

УДК 621.92

**С.М. Братан, профессор, д-р техн. наук,
А.А. Ярошенко, доцент, д-р физ.-мат. наук,
Н.Н. Столяров, аспирант**

*Севастопольский национальный технический университет,
ул. Университетская 33, г. Севастополь
tm@sevntu.com.ua*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЕЙ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ, УЧИТЫВАЮЩИХ КОРРЕКЦИИ ЦИКЛА ЗА ПЕРИОД СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА

Рассмотрен алгоритм и практические примеры расчета циклов круглого наружного шлифования по предложенной модели методом спирального покоординатного спуска при использовании в качестве критерия эффективности технологической себестоимости и по быстродействию. Предложен алгоритм позволяющий повысить производительность обработки, за счет коррекции цикла за период стойкости инструмента.

Ключевые слова: шлифование, коррекция, циклы, оптимизация.

Введение. Управление процессом шлифования с целью обеспечения наибольшей эффективности операции является многовариантной задачей, решение которой не может быть сведено лишь к повышению точности и жесткости шлифовального станка, выбору режимов резания, обеспечивающих работу в области устойчивости динамической системы, подавлению основных источников вибрации и снижению погрешностей заготовок [1-4]. Качественный выбор способа управления может быть выполнен только на основе анализа процесса, с учетом многообразия влияющих на него факторов, изменяющихся с течением времени, между которыми существует обратная причинно-следственная связь.

Решение задачи включает в себя: составление математических моделей процесса, разработку алгоритмов управления и их реализацию системой управления станка.

Целью данной статьи является разработка методики построения высокопроизводительных циклов врезного шлифования на примере опорных шеек распределительного вала за период стойкости шлифовального круга.

Основное содержание работы. В работах авторов [1, 2] получены результирующие зависимости, устанавливающие связь параметров инструмента с технологическими факторами и временем работы, которые позволяют прогнозировать состояние рабочей поверхности инструмента в любой момент времени при различных алгоритмах изменения технологических режимов (таблица 1). Во все зависимости, отражающие состояние рабочей поверхности, входит износ единичных кромок. Полученные зависимости носят функциональный характер и позволяют прогнозировать поведение операции с учетом изменения ее состояния вследствие износа шлифовального круга при различных режимах шлифования.

Начальное состояние рабочей поверхности инструмента определяется параметрами, полученными после правки круга, конечное - в конце стойкости инструмента. Последнее характеризуется максимально допустимой волнистостью $W_{k\max}$, образующейся на поверхности круга, при которой не обеспечивается заданная точность формы поверхности, либо максимально допустимой величиной износа $\Delta h_{3\max}$ на вершинах режущих кромок, при которой начинается интенсивное разрушение рабочей поверхности инструмента. Аналитически эти условия могут быть записаны в виде неравенств:

$$W_k \leq W_{k\max}; h_3 \leq h_{3\max}.$$

Состояние заготовки, после j -го контакта с кругом задается текущим радиус-вектором $r_j(\alpha)$, где α – полярный угол; пространственными отклонениями Δ_j ; наибольшей высотой профиля шероховатости $R_{\max j}$; глубиной дефектного слоя $h_{d j}$.

Текущий радиус-вектор заготовки после j -го оборота вычисляется по его значению после $(j-1)$ -го оборота и величине радиального съема материала $\Delta r_j(\alpha)$:

$$r_j(\alpha) = r_{j-1}(\alpha) - \Delta r_j(\alpha).$$

Отклонения формы заготовки после j -го контакта определяются разностью между максимальным и минимальным значениями радиусов векторов поверхности

$$\Delta_j = \max_{\alpha} r_j(\alpha) - \min_{\alpha} r_j(\alpha).$$

Текущее значение высоты профиля шероховатости поверхности детали, отсчитываемое от линии выступов шероховатости имеет вид:

$$R_{\max j} = qR_{\max j-1} - q\Delta r - (1-q)R_{\max jf}, \quad (1)$$

где $q = 1$, если нижняя граница слоя шероховатости поверхности после j -го прохода не изменяет своего положения; $q = 0$, если нижняя граница слоя перемещается в глубину материала. $R_{\max jf}$ – шероховатость, которая формируется при j -ом контакте.

