

УДК 21.9: 658.5

**И. А. Петряева**, канд. техн. наук, доц.

Донецкий национальный технический университет

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [irina\\_petryaeva@mail.ru](mailto:irina_petryaeva@mail.ru)

## **МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОСТИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

*В статье представлены результаты многокритериальной оптимизации режимов чистового точения фасонных поверхностей с учетом переменности действующих ограничений. Основными критериями оптимизации являются максимальная производительность, минимальная себестоимость и мультипликативная свертка этих критериев, то есть отношение себестоимости к производительности. Установлены закономерности изменения основных переменных ограничений - температуры резания и шероховатости обработанной поверхности в зависимости от положения вершины лезвия инструмента на фасонной поверхности. Методами оптимизации являются линейное программирование по критерию максимальной производительности и геометрическое программирование по критерию минимальной себестоимости. Результаты оптимизации представлены в виде аналитических зависимостей оптимальных значений скорости резания и подачи от параметров процесса чистового точения фасонных поверхностей с учетом переменности действующих ограничений по температуре резания и шероховатости рабочей поверхности.*

**Ключевые слова:** фасонная поверхность, производительность, мультипликативная свертка, критерий оптимизации, режимы резания.

**I. A. Petryaeva**

## **MULTICRITERION OPTIMIZATION OF THE CUTTING REGIMES IN THE CONDITIONS OF CHANGEABILITY OF THE OPERATING LIMITATIONS**

*In the presented work the results of the multicriterion optimization of the clean turning regimes of the shaped surfaces are presented taking into account the changeability of the operating limitations. Basic criteria of optimization are the maximum productivity, the minimum prime price and multiplicative association of these criteria, which is attitude of the prime price toward the productivity. Regularities of changes in the main variable constraints - cutting temperature and roughness of the processed surface, depending on the position of the tip of the tool blade on the shaped surface are established. Basic variable limitations are the limitation on the cutting temperature and the work surface roughness. Methods of the optimization are the linear programming for the criterion of the maximum productivity and the geometrical programming for the criterion of the minimum prime price. The results of the optimization are set as the analytical dependences of the optimum values of the cutting speed and feed from the parameters of clean turning process of the shaped surfaces taking into account changeability of the operating limitations on the cutting temperature and roughness of the work surface.*

**Keywords:** shaped surfaces, productivity, prime price, multiplicative association, criteria of optimization, cutting regimes.

### **1. Введение**

Повышение эффективности изготовления деталей машин успешно решается за счет оптимизации параметров механической обработки. Сегодня довольно широко используются методы линейного и геометрического программирования при оптимизации режимов резания по критериям максимальной производительности и минимальной стоимости [1]. Однако использование этих методов позволяет решать только задачи однокритериальной оптимизации режимов резания.

Более перспективным сегодня является решение многокритериальных задач при оптимизации, поскольку они позволяют обеспечить одновременное улучшение параметров обработки по нескольким критериям. Многокритериальная оптимизация с использованием мультипликативной свертки критериев позволяет различные

критерии оптимизации привести к единому, что обеспечивает их наилучшее сочетание [2].

Особенностью существующих методик оптимизации является постоянство, как самой целевой функции, так и действующих ограничений. Однако в ряде случаев параметры процесса резания закономерно изменяются, что характерно для обработки фасонных поверхностей, и поэтому существующие ограничения становятся переменными. Закономерности изменения основных параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей: геометрических параметров инструмента, параметров среза и стружкообразования, сил и температур резания достаточно хорошо изучены [3].

Методика определения режимов точения, оптимальных по критерию максимальной производительности, с учетом переменности параметров обработки фасонных поверхностей методом линейного программирования представлена в [4]. В работе [5] метод геометрического программирования применялся для оптимизации режимов точения фасонных поверхностей по критерию минимальной себестоимости с учетом переменности существующих температурных ограничений и ограничений по прочности режущей пластины.

Целью представляемой работы является развитие методики многокритериальной оптимизации режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей с учетом переменности действующих ограничений.

## 2. Основное содержание и результаты работы

При решении задач оптимизации в качестве основных критериев принимаются переменные части производительности  $P$  и себестоимости  $C$ , зависящие от режимов резания. В представленной работе дополнительным критерием оптимизации является мультипликативная свертка этих критериев, выражаемая отношением переменных частей себестоимости и производительности, зависящих от режимов резания  $C_M = P/C$ .

