

НОВЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЗУБОНАРЕЗАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

При оптимизации режимов резания целевыми параметрами обычно являются себестоимость и производительность операции. При этом наиболее часто задача оптимизации формулируется следующим образом:

1. Определение режимов резания, при которых достигается наименьшая себестоимость операции при условии, что на производительность процесса ограничения не накладываются.
2. Расчет режимов резания наибольшей производительности (минимального значения штучного времени) при отсутствии ограничений себестоимости обработки.

Методики оптимизации режимов резания для указанных условий теоретически разработаны достаточно полно [1, 2, 3], хотя на практике режимы резания обычно устанавливаются 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 значением $C = VS$, 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 наши исследования [4], 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 нами предложено учесть и ограничения на важнейшие показатели точности зубьев, связанные с режимами зубофрезерования.

В этом случае в качестве целевой функции принимается доля себестоимости операции C_p , зависящая от режимов резания

$$C_p = T_o E_p + \frac{\text{Эк}}{R}, \quad (1)$$

где T_o – основное время операции; E_p – себестоимость 1 мин работы станка и рабочего; Эк – сумма всех затрат за период стойкости T инструмента; R – число заготовок, обработанных за период стойкости.

Решение задачи оптимизации режимов резания производится для заданных оборудования и инструмента. В этих условиях, как видно из формулы (1), минимальное значение C_p будет иметь место при максимальной стойкости T инструмента.

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

$$\left. \begin{array}{l} T \rightarrow \max \\ N \leq N_{\text{рек.}} \\ F \leq F_{\text{доп.}} \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где N , $N_{рек}$ – расчетное и рекомендуемое число станков на операции; F , $F_{доп}$ – достижимое при данных режимах резания и допустимое на данной операции значения важнейшего показателя (лей) 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 $C_{опт} = V_{опт} \cdot S_{опт}$.

В условиях мелкосерийного производства рекомендуется $N_p = 1-2$, среднесерийного производства – $N_p = 2-3$, крупносерийного производства – $N_p = 2-4$. Величина N зависит от времени выполнения операции

$$N = \frac{T_{шт.(шт.-к.)}}{t}, \text{ шт.} \quad (3)$$

где $T_{шт.(шт.-к.)}$ – штучное или штучно-калькуляционное время выполнения операции; t – темп выпуска.

$$T_{шт.(шт.-к.)} \approx \varphi_k \cdot T_0, \quad (4)$$

где φ_k – коэффициент, учитывающий другие составляющие $T_{шт.(шт.-к.)}$ помимо T_0 ; T_0 – основное время операции. φ_k для зуборезных работ равен 1,66 для мелкосерийного производства и 1,27 для средне- и крупносерийного производства.

$$t = \frac{60F_d}{N_{вып.}}, \quad (5)$$

где F_d – действительный годовой фонд времени работы оборудования в заданном режиме; $N_{вып.}$ – годовая программа выпуска деталей.

При зубофрезеровании шестерен червячными фрезами

$$T_0 = \frac{L_{р.х.} \cdot z_d}{S_0 \cdot n \cdot \varepsilon \cdot q}, \quad (6)$$

где $L_{р.х.}$ – длина рабочего хода, мм; z_d – число зубьев обрабатываемой шестерни; S_0 – подача, мм/об.; n – число оборотов фрезы; q – число одновременно обрабатываемых деталей; ε – число заходов фрезы.

Задавшись $N_{рек}$, можно определить $S_0 n$ или SV , удовлетворяющее условию $N \leq N_{рек}$.

Сочетание SV удовлетворяющее условию $F \leq F_{доп}$, можно установить с помощью ранее разработанных нами рекомендаций [4] (см. табл.1).

Значение $C = VS$, обеспечивающее T_{max} с учетом характера зубообработки (однократная, предварительная, чистовая), вида инструмента и некоторых других факторов можно предварительно определить с помощью рекомендаций, приводимых в справочной литературе, например, в [5].

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

При выполнении указанного ПФЭ области предельных значений V и S должны включать найденные выше значения, а также учитывать возможности используемых на данной операции оборудования и оснастки.

Как показали многочисленные исследования [1, 2, 3], в наилучшей степени зависимость стойкости инструмента от режимов резания описывается выражением:

$$T = K \cdot V^m \cdot S^n, \quad (7)$$

где K – постоянный коэффициент, учитывающий условия обработки; V – скорость резания, м/мин; S – подача, мм/об.; m , n – показатели степени.