Для глубины дефектного слоя h_d , независимо от (1), но с теми же обозначениями:

$$h_{dj} = (1-q)h_{djf} + (h_{dj-1} + R_{\max j-1} - R_{\max j} - \Delta r_j)q, \quad (2)$$

где h_{djf} – дефектный слой, который формируется при j -ом контакте.

При равных условиях предпочтение отдается варианту с меньшей глубиной дефектного слоя.

Текущий припуск после j -го оборота вычисляется по его значению после $(j-1)$ -го оборота и величине радиального съема материала Δr_j

$$\Pi_j = \Pi_{j-1} - \Delta r_j.$$

Начальное состояние объекта (0) соответствует параметрам заготовки в момент ее установки на станок:

$$r_o(\alpha) = r_{заг}(\alpha); \quad \Delta_o = \Delta_{заг}; \quad R_{\max 0} = R_{\max заг}; \quad h_{d0} = h_{d_{заг}}.$$

Конечное состояние k объекта должно соответствовать техническим требованиям на деталь

$$\Delta_k \leq \Delta_d; \quad R_{\max k} \leq R_{\max d}; \quad R_{ak} \leq R_{ad}; \quad h_{dk} = h_{dd}; \quad r_k(\alpha) \leq r_{\max d}(\alpha); \quad r_k(\alpha) \geq r_{\min d}(\alpha), \quad (3)$$

где $r_{\max d}(\alpha) - r_{\min d}(\alpha) = \delta$, δ – допуск на изготовление детали.

Неравенства (3) справедливы для конца цикла обработки детали, после того как будет снят весь припуск на шлифование. В процессе обработки параметры качества изделия могут отличаться от требований чертежа. Однако они на протяжении всего цикла должны находиться в заданной области значений, при которых достижимы требуемые параметры качества детали. Так в течение всего цикла обработки нижняя граница текущей шероховатости поверхности не должна опускаться глубже, чем соответствующая граница слоя шероховатости детали [2].

$$R_{\max j} \leq \Pi_{jd} + R_{\max d},$$

где Π_{jd} – припуск, оставшийся не удаленным после j -го контакта поверхности с кругом.

Аналогичные неравенства могут быть записаны для глубины дефектного слоя:

$$h_{dj} + R_{\max j} \leq \Pi_j + h_{ddj} + R_{\max dj},$$

и пространственных отклонений формы заготовки:

$$\Delta_j \leq \left(\frac{\max}{\alpha} r_j(\alpha) - \sum_{i=j}^n \frac{\max}{\alpha} \Delta r_j(\alpha) \right) - \left(\frac{\min}{\alpha} r_j(\alpha) - \sum_{i=j}^n \frac{\min}{\alpha} \Delta r_j(\alpha) \right).$$

Кроме рассмотренных, на процесс шлифования накладывается ряд ограничений, обусловленных техническими характеристиками станка и технологической системы процесса чистового и тонкого шлифования.

К таким ограничениям относятся:

– фактическая глубина резания t_f , которая в свою очередь не должна превышать расстояния, равного максимальному вылету зерна над связкой δ_{cb} :

$$t_f \leq \delta_{cb}.$$

При повышении δ_{cb} появляется возможность увеличить интенсивность удаления материала заготовки, но это приводит к уменьшению сил закрепления зерен и увеличивает износ.

– радиальная составляющая силы резания, пределом которой является условие:

$$P_y \leq P_{y_{дон}}; \quad P_z \leq P_{z_{дв}}. \quad (4)$$

Аналогичные ограничения накладываются кинематикой станка на скорости вращения детали, круга и поперечную подачу:

$$V_u \geq V_{u \min}; \quad V_u \leq V_{u \max}; \quad V_k \geq V_{k \min}; \quad V_k \leq V_{k \max}; \quad S \geq 0; \quad S \leq S_{c0 \max}.$$

Совокупность зависимостей и ограничений, сведенных в таблицу 1, представляют описание свойств технологической системы.