Целевые функции, определяющие зависимость критериев от скорости резания  $V$  и подачи  $S$  представлены в виде:

$$P = VS \rightarrow \max; C = V^{-1}S^{-1} + MK_{\Theta}^{-1/mn} V^{k_V} S^{k_S}; C_M = V^{-2}S^{-2} + MK_{\Theta}^{-1/mn} V^{k_V-1} S^{k_S-1}, \quad (1)$$

где  $M = (t_c + A_u/A)(t^{x_V}/C_V K_V)^{1/m}$ ;  $k_V = 1/m - 1$ ;  $k_S = y_V/m - 1$ ;  $A$  - стоимость станка - минуты,  $A_u$  - стоимость одного периода стойкости инструмента;  $t_c$  - время смены инструмента;  $C_V, K_V$  - коэффициенты и  $x_V, y_V, m$  - показатели, характеризующие степень влияния глубины  $t$ , подачи  $S$  и стойкости  $T$  на скорость резания  $V$ ;  $K_{\Theta} = \Theta_0/\Theta$  - коэффициент необходимого снижения температуры резания  $\Theta$  при превышении ею допустимого уровня  $\Theta_0$ .

При чистовой обработке основные ограничения - ограничения по температуре резания и шероховатости обрабатываемой поверхности  $R_a$ :

$$C_{\Theta} V^{n_t} S^{y_t} t^{x_t} \leq \Theta_0; C_R S^{y_r} \leq R_a, \quad (2)$$

где  $C_{\Theta}$  - коэффициент и  $n_t, y_t, x_t$  - показатели степени, учитывающие влияние подачи, скорости и глубины резания на температуру резания;  $C_R$  - коэффициент и  $y_r$  - показатель степени, учитывающий влияние подачи на шероховатость обработанной поверхности.

Для обеспечения возможности сравнительного анализа заданные целевые функции (1) целесообразно представить в относительном виде, где их значения приняты за основу для сравнения при оптимальных режимах резания - подачах  $S_0$  и скоростях  $V_0$ :  $K_P = P(V,S)/P(V_0,S_0)$ ;  $K_C = C(V,S)/C(V_0,S_0)$ ;  $K_M = C_M(V,S)/C_M(V_0,S_0)$ :

Изменения относительных целевых функций производительности  $K_P$ , себестоимости  $K_C$  и их мультипликативной свертки  $K_M$  в зависимости от скорости резания представлены графически (рис.1). Графики приведены для следующих условий: чистовое

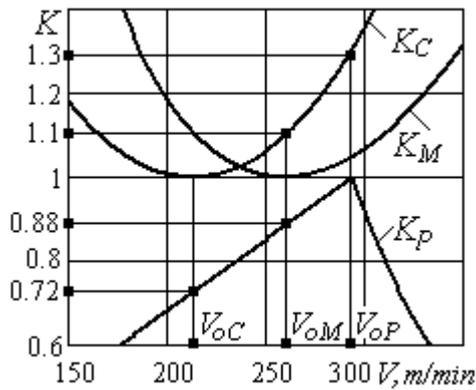


Рисунок 1. Графики изменения относительной целевой функции производительность  $K_P$ , себестоимости  $K_C$  и их мультипликативная свертка  $K_M$  в зависимости от скорости резания  $V$

себестоимости и производительности можем получить минимальные потери обеих целевых функций - производительности ( $K_P(V_{oM}) = 0,88$ ) и себестоимости ( $K_C(V_{oM}) = 1,1$ ).

Результаты определения оптимальных режимов резания от параметров процесса чистового точения фасонных поверхностей методами линейного и геометрического программирования представлены аналитическими зависимостями [1, 2].

Оптимальная подача при чистовом точении, независимо от критерия оптимизации определяется исходя из заданной шероховатости обработанной поверхности  $R_a$ . Независимо от критерия оптимизации так же определяется и скорость резания при наличии температурных ограничений  $V_{o\theta}$ . Необходимость учета температурных ограничений определяется на основании граничного значения коэффициента снижения температуры резания  $K_{\theta o} = \Theta_o / \Theta(V_o, S_o)$ .

$$S_o = (R_a / C_R)^{1/y_r} ; V_{o\theta} = (\Theta / C_{\theta} t^{x_t} S_o^{y_t})^{1/n_t} \text{ при } K_{\theta o} = \Theta_o / V_o^{n_t} S_o^{y_t} t^{x_t} \leq 1. \quad (3)$$

При отсутствии температурных ограничений оптимальные скорости резания определяются с учетом критерия оптимизации:  $V_{oP}$  – для критерия максимальной производительности,  $V_{oC}$  – для критерия минимальной себестоимости.  $V_{oM}$  – для мультипликативной свертки критериев.

$$V_{oP} = C_V K_V / T^m t^{x_t} S_o^{y_v} ; V_{oC} = (m / (1 - m) M)^m S_o^{y_v} ; V_{oM} = (2m / (1 - 2m) M)^m S_o^{y_v} \quad (4)$$



Рисунок 2. Фасонные поверхности деталей металлургического оборудования

плане и параметры среза (рис. 3а).

