

Игорь ИВАНОВ, Сергей УРУШЕВ

Ленинградский институт инженеров  
железнодорожного транспорта

Александр АЛДРИН

Московский локомотиворемонтный завод

#### ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ КОЛЕС

Содержание. Рассмотрена уточненная математическая модель ОПТИМИЗАЦИИ параметров режимов резания цельнокатанных колес применительно к условиям их производства на металлургических заводах. Ряд ограничений модели - нелинейны. В качестве критерия оптимальности использована величина удельных приведенных затрат. Расчет произведен для колесных сталей по ГОСТ 10791-81 и режущего инструмента из твердого сплава Т14К8 (P20) чашечной формы. При решении разработан пакет прикладных программ поиска приближенного решения задач нелинейного программирования. Для статистической оценки результатов расчетов выполнен машинный планируемый эксперимент, который показал адекватность модели функции отклика. Полученные результаты используются в производственных условиях.

Как известно, параметры режима резания (скорость  $V$ , подача  $S$ , глубина  $t$ ) оказывают существенное влияние на производительность обработки и эффективность использования оборудования. При увеличении этих параметров до определенных значений эффективность процесса обработки возрастает, а при дальнейшем их увеличении - снижается. Оптимальные величины параметров режима зависят от многочисленных факторов, характеризующих технические и технологические условия обработки и саму технологическую систему.

Для решения задачи оптимизации параметров режимов резания при механической обработке [1] цельнокатанных колес на металлургических заводах, была разработана математическая модель, а в дальнейшем на ее основе подготовлен алгоритм и программа расчета оптимальных режимов механической обработки колес. При этом за основу принята математическая модель, разработанная Институтом технической кибернетики АН БССР.

Для более полного отображения процесса резания в математическую модель введено ограничение по допустимой температуре в зоне резания металла, причем это ограничение может вводиться в двух видах: полученное теоретическим путем на основании зависимостей, предложенных проф. С.С.Силиным [2], и полученное в результате экспериментальных работ, выполненных в лабораторных условиях.

Все ограничения объединены в три основные группы:

$R_1$  - группа ограничений, выражающая взаимосвязь технических параметров системы СПИД с режимами резания (мощность электродвигателя станка, ряды частот вращения и подачи станка, предельная стойкость инструмента и т.д.);

$R_2$  - группа ограничений, отражающая взаимосвязь режимов резания с параметрами качества детали (шероховатость поверхности, точность обработки и др.);

$R_3$  - группа ограничений, отражающая взаимосвязь параметров режимов резания с технико-экономическими показателями операции (заданная производительность, время работы инструмента до замены и др.).

В качестве критерия оптимальности используются две целевые функции:

- в общем случае, удельные приведенные затраты на выполнение детали операции  $C_n^{(1)}$ ;

- при необходимости оценки вариантов по затратам времени вводится критерий неполного оперативного времени  $t_{оп}^{(1)}$ , учитывающий только часть элементов вспомогательного времени, зависящих от изменения режимов резания.

Математическая модель оптимизации режимов резания в общем виде:

$$\left. \begin{array}{l} f_{11}(t, S, n) \leq C_{11} \\ f_{12}(t, S, n) \leq C_{12} \\ \dots \\ f_{1m}(t, S, n) \leq C_{1m} \end{array} \right\} R_1 \quad \left. \begin{array}{l} f_{21}(t, S, n) \leq C_{21} \\ f_{22}(t, S, n) \leq C_{22} \\ \dots \\ f_{2m}(t, S, n) \leq C_{2m} \end{array} \right\} R_2 \quad \left. \begin{array}{l} f_{31}(t, S, n) \leq C_{31} \\ f_{32}(t, S, n) \leq C_{32} \\ \dots \\ f_{3m}(t, S, n) \leq C_{3m} \end{array} \right\}$$

$$C_n^{(1)} = A \cdot t_{шт} + \frac{C_{ндj} \cdot t_{pd}}{T_{стj}} + C_{э}^{(1)} t_p \longrightarrow \min$$

$$\text{или} \quad t_{оп}^{(1)} = t_p + t_b \longrightarrow \min$$

где  $f_m(t, S, n) \leq C_m$  - функция, отражающая взаимосвязь режимов резания (глубины резания  $t$ , подачи  $S$  и частоты вращения  $n$ ) с параметрами качества детали, техническими параметрами системы СПИД и технико-экономическими показателями операции;