Представленная в таблице 1 математическая модель операции круглого наружного врезного шлифования опорных шеек распределительного вала, в виде дифференциально-разностных соотношений, связывает соответствующие разности подачи инструмента и разности фактической глубины резания.

В качестве начального приближения (начальных условий для моделирования) используются справочные данные и существующие технологические рекомендации для соответствующих процессов.

Если при этом выполняются условия не нахождения технологических параметров в областях ограничений, то результат решения системы таблицы 1 определяет как закон изменения величины подачи инструмента, так и законы изменения величин съема материала, шероховатость поверхности заготовки, волнистость и т.д.

Приведенная математическая модель позволяет решать задачу оптимального управления, она вскрывает функциональные связи показателей качества процесса с основными технологическими факторами, позволяет прогнозировать поведение технологической системы при любых алгоритмах изменения режимов в любой момент времени.

Расчет цикла может быть произведен по быстродействию или по себестоимости обработки. По быстродействию: 1. Рассчитывают параметры состояния рабочей поверхности инструмента после правки; 2. Рассчитывают значение скорости съема материала при минимальных значениях фактической глубины, подачи шлифовальной бабки, скорости детали; 3. Задают приращение поперечной подачи S_y и рассчитывают все технологические показатели. Сравнивают полученные результаты с технологическими ограничениями. Если полученная точка фазового пространства оказывается за пределами достигнутой области, хотя бы по одному из параметров, то уменьшают величину приращения до тех пор, пока точка не окажется в области допустимых значений; 4. Рассчитывают скорость съема при полученном значении S_y и сравнивают ее с предшествующей. Если полученное значение оказалось больше предыдущего, то дают приращение по следующей переменной, в противном случае уменьшают величину приращения S_y до выполнения условия $Q_{\Sigma j} \geq Q_{\Sigma j-1}$; 5. Описанные выше процедуры повторяют для остальных переменных; 6. Нарращивают значение переменных до тех пор, пока не достигнут точки экстремума или точки границы, максимально приближающейся к ней; 7. Через уравнение баланса перемещений рассчитывают подачу шлифовальной бабки, оставшийся припуск и время этапа цикла; 8. Определяют режим работы инструмента сопоставлением прочности кромок и прочности закрепления зерен в круге с величиной сил резания, допускаемой технологической системой; 9. Рассчитывают величину износа наиболее выступающих режущих кромок. Рассчитывают параметры формы зерен их распределения по поверхности; 10. Рассчитывают параметры формы инструмента; 11. Изменение $\tau(\tau_{i+1} = \tau_i + h_\tau)$, коррекция входных данных; 12. Для оставшегося припуска повторяют вычисления с учетом полученных коррекций; 13. Расчет цикла прекращают, когда величина припуска окажется меньшей или равной величине допуска. Полученная информация поступает на управляющие органы станка или печать.

По себестоимости расчет цикла управления осуществляется аналогичным образом. В качестве критерия эффективности принимается стоимость съема 1 м^3 материала. Целевая функция минимизируется.

Предложенная методика расчета высокопроизводительных циклов по съему припуска и себестоимости обработки обеспечивает получение деталей с заданными параметрами качества. Методика основана на использовании динамической теоретико-вероятностной модели и метода винтового покоординатного спуска.

При ее апробировании выполнен расчет высокопроизводительных циклов на операцию предварительного шлифования опорных шеек распределительного вала. Материал распределительного вала сталь 40Х. Заготовки, поступающие на операцию шлифования после токарной обработки имеют размеры $42,95 \pm 0,15$ мм, шероховатость поверхности заготовки $R_a = 0,63$ мкм ($H_0 = 6,3$ мкм), пространственные отклонения опорных шеек (биение относительно оси центровых отверстий) не должны превышать 0,20 мм.

Деталь после обработки имеет размеры $42 \pm 0,02$ мм, шероховатость поверхности $R_a = 3,2$ мкм ($H_0 = 3,2$ мкм), биение опорных шеек не должно превышать 0,03 мм. Глубина дефектного слоя техническими требованиями на операцию не оговаривается. Шлифование шеек проводится на круглошлифовальном станке ХШ1-78Ф2Ш11, снабженном прибором активного контроля, кругами 1 600x25x305 24А40СТ16КА2. Обработка ведется с использованием трехступенчатого цикла: быстрый подвод (форсированная подача); черновое шлифование; чистовое шлифование. Этап форсированной подачи выполняется при поперечной подаче 12 мм/мин, чернового шлифования 0,4 мм/мин, чистового шлифования 0,15 мм/мин.

