

**Ю.О. Стреляная, к.т.н., асист.***Севастопольский национальный технический университет,***ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ЧИСТОВОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ  
НА ТЯЖЕЛЫХ СТАНКАХ**

*Разработана методика построения предельных граничных циклов управления операцией чистового точения на тяжелых станках, за счет оптимизации параметров технологического процесса, разработаны математические зависимости, характеризующие ограничения в виде неравенств и выбраны критерии эффективности.*

**Ключевые слова:** *стабильность, оптимизация, граничный цикл, чистовое точение, тяжелые станки, критерий эффективности.*

**Постановка проблемы.** В сравнении с традиционной обработкой, чистовое точение на тяжелых станках является более сложным. Поверхности преобразуются от заготовки до готовой детали за более или менее длительный промежуток времени, в течение которого изменяются взаимное расположение исполнительных механизмов станка, элементы режима резания, состояние рабочей поверхности инструмента. В этих условиях обеспечение стабильного качества обработки и эффективности операций возможно только на основе динамических моделей, которые должны учитывать влияние внешних возмущений за время обработки детали; деформации приспособления, детали и инструмента; наличие вибраций в технологической системе и т. д.

При проектировании технологических процессов чистового точения, за основу берутся детерминированные модели, по которым рассчитывается традиционные или традиционно-граничные циклы, осуществляется обработка партии заготовок, после чего систему перестраивают на обработку другого типоразмера или вида. В результате этого технологический процесс осуществляется с применением традиционных режимов резания, способов диагностики и управления.

В области теории оптимальных процессов разработан универсальный математический аппарат оптимального управления и только отсутствием динамических моделей следует объяснить

несовершенство общей методологии оптимизации и управления процессами чистового точения на тяжелых станках.

В большинстве случаев при проектировании технологических процессов чистового точения, за основу берутся детерминированные модели, по которым рассчитывается традиционные или традиционно-граничные циклы, осуществляется обработка партии заготовок, после чего систему перестраивают на обработку другого типоразмера или вида [1]. В результате этого технологический процесс осуществляется с применением традиционных режимов резания, способов диагностики и управления.

**Целью** данной статьи является построение предельных граничных циклов управления процессом чистового точения на тяжелых станках, за счет оптимизации параметров технологического процесса.

Решать задачи оптимизации технологического процесса возможно численными методами по различным формализованным критериям: по критериям быстродействия (например, критерий штучного времени производства детали, интенсивность съема материала) или себестоимости (например, приведенных затрат и др.), соответствует решению задачи построения предельных граничных циклов программного управления.

В качестве параметров, которые используются при определении конкретных значений вышеприведенных критериев, используются значения переменных, характеризующих поведение технологического процесса, и его результаты. Для конкретизации этих значений еще до выполнения соответствующих технологических операций необходимо адекватное описание поведения технологической системы и необходимых по техническим требованиям параметров качества. Погрешности описания неизбежно приводят к снижению производительности, нестабильности и потере качества изделий.

Начальное состояние рабочей поверхности инструмента определяются его исходным состоянием (в момент времени  $t = 0$ ). Последнее характеризуется максимально допустимым износом его поверхности, при котором не обеспечивается заданная точность формы поверхности, либо заданная величина шероховатости поверхности. Аналитически эти условия могут быть записаны в виде равенств:

$$h_3 \leq h_{max} \quad (1)$$

Состояние заготовки при чистовом точении (рис. 1), после  $j$ -го прохода задается текущим радиус-вектором  $r_j(\alpha)$ , где  $\alpha$  – полярный угол; пространственными отклонениями  $\Delta_j$ ; наибольшей

высотой профиля шероховатости  $R_{\max j}$ ; глубиной дефектного слоя  $h_{dj}$ .