$A$  - все расходы и капитальные вложения, пропорциональные штучному времени  $t_{шт}$ ;

$C_{иj}$  - расходы и капитальные вложения в режущий инструмент, пропорциональные времени резания  $t_{pj}$   $j$ -м инструментом;

$C_{э}^{(j)}$  - расходы на силовую электроэнергию, пропорциональные времени резания на операцию  $t_p$ ;

- вспомогательное время на смену инструмента и подналадку, а также на переключение подач и частот вращения при изменении режимов резания, т.е. зависящее от изменения режимов резания;

$T_{стj}$  - стойкость  $j$ -го инструмента до переточки.

В связи с относительно большими колебаниями глубины резания из-за неустойчивых размеров колесного проката при оптимизации параметров режима глубина резания для оптимизируемой поверхности задавалась равной максимально возможной в соответствии с техническими возможностями станка и технологическими требованиями к обрабатываемой поверхности, и оптимизация производилась только по двум параметрам: подаче  $S$  и частоте вращения  $n$ , отражающей скорости резания.

Математическая модель оптимизации режимов механической обработки колес на специальных токарно-карусельных станках включает в себя следующий ряд технических и технологических ограничений.

К технологическим ограничениям, определяемым требованиями к обрабатываемым поверхностям, относятся следующие:

- ограничение по условиям нормального стружкообразования;

$$S \geq S_{min}$$

где  $S_{min}$  - минимальная технологически допустимая величина подачи по условиям обеспечения нормального стружкообразования;

- ограничение по допустимой высоте микронеровностей  $R_z$  обработанной поверхности детали, принимаемое по данным проф. А.И.Исаева [3]:

а) при  $\left\{ \begin{array}{l} 10 < V \leq 193 - \frac{243S}{v_b^{0,52}} \\ S \geq 0,1 \text{ мм/об} \end{array} \right. \quad (1)$

$$R_z^{30q} \geq \frac{S(98-0,5V)}{v_b^{0,53} \cdot \Delta\psi_1^{0,04}}$$

б) при  $\left\{ \begin{array}{l} V > 193 - \frac{243S}{v_b^{0,52}} \\ S \geq 0,1 \text{ мм/об} \end{array} \right. \quad (2)$

$$R_z^{30q} \geq v_b - \frac{\sqrt{4v_b^2 - S^2}}{2}$$

в Формулах (1), (2):  $\Delta\psi_1 = \arcsin \frac{S}{2v_b} - \psi_1$ ,

причем, если  $\Delta \psi_1 < 1$ , то в формуле (I)  $\Delta \psi_1 = 1$ ;

$r_b$  - радиус при вершине резца;

$\psi_1$  - вспомогательный угол в плане резца;

- ограничение на размерную погрешность обработки по упругому прогибу инструмента:

$$\delta_{\text{доп}} \geq \frac{R_z \cdot l_{\text{вы}}^3 \cdot 100}{E_{\text{и}} \cdot J_{\text{и}} \cdot 0,25},$$

где  $\delta_{\text{доп}}$  - допуск на размер;

$R_z$  - тангенциальная составляющая силы резания;

$l_{\text{вы}}$  - длина вылета инструмента;

$E_{\text{и}}$  - модуль упругости державки режущего инструмента;

$J_{\text{и}}$  - момент инерции сечения державки в месте искомого прогиба;

- ограничение по минимально допустимой стойкости инструмента,

определяющей частоту его смены:

$$T_{\text{зад}} \geq T_{\text{р}} \cdot K_{\text{нт}},$$

где  $T_{\text{зад}}$  - заданный период стойкости инструмента;

$T_{\text{р}}$  - время резания данным инструментом;

$K_{\text{нт}}$  - коэффициент надежности стойкости, принят равным 1,2.