Таблица 1 – Математическая модель операции круглого наружного врезного шлифования опорных шеек распределительного вала

Вид зависимости	Зависимости математической модели	
Изменение фазовых координат системы и объекта	$\Delta A_j = \Delta t_{ff} + \Delta r_{j-1} + \Delta R_j - \Delta y_j; \Delta y_j = \frac{\Delta P_{yj}}{G};$ $\rho_{3i} = \rho_{3i-1} \cdot \left(\frac{t_{fi}}{t_{fi} - \Delta h_{3i}} \right); \Delta h_{3i} = \Delta R_i = C_n \cdot V_{ui}^{-0,06} \cdot l_o^{-0,21} \cdot h_k^{1,5} \cdot t_{fi}^{1,4};$ $l_{3i} = 2,828 \cdot \sqrt{\rho_{3i} \cdot h_{3i}}; n_{3i} = n_{3i-1} + \frac{1,5 \cdot n_{3o} \cdot \Delta h_{3i}}{t_{fi}^{1,5}} - n_{3i-1} \cdot P_3; r_j = r_{j-1} - \Delta r_j;$ $\Pi_j = \Pi_{j-1} - \Delta r_j; H_j = \max(H_{j-1} - \Delta r_j; H_{ff}); h_{dj} = \max(h_{dj-1} + H_{j-1} - \Delta r_j - H_j; h_{fdj});$ $P_{yj} = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot B \cdot n_{3j}^{0,3-1} \cdot \tau_s \cdot \sqrt{D_3 \cdot t_{ff}} \cdot [0,083 \cdot t_{ff} + 0,061 \cdot h_{3j-1}];$ $h_{dj} = 2 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot \sqrt{D_3 \cdot t_f} \cdot (T_k - T_{cp})}{V_u \cdot T_k}} \cdot \sqrt{\ln \frac{T - T_{cp}}{2 \cdot T_{cp}}}; \Delta r_j = t_{fi}^2 / (1,478 \cdot t_{fi} + \frac{13,66 \cdot V_u}{K_c \cdot (V_{ki} \pm V_{ui}) \cdot n_{3i} \cdot \sqrt{D_3 \cdot \rho_{3i}}});$ $t_f = 0,739 \Delta r + \sqrt{0,546 \Delta r^2 + \frac{13,66 \cdot V_u \cdot \Delta r}{K_c \cdot (V_{ki} \pm V_{ui})^{0,4} \cdot n_{3i}^{0,4} \cdot \sqrt{D_3 \cdot \rho_{3i}}}}.$	
	<p>Δh_{3i} – приращение износа вершины абразивного зерна при i-том контакте инструмента; ΔA_j – изменение межцентрового расстояния между кругом и заготовкой; Δy_j – приращение упругих отжатий в технологической системе; ρ_{3i} – радиус округления вершины зерна; l_{3i} – длина площадки износа абразивного зерна; n_{3i} – число зёрен в единице объёма рабочего слоя инструмента; r_j – текущий радиус-вектор заготовки после j-того оборота; Π_j – припуск, оставшийся не удалённым после j-того контакта детали с кругом; H_j – слой, в котором распределена шероховатость; h_{dj} – глубина дефектного слоя; P_{yj} – радиальная составляющая силы резания; Δr_j – радиальный съём материала.</p>	
Технические ограничения	$V_u \geq 0,26 m/c; S_y \leq 0,2 \cdot 10^{-3} m/c; S_y \geq 0 m/c; V_k \leq 50 m/c; V_k \geq 0 m/c;$ $t_{ff} \leq \Pi_j + 0,063 \cdot 10^{-3}; h_{dj} + H_j \geq \Pi_j + 0,103 \cdot 10^{-3}; P_y \geq 0; P_y \leq 250$	
	V_u – окружная скорость детали; t_{ff} – фактическая глубина резания; S_y – величина поперечной подачи; V_k – окружная скорость шлифовального круга.	
Критерий эффективности	Вариант 1	Вариант 2
	$C_j = \frac{R + \pi D C_u B S_{Rj}}{\Delta r_j V_{uj} B}$	$t_{Qj} = \frac{1}{\Delta r_j B V_{uj}}$
	C_j – приведенные затраты съёма единицы объёма материала; R – стоимость одной станкосекунды; t_j – время j -того оборота заготовки; Δr_j – радиальный съём материала при j -ом обороте; D – диаметр круга; B – высота круга; S_{Rj} – скорость радиального износа круга при j -ом обороте; C_u – стоимость единицы объёма инструмента с учётом расходов на правку и замену; t_{Qj} – время, затрачиваемое за 1 оборот на съём единицы объёма материала.	

