage Cycle in Plane Grinding by the Wheel Periphery]. *Russian Engineering Research*, 2020, no. 4 (40), pp. 347–350. (in Russ.)
5. Nurkenov A., Guzeev V.I., Nurkenov A., Mazein P.G., Deryabin I.P. [Designing high-speed CNC-operations]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 450, no. 032014.
6. 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.)
7. 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. 2–12. (in Russ.)
8. Nathan R.D., Vijayaraghavan L., Krishnamurthy R. Intelligent Estimation of Burning Limits to Aid in Cylindrical Grinding Cycle Planning. *Heavy Vehicle Systems*, 2001, vol. 80, pp. 48–59.
9. Horiuchi O., Shibata T. Computer Simulations of Cylindrical Plunge Grinding – Influence of Work Stiffness on Grinding Accuracy. *Key Engineering Materials*, 2007, vol. 329, pp. 51–56. DOI: 10.4028/0-87849-416-2.51
10. 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.
11. 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.
12. 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.

13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Agarwal S. Optimizing machining parameters to combine high productivity with high surface integrity in grinding silicon carbide ceramics. *Ceram. Int.*, 2016, vol. 42(5), pp. 6244–6262.
17. Pi V.N., Hung L.X., Tung L.A., Long B.T. Cost optimization of internal grinding. *J. Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 6, pp. 291–296.
18. Hung L.X., Pi V.N., Tung L.A., Tu H.X., Jun G., Long B.T. Determination of optimal exchanged grinding wheel diameter when internally grinding alloy tool steel 9CrSi. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 417, pp. 012–026.
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. Yudin S., Smolyanoy K., Pereverzev P. Generalized cutting force model for grinding. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, no. 033005.

Received 28 August 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Акинцева, А.В. Основные этапы моделирования послойного съема металла с применением цифрового двойника операции круглого шлифования с ЧПУ / А.В. Акинцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 48–58. DOI: 10.14529/engin200305

FOR CITATION

Akintseva A.V. Main Modeling Stages of Layer-By-Layer Metal Removal with Digital Twin of the Circular Grinding Operation with CNC. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 48–58. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200305