К техническим ограничениям относятся следующие:

- ограничение по кинематическим возможностям станка:

$$S \in S_{\text{ст}},$$

где  $S_{\text{ст}}$  - значения подач, имеющиеся на данном станке;

- ограничение по допустимой станком частоте вращения главного привода:

$$n \in n_{\text{ст}},$$

где  $n_{\text{ст}}$  - значения частот вращения, имеющиеся на данном станке;

- ограничение по прочности механизмов станка:

а) механизмов, соответственно, продольной и поперечной подачи:

$$P_{\text{S прод}} \geq C_{\text{рх}} \cdot t^{\text{рх}} \cdot S^{\text{рх}} \cdot V^{\text{рх}} \cdot K_{\text{р}}$$

$$P_{\text{S поп}} \geq C_{\text{рy}} \cdot t^{\text{рy}} \cdot S^{\text{рy}} \cdot V^{\text{рy}} \cdot K_{\text{р}},$$

где  $P_{\text{S прод}}$ ;  $P_{\text{S поп}}$  - соответственно, величина осевой или радиальной составляющей силы резания, допускаемая прочностью слабого звена механизма продольной или поперечной подачи станка;

$C_{\text{рх}}$ ,  $C_{\text{рy}}$  - постоянные коэффициенты;

$X_{\text{рх}}$ ,  $X_{\text{рy}}$ ,  $Y_{\text{рх}}$ ,  $Y_{\text{рy}}$ ,  $n_{\text{рх}}$ ,  $n_{\text{рy}}$  - показатели степени для расчета осевой и радиальной составляющих силы резания соответственно при глубине резания, подаче и скорости резания;

$K_{\text{р}}$  - обобщенный коэффициент, учитывающий влияние измененных условий обработки на силу резания;

б) механизма главного движения:

$$M_{кр}^{от} \geq \frac{P_x \cdot D_g}{\lambda \cdot 10^5}$$

где  $M_{кр}^{от}$  - крутящий момент на шпинделе станка, допустимый по прочности слабого звена механизма главного привода;

$D_g$  - диаметр обрабатываемой поверхности колеса;

- ограничение по мощности главного привода станка:

$$W_{эв} \cdot \eta_{ст} \cdot K_{пер} \geq \frac{P_x \cdot V}{6120}$$

где  $W_{эв}$  - мощность электродвигателя главного привода;

$\eta_{ст}$  - к.п.д. передачи от электродвигателя к шпинделю станка;

$K_{пер}$  - коэффициент допускаемой перегрузки станка;

- ограничение по прочности режущего инструмента:

а) по прочности державки

$$[\sigma_{и}] \geq \frac{P_x \cdot l_{сн}}{W_g}$$

где  $[\sigma_{и}]$  - допускаемый предел прочности материала державки при изгибе;

$W_g$  - момент сопротивления сечения державки в месте изгиба;

б) для твердосплавных и минералокерамических режущих пластинок производится их проверка на прочность [4]:

$$P_{доп} \geq \frac{P_x}{a}$$

где  $P_{доп}$  - усилие, допускаемое на  $l$  мм длины режущей кромки;

$a$  - длина той части режущей кромки, которая непосредственно срезают слой металла;

- ограничение по предельному значению стойкости инструмента:

$$T_{ст} \leq \frac{T_n \cdot T_{пр} \cdot C_v^M}{\left(\frac{V}{K_v}\right)^M \cdot \chi_{рв}^M (T_{пр} - T_n) + T_n \cdot C_v^M}$$

где  $K_v$  - обобщенный поправочный коэффициент на изменение условия обработки;

$T_n$  - нормативная стойкость;

$T_{пр}$  - предельная стойкость;

$C_v$  - постоянная обрабатываемого материала;

$\chi$  - показатель степени, характеризующий влияние сечения

среза, формы и размеров инструмента на его стойкость;

значение констант  $C_v$ ,  $M$ ,  $\chi_{рв}$  установлены Мушковым А.А. и Гостевым Г.В. и приведены в [5];

