

## *Совершенствование методики оптимизации режимов резания на примере зубонарезания цилиндрических шестерен*

д.т.н., М. М. Кане, к.т.н. Б. В. Иванов, Н. Б. Загорская  
// БНТУ, Республика Беларусь, г. Минск

Основные критерии при решении задачи оптимизации режимов резания материалов — себестоимость или производительность операции обработки. Распространены две схемы оптимизации режимов резания: 1) из условия обеспечения наименьшей себестоимости операции без ограничений на ее производительность; 2) из условия обеспечения максимальной производительности операции без ограничений на ее себестоимость.

Методики оптимизации режимов резания для указанных условий теоретически разработаны [1 и 2], хотя на практике режимы резания обычно устанавливают по справочникам на основе опытно-статистических данных.

В большей степени реальным производственным условиям соответствует следующая постановка задачи оптимизации режимов резания: установление режимов резания, обеспечивающих минимальное значение себестоимости операции при

заранее заданной производительности. Производительность обработки характеризуется величиной  $C = vs$ , где  $v$  и  $s$  соответственно скорость резания (м/мин) и подача (мм/об). При заданной программе выпуска число станков, необходимых для выполнения данной операции, зависит от времени обработки, которое в свою очередь определяется значением  $C$ . Для различных условий производства имеются свои ограничения на число однотипных станков, используемых для выполнения одной операции.

При оптимизации режимов резания необходимо также учитывать их влияние на качество продукции. Как показали исследования [3], при зубофрезеровании цилиндрических шестерен червячными фрезами режимы резания в наибольшей степени влияют на точность зубчатых колес. Поэтому при оптимизации режимов зубофрезерования цилиндрических шестерен червячными фрезами наряду

с ограничениями на себестоимость и производительность обработки предложено учесть и ограничения на важнейшие показатели точности зубьев, связанные с режимами зубофрезерования.

В этом случае в качестве целевой функции принимают долю  $C_p$  себестоимости операции, зависящую от режимов резания:

$$C_p = T_0 E_p + \mathcal{E}_k / R, \quad (1)$$

где  $T_0$  — основное время операции;  $E_p$  — себестоимость одной минуты работы станка и рабочего;  $\mathcal{E}_k$  — сумма всех затрат за период  $T$  стойкости режущего инструмента (РИ);  $R$  — число заготовок, обработанных за период стойкости.

Задачу оптимизации режимов резания решают для заданных оборудования и РИ. В этих условиях [как видно из формулы (1)] минимальное значение  $C_p$  соответствует максимальной стойкости РИ.

Таким образом, операционная модель предложенного метода оптимизации режимов резания может быть записана в виде:

$$\left. \begin{array}{l} J \rightarrow \max \\ N < N_{рек} \\ F < F_{доп} \end{array} \right\} \quad (2)$$

где  $N$  и  $N_{рек}$  — расчетное и рекомендуемое число станков на операции;  $F$  и  $F_{доп}$  — достижимое при данных режимах резания и допустимое на данной операции значения важнейшего показателя — точности обрабатываемой детали.

Для выбора ограничений, принятых в модели (2), необходимо установить значения  $C$ , от которых зависят величины  $N$ ,  $F$  и  $T$  и внутри которых должно располагаться значение  $C_{опт} = v_{опт} s_{опт}$ .

Рекомендуемые значения:  $N_p = 1 \div 2$ ;  $N_p = 2 \div 3$  и  $N_p = 2-4$  для мелкосерийного, среднесерийного и крупносерийного производства соответственно. Величина  $N$  зависит от времени выполнения операции:  $N = T_{шт} / (T_{шт-к} / t)$ , шт., где  $T_{шт} / (T_{шт-к} / t)$  — штучное или штучно-калькуляционное время выполнения операции;  $t = 60 F_d / N_{вып}$  — темп выпуска ( $F_d$  — действительный годовой фонд времени работы оборудования в заданном режиме;  $N_{вып}$  — годовая программа выпуска деталей),  $T_{шт} / (T_{шт-к} / t) \approx \varphi_k T_0$ , где  $\varphi_k$  — коэффициент, учитывающий другие составляющие  $T_{шт} / (T_{шт-к} / t)$  (помимо  $T_0$ );  $\varphi_k = 1,66$  для зуборезных работ при мелкосерийном производ-

стве и  $\varphi_k = 1,27$  при средне- и крупносерийном производстве.