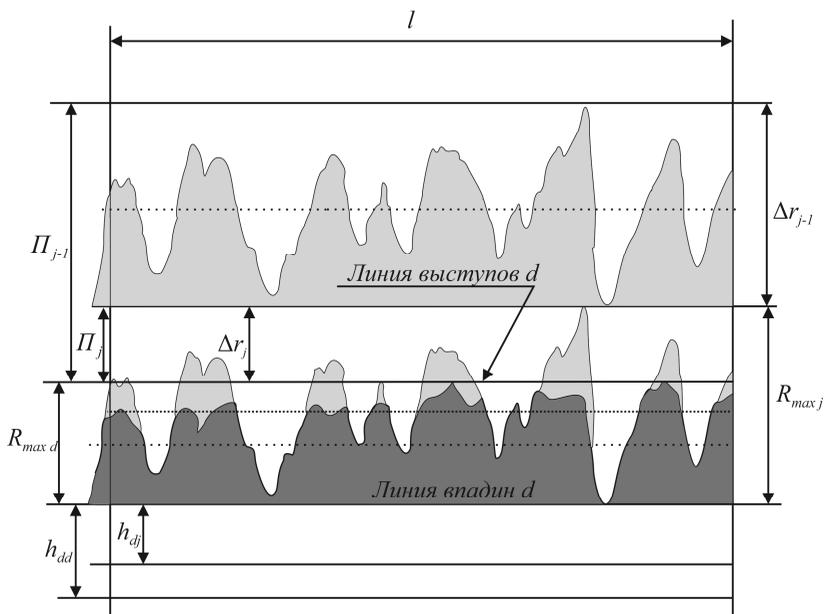


Рис. 1. Расчетная схема формирования показателей качества при чистовом точении

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

$$r_j(\alpha) = r_{j-1}(\alpha) - \Delta r_j(\alpha). \quad (2)$$

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

$$\Delta_j = \frac{\max}{\alpha} r_j(\alpha) - \frac{\min}{\alpha} r_j(\alpha). \quad (3)$$

Текущее значение высоты профиля шероховатости поверхности детали (рис. 1), отсчитываемое от линии выступов шероховатости имеет вид:

$$R_{\max j} = qR_{\max j-1} - q\Delta r - (1-q)R_{\max ff}, \quad (4)$$

где  $q = 1$ , если нижняя граница слоя шероховатости поверхности после  $j$ -го прохода не изменяет своего положения;  $q = 0$ , если нижняя граница слоя перемещается вглубь материала,  $R_{\max j}$  – шероховатость, которая формируется на  $j$ -м проходе.

Для глубины дефектного слоя  $h_d$ :

$$h_{dj} = (1 - q)h_{djf} + (h_{dj-1} + R_{\max j-1} - R_{\max j} - \Delta r_j)q, \quad (5)$$

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 прохода вычисляется по его значению после  $j-1$ -го прохода и величине радиального съема материала  $\Delta r_j$ :

$$P_j = P_{j-1} - \Delta r_j. \quad (6)$$

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

$$r_0(\alpha) = r_{заг}(\alpha); \Delta_0 = \Delta_{заг}; R_{\max 0} = R_{\max заг}; h_{\delta 0} = h_{\delta заг}. \quad (7)$$

Конечное состояние ( $k$ ) объекта должно соответствовать техническим требованиям на деталь:

$$r_k(\alpha) \leq r_{\max d}(\alpha); r_k(\alpha) \geq r_{\min d}(\alpha);$$

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

$$\Delta_k \leq \Delta_d; R_{\max k} \leq R_{\max d}; R_{ak} \leq R_{ad}; h_{dk} = h_{dd}. \quad (8)$$

В течение всего цикла обработки нижняя граница текущей шероховатости поверхности не должна опускаться глубже, чем соответствующая граница слоя шероховатости детали:

$$R_{\max j} \leq P_{jd} + R_{\max d}, \quad (9)$$

где  $P_{jd}$  – припуск, оставшийся не удаленным после  $j$ -го прохода.

Аналогичные неравенства могут быть записаны для глубины дефектного слоя:

$$h_{dj} + R_{\max j} \leq P_j + h_{ddj} + R_{\max dj}, \quad (10)$$

и пространственных отклонений формы заготовки:

$$\Delta_j \leq \left( \frac{\max}{\alpha} r_j(\alpha) - \sum_{i=j}^n \frac{\max}{\alpha} \Delta r_j(\alpha) \right) - \left( \frac{\min}{\alpha} r_j(\alpha) - \sum_{i=j}^n \frac{\min}{\alpha} \Delta r_j(\alpha) \right). \quad (11)$$

Кроме рассмотренных, на процесс накладываются ряд ограничений, обусловленных техническими характеристиками станка и технологической системы процесса.

К таким ограничениям относится:

– окружная скорость детали  $V_{\partial}$ , ограничивается предельными значениями технических возможностей станка:

$$V_{\partial} \geq V_{\partial \min}, V_{\partial} \leq V_{\partial \max}, \quad (12)$$

– составляющие силы резания, пределом которой является условие:

$$P_x \leq P_{x_{\text{доп}}}, P_y \leq P_{y_{\text{доп}}}, P_z \leq P_{z_{\text{доп}}}. \quad (13)$$

– поперечная подача, пределом которой является условие

$$S \geq 0; S \leq S_{cm \max}. \quad (14)$$

Совокупность зависимостей, ограничений, и известных зависимостей описания свойств технологической системы позволяют осуществить расчет циклов программного управления.

