

ISSN 0869-7566

1'2008

**СТИН**

**СТАНКИ ИНСТРУМЕНТ**

Учредитель ООО «СТИН»

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий  
для публикации трудов соискателей ученых степеней

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ

- Ванин В. А.** Кинематическая структура  
зубо- и резьюобрабатывающих станков  
с унифицированными гидравлическими связями  
в формообразующих цепях . . . . . 2
- Либерман Я. Л.,  
Черноголова С. А.** Повышение точности систем ЧПУ . . . . . 6
- 

### МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

- Козлов В. И.** Анализ влияния относительных колебаний  
на износ лезвийного инструмента . . . . . 9
- Бровер А. В.** Лазерное поверхностное упрочнение  
металлообрабатывающего инструмента . . . . . 14
- Архипов В. Е.,  
Москвитин Г. В.,  
Поляков А. Н.** Повышение стойкости инструмента  
методом СВС . . . . . 19
- Пушкарев О. И.,  
Мальгинова Г. М.,  
Славина Е. В.** Определение режущей способности  
шлифматериалов при моделировании процессов  
абразивной обработки . . . . . 22
- 

### ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

- Новоселов Ю. А.** Образование поверхностей при обработке резанием . . 25
- Грубый С. В.** Оптимизация режимов одноинструментной  
лезвийной обработки . . . . . 32
- 

### ОТКРЫТИЯ. ИЗОБРЕТЕНИЯ. НОВАЯ ТЕХНИКА

- Буренин В. В.** Фильтрация рабочей жидкости  
для объемного гидропривода станков . . . . . 35

# Оптимизация режимов одноинструментной лезвийной обработки\*

д.т.н. С. В. Грубый

Современные требования к повышению эффективности и конкурентоспособности производства вызывают необходимость не только рассчитывать, но и оптимизировать параметры режимов лезвийной обработки. Задача оптимизации параметров режима является экономико-математической; она содержит количественные критерии и ограничения, выраженные уравнениями в той или иной форме.

Степенные уравнения используют для расчета параметров режима, например на следующих операциях.

1. Точение (скорость резания  $v$ , м/с; тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  составляющие силы резания, Н; параметр шероховатости  $R_a$ , мкм):

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{C_v K_v}{60 T^{m_v} t^{x_v} s^{y_v}}; \\ P_z &= C_{P_z} t^{x_{P_z}} s^{y_{P_z}} K_{P_z} / (60v)^{n_{P_z}}; \\ P_y &= C_{P_y} t^{x_{P_y}} s^{y_{P_y}} K_{P_y} / (60v)^{n_{P_y}}; \\ R_a &= K_{R_a} \frac{s^{k_1} (90 + \gamma)^{k_4}}{r^{k_2} v^{k_3}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $T$  — стойкость инструмента, мин;  $t$  — глубина резания, мм;  $s$  — подача, мм/об;  $r$  — радиус при вершине резца, мм;  $\gamma$  — передний угол, градус;  $C_v$ ,  $C_{P_z}$ ,  $C_{P_y}$  — постоянные;  $K_v$ ,  $K_{P_z}$ ,  $K_{P_y}$ ,  $K_{R_a}$  — поправочные коэффициенты; здесь и далее показатели степени выбирают по соответствующим справочникам.

2. Сверление (скорость резания  $v$ , м/с; осевая составляющая  $P_o$  силы резания, Н; крутящий момент  $M$ , Н·м; параметр шероховатости  $R_a$ , мкм):

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{C_v d^{q_v} K_v}{60 T^{m_v} s^{y_v}}; & P_o &= C_{P_o} d^{q_p} s^{y_p} K_{P_o}; \\ M &= C_M d^{q_M} s^{y_M} (60v)^{m_M} K_M; \\ R_a &= C_{R_a} d^{q_R} v^{n_R} s^{y_R}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

\* По материалам 5-й международной научно-технической конференции "Обеспечение и повышение качества машин на этапах их жизненного цикла" (Брянск, 2005 г.).

где  $d$  — диаметр сверла, мм;  $C_{P_o}$ ,  $C_M$ ,  $C_{R_a}$  — постоянные;  $K_{P_o}$ ,  $K_M$  — поправочные коэффициенты.