точение конструкционной стали 45 резами с твердосплавными пластинами T15K6.

Из графиков очевидно наличие экстремумов функций: максимум по производительности  $K_P$  и минимум по себестоимости  $K_C$  и их мультипликативной свертки  $K_M$ . За счет выбора оптимальной по себестоимости скорости резания  $V_{oC}$  ( $K_C(V_{oC}) = 1$ ) получаем снижение производительности в 1,4 раза. Выбирая скорость резания  $V_{oP}$ , оптимальную по производительности, обеспечиваем максимум производительности ( $K_P(V_{oP}) = 1$ ), но получаем повышение себестоимости в 1,3 раза. При обеспечении экстремального уровня одного из критериев, мы существенно ухудшаем другой. И только при выборе оптимальной скорости резания  $V_{oM}$  по мультипликативной свертке критериев

Представленная методика оптимизации устанавливает постоянство, как самой целевой функции, так и действующих ограничений. Однако при точении фасонных поверхностей параметры процесса резания закономерно изменяются (рис.2), соответственно и действующие ограничения становятся переменными.

При точении деталей со сложным профилем переменными вдоль криволинейной образующей являются углы в

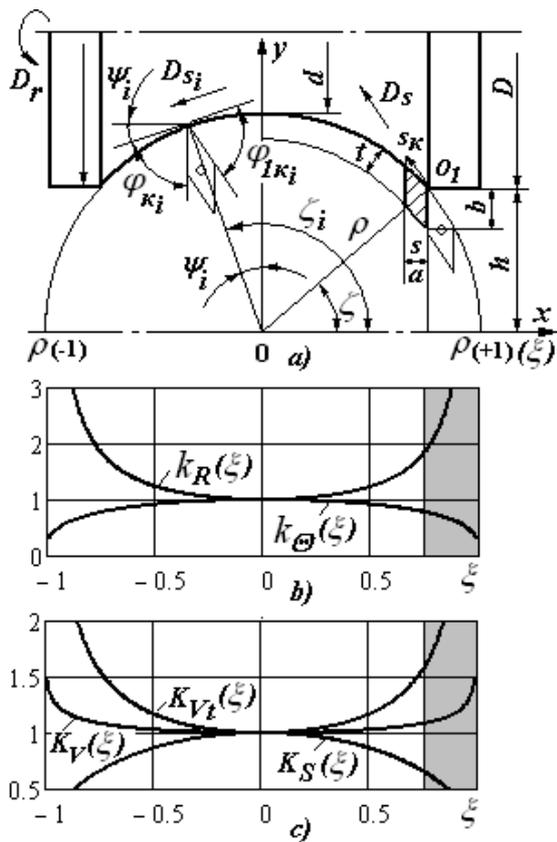


Рисунок 3. Схема определения параметров среза при токарной обработке вогнутых фасонных поверхностей. Графики зависимости коэффициентов изменения производительности и себестоимости обработки от скорости резания

зания:

$$R_a(\xi) = C_R k_R(\xi) S^{y_r}; \quad \Theta(\xi) = C_\Theta k_\Theta(\xi) V^{n_t} S^{y_t} t^{x_t}, \quad (6)$$

где  $k_R(\xi)$ ,  $k_\Theta(\xi)$  – безразмерные коэффициенты, характеризующие относительное изменение шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  и температуры резания  $\Theta$  вдоль безразмерной координаты  $\xi$ , в сравнении со значениями этих параметров в точке, соответствующей началу принятой системы координат  $k_R(\xi) = R_a(\xi)/R_a(0)$ ,  $k_\Theta(\xi) = \Theta(\xi)/\Theta(0)$  (рис. 3б):

$$k_R(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{-y_r}; \quad k_\Theta(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{y_t/n_t}. \quad (7)$$