- ограничение по допустимой температуре в зоне резания металла [2]:

$$K_{\theta} \theta_x \geq \frac{P_z}{\frac{2,65 S^{0,47} \cdot t(c_p)^{0,57} \cdot \rho_1^{0,4} \cdot \lambda_2^{0,43}}{m^{0,55} \cdot V^{0,43} \cdot \sin^{0,05} \alpha} + \frac{0,6625 S^{0,125} \cdot t^{0,07} \cdot \lambda_p \beta \epsilon \rho_1^{0,175}}{m^{0,575} \cdot V \cdot \sin^{0,165} \alpha}}$$

где  $K_{\theta}$  - коэффициент, учитывающий соотношение температуры в зоне резания металла и температуры красностойкости материала режущей части инструмента;

$\theta_k$  - температура красностойкости;

$c_p$  - удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала;

$\rho_1$  - радиус закругления режущей кромки;

$\lambda_2, \lambda_p$  - коэффициент теплопроводности материала, соответственно обрабатываемой детали и режущего инструмента;

$\alpha$  - задний угол;

$\beta$  - угол заострения;

$\epsilon$  - угол в плане при вершине реза;

$m$  - безразмерный коэффициент, изменяющийся в зависимости от схемы точения [2];

или на основе экспериментальных данных, полученных при обработке колесной стали по ГОСТ 10791-81

$$\theta_{c, \min} \leq \theta \leq \theta_{c, \max},$$

где  $\theta$  - температура резания;

$\theta_{c, \max}, \theta_{c, \min}$  - предельные значения оптимальной температуры резания, соответствующей минимальному износу режущего инструмента.

$$\theta = e^{a_{\theta}} \cdot t^{x_{\theta}} \cdot S^{y_{\theta}} \cdot V^{n_{\theta}} \cdot K_{\theta},$$

где  $a_{\theta}$  - показатель степени для определения постоянной;

$x_{\theta}, y_{\theta}, n_{\theta}$  - показатели степени при глубине резания, подаче и скорости резания;

$K_{\theta}$  - поправочный коэффициент на изменение условий обработки.

Расчет оптимальных режимов резания произведен для колесных сталей по ГОСТ 10791-81 и режущего инструмента из твердого сплава Т14К3 чашечной формы. При решении разработан пакет прикладных программ поиска приближенного решения задач нелинейного программирования.

Комплекс задач, решаемых при расчете режимов резания, следующий: оптимизация режимов обработки, расчет составляющих штучного времени, составление и печать операционных расчетно-технологических карт, расчет экономических показателей деталюпераций и определение лимитирующих режимы резания ограничений.

В соответствии с данным алгоритмом разработана расчетная программа оптимизации режимов резания. Расчет оптимальных режимов резания на каждом переходе выполняется в два основных этапа: настройка и поиск экстремальной точки. На первом этапе по введенной в память ЭВМ информации строятся обобщенные таблицы, содержащие технико-экономическую информацию о станке, операции, органах движения, группах инструмента, поверхностях, обрабатываемых на данном переходе, т.е. информацию о взаимодействии узлов станка в процессе выполнения операции. Кроме того в таблицы заносится вся нормативная информация, необходимая для расчета ограничений и критерия оптимальности. На этапе настройки выполняются все вычисления постоянных для ограничений и критерия с целью уменьшения количества вычислений на втором этапе.

На первом этапе производится также выбор независимых переменных и определений минимального и максимального значений для каждой переменной.

По окончании первого этапа расчетов вычисляются значения критерия оптимальности и ограничений в любой точке параллелепипеда:

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, N$$

На втором этапе расчета решается задача частично целочисленного нелинейного программирования.

Найти  $\min K(x)$ , где

$$x \in P = \{x / x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}\} \in R^N$$

(т.е.  $P$  есть  $N$ -мерный параллелепипед)

при условии выполнения ограничений:

$$y_i(x) \geq 0, \quad i = 1, \dots, M$$

и, накладываемых на некоторые переменные, ограничений дискретности, т.е. для  $x_j$  таких, что

$$j \in Y \subset \{1, \dots, N\}$$

должно выполняться

$$x_j \in R_j = \{x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^r\}.$$

Здесь  $K(x)$  и  $y_i(x)$  - нелинейные функции  $N$ -переменных, причем  $K(x)$  - многоэкстремальная функция.