Переключение с этапа форсированной подачи на этап чернового шлифования производится при достижении размера 42,9 мм, с чернового на чистовое при 42,3 мм. Отключение станка выполняется при настройке прибора активного контроля на размер 42,00 мм.

Все этапы цикла выполняются при одной частоте вращения заготовки $n_u = 120$ об/мин, которая определена экспериментально и соответствует верхнему пределу скорости V_u , допускаемому особенностью конструкции детали.

При разработке математической модели на основе выполненных исследований и литературных данных приняты следующие значения параметров процесса, коэффициентов и показателей степени: скорость круга 50 м/с (паспорт станка); податливость технологической системы $\omega = 20 \cdot 10^{-9}$ м/Н (эксперимент); число зерен на единице поверхности инструмента $n_3 = 2 \cdot 10^6$ 1/м² (данные литературы); $K_c = 0,9$; $\tau_s = 7,2 \cdot 10^3$ Н/м²; $z_h = 5$; $\rho_3 = 0,016$ (данные литературы); $D_3 = 40,1$ мм (расчет); периодичность правки круга - 5 деталей.

При составлении модели все параметры приведены к размерностям системы СИ. Глубина дефектного слоя назначена по данным [2] $h_{d_j} = 0,04$ мм.

Расчеты циклов выполнены с использованием в качестве критерия эффективности технологической себестоимости операции и по быстрдействию. При расчете циклов по быстрдействию рассмотрено два варианта:

- а) состояние рабочей поверхности абразивного инструмента в процессе обработки одной поверхности (детали) принято постоянным;
- б) при каждом обороте участок поверхности контактирует с кругом с измененным состоянием рабочей поверхности инструмента.

На рисунке 1 приведено сопоставление рассчитанных при обработке первой и пятой деталей после правки (первая и последняя деталь периода стойкости инструмента). Первый этап цикла «форсированная подача» выполняется при одинаковых подачах, по продолжительности он несколько меньше для пятой детали, что связано с увеличением контактной жесткости при затуплении абразивного инструмента. На втором участке цикла для первой детали подача увеличивается в 1,42 раза, круг имеет более высокую режущую способность, на третьем участке цикла кривая изменения подач также располагается выше кривой цикла обработки пятой детали. Общее время цикла обработки первой детали в 1,38 раза меньше цикла обработки детали в конце периода стойкости инструмента. При обработке 2-й, 3-й, 4-й деталей основное время при коррекции цикла соответственно снижается в 1,3; 1,2; 1,12 раза. Сопоставление расчетных циклов обработки деталей с действительными на предприятии свидетельствуют, что они в основном отличаются третьим этапом цикла. На чистовом этапе цикла предприятия подача сохраняется постоянной, что объясняется несовершенством системы управления и дискретностью выбора подачи. При изменении подачи в период третьего этапа цикла его продолжительность уменьшается в 1,5 раза. Переход от дискретной системы управления к непрерывной является существенным резервом повышения производительности операций шлифования.

Таким образом, выполненные расчеты показывают на достаточно высокую эффективность коррекции цикла за период стойкости абразивного инструмента при обработке деталей в автоматизированном производстве.

При введении коррекции производительность обработки увеличивается в среднем на 20...25%, в начальный период стойкости инструмента на 35...40%.