Показательно-степенные уравнения позволяют аппроксимировать зависимости, имеющие ярко выраженный нелинейный или экстремальный характер. Например, для условий точения заготовок из стали 60 резцами из твердого сплава КНТ16 в работе [1] получено следующее уравнение:

$$T = \frac{C_T s^{y_T} K_\Phi K_{COЖ}}{v^{1/m_v} t^{x_T} \exp(c_1 t + c_2 s) (1,5 - h_3)^{z_1}}, \quad (3)$$

где  $h_3$  — износ инструмента по задней поверхности, мм;  $K_\Phi$  и  $K_{COЖ}$  — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние формы режущей пластины и наличие СОЖ;  $C_T$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  — постоянные.

Полиномиальные уравнения применяют для обработки результатов многофакторных экспериментов, а также для больших массивов исходных данных. В частности, автором предложено рассчитывать параметр  $R_z$  шероховатости обработанной поверхности (в мкм) посредством полиномиального уравнения, представленного в матричном виде:

$$y = \lg R_z = [B]^T [f(p)] = [B]^T [f(v, s, t, h_3)]; \quad (4)$$

здесь  $[B]$  — матрица-столбец коэффициентов;  $[f]$  — соответствующая ей матрица функций-полиномов;  $(p)$  — матрица входных переменных (скорости резания, подачи, глубины, износа инструмента), представленных общей функцией  $Cod$  в кодированном виде:

$$\begin{aligned} x &= Cod(x_T, x_{\max}, x_{\min}) = \\ &= 2(\lg x_T - \lg x_{\max}) / (\lg x_{\max} - \lg x_{\min}) + 1, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $x_T$ ,  $x_{\max}$  и  $x_{\min}$  — текущее, максимальное и минимальное значения соответствующей переменной с натуральной размерностью ( $v$  — в м/с;  $s$  — в мм/об;  $t$  и  $h_3$  — в мм);  $x$  — текущее значение переменной в кодированном виде.

Для условий точения стали твердосплавными резами уравнение (4), полученное по результатам обработки 186 опытов, имеет вид

$$\lg R_z = \sum_{j=1}^{15} b_j(x_j) = b_1 + b_2v + b_3t + b_4s + b_5h_3 + b_6v^2 + b_7s^2 + b_8t^2 + b_9h_3^2 + b_{10}st + b_{11}vt + b_{12}vs + b_{13}vh_3 + b_{14}sh_3 + b_{15}th_3, \quad (6)$$

где факторы в кодированном виде выражены согласно формуле (5) следующим образом:  $v = \text{Cod}(v_T; 5; 0,4)$ ;  $s = \text{Cod}(s_T; 0,4; 0,1)$ ;  $t = \text{Cod}(t_T; 4; 0,75)$ ;  $h_3 = \text{Cod}(h_{3,T}; 1,1; 0,02)$ .

Коэффициенты уравнения (6) приведены ниже.

$j$ .....	1	2	3	4	5	6	7	8
$b_j$ .....	0,743	0,047	0,138	0,280	0,343	0,165	0,050	0,158
$j$ .....	9	10	11	12	13	14	15	
$b_j$ .....	0,274	0,047	0,050	-0,013	-0,016	-0,064	0,066	

Уравнения (1)–(6) можно использовать прежде всего для **нормирования**, т. е. расчета норм времени и основных показателей, характеризующих операцию. Нормирование без оптимизации осуществляют по нормативным (табличным) значениям параметров режима [2 и др.].

В результате расчетов находят штучно-калькуляционное время  $t_{\text{шт-к}}$  (мин) и производительность обработки  $Q = 1/t_{\text{шт-к}}$  (шт./мин), норму сменной выработки  $W = 480/t_{\text{шт-к}}$  (шт./смена), а также сменный расход лезвий  $U_{\text{см}}$ , сменный расход инструмента  $U_{\text{и,см}}$  и требуемое число  $U_{\text{и}}$  инструментов для изготовления партии деталей (размер партии  $R$ , шт.) с учетом переточек или замены вершин сменной многогранной пластины (СМП).