Для решения полученной экстремальной задачи разработан пакет прикладных программ оптимизации. Этот пакет состоит из 4-х уровней. Программы каждого уровня имеют унифицированное оформление.

Программы первого уровня решают задачу одномерного поиска с использованием методов золотого сечения [6] и одномерного варианта градиентного поиска [7].

Программы второго уровня решают задачу поиска локального экстремума с использованием простого градиентного метода, метода сопряженных градиентов [7, 8], метода переменной метрики (метод Дэвидсона-Флетчера-Пауэлла) [7, 8].

Программы третьего уровня решают задачу поиска глобального экстремума. Они используют метод перебора на неравномерной сетке [9], простейший метод случайного поиска с использованием  $\chi^2$ -последовательности [10]. Случайный поиск применяется для нахождения начальных точек с целью последующего использования локальных методов.

Программы четвертого уровня решают задачу целочисленного программирования с использованием методов перебора, ветвей и границ [11], покоординатного спуска, причем для учета ограничений используется метод штрафов.

Для решения задачи оптимизации режимов обработки колес на токарно-карусельном станке использовались, как правило, программы третьего-четвертого уровней, т.к. данная задача характеризуется большим числом переменных (свыше 5).

Оптимизация режимов резания выполнялась для сталей по ГОСТ 10791-81 при трех значениях твердости HB=320, HB=250, HB=190, с учетом использования вариантов режущего инструмента, отличающихся геометрией заточки (табл. I).

Таблица I.

Варианты режущего инструмента для обработки колес

Суппорт	Наименование инструмента	Материал режущей части	Заданная стойкость, мин.	Геометрия заточки					№ варианта
				задний угол град	передний угол град	угол наклона режущей кромки, град	главный угол в плане, град	вспомогательный угол в плане, град	
правый и левый боковые	резец чашечный проходной	Т14К8	12	6,0	0	0	30	3	I П Ш
				6,0	-2	0	30	3	
				8,0	-5	+5	30	3	
правый и левый вертикальные	резец чашечный проходной	Т14К8	100	6,0	0	0	18	3	I П Ш
				6,0	-2	0	18	3	
				8,0	-5	+5	18	3	



Для статистической оценки результатов расчета выполнен машинный планируемый эксперимент  $2^2$  с эффектом взаимодействия. Одна из матриц планирования приведена в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$	Значение отклика, $y_{qi}$	Средний результат, $\bar{y}_i$	$S_i^2 = \frac{\sum (y_{qi} - \bar{y}_i)^2}{n - 1}$
1	+I	-I	-I	+I	80,30 78,10 79,27	79,22	1,2117
2	+I	+I	-I	-I	29,90 31,00 28,50	29,80	1,5700
3	+I	-I	+I	-I	50,30 45,70 41,30	45,76	20,2534
4	+I	+I	+I	+I	14,90 15,10 15,23	15,07	0,0297

Определялась зависимость между минутной подачей, глубиной резания и твердостью обрабатываемой поверхности. Функция отклика аппроксимировалась полиномом первой степени, содержащим линейные члены и взаимодействия первого порядка. Статистический анализ полученной модели выполнен путем оценки дисперсии воспроизводимости (по критерию Кохрена), проверки значимости коэффициентов модели с помощью  $t$ -критерия Стьюдента и пригодности модели предсказывать результаты расчета в рассматриваемой области с требуемой точностью путем расчета критерия Фишера (как отношение дисперсии адекватности к дисперсии воспроизводимости). Полученные данные показали адекватность модели функции отклика.