В связи с тем, что оптимальные циклы шлифования, предусматривающие возможность непрерывного изменения поперечной подачи, не могут быть реализованы на всех видах оборудования в производственных условиях, кроме рассмотренной может быть поставлена задача коррекции цикла без изменения его структуры. Для ее решения введем понятие коэффициента коррекции цикла K_{si} , который для i -й обрабатываемой после правки круга заготовки равен отношению подачи, вычисленной с учетом фактического состояния рабочей поверхности режущего инструмента к соответствующей подаче конца периода его стойкости. При наличии управления по скорости изделия может быть введен коэффициент коррекции скорости K_{vi} . Такие коэффициенты вычисляются для каждого участка цикла при обработке первой, второй, N -ой заготовки или поверхности.

Рассмотрим возможные варианты расчета коэффициентов коррекции при врезном шлифовании с изменением поперечной подачи. При его определении нет необходимости на каждом участке цикла учитывать все ограничения режима резания, а можно рассматривать только те, которые определяют данный этап.

Для участка цикла «форсированная подача» создается натяг в технологической системе. В не зависимости от состояния рабочей поверхности инструмента величина подачи определяется техническими возможностями технологической системы. Коэффициент коррекции для всех заготовок периода стойкости инструмента на этом этапе равен единице.

На втором участке цикла определяющим ограничением является допустимая технологической системой сила резания, неравенство (5). Для расчета коэффициента коррекции приравняем текущее значение силы резания при обработке i -ой и N -ой деталей к допустимой

$$P_{y_{дон.i}} = K_1 \cdot \frac{(t_{fi} - \Delta r_i)^{\chi+0,5}}{t_{fi}} \cdot [K_2 \cdot (t_{fi} - \Delta r_i) + K_3], \quad (6)$$

$$P_{y_{дон.N}} = K_1 \cdot \frac{(t_{fN} - \Delta r_N)^{\chi+0,5}}{t_{fN}} \cdot [K_2 \cdot (t_{fN} - \Delta r_N) + K_3], \quad (7)$$

где $K_1 = \chi \cdot l_k \cdot n_3 \cdot C_b \cdot h_{3max} \cdot \sqrt{D_3}$; $K_2 = 0,96 \cdot B(\chi; z \cdot m + 3,5) \cdot \frac{\cos \beta}{\sin \beta}$; $K_3 = \frac{\pi \cdot \mu \cdot C_b \cdot h_{3max}^m}{b} \cdot B(\chi; 2 \cdot m \cdot z + 2,5)$.

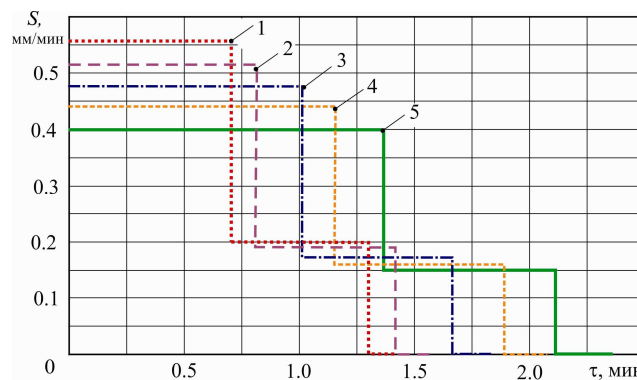


Рисунок 1 – Изменение цикла шлифования за период стойкости инструмента по продольной подаче
S(1,2,3,4,5 – номер детали после правки круга; τ – время шлифования)

Выражая радиальный сьем материала в уравнениях (6) и (7) из уравнения вероятности контакта [1], получим зависимости, имеющие по одной неизвестной t_{fi} и t_{fN} . Вычисление t_{fi} и t_{fN} по зависимостям (6) и (7) может быть выполнено численными методами.