Итогом нормирования является определение себестоимости, точнее — ее переменной части  $S$  (руб./шт.), зависящей от режима резания:

$$S = t_0E + t_0E_{\text{э1}} + t_0(T_{\text{зам}}E + E_{\text{и}})/T = S_{\text{ст}} + S_{\text{э}} + S_{\text{и}}, \quad (7)$$

где  $t_0$  — основное время, мин;  $E$  — стоимость минуты работы станка с учетом затрат на эксплуатацию и ремонт, руб./мин;  $E_{\text{э1}}$  — затраты на электро-

энергию за 1 мин резания, руб./мин;  $T_{\text{зам}}$  — время на замену заступившегося инструмента и поднастройку станка, мин;  $E_{\text{и}}$  — расходы на инструмент за период  $T$  его стойкости;  $S_{\text{ст}}$ ,  $S_{\text{э}}$  и  $S_{\text{и}}$  — части себестоимости, приходящиеся на станок, электроэнергию и инструмент соответственно.

Стоимость работы станка  $E = E_c + (A_0 + \varepsilon_k) \times V/(60F_T)$ , где  $E_c$  — минутная тарифная ставка станочника с накладными расходами;  $A_0$  — годовая норма амортизационных отчислений;  $\varepsilon_k$  — коэффициент эффективности капитальных вложений;  $V$  — стоимость станка, руб.;  $F_T$  — годового фонда времени, ч. В расчетах было принято  $E_c = 3$  руб./мин;  $A_0 = 0,14$ ;  $\varepsilon_k = 0,12$ ;  $F_T = 1860$  ч.

Затраты на электроэнергию  $E_{\text{э1}} = E_{\text{э}}N/60$ , где  $E_{\text{э}}$  — стоимость электроэнергии, руб./(кВт·ч);  $N$  — мощность на шпинделе, кВт. Например, для сверления  $N = M\omega K_w/(9554\eta)$ , где  $M$  — крутящий момент [см. формулы (2)], Н·м;  $\omega$  — частота вращения шпинделя, об/мин;  $K_w = 1,2$  — коэффициент, учитывающий потери в электросети;  $\eta = 0,8$  — КПД привода главного движения станка. Расходы на инструмент за период стойкости учитывают его первоначальную стоимость, расходы на переточки и эксплуатационные затраты.

В таблице приведены результаты нормирования операции сверления на станке мод. 2С132. Были приняты следующие условия операции и исходные данные для расчета: обрабатываемый материал — сталь 12Х18Н10Т;  $R = 1000$  шт.; сверло из стали Р6М5;  $d = 15$  мм; длина резания с учетом врезания и перебега 51 мм;  $s = 0,2$  мм/об;  $T = 15$  мин; число переточек 45;  $T_{\text{зам}} = 3$  мин;  $E_{\text{э}} = 1,5$  руб./(кВт·ч);  $V = 190000$  руб.; стоимость нового инструмента 146 руб. Постоянные, коэффициенты и показатели степени, входящие в формулы (2), выбраны по справочнику [2]:  $C_v = 0,8$ ;  $m_v = 0,25$ ;  $y_v = 0,85$ ;  $q_v = 0,75$ ;  $K_v = 1$ ;  $C_M = 0,804$ ;  $m_M = 0,15$ ;  $y_M = 0,8$ ;  $q_M = 1,9$ ;  $K_M = 1$ . Следует отметить существенную долю (28 %), вносимую инструментом в общую себестоимость обработки деталей на данной операции.

$\omega$ , об/мин	$v$ , м/с	$S$ , руб./шт.	$S_{\text{ст}}$ , руб./шт.	$S_{\text{и}}$ , руб./шт.	$S_{\text{э}}$ , руб./шт.	$T$ , мин	$M$ , Н·м	$N$ , кВт	$Q$ , шт./мин	$W$ , шт.	$U_{\text{см}}$ , шт.	$U_{\text{и,см}}$ , шт.	$U_{\text{и}}$ , шт.
250	0,2	4,93	3,48	1,39	0,05	17,1	54,9	2,2	0,55	264,0	15,8	0,35	1,33