В связи с переменностью ограничений переменными вдоль криволинейной образующей становятся и оптимальные резания:

$$\begin{aligned} S_o(\xi) &= K_S(\xi) (R_a/C_R)^{1/y_r}; \\ V_{o\Theta}(\xi) &= K_{V\Theta}(\xi) (\Theta/C_\Theta t^{x_t} S_o^{y_t})^{1/n_t}; \\ V_{oP}(\xi) &= K_V(\xi) C_V K_V / T^m t^{x_v} S_o^{y_v}; \\ V_{oC}(\xi) &= K_V(\xi) (m/(1-m)M)^m S_o^{y_v}; \\ V_{oM}(\xi) &= K_V(\xi) (2m/(1-2m)M)^m S_o^{y_v}, \end{aligned} \quad (8)$$

Для вогнутой поверхности с постоянным радиусом кривизны  $\rho$  определены основные параметры обработки точением. Условия обработки: главный статический угол в плане  $\varphi_C = 90^\circ$ ; и вспомогательный статический угол в плане  $\varphi_{1C} = 55^\circ$ . Положение вершины резца на указанной поверхности с криволинейной образующей определяется мгновенным углом поворота  $\zeta_i = \arccos(\xi_i)$  ( $\xi_i = x_i/\rho$  – безразмерная координата).

Геометрические параметры сечения среза – толщина  $a$  и ширина  $b$  зависят от технологических параметров – подачи  $S$  и глубины резания  $t$ , а также главного угла в плане  $\varphi$ . Изменение толщины среза  $a$ , толщины среза  $b$  а также кинематической подачи  $S_K$ , совпадающей с направлением движения подачи  $D_S$  в зависимости от положения вершины лезвия инструмента на фасонной поверхности представлены в работе [4].

Действующие ограничения при чистой обработке фасонных поверхностей, а именно, ограничения по температуре резания  $\Theta$  и шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  являются переменными вдоль криволинейной образующей фасонной поверхности вследствие переменности вышеуказанных параметров процесса ре-

где  $K_S(\xi)$ ,  $K_V(\xi)$ ,  $K_{V_i}(\xi)$  – безразмерные коэффициенты, характеризующие относительное изменение оптимальных подач  $S_o$  и скоростей резания  $V_o$  вдоль безразмерной координаты  $\xi$  по отношению к точке, соответствующей началу принятой системы координат  $K_S(\xi) = S_o(\xi)/S_o(0)$ ,  $K_V(\xi) = V_o(\xi)/V_o(0)$ ;  $K_{V_i}(\xi) = V_{oi}(\xi)/V_{oi}(0)$  (рис. 3с):

$$K_S(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^r; K_V(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{-y_v}; K_{V_i}(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{-y_v/n_i}. \quad (9)$$

Установленные коэффициенты позволяют определять оптимальные режимы резания в любой точке фасонной поверхности.

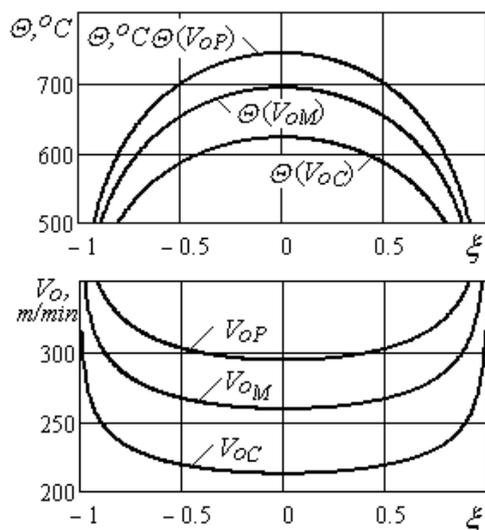


Рисунок 4. Графики зависимости коэффициентов изменения производительности и себестоимости обработки от скорости резания

На рис. 4 приведены расчеты оптимальных режимов резания для двух вариантов обработки: конструкционной стали 45 и нержавеющей стали 95X18 твердосплавными инструментами.

Характер изменения температур резания вдоль безразмерной координаты  $\xi$  для указанных условий обработки, рассчитанных для оптимальных по различным критериям значениям подач и скоростей резания для конструкционной стали 45, представлен на рис. 4а. Вдоль всей образующей криволинейной поверхности температуры резания не превышают предельно допустимую для заданных условий  $\Theta_o = 800^\circ\text{C}$ . Таким образом, оптимальные режимы резания определены без учета температурных ограничений ( $K_{\Theta o} \geq 1$ ):  $S_o = 0,3\text{мм/об}$ ;  $V_{oP} = 293\text{м/мин}$ ;  $V_{oC} = 212\text{м/мин}$ ,  $V_{oM} = 258\text{м/мин}$ .