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

Если при этом выполняются условия ненахождения технологических параметров в областях ограничений, то результат решения определяется как закон изменения управляющих величин.

Указанное, позволяет решать задачи оптимизации технологического процесса известными численными методами по различным формализованным критериям, например, по критерию быстродействия [2] (критерий штучного времени производства детали), себестоимости, приведенных затрат и др.

В заводских условиях при обработке заготовок на тяжелых станках в качестве критериев эффективности обычно полагают  $t_{um}$  – штучное время на операцию или  $C_i$  – приведенные затраты на обработку изделия:

$$t_{um} = \frac{\Pi}{Q_{\Sigma}} K_{\Pi} + T_{\Pi} + \frac{T_{C.II} \cdot n_{c.u}}{n_{\text{дет}}}, \quad (15)$$

$$C_i = R \cdot t_{um} + q \cdot \Pi \cdot B \cdot L \cdot C_u + n_{c.u} \cdot C_{\text{пер}}, \quad (16)$$

где  $\Pi$  – припуск на операцию;  $Q_{\Sigma}$  – суммарная скорость съема материала;  $K_{\Pi}$  – коэффициент, учитывающий влияние пути врезания и схода инструмента на основное время;  $T_{\Pi}$  – подготовительно-заключительное время на деталь;  $T_{C.II}$  – время замены инструмента в случае его предельного износа;  $n_{c.u}$  – количество смен инструмента при обработке партии деталей;  $n_{\text{дет}}$  – количество деталей в партии;  $R$  –

стоимость станкосекунды;  $q$  – удельный расход материала резца;  $C_u$  – стоимость инструмента;  $C_{пер}$  – затраты на одну переточку резца.

Для определения величины характеризующей глубину резания необходимо решение уравнения баланса перемещений в технологической системе. Из анализа кинематики процесса можно сделать вывод, что радиальная подача расходуется на приращение съема металла, износа инструмента, упругие и температурные деформации в системе, а также – на приращение фактической глубины резания.

Отсюда уравнение баланса перемещений в технологической системе в непрерывной форме имеет вид [3]:

$$\Delta A = \Delta t_f + \Delta R + \Delta r + \Delta y_{yn} + \Delta y_T, \quad (17)$$

где  $\Delta A$  – расстояние между центром резцедержателя и центром вращения детали;  $\Delta t_f$  – изменение фактической глубины резания;  $\Delta R$  – износ вершины резца;  $\Delta r$  – изменение толщины заготовки;  $\Delta y_{yn}$  – упругие деформации системы;  $\Delta y_T$  – температурные деформации системы.

Уравнение баланса перемещений в технологической системе (17) показывает, на какие составляющие расходуется величина поперечной подачи. Оно же определяет геометрию зоны контакта инструмента с заготовкой.

Таким образом, важнейшим параметром, характеризующим процессы в зоне контакта и ее форму, является фактическая глубина резания  $t_f$ . Для ее определения необходимо решение уравнения (17) на каждом интервале времени  $\Delta \tau$ .

Стабильность параметров качества поверхностей при точении в существенной степени зависит от изменения фактической глубины резания  $t_f$ , которая, с одной стороны, представляет связующее звено между выходными параметрами процесса и управляющими воздействиями, с другой стороны – определяет важнейшие ограничения

$$t_{f \min} \leq t_f \leq t_{f \max}. \quad (18)$$

Уравнения (17 и 18) характеризует изменение состояния технологической системы для любого момента времени и справедливо для операции точения. Его анализ показывает, что радиальная подача на  $j$ -ом обороте (проходе) расходуется на приращение глубины резания, компенсацию радиального съема материала

предшествующего прохода, износ инструмента, приращение упругих и температурных деформаций.

При оптимизации по быстродействию или нахождении наилучшего решения по себестоимости может быть использован широкий спектр методов оптимизации, например: метод покоординатного спуска Пауэлла или динамического программирования Беллмана.

Из рассмотренных способов оптимизации режимов обработки весьма перспективно использование метода динамического программирования. Его применение ограничивается только объемом вычислительных работ, который в значительной степени определяется числом возможных сочетаний регламентируемых параметров качества. Если качество детали задается двумя параметрами, то возможные фазовые состояния будут определяться множеством сочетаний значений координат внутренних и граничных областей прямоугольника (рис. 2).

Ограничения уменьшают число возможных фазовых координат объекта, выделяя область технически обоснованных состояний. Алгоритм вычисления циклов чистового точения методом динамического программирования заключается в последовательном определении возможных фазовых состояний заготовки после  $N-i$ -го оборота, оценке полученных фазовых траекторий по критерию эффективности с выделением оптимального варианта. На первом этапе на основе анализа технических условий на изготовление детали устанавливаются все возможные фазовые состояния объекта после последнего прохода.