Для примера в табл.3 приведены данные по результатам расчетов режимов обработки колес диаметром 950 мм из стали марки I по ГОСТ 10791-81 при трех значениях твердости

Таблица 3

Твердость, НВ, ГПа	Подача, S, мм/мин	Частота вращения шпинделя, n, мин <sup>-1</sup>	$S_n$ , руб/шт	$T_{шт}$ , мин
I	2	3	4	5
1,90	89,7-38,9	38,9	1,927	7,31

Продолжение табл.3

1	2	3	4	5
2,50	53,3-30,3	29,6	2,507	3,31
3,20	29,1-16,6	15,6	4,34	13,25

Анализ результатов оптимизации показал, что применяемые в настоящее время режимы резания назначены без учета возможных колебаний твердости обрабатываемых колес; значения используемых подач в ряде случаев бывают занижены; возможные изменения твердости термообработанных (НВ 2,6...32 ГПа) и нетермообработанных (НВ 1,9...2,6 ГПа) колес приводят к значительному изменению расчетных величин подач и частот вращения планшайбы.

Полученные расчетные данные оптимизации были проверены в производственных условиях при обработке термообработанных колес.

В ходе экспериментов, в частности проводились стойкостные испытания чашечного инструмента ГОСТ 2209-82, форма 12, материал режущей части Т14К3. Геометрия заточки:  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\gamma_f = -5^\circ$ ,  $\rho = 0,15$ .

За время проведения производственных испытаний обточено более четырех тысяч колес. Большинство обработанных колес имели химический состав и механические свойства стали близкие к верхним пределам установленных ГОСТами ( $C = 0,63...0,67$ ,  $Mn = 0,36...0,96$ ,  $V = 0,12...0,15$ , НВ=2,86...2,93 ГПа,  $G_s = 98...104$ ) и следовательно, обладали наихудшей обрабатываемостью.

Для сравнения расходов режущего инструмента и производительности закаленные колеса точились, как на существующих режимах ( $n = 28...32$  об/мин), так и на специально переоборудованных станках с низкой частотой вращения планшайбы ( $n = 22$  об/мин).

Для назначения режимов резания в зависимости от химического состава и твердости при механической обработке железнодорожных колес на основании расчета на ЭВМ разработаны номограммы для выбора рациональных режимов резания. Практически же, исходя из возможностей оборудования, обработка производилась просто на режимах, приближенных к нужным величинам. Несоответствие расчетных режимов резания с установленными несомненно сказалось на результатах экспериментов. Стойкость резцов в ряде случаев оказалась ниже ожидаемой. Но и одно уменьшение частоты вращения планшайбы дало положительные результаты - подтвердило правильность выводов о назначении оптимальных режимов резания для обработки колес. В табл.4 приведены примеры, характеризующие влияние несоответствия применяемых режимов резания и рекомендованных на стойкость режу-

Таблица 4

Значение применяемых и рекомендованных  
режимов резания

Химический состав стали		Твер- дость, ГПа	Применяемые режимы			Рекомендованные режимы			Расход режущего инструмента, шт/кол.
С	Mn		n, об/мин	S <sub>пр</sub> , мм/мин	S <sub>лев</sub> , мм/мин	n, об/мин	S <sub>пр</sub> , мм/мин	S <sub>лев</sub> , мм/мин	
0,65	0,71	2,74	22	28,5	32	23	27	31,5	0,229
0,59	0,72	2,69	22	28,5	32	25	26,5	31	0,257
0,64	0,84	2,67	22	28,5	32	22	26,5	31	0,155
0,65	0,86	2,98	22	24	29,5	19,5	21,5	25	0,297
0,62	0,72	2,98	22	24	29,5	20	21,5	25	0,263
0,61	0,76	2,80	22	24	29,5	22	23	27	0,134
0,63	0,74	2,20	32	32	36	28	40	42	0,358
0,59	0,64	2,40	30	36	36	30	34	36	0,108

шего инструмента. Данные приведены только для двух боковых суппортов, ведущих обработку профиля катания колеса.

Как видно из приведенных в табл.4 данных, чем больше разница между примененными и рекомендуемыми, тем ниже стойкость инструмента.

Расход инструмента, достигнутый при точении опытными резцами на боковых суппортах 0,134-0,229 шт/кол. является определяющим для величины расхода резцов, необходимого для обработки колеса по всем поверхностям [12].