В результате анализа полученных оптимальных режимов резания установлено, что оптимальная по производительности скорость резания в 1,4 раз больше скорости, оптимальной по себестоимости (коэффициент изменения  $K_{VC} = 0,72$ ). Оптимальная скорость резания, определенная по мультипликативной свертке критериев в 1,1 раза меньше оптимальной по производительности скорости резания (коэффициент изменения  $K_{VM} = 0,88$ ).

Коэффициенты изменения себестоимости и производительности могут быть рассчитаны по формулам:

$$K_{VC} = \frac{V_{oC}}{V_{oP}} = \left[ \frac{mT}{(1-m)(t_c + A_u/A)} \right]^m; K_{VM} = \frac{V_{oM}}{V_{oP}} = \left[ \frac{2mT}{(1-2m)(t_c + A_u/A)} \right]^m. \quad (10)$$

Закономерности изменения оптимальных скоростей резания  $V_o$  вдоль безразмерной координаты  $\xi$ , по мультипликативной свертке критериев, представлены на рис. 4б. Установлено, что в разных точках криволинейной поверхности оптимальные режимы могут изменяться до 1,5 раз. Это изменение является определяющим при выборе оптимальных режимов резания.

Второй пример расчета приведен для труднообрабатываемой стали 95X18, которая широко применяется для изготовления деталей металлургического оборудования. Температура в зоне резания для этого материала ввиду его более низкой теплопроводности значительно выше, чем при обработке конструкционных сталей.

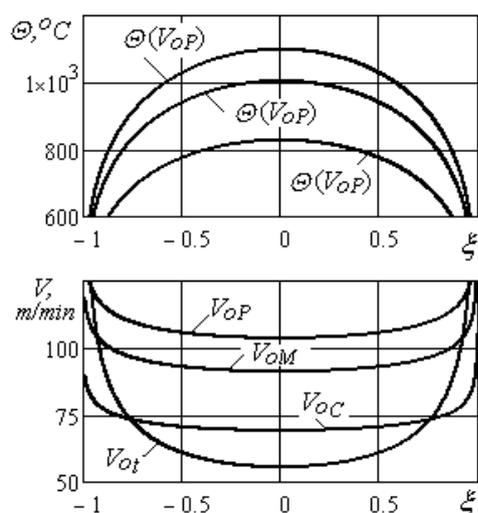


Рисунок 5. Графики зависимости коэффициентов изменения производительности и себестоимости обработки от скорости резания

температурных ограничений. Результаты оптимизации получены в виде аналитических зависимостей оптимальных значений подачи и скорости резания от параметров процесса чистового точения фасонных поверхностей с учетом переменности действующих ограничений по температуре резания и шероховатости обработанной поверхности. Анализ результатов расчета показал, что вдоль криволинейной образующей поверхности оптимальные режимы могут изменяться до 1,5 -2 раз, что необходимо учитывать при выборе оптимальных режимов резания.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ivchenko Tatiana, Boguslavskiy Vadim, Petryaeva Irina, Mihaylov Dmitriy, (2014). Estimation of Possibilities of the Productivity Rise at Turning of Hard-Processing Materials, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Vol. 657, pp 63-67.
2. Петряева, И. А. Оптимизация режимов чистового точения на основании мультипликативной свертки критериев производительности и себестоимости / И. А. Петряева, Т. Г. Ивченко, // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Вып. 1 (52). – С.147-151.
3. Ivchenko Tatiana, Petryaeva Irina, Grubka Roman, (2014). Research of Changeability of Cutting Process Parameters at turning of the Shaped Surfaces, Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Vol. 1036, pp. 361-364.
4. Петряева, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / Петряева И. А., Михайлов А. Н., Ивченко Т. Г. / Научно-технические технологии в машиностроении. – М: Машиностроение. – 2014. – Вып. 9. – С. 6-13.
5. Ивченко, Т. Г. Оптимизация режимов резания в условиях переменности действующих ограничений / Т. Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць.. – Краматорськ, ДДМА. – Вип. 34. – 2014. – С. 32-37.

Поступила в редколлегию 14.05.2021 г.

Снижение оптимальной скорости резания в значительной степени обусловлено учетом температурных ограничений. Возможность повышения производительности чистовой токарной обработки фасонных поверхностей определяется снятием температурных ограничений.

Таким образом, анализ теплового состояния в зоне обработки и снятие температурных ограничений позволяют повысить производительность обработки в 2 раза, снизить себестоимость в 1,25 раза.

#### Заключение

На основании разработанной методики многокритериальной оптимизации с учетом переменности действующих ограничений при обработке фасонных поверхностей выполнена оценка возможностей повышения производительности до 2 раз, снижения себестоимости в 1,25 раза за счет снятия тем-