Для приведения зависимости (7) к линейному виду прологарифмируем ее.

$$\ln T = \ln K + m \ln V + n \ln S \quad (8)$$

Таблица 1 – Достижимые значения точности цилиндрических зубчатых колес при различных режимах зубофрезерования (материал зубчатых колес – стали 25ХГТ, 20ХНЗА, модуль $m = 3,5 - 6,3$ мм, диаметр делительной окружности $d = 120 - 400$ мм) [4]

Режимы резания		Показатели точности цилиндрических зубчатых колес			
V , м/мин	S_0 , мм/об	$F_{гр}$, мм	F_{ir} , мм	f_{ir} , мм	$F_{\beta r}$, мм
25 – 30	1,5	0,100	0,120	0,040	0,019
	2,5	0,110	0,130	0,044	0,028
	3,5	0,120	0,140	0,048	0,037
30 – 35	1,5	0,110	0,130	0,044	0,028
	2,5	0,120	0,140	0,048	0,037
	3,5	0,130	0,150	0,052	0,046
35 – 40	1,5	0,120	0,140	0,048	0,037
	2,5	0,130	0,150	0,052	0,046
	3,5	0,140	0,160	0,056	0,055
40 – 45	1,5	0,130	0,150	0,052	0,046
	2,5	0,140	0,160	0,056	0,055
	3,5	0,150	0,170	0,060	0,064
45 – 50	1,5	0,140	0,160	0,056	0,055
	2,5	0,150	0,170	0,060	0,064
	3,5	0,160	0,180	0,064	0,073

Зависимость (8) можно представить в виде:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (9)$$

Здесь x_1 и x_2 – кодированные значения V и S ; β_0 , β_1 , β_2 – истинные значения коэффициентов.

С учетом эффекта взаимодействия значений V и S , что определяется природой процесса резания, зависимость (9) можно записать в виде

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (10)$$

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

Значения указанных коэффициентов можно определить по результатам ПФЭ по известным формулам [6].

Нами выполнено экспериментальное исследование зависимости вида (10) по схеме ПФЭ в условиях Минского завода шестерен. Производилась обработка цилиндрических зубчатых колес ($m = 4$ мм, $z = 37$, материал – сталь 18ХГТ, НВ 156...207) на станке 5В312 стандартными червячными фрезами из сталей Р18, Р6М5, Р6М3. Значения V составляли 29,2 и 52,9 м/мин, значения S – 1,64 и 4,08 мм/об. Были получены следующие зависимости для фрез из сталей Р6М5, Р18, Р6М3:

$$y = 4,65 - 0,69x_1 - 0,95x_2 + 0,43x_1x_2 \quad (11)$$

$$y = 4,75 - 0,74x_1 - 0,97x_2 + 0,43x_1x_2 \quad (12)$$

$$y = 4,41 - 0,45x_1 - 0,67x_2 + 0,23x_1x_2 \quad (13)$$

Были подтверждены адекватность этих зависимостей опытным данным и достоверность их коэффициентов.

Анализ этих зависимостей показал, что рассмотренные материалы режущей части червячных фрез не оказывают на них существенного влияния. Анализ ранее выполненных работ [1, 2, 3], 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 использовать в практических целях с достаточной точностью установленные для данных условий зависимости $T = f(V, S)$ вида (7) или (10).

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 были построены такие графики для фрез из сталей Р6М5, Р18 и Р6М3 (см. рис. 1).

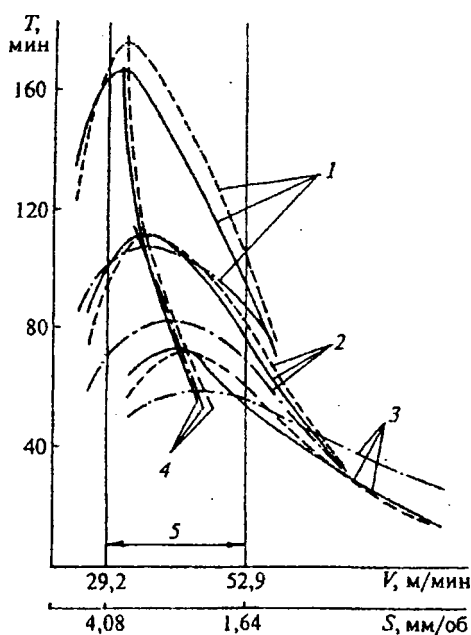


Рис. 1. Изменение стойкости червячных фрез при постоянной производительности.