В отличие от нормирования **оптимизацию** параметров режима выполняют на основе критерия, представленного соответствующим математическим уравнением в виде целевой функции:

$$f_0(\vec{X}) \rightarrow \min; \vec{X} \in \Omega, \quad (8)$$

где  $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots) = (v, s_1, s_2, \dots)^T$  — вектор (матрица) переменных (параметров) режима;  $\Omega$  — область допустимых значений параметров режима, задаваемая системой технологических ограничений в виде уравнений (в общем случае неравенств и равенств):

$$\left. \begin{aligned} f_1(\vec{X}) \leq 0; \quad f_2(\vec{X}) \leq 0; \quad \dots; \quad f_g(\vec{X}) \leq 0; \\ f_{g+1}(\vec{X}) = 0; \quad \dots; \quad f_h(\vec{X}) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Задача минимизации целевой функции (8) с учетом ограничений (9) представляет собой задачу математического программирования. Точку  $\vec{X}^*$ , в которой достигается минимум целевой функции (стационарную точку), называют оптимальным решением, а соответствующие ей значения параметров режима — оптимальными. Необходимым условием того, чтобы функция (8) имела локальный минимум в точке  $\vec{X}^*$ , является равенство нулю всех ее первых частных производных или равенство нулю вектора градиента.

Исследование характера стационарной точки приводит к условиям второго порядка. Согласно этим условиям для того, чтобы дважды непрерывно дифференцируемая функция имела в стационарной точке минимум, необходимо и достаточно, чтобы матрица  $H(\vec{X}^*)$  ее вторых производных (матрица Гессе) была положительно определенной. Таким образом, условия минимума функции многих переменных имеют вид  $\partial f / \partial x_i = 0$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) или градиент  $\nabla f(\vec{X}^*) = 0$ ;

$$H(\vec{X}^*) = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_1} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_n} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Проверка знакоопределенности матрицы Гессе, методы минимизации функции многих переменных (8) и исследования стационарных точек изложены в литературе (например, [3]).

Если в качестве переменных параметров режима принять скорость  $v$  резания и подачу  $s$ , то себе-

стоимость [см. формулу (7)] будет функцией этих переменных. Преобразуем функцию (7) для условий наружного продольного точения заготовки диаметром  $d$  при длине  $l$  обработки с учетом врезания и перебега инструмента. Для расчета стойкости инструмента и мощности резания используем степенные уравнения (1). Тогда функция себестоимости после преобразований примет следующий вид:

$$S(v, s) = S_{\text{ст}} + S_3 + S_{\text{и}} = C_1 E / (vs) + C_1 C_2 / (v^{n_{p_z}} s^{1-y_{p_z}}) + C_3 v^{1/m_v-1} s^{y_v/m_v-1}, \quad (11)$$

где постоянные равны

$$C_1 = \pi dl / (6 \cdot 10^4);$$

$$C_2 = E_3 C_{p_z} t^{x_{p_z}} K_{p_z} K_w / (6 \cdot 10^4 \cdot 60^{n_{p_z}} \eta);$$

$$C_3 = C_1 (T_{\text{зам}} E + E_{\text{и}}) / C_4; \quad C_4 = [C_v K_v / (60 t^{x_v})]^{1/m_v}.$$

Приняты следующие условия токарной операции: материал заготовки — сталь 12Х18Н10Т; резец сборный с СМП из твердого сплава ВК8;  $d = 200$  мм;  $l = 105$  мм;  $t = 2,5$  мм = const;  $V = 850000$  руб.; стоимость державки 500 руб.; стоимость СМП 30 руб.; число вершин — три. Постоянные, коэффициенты и показатели степени для условий операции приняты по справочнику [2]:  $C_v = 150$ ;  $m_v = 0,25$ ;  $x_v = 0,15$ ;  $y_v = 0,45$ ;  $K_v = 1$ ;  $C_{p_z} = 3400$ ;  $x_{p_z} = 0,95$ ;  $y_{p_z} = 0,75$ ;  $n_{p_z} = 0,15$ ;  $K_{p_z} = 1$ . Тогда после преобразований уравнение (11) примет вид:

$$S(v, s) = 5,44 / (vs) + 0,18 / (v^{0,15} s^{0,25}) + 1,78 v^{3,8} s^{0,8} \quad (12)$$

(здесь, как и выше,  $v$  — в м/с;  $s$  — в мм/об.).

Для нахождения минимума функции (12) использован **метод спуска**, который относится к градиентным методам. В основе этих методов лежит понятие о том, что антиградиент функции в точке есть вектор, направленный в сторону наискорейшего убывания функции. Тогда справедлив итерационный процесс вида

$$\vec{X}_{k+1} = \vec{X}_k - \alpha_k \nabla f(\vec{X}_k); \quad \alpha_k > 0; \quad k = 1, 2, \dots, \quad (13)$$

где  $\alpha_k$  и  $k$  — шаг и номер итерации.