Уравнение баланса перемещений для второго участка цикла может быть преобразовано, в связи с отсутствием приращений упругих деформаций и фактической глубины микрорезания

$$\Delta A_j = \Delta r_{j-1} + \Delta R_j. \quad (8)$$

Учитывая, что радиальный износ круга на два порядка меньше радиального съема материала уравнение (8) упрощается. Можно считать, что для установившегося процесса шлифования вся подача расходуется на радиальный сьем материала. Коэффициент коррекции в этом случае определяется из соотношения

$$K_{si} = \frac{\Delta r_i}{\Delta r_N}, \quad (9)$$

где Δr_i и Δr_N – соответственно радиальный сьем материала при одном контакте заготовки с кругом при обработке i -ой и N -ой деталей (поверхностей).

Радиальный сьем материала и фактическая глубина микрорезания определяются из системы уравнений таблица 1.

При расчете Δr_i в уравнения подставляются значения параметров состояния рабочей поверхности инструмента на момент начала второго этапа цикла i -ой заготовки, при расчете Δr_N соответственно значения параметров состояния при обработке N -ой заготовки.

Для третьего участка цикла «чистовая подача» лимитирующими ограничениями являются ограничения: по глубине слоя шероховатости поверхности и по глубине дефектного слоя. Так же как и для второго участка цикла после нескольких контактов поверхности с инструментом процесс становится установившимся, вся поперечная подача расходуется на радиальный сьем материала. Коэффициент коррекции цикла шлифования может быть рассчитан по уравнению (9).

При лимитирующем ограничении по шероховатости поверхности воспользуемся уравнением

$$H_i = t_{fi} - \Delta r_i. \quad (10)$$

Приняв H_i , равное величине допустимого слоя шероховатости, неравенство (10) после подстановки вместо Δr_i его значения из уравнения (таблица 1) получим для заключительной части третьего этапа цикла

$$P_j + H_{ig.} = t_{fi} - \frac{t_{fi}^2}{1,478 \cdot t_{fi} + \frac{13,66 \cdot V_u}{K_c \cdot (V_{ki} \pm V_{ui}) \cdot n_{zi} \cdot \sqrt{D_{\varphi} \cdot \rho_{zi}}}} \quad (11)$$

Решая квадратное уравнение соответственно для i -ой и N -ой поверхностей найдем значения t_{fi} и t_{fN} . Вычисляя соответственно Δr_i и Δr_N и беря их соотношение, определим коэффициент коррекции цикла на его третьем участке. При лимитирующем ограничении по глубине дефектного слоя воспользуемся уравнением [4] $h_{dj} = 2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau_k \cdot \frac{T_k - T_{cn}}{T_k} \cdot \ln \frac{T_k - T_{cn}}{2 \cdot T_{cn}}}$, подставив в его левую часть вместо текущего значения h_{dj} допустимую глубину дефектного слоя для заключительной части третьего этапа цикла

$$P_j - H_j + h_{dj} + H_{jg} = 2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau_k \cdot \frac{T_k - T_{cn}}{T_k} \cdot \ln \frac{T_k - T_{cn}}{2 \cdot T_{cn}}} \quad (12)$$

Уравнение (4) позволяет рассчитать допустимую тангенциальную составляющую силу резания. Дальнейшая последовательность расчета коэффициента коррекции третьего этапа цикла, сохраняется такой же, как и для второго этапа.

Рассчитываются фактическая глубина микрорезания и радиальный съём материала при обработке i -ой и N -ой деталей. По зависимости (9) определяется коэффициент коррекции цикла.

Как следует из литературного обзора и анализа циклов, применяемых на Мелитопольском моторном заводе, многие из них заканчиваются этапом выхаживания. Этап выхаживания проводится без поперечной подачи. Коэффициент коррекции этого этапа согласно уравнению (9) равен единице, но в зависимости от состояния рабочей поверхности инструмента изменяется продолжительность этапа. Для расчета продолжительности этапа при обработке i -ой поверхности достаточно решить уравнение баланса перемещений, приравняв значение приращения ΔA_j нулю.