Материал режущей части инструмента:
 Р6М5 ———; Р18 - - - -; Р6М3 - · - · -; 1 - C_1 ; 2 - C_2 ; 3 - C_3 ($C_1 < C_2 < C_3$);
 4 - линия изменения максимальных значений стойкости;
 5 - диапазон скоростей и подач, охваченных экспериментом

Полученные кривые имеют один экстремум. Как известно [7], экстремум некоторой функции, если он существует, достигается при равенстве нулю ее частных производных по всем неизвестным. Для зависимости (7) это условие можно записать как

$$\frac{\partial T}{\partial V} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial S} = 0, \quad (14)$$

После логарифмирования обеих частей уравнения (6) мы получили зависимость (10), где $y = \ln T$.

В этой зависимости

$$x_1 = a_1 + a_2 \ln V \quad (15)$$

$$x_2 = k_1 + k_2 \ln S \quad (16)$$

где a_1, a_2, k_1, k_2 – коэффициенты, зависящие от предельных значений V и S , используемых в ПФЭ, по результатам которого найдена зависимость (10). Коэффициенты b_0, b_1, b_2, b_{12} этой зависимости определены по известным формулам [6]. Значения x_1 и x_2 определяют по формулам

$$x_1 = \frac{2(\ln V - \ln V_{\max})}{\ln V_{\max} - \ln V_{\min}} + 1 \quad (17)$$

$$x_2 = \frac{2(\ln S - \ln S_{\max})}{\ln S_{\max} - \ln S_{\min}} + 1 \quad (18)$$

Для расчета a_1, a_2, k_1, k_2 используют формулы

$$a_1 = \frac{\ln V_{\max} + \ln V_{\min}}{\ln V_{\max} - \ln V_{\min}} \quad (19)$$

$$a_2 = \frac{2}{\ln V_{\max} - \ln V_{\min}} \quad (20)$$

$$k_1 = \frac{\ln S_{\max} + \ln S_{\min}}{\ln S_{\max} - \ln S_{\min}} \quad (21)$$

$$k_2 = \frac{2}{\ln S_{\max} - \ln S_{\min}} \quad (22)$$

Здесь $V_{\min}, V_{\max}, S_{\min}, S_{\max}$ – предельные значения V и S , использованные при ПФЭ для нахождения зависимости (10).

Прологарифмируем выражение $C = VS$ и выразим $\ln S$ через $\ln V$ и $\ln C$,

$$\ln S = \ln C - \ln V \quad (23)$$

Приводим формулу (16) к виду

$$x_2 = k_1 + k_2 (\ln C - \ln V) \quad (24)$$

После подстановки в уравнение (8) значения $\ln S$ из формулы (23), а также значений x_1 и x_2 из формул (15) и (24) и объединения общих множителей при $\ln V, \ln C \cdot \ln V, \ln^2 V$, а также свободных членов уравнений получим

$$\ln T = B_0 + B_1 \ln V + B_2 \ln C \cdot \ln V - B_3 \ln^2 V, \quad (25)$$

$$\text{где } B_0 = b_0 + b_1 a_1 + b_2 k_1 + b_2 k_2 \ln C + b_{12} a_1 k_1 + b_{12} a_1 k_2 \ln C \quad (26)$$

$$B_1 = b_1 a_2 + b_2 k_2 + b_{12} a_1 k_2 + b_{12} a_2 k_1 \quad (27)$$

$$B_2 = B_3 = b_{12}a_2k_2 \quad (28)$$

Для определения $V_{\text{опт}}$, при которой $T = T_{\text{max}}$, найдем производную $\frac{\partial \ln T}{\partial \ln V}$ из зависимости (25) и приравняем ее 0.

$$\frac{\partial \ln T}{\partial \ln V} = B_1 + B_2 \ln C - 2B_3 \ln V = 0 \quad (29)$$

Откуда

$$B_1 + B_2 \ln C = 2B_3 \ln V \quad (30)$$

Из зависимости (30) определяем

$