С учетом различной размерности скорости и подачи выбран такой метод спуска, для которого шаги по соответствующим направлениям различаются. Тогда выражение (13) в координатной форме принимает вид

$$\begin{aligned} v_{k+1} &= v_k + \alpha_v \partial S(v_k, s_k) / \partial v; \\ s_{k+1} &= s_k - \alpha_s \partial S(v_k, s_k) / \partial s, \end{aligned} \quad (14)$$

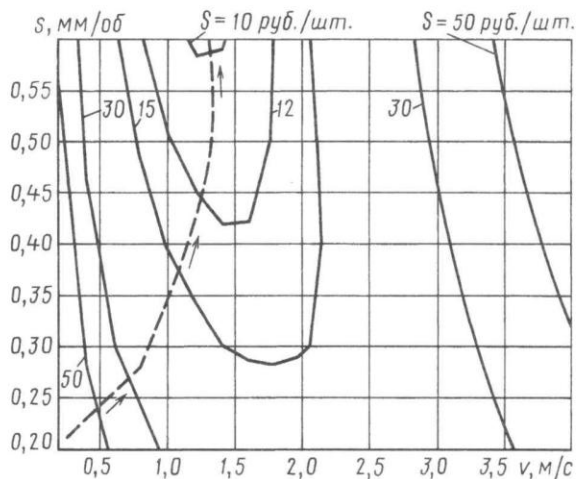


Рис. 1. Линии уровня себестоимости  $S$  операции точения и направление спуска в точку минимума (штриховая линия)

где производные на каждой итерации рассчитаны по функции себестоимости (12). Движение по координатам начинается из точки  $(v, s) = (0,25; 0,21)$ . Расчет прекращается, если  $S(v_k, s_k) - S(v_{k+1}, s_{k+1}) < \xi$ ;  $\xi > 0$  — малая величина.

На рис. 1 в координатной плоскости  $v-s$  показано расчетное направление спуска (штриховая линия), а также приведены линии уровня функции себестоимости (12). Для построения этих линий использована функция MATLAB contour [4].

Характерно, что при движении от начальной точки до конечной, имеющей координаты  $(1,27; 0,6)$ , себестоимость уменьшается в несколько раз. Результирующие показатели составляют:  $S(1,27; 0,6) = 9,76$  руб./шт.;  $S_{ст} = 7,13$  руб./шт.;  $S_3 = 0,20$  руб./шт.;  $S_{и} = 2,43$  руб./шт.;  $T = 21,7$  мин.

(Окончание следует)

### Список литературы

1. Петрушин С. И., Грубый С. В. Обработка чугунов и сталей сборными резцами со сменными многогранными пластинами. — Томск: Изд-во ТПУ, 2000. — 156 с.
2. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я. Л. Гуревич, М. В. Горохов, В. И. Захаров и др. — М.: Машиностроение, 1986. — 240 с.
3. Аггетков А. В., Галкин С. В., Зарубин В. С. Методы оптимизации: Учеб. для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 440 с.
4. Кетков Ю. Л., Кетков А. Ю., Шульц М. М. MATLAB б.х.: программирование численных методов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 672 с.

## ОТКРЫТИЯ. ИЗОБРЕТЕНИЯ. НОВАЯ ТЕХНИКА

### Фильтрация рабочей жидкости для объемного гидропривода станков

к.т.н. В. В. Буренин

Опыт эксплуатации гидрофицированных станков показывает, что загрязненность рабочих жидкостей (РЖ) является одной из основных причин отказов гидроагрегатов и резко сокращает сроки их службы. Поэтому вопросам очистки РЖ как при заправке гидросистем, так и в процессе их работы уделяют большое внимание.

Особенно высокие требования предъявляют к чистоте РЖ в следящих гидросистемах и объемных гидроприводах, имеющих прецизионные золотниковые пары с зазорами величиной 4—10 мкм.

Примеси, загрязняющие РЖ, могут состоять из частиц, попадающих в РЖ извне, и частиц, образовавшихся в результате износа подвижных деталей соединений гидроагрегатов, а также из вязких включений (продуктов окисления РЖ). Для очистки РЖ от таких примесей служат гидравлические фильтры [1], которые в зависимости от использованного в них метода очистки подразделяются на механические (очистка с помощью фильтрующих перегородок) и силовые (очистка посредством силовых полей).