При зубофрезеровании шестерен червячными фрезами

$$T_0 = \frac{L_{рх} z_d}{s_0 n \varepsilon q} \quad (3)$$

где  $L_{рх}$  — длина рабочего хода, мм;  $z_d$  — число зубьев обрабатываемой шестерни;  $s_0$  — подача, мм/об.;  $n$  — частота вращения фрезы, об/мин;  $q$  — число одновременно обрабатываемых деталей;  $\varepsilon$  — число заходов фрезы.

Задаввшись  $N_{рек}$ , можно определить  $s_0 n$  или  $sv$ , удовлетворяющее условию  $N < N_{рек}$ .

Сочетание  $sv$ , удовлетворяющее условию  $F \leq F_{доп}$ , можно установить с помощью ранее разработанных рекомендаций [3]. Достижимые значения точности цилиндрических зубчатых колес при различных режимах зубофрезерования [(материал зубчатых колес — стали 25ХГТ, 20ХН3А; модуль  $m = 3,5-6,3$  мм; диаметр делительной окружности  $d = 120-400$  мм) [4]] представлены в таблице.

v, м/мин	Режимы резания	Показатели точности цилиндрических зубчатых колес			
		$s_0$ , мм/об	$F_{гр}$ , мм	$F'$ , мм	$f_{ir}$ , мм
25—30	1,5	0,1	0,12	0,04	0,019
	2,5	0,11	0,13	0,044	0,028
	3,5	0,12	0,14	0,048	0,037
30—35	1,5	0,11	0,13	0,044	0,028
	2,5	0,12	0,14	0,048	0,037
	3,5	0,13	0,15	0,052	0,046
35—40	1,5	0,12	0,14	0,048	0,037
	2,5	0,13	0,15	0,052	0,046
	3,5	0,14	0,16	0,056	0,055
40—45	1,5	0,13	0,15	0,052	0,046
	2,5	0,14	0,16	0,056	0,055
	3,5	0,15	0,17	0,060	0,064
45—50	1,5	0,14	0,16	0,056	0,055
	2,5	0,15	0,17	0,06	0,064
	3,5	0,16	0,18	0,064	0,073

Значение  $C = sv$ , обеспечивающее  $T_{max}$  с учетом характера зубообработки (однократная, предварительная, чистовая), вида РИ и некоторых других факторов можно предварительно определить с помощью рекомендаций, приводимых в литературе [4].

Однако для определения режимов резания, обеспечивающих требования модели (2) и учитывающих фактические условия зубонарезания, необходимо выполнить эксперимент по определенной схеме, установить параметры зависимости  $T = f(v, s)$  и выполнить расчеты, приведенные ниже.

При выполнении эксперимента области предельных значений  $v$  и  $s$  должны включать в себя найденные значения (см. табл.), а также учитывать возможности оборудования и оснастки, используемых при выполнении данной операции.

Как показали исследования [1 и 2], наиболее объективно зависимость стойкости РИ от режимов резания представлена в выражении:

$$T = kv^m s^n, \quad (4)$$

где  $k$  — постоянный коэффициент, учитывающий условия обработки;  $v$  — скорость резания, м/мин;  $s$  — подача, мм/об.;  $m, n$  — показатели степени.

Для приведения зависимости (4) к линейному виду прологарифмируем ее:

$$\ln T = \ln k + m \ln v + n \ln s. \quad (5)$$

Зависимость (5) можно представить в виде:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2, \quad (6)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — кодированные значения  $v$  и  $s$ ;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  — фактические значения коэффициентов.

С учетом эффекта взаимодействия значений  $v$  и  $s$ , что определяется процессом резания, зависимость (6) можно записать в виде:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (7)$$

где  $y = \ln T$ ;  $b_0, b_1, b_2, b_{12}$  — выборочные оценки значений коэффициентов.

Значения указанных коэффициентов можно определить по известным формулам [5].

