

УДК 621.941

**Ю.О. Стреляная, ассистент***Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**joulia.bayrakova@mail.ru***РАЗРАБОТКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ГРАНИЧНЫХ ЦИКЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЕЙ ЧИСТОВОГО ТОЧЕНИЯ НА ТЯЖЕЛЫХ СТАНКАХ**

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

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

Современный уровень развития техники характеризуется повышением требований к качеству механизмов и машин. В связи с требованиями рынка, при изготовлении широкого класса деталей машин, необходимо стремиться, как к повышению производительности, так и выдерживать высокие требования по качеству обработанной поверхности.

Важнейшими факторами, определяющими потребительские качества, долговечность, надежность и точность работы машин, являются погрешности размеров, отклонения формы, шероховатость, волнистость поверхностей и др.

Эта проблема особенно актуальна для операций чистового точения изделий на тяжелых станках, на которых окончательно формируются параметры качества готовых изделий (рисунок 1).

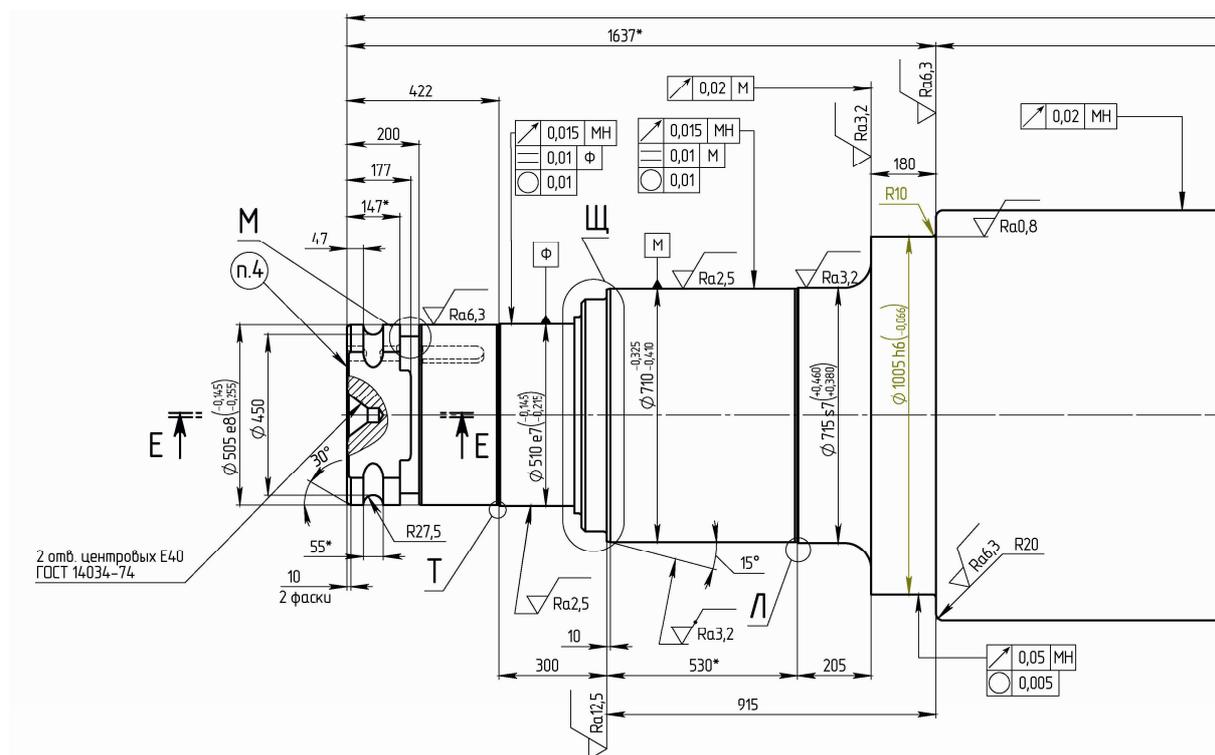


Рисунок 1 – Фрагмент чертежа валка прокатного стана

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.

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 решениях международной научно-технической конференции – «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку, 2012» отмечалось, что создание адаптивных систем управления является необходимым условием обеспечения стабильного качества обработки деталей тяжелого машиностроения.

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 разработка методов построения предельных граничных циклов управления операцией чистового точения на тяжелых станках, учитывающих изменение состояния технологической системы с течением времени.

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 неравенств:

$$h_3 \leq h_{max} . \tag{1}$$

Состояние заготовки при чистовом точении (рисунок 2), 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  $h_{dj}$ .

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

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

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

$$\Delta_j = \max_{\alpha} r_j(\alpha) - \min_{\alpha} r_j(\alpha) . \tag{3}$$

Текущее значение высоты профиля шероховатости поверхности детали (рисунок 2), отсчитываемое от линии выступов шероховатости имеет вид:

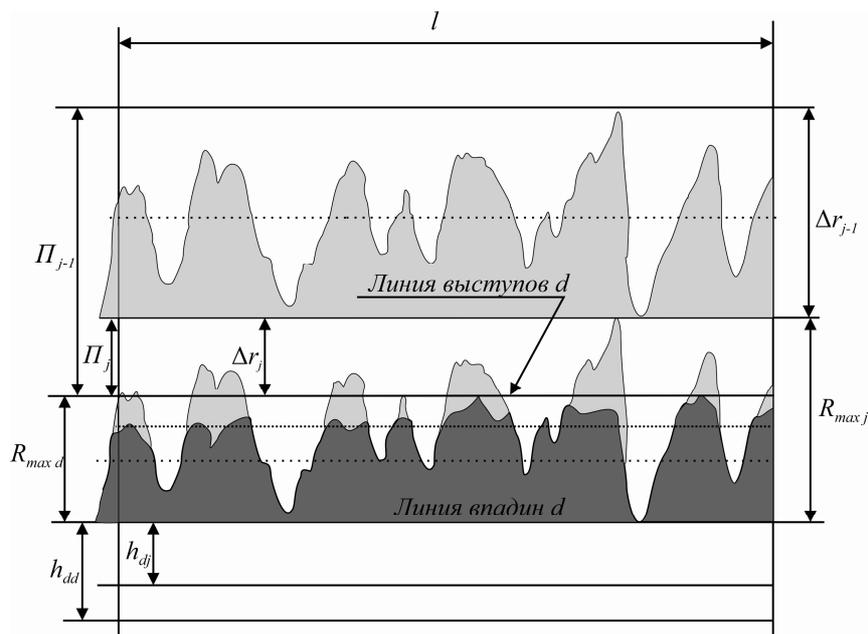


Рисунок 2 – Расчетная схема формирования показателей качества при чистовом точении

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

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,  $R_{\max ff}$  – шероховатость, которая формируется на  $j$ -м проходе.

Для глубины дефектного слоя  $h_d$ :

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

где  $h_{dff}$  – дефектный слой, который формируется при  $j$ -м 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  $\Delta r_j$

$$\Pi_j = \Pi_{j-1} - \Delta r_j. \quad (6)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Аналогичные неравенства могут быть записаны для глубины дефектного слоя:

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

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 относятся:

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

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

– составляющие силы резания, пределом которой является условие:

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

– поперечная подача, пределом которой является условие

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

Совокупность зависимостей и 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:

$$t_{um} = \frac{П}{Q_{\Sigma}} K_{II} + T_{II} + \frac{T_{C.II} \cdot n_{C.II}}{n_{дет}},$$

$$C_i = R \cdot t_{um} + q \cdot П \cdot B \cdot L \cdot C_u + n_{c.u} \cdot C_{nep},$$

где  $П$  – припуск на операцию;  $Q_{\Sigma}$  – суммарная скорость съема материала;  $K_{II}$  – коэффициент, учитывающий влияние пути врезания и схода инструмента на основное время;  $T_{II}$  – подготовительно-заключительное время на деталь;  $T_{C.II}$  – время замены инструмента в случае его предельного износа;  $n_{C.II}$  – количество смен инструмента при обработке партии деталей;  $n_{дет}$  – количество деталей в партии;  $R$  – стоимость станкосекунды;  $q$  – удельный расход материала резца;  $C_u$  – стоимость инструмента;  $C_{nep}$  – 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]:

$$\Delta A = \Delta t_f + \Delta R + \Delta r + \Delta y_{yn} + \Delta y_T, \quad (15)$$

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 (15) 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 (15) 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

$$t_{fi \min} \leq t_{fi} \leq t_{fi \max}. \quad (16)$$

Уравнения (15 и 16) 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. 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.

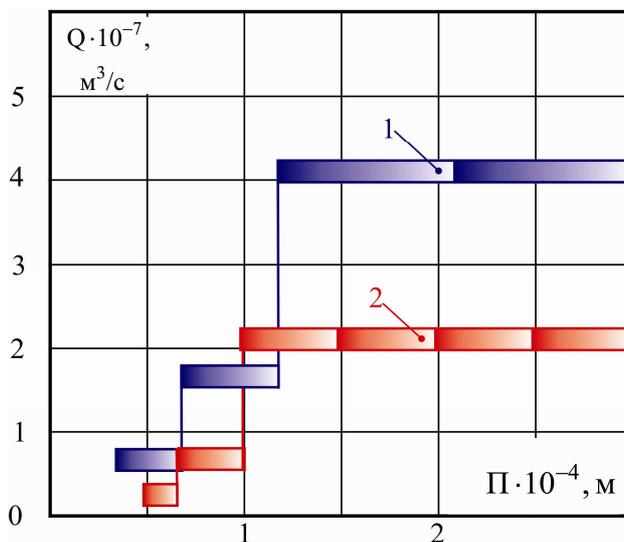
Рассмотренные методы оптимизации позволяют решить задачу построения предельных граничных циклов управления процессом чистового точения на тяжелых станках, обеспечивающих минимально возможное машинное время или минимальную себестоимость обработки деталей при заданных ограничениях.

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 (рисунок 3).



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

Рисунок 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

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.

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 систем с обратной связью, адекватно оценивающих текущее состояние технологической системы.

#### **Бibliографический список использованной литературы**

1. Васильева Л.В. Підвищення ефективності обробки на середніх токарних верстатах за рахунок оптимізації конструктивних параметрів різців і режимів різання: дис... канд. техн. наук. спец. 05.03.01/ Л.В. Васильева. — Севастополь, 2010. — 157 с.
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. ст. — Харків: НТУ «ХП», 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 національного технічного університету: зб.наук. праць. — Донецьк: 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.

Поступила в редакцию 29.03.2013 г.

**Стреляна Ю.О. Розробка порогових граничних циклів управління операцією чистового точіння на важких верстатах**

Розроблено методику побудови порогових граничних циклів управління операцією чистового точіння на важких верстатах, розроблені математичні залежності, що характеризують обмеження у вигляді нерівностей і обрані критерії ефективності.

**Ключові слова:** граничний цикл, чистове точіння, важкі верстати, критерій ефективності.

**Strelyanaya Yu. O. Development of limit boundary cycles of management of the operation to finish turning on heavy machine tools**

A construction method of boundary limit cycles of operation management of final turning of heavy machine tools, developed mathematical relationships characterizing inequality constraints, and selected criteria of efficiency is developed.

**Keywords:** boundary cycle, finish turning, heavy machine tools, criterion of efficiency.