Сводные данные по коэффициентам коррекции и продолжительности каждого этапа цикла приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты коррекции циклов шлифования распределительного вала

Этап цикла	Форсированная подача					Черновое шлифование					Чистовое шлифование					Выхаживание				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Коэффициент коррекции цикла	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.42	1.30	1.20	1.10	1.00	1.35	1.28	1.15	1.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Время выполнения этапа	0.50	0.54	0.58	0.62	0.65	0.72	0.82	1.03	1.15	1.17	0.62	0.64	0.68	0.72	0.75	0.20	0.20	0.21	0.21	0.23

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшие значения коэффициента коррекции циклов получены для обработки первой заготовки после правки. При обработке 2-й, 3-й, 4-й поверхностей он закономерно уменьшается. Для черногового этапа коэффициент коррекции изменяется от 1 до 1,4, для чистового этапа от 1 до 1,35. Для 1-й, 2-й, 3-й поверхностей отмечается значительное снижение времени на обработку. Суммарное время на обработку 1-й поверхности составляет 2,04 мин., 2-й поверхности 2,18 мин., 3-й поверхности 2,46 мин., 4-й поверхности 2,64 мин., 5-й поверхности 2,90 мин. Производительность процесса обработки соответственно увеличивается при шлифовании первой

поверхности в 1,42 раза, второй поверхности в 1,35 раза, третьей поверхности в 1,18 раза, четвертой поверхности в 1,1 раза.

Выводы. Выполненный анализ позволяет сделать заключение, что коррекция циклов шлифования за период стойкости инструмента, выполняемая с учетом фактического состояния рабочей поверхности инструмента, является важным резервом повышения эффективности операций круглого наружного шлифования в автоматизированном производстве. При введении коррекции производительность операций шлифования увеличивается на 15-30 % при одновременной стабилизации параметров качества обработанных деталей. Предложенные методики и алгоритмы позволяют производить расчеты высокопроизводительных циклов шлифования с учетом состояния рабочей поверхности инструмента и коэффициента коррекции для каждого этапа цикла за период стойкости инструмента.

Перспективы дальнейших исследований в данной области. При выполнении данных исследований не учитывалось изменение количества зерен по глубине инструмента с течением времени, рассматривался один типоразмер заготовок, не учитывалось изменение характеристик кругов. Учет вышеуказанных факторов представляет перспективы дальнейших исследований в данной области.

Библиографический список использованной литературы

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304 с.
2. Братан С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования: дис. ... доктора техн. наук: 05.02.08: защищена 24.03.2006; утв. 01.07. 2006 / Братан Сергей Михайлович. – Одесса, 2006. – 321 с.
3. Кальченко В.В. Шлифование вогнутых и выпуклых криволинейных поверхностей вращения на станках с ЧПУ одним инструментом со скрещивающимися осями его и детали / В.В. Кальченко // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. – Вып. 65. – С. 65-72.
4. Богущкий В.Б. Особенности процесса шлифования и заточки в условиях перекрещивающихся осей инструмента и детали / В.Б. Богущкий, С.М. Братан // Міжнародна науково-технічна конференція «Машинобудування – очима молодих»: матеріали конференції, Кременчук, 30 жовтня – 1 листопада 2013 р. – Кременчук: КрНУ ім. М.Остроградського, 2013. – С. 37-39.

Поступила в редакцию 05.01.2014 г.

Братан С.М., Ярошенко А.А., Столяров М.М. Розробка алгоритмів управління операцією круглого шліфування, що враховують корекції циклу за період стійкості інструменту

Розглянуто алгоритм та практичні приклади розрахунку циклів круглого зовнішнього шліфування по запропонованій моделі методом спірального покоординатного спуску при використанні як критерію ефективності технологічної собівартості і зашвидкодією. Запропоновано алгоритм дозволяє підвищити продуктивність виробництва, за рахунок корекції циклу за період стійкості інструменту.

Ключові слова: шліфування, корекція, цикли, оптимізація.

Bratan S.M., Yaroshenko A.A., Stolyarov N.N. Development of control algorithms cylindrical grinding operation, taking into account the correction cycle during the period of the life of the tool

An algorithm and practical examples of calculation cycles round outer grinding on the model proposed by the spiral of descent when used as a criterion for the effectiveness of the technological and cost in performance. An algorithm is proposed to improve the performance of processing, due to the correction cycle for tool life.

Keywords: grinding, correction cycles, optimization.