Экспериментальное исследование зависимости (7) по указанной схеме выполнено на Минском заводе шестерен. Обработывали цилиндрические зубчатые колеса ( $m = 4$  мм,  $z = 37$ , материал — сталь 18ХГТ, твердость 156—207 НВ) на станке мод. 5В312 стандартными червячными фрезами из сталей Р18, Р6М5, Р6М3. Скорость резания  $v = 29,2$  и  $52,9$  м/мин, подача  $s = 1,64$  и  $4,08$  мм/об. Получены следующие зависимости для фрез из сталей Р6М5, Р18 и Р6М3:

$$y = 4,65 - 0,69x_1 - 0,95x_2 + 0,43x_1x_2; \quad (8)$$

$$y = 4,75 - 0,74x_1 - 0,97x_2 + 0,43x_1x_2; \quad (9)$$

$$y = 4,41 - 0,45x_1 - 0,67x_2 + 0,23x_1x_2. \quad (10)$$

Подтверждена адекватность этих зависимостей опытным данным и достоверность их коэффициентов.

Анализ зависимостей (8—10) показал, что материалы режущей части червячных фрез не оказывают существенного влияния на результат. Анализ ранее выполненных работ [1 и 2], а также производственный опыт подтверждают, что в области используемых режимов резания влияние других факторов на стойкость фрез несоизмеримо с влиянием режимов резания. Поэтому при оптимизации режимов зубофрезерования можно (в практических целях) использовать с достаточной точностью установленные для данных условий зависимости  $T = f(v, s)$  вида формул (4) или (7).

Рассмотрим методику определения оптимальных значений  $v$  и  $s$  при заданном  $C = vs$  (как характеристике производительности процесса зубонарезания).

При  $C = \text{const}$  величину  $v$  можно выразить через  $C$  и  $s$ , а величину  $s$  — через  $C$  и  $v$  и построить графики зависимостей  $T = f(v)$  и  $T = f(s)$ . Для выполненных исследований построены такие графики для фрез из сталей Р6М5, Р18 и Р6М3 (см. рисунок).

Полученные кривые имеют один экстремум. Как известно, экстремум некоторой функции, если он существует, достигается при равенстве нулю ее частных производных по всем неизвестным. Для зависимости (4) это условие можно записать как:  $\partial T / \partial v = 0, \partial T / \partial s = 0$ .

После логарифмирования обеих частей уравнения (3) получили зависимость (7), где  $y = \ln T$ .

В этой зависимости

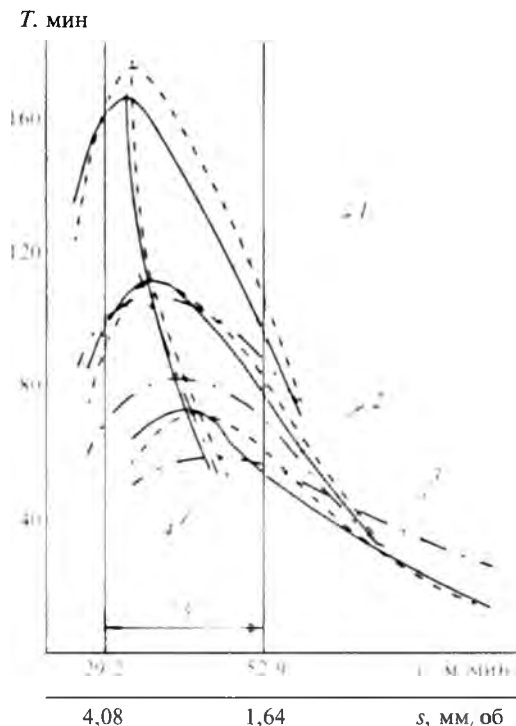
$$x_1 = a_1 + a_2 \ln v, \quad (11)$$

$$x_2 = k_1 + k_2 \ln s, \quad (12)$$

где  $a_1, a_2, k_1, k_2$  — коэффициенты, зависящие от предельных значений  $v$  и  $s$ , используемых в эксперименте, по результатам которого найдена зависимость (7). Коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, b_{12}$  этой зависимости определены по известным [5] формулам. Значения  $x_1$  и  $x_2$  определяют по формулам:

$$x_1 = \frac{2(\ln v - \ln v_{\max})}{\ln v_{\max} - \ln v_{\min}} + 1; \quad (13)$$

$$x_2 = \frac{2(\ln s - \ln s_{\max})}{\ln s_{\max} - \ln s_{\min}} + 1.$$



Изменение стойкости  $T$  червячных фрез при постоянной производительности. Материал режущей части инструмента: P6M5 (—); P18 (----); P6M3 (- · - ·); кривые 1 —  $C_1$ ; кривые 2 —  $C_2$ ; кривые 3 —  $C_3$ ; ( $C_1 < C_2 < C_3$ ); 4 — линия изменения максимальных значений стойкости; 5 — интервал скоростей и подач при проведении эксперимента

Для расчета коэффициентов  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  использовали формулы:

$$a_1 = \frac{\ln v_{\max} + \ln v_{\min}}{\ln v_{\max} - \ln v_{\min}} \quad (14)$$

$$a_2 = \frac{2}{\ln v_{\max} - \ln v_{\min}} \quad (15)$$

$$k_1 = \frac{\ln s_{\max} + \ln s_{\min}}{\ln s_{\max} - \ln s_{\min}} \quad (16)$$

$$k_2 = \frac{2}{\ln s_{\max} - \ln s_{\min}} \quad (17)$$

где  $v_{\min}$ ,  $v_{\max}$  и  $s_{\min}$ ,  $s_{\max}$  — предельные значения  $v$  и  $s$ , использованные при эксперименте для нахождения зависимости (7).

Прологарифмируем выражение  $C = vs$  и выразим  $\ln s$  через  $\ln v$  и  $\ln C$ ,

$$\ln s = \ln C - \ln v. \quad (18)$$

Приводим формулу (12) к виду:

$$x_2 = k_1 + k_2(\ln C - \ln v). \quad (19)$$

После подстановки в уравнение (5) значения  $\ln s$  из формулы (18), а также значений  $x_1$  и  $x_2$  из формул (11) и (19) и объединения общих множителей при  $\ln v$ ,  $\ln C \ln v$ ,  $\ln^2 v$ , а также свободных членов уравнений получим:

$$\ln T = B_0 + B_1 \ln v + B_2 \ln C \ln v - B_3 \ln^2 v, \quad (20)$$

где  $B_0 = b_0 + b_1 a_1 + b_2 k_1 + b_2 k_2 \ln C + b_{12} a_1 k_1 + b_{12} a_1 k_2 \ln C$ ,

$$B_1 = b_1 a_2 + b_2 k_2 + b_{12} a_1 k_2 + b_{12} a_2 k_1, \quad (21)$$

$$B_2 = B_3 = b_{12} a_2 k_2. \quad (22)$$

Для определения  $v_{\text{опт}}$ , при которой  $T = T_{\max}$ , найдем производную  $d \ln T / d \ln v$  из зависимости (20) и приравняем ее нулю:  $d \ln T / d \ln v = B_1 + B_2 \ln C - 2 B_3 \ln v = 0$ , откуда следует, что:

$$B_1 + B_2 \ln C = 2 B_3 \ln v. \quad (23)$$

Из зависимости (23) определяем:

$$v_{\text{опт}} = e^{\frac{B_1 + B_2 \ln C}{2 B_3}} = e^{\frac{B_1}{2 B_3} + \frac{B_2}{2 B_3} \ln C} = e^{n_1 + n_2 \ln C}$$

Подставляя вместо значений  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  их выражения из зависимостей (21) и (22), получаем:

$$n_1 = \frac{b_1 a_2 + b_2 k_2 + b_{12} a_1 k_2 + b_{12} a_2 k_1}{2 b_{12} a_2 k_2}$$

$$\text{и } n_2 = \frac{b_{12} a_2 k_2}{2 b_{12} a_2 k_2} = 0,5. \quad (24)$$

Таким образом:

$$v_{\text{опт}} = e^{n_1 + 0,5 \ln C} \quad (25)$$

Как видно из рисунка, скорость зубофрезерования, соответствующая  $T_{\max}$ , принимает близкие значения для всех используемых в эксперименте марок быстрорежущей стали. Этот вывод подтверждается проведенными расчетами коэффициента  $n_1$  по формуле (24) для каждой марки быстрорежущей стали. В результате получили следующие формулы для определения оптимальной скорости резания:

$$\text{для стали P18 } v_{\text{опт}} = e^{1,31 + 0,5 \ln C} \quad (26)$$

$$\text{для стали P6M5 } v_{\text{опт}} = e^{1,32 + 0,5 \ln C} \quad (27)$$

$$\text{для стали P6M3 } v_{\text{опт}} = e^{1,34 + 0,5 \ln C} \quad (28)$$

Усредненное выражение формулы для определения оптимальных режимов зубофрезерования фрезами из быстрорежущих сталей нормальной про-

изводительности при заданной производительности операции  $C$  можно принять в следующем виде:

$$v_{\text{опт}} = e^{1.32 + 0.5 \ln C} \quad (29)$$

Таким образом, оптимизацию режимов резания по предлагаемой методике выполняют в следующей последовательности.

1. Выбор трех значений  $C = vs$  и областей изменения  $v$  и  $s$  с помощью ограничений (2).

2. Экспериментальное определение зависимости  $T = f(v, s)$  вида (7) для заданных областей изменения  $v$  и  $s$ .

3. Расчет коэффициентов  $a_1, a_2, k_1, k_2$  по формулам (14)—(17).

4. Расчет коэффициента  $n_1$  для зависимости (25) по формуле (24).

5. Расчет трех значений  $v_{\text{опт}}$  по формуле (25) для трех значений  $C$ , установленных для данных условий обработки при подготовке исходных данных (см. п. 1) и трех значений  $x_1, x_2$  по формулам (13) и (19). В формулы (13) и (19) вместо  $v$  подставляют  $v_{\text{опт}}$ , найденные ранее по формуле (25).

6. Расчет трех значений  $T$  по зависимости (10) для трех значений  $x_1$  и  $x_2$ .

7. Выбор в качестве приемлемого значения  $v_{\text{опт}}$  и соответствующего ему  $C$  тех значений этих параметров, которые обеспечивают  $T_{\text{max}}$  для трех рассмотренных сочетаний  $C$  и  $v_{\text{опт}}$ .

8. Определение  $s_{\text{опт}} = C/v_{\text{опт}}$ , где  $C$  и  $v_{\text{опт}}$  — значения, принятые в п. 7.

Если условия зубообработки близки к условиям экспериментального определения зависимости  $T = f(v, s)$ , то в п. п. 2, 3, 4 могут быть исполь-

зованы полученные зависимости (8)—(10) и зависимости (26)—(29).

Разработана программа расчета оптимальных режимов зубофрезерования цилиндрических шестерен червячными фрезами (на языке программирования Турбо-Паскаль 7.0) по описанной методике.

## Выводы

1. Предложенная методика оптимизации режимов резания позволяет для заданных условий обработки минимизировать ее себестоимость при обеспечении требуемой производительности и качества продукции.

2. Для характерных для общего машиностроения условий зубофрезерования цилиндрических шестерен червячными фрезами получены зависимости  $T = f(v, s)$  и  $v_{\text{опт}} = f(C)$ , где  $C$  — ограничение по производительности обработки.

3. Разработано программное обеспечение предложенной методики оптимизации режимов резания.

## Список литературы

1. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов. — М.: Машиностроение, 1966. — 372 с.
2. Клушин М. И. Резание металлов. — Горький: Изд-во М-ва высш. и средн. спец. образования РСФСР, 1970. — 101 с.
3. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: Учеб. пособие / Под общ. ред. В. Е. Старжинского, М. М. Кане. — СПб.: Профессия, 2007. — 832 с.
4. Режимы резания металлов. Справочник / Ю. В. Барановский, Л. А. Брахман, А. Н. Галевич и др.: Под ред. А. Д. Корчемкина. — М.: НИИТАвтопром, 1995. — 456 с.
5. Кане М. М. Основы научных исследований в технологии машиностроения. — Мн.: Вышэйшая школа, 1987. — 230 с.