Для каждого из них намечаются допустимые сочетания элементов режима на последнем проходе, вычисляются значения критерия эффективности. По возможным значениям фазовых координат после  $N$ -го оборота и значениям элемента режима определяются все возможные фазовые состояния объекта после  $N-1$ -го прохода. При этом в одну и ту же точку фазового пространства можно попасть при различном сочетании выходных значений параметров качества и значений управляющих параметров. На основании сопоставления выявляются варианты с наименьшим значением критерия эффективности, они запоминаются, формируется множество возможных состояний после  $N-1$  оборота и оптимальное управление для преобразования качества на  $N$ -ом обороте.



Рис. 2. Прямоугольник возможных фазовых состояний объекта производства при двух регламентируемых параметрах качества

На третьем и четвертом этапе определяются для каждой полученной точки фазового пространства все возможные управления на  $N-1$ -м обороте и все возможные состояния объекта после  $N-2$ -го оборота детали. Формируется множество возможных фазовых состояний  $M_{N-i}^k$ ,  $i = 2$ .

В одну и ту же точку фазового пространства после  $N-i$  оборота детали ( $i > 1$ ) можно попасть как при различном сочетании элементов режима, так и при различном количестве чисел оборотов завершающей части процесса. Поэтому на пятом этапе выделяют такие общие точки  $M_{N-i}^k = M_{N-i+1}^k + \dots + M_N^k$  и выбирают траектории с минимальным значением критерия эффективности заключительной части процесса. На последующих этапах выполняется анализ возможных состояний объекта после  $N-i$ -го оборота ( $i = 3, 4, \dots, N$ ). Процесс вычисления заканчивается после получения результата, свидетельствующего, что все возможные фазовые состояния объекта, определяемые по значениям управляющих воздействий, выходят за пределы, допустимые математической моделью, либо после получения

результата, свидетельствующего, что все оставшиеся варианты имеют

$$\sum_{j=0}^{i+1} \tau_j \text{ одного из вариантов}$$

$$P = P_{заг} \text{ и } y_{N-i}^k \geq y_{заг}^k, \quad (19)$$

где  $y_{N-i}^k$  – значение  $k$ -го параметра качества.

Путем сопоставления полученных вариантов, удовлетворяющих начальным условиям, выбирается вариант, обеспечивающий минимальное значение критерия эффективности. Он принимается за оптимальный, так как обеспечивает формирование заданных параметров качества детали при наименьшем значении критерия эффективности.

Для процессов точения определение оптимального цикла может выполняться и в прямой последовательности, начиная с первого прохода и заканчивая последним. Общая структура вычислительного алгоритма при этом сохраняется. На основе анализа технических ограничений устанавливаются все возможные сочетания элементов режима резания на первом проходе. По известным фазовым координатам заготовки и возможным сочетаниям элемента режима определяются все возможные фазовые состояния объекта после первого прохода, на основании сопоставления критерия эффективности для каждого такого состояния выбирается оптимальное сочетание элементов режима. Затем последовательно выполняется анализ второго, третьего и т. д. проходов. На каждом этапе для последующих вычислений формируется множество  $M^h$  состояний, для которых не достигнуты параметры качества детали и критерий эффективности меньше его значений законченных вариантов. При  $M^h = 0$  вычисления прекращаются, из полученных возможных вариантов выбирается оптимальный.

Рассмотренный алгоритм позволяет определять наиболее рациональное сочетание элементов режима резания для каждого прохода. С увеличением числа управляющих воздействий и числа возможных фазовых состояний объекта структура алгоритма сохраняется, но объем вычислительных работ возрастает в геометрической прогрессии. Поэтому метод динамического программирования целесообразно применять при оптимизации процесса, когда число этапов процесса невелико, а принцип дискретности наиболее выявлен.

Для операций с большим числом контактов поверхности с инструментом можно заменить дискретный процесс преобразования параметров качества на непрерывный, а высокопроизводительные циклы определить на основе принципа максимума Понтрягина, по методике, рассмотренной в работе М.М. Тверского.

Рассмотренные методы оптимизации позволяют решить задачу построения предельных граничных циклов управления процессом чистового точения на тяжелых станках, обеспечивающих минимально возможное машинное время или минимальную себестоимость обработки деталей при заданных ограничениях.