## ВЫВОДЫ

1. Достигнутые стойкость инструмента и производительность станков подтвердили правильность выбора параметров рациональных режимов резания, основанного на результатах оптимизации.

2. Анализ результатов оптимизации режимов резания показывает, что:

- применяемые в настоящее время режимы резания назначены без учета возможных колебаний твердости обрабатываемых колес;
- значения применяемых подач при обработке колес по существующей технологии несколько занижены;
- изменения твердости от HB=320 до HB=190 приводит к значительному изменению расчетных величин подач и частот вращения планшайбы;
- различие в глубинах резания и твердостях при обработке разных поверхностей колеса ведет к изменению расчетных величин при переходе от одной поверхности к другой;
- различие в диаметрах обрабатываемых поверхностей ступицы и обода приводит к работе инструмента на неоптимальных режимах на поверхности ступицы, например  $V_{\text{ступицы}} = 22,9$  м/мин,  $V_{\text{обода}} = 89,3$  м/мин.

3. В связи с изложенным выше можно указать следующие направления совершенствования технологии и оборудования для обработки цельнокатанных колес на металлургических предприятиях:

- расширение диапазона регулирования частоты вращения планшайбы до 12 - 40 об/мин карусельных станков;
- введение бесступенчатого регулирования подачи в пределах 10-80 мм/мин;
- разделение обработки ступицы и обода колеса за счет совершенствования маршрутной технологии;
- применение адаптивного управления процессом резания колес с целью повышения производительности обработки и снижения ее себестоимости.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Экономическая оптимизация процесса восстановления профиля поверхности катания колесных пар обточкой после отжига их при нагреве токами высокой частоты / Машнев М.М., Диденко В.В., Алешин А.Д. и др. // В кн. Конструктивно-технологическое обеспечение надежности подвижного состава. - Л.: ЛИИЖТ, 1985. с.48-53.

[2] Силин С.С. Метод подобия при резании материалов.-М. Машиностроение, 1979, 152 с.

[3] Развитие науки о резании металлов.-М., Машиностроение, 1968. 416 с.

[4] Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. ч.1.-М. Машиностроение, 1974. 348 с.

[5] Гильман А.М. и др. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках.-М. Машиностроение, 1972. 188 с.

[6] Уайлд Д. Методы поиска экстремума. М. Наука. 1967. 260 с.

[7] Полак Э. Численные методы оптимизации. М. Мир. 1974. 352с.

[8] Химмельблад Д. Прикладное нелинейное программирование. М. Мир. 1975. 321 с.

[9] Ввтушенко Ю.Г. Методы поиска глобального экстремума. Сб. "Исследование операций" вып.4. М.:ВЦ АН СССР. 1974. с.26-34.

[10] Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М. Наука. 1973. 182 с.

[11] Кофман А., Анри-Лабурдер А. Методы и модели исследования операций. Целочисленное программирование. М. Мир. 1977. 286 с.

[12] Будюкин А.М. Некоторые результаты производственных испытаний механической обработки закаленных колес. В кн. конструктивно-технологическое обеспечение надежности подвижного состава Л.: ЛИИЖТ. 1985. с.22-24.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Stanisław Tkaczyk

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1990

## OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW SKRAWANIA KÓŁ KOLEJOWYCH

## Streszczenie

W pracy przedstawiono matematyczny model optymalizacji parametrów skrawania kół kolejowych w czasie ich wytwarzania. Jako kryterium optymalizacji wykorzystano wielkość względnego traconego czasu. Przeprowadzono statystyczną ocenę otrzymanych rezultatów, która potwierdziła

zgodność z przyjętym modelem. Otrzymane wyniki pozwoliły na zastosowanie przyjętego modelu matematycznego w zakładach pracy.

#### OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS FOR RAILWAY WHEELS

#### S u m m a r y

In the paper a mathematical model for the optimization of cutting parameters of railway wheels is presented. The value of the wasting time is used as the objective function. The results have been estimated statistically and they confirmed the consistency with the assumed model. The proposed model could be applied in plants.