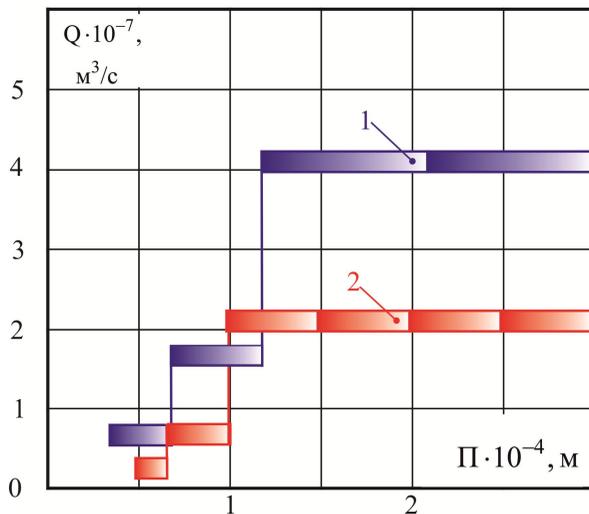
Полученные в результате расчета циклы оказались состоящими из трех этапов, которые могут характеризоваться также как и в работах [4]:

- этапа «форсированного режима», на котором снимается основной слой припуска;
- этапа «чистового», на котором подача и глубина резания ограничивается точностью формы изделия;
- этапа «финишного», где подача и глубина резания, лимитируется ограничениями на шероховатость поверхности.

При расчете циклов учитывалось состояние инструмента в различные периоды его стойкости, поэтому продолжительность каждого последующего цикла увеличивается.

Общее время цикла обработки первой детали в 1,75 раза меньше цикла обработки детали в конце периода стойкости инструмента (рис. 3).

Применение многоступенчатых циклов при чистовом точении на предприятии НКМЗ г. Краматорск позволило повысить точность обработки на один квалитет, снизить шероховатость поверхности в 1,5...2 раза для 15–30 % деталей партии. Однако, при обработке по предложенным граничным алгоритмам, увеличилось количество бракованных изделий, вследствие изменения состояния технологической системы.



1	t, мм	0,8	0,8	0,5	0,3		
	S, мм/об.	0,25	0,25	0,16	0,1		
	Q × 10 <sup>-7</sup> , м <sup>3</sup> /с	0,42	0,42	1,6	0,625		
2	t, мм	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,2
	S, мм/об.	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,07
	Q × 10 <sup>-7</sup> , м <sup>3</sup> /с	2,08	2,08	2,08	2,08	0,625	0,29

Рис. 3. Примеры граничных циклов процесса чистового точения на тяжелых станках для обработки стали 40X резцом: 1 – с «новой» пластиной из смешанной керамики на основе оксида алюминия (CC650); 2 – после 30 минут ее работы

**Перспективы дальнейших исследований в данной области.** Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для обеспечения стабильности параметров качества изделий при обработке по граничным алгоритмам необходима стабилизация параметров расчетного технологического цикла, что, возможно, осуществить только за счет введения адаптивных систем с обратной связью, адекватно оценивающих текущее состояние технологической системы.

#### Список использованной литературы:

1. *Васильева Л.В.* Підвищення ефективності обробки на середніх токарних верстатах за рахунок оптимізації конструктивних параметрів різців і режимів різання / *Л.В. Васильева* : дис. ... канд. техн. наук. : спец. 05.03.01. – 22.10. 2010 р. – Севастополь, 2010. – 157с.
2. Проблема выбора критерия качества при производстве и эксплуатации деталей машин / *С.М. Братан, Д.А. Каинов, Ю.О. Стреляная, П.А. Новиков* // *Сучасні технології у машинобудуванні* : зб. наук. статей. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – Вип. 7. – С. 153–160.
3. *Стреляная Ю.О.* Взаимосвязь перемещений в технологической системе при токарной обработке / *Ю.О. Стреляная, С.М. Братан, Д.Е. Сидоров* // *Наукові праці Донецького нац. тех. ун-ту* : зб. наук. праць. – Донецк : ДонНТУ, 2012. – Вип. 9 (205) – С. 72–76.
4. *Калман Р.* Очерки по математической теории систем / *Р.Калман, П.Фалб, М.Арбиб.* – М. : Мир, 1971. – 398 с.

СТРЕЛЯНАЯ Юлия Олеговна – кандидат технічних наук, ассистент кафедры «Технология машиностроения» Севастопольского национального технического университета.

Научные интересы:

– обеспечение стабильности параметров качества деталей при чистовом точении на тяжелых станках.

Тел.: (050)932–37–32.

E-mail: [joulia.bayrakova@mail.ru](mailto:joulia.bayrakova@mail.ru).

Стаття поступила в редакцію 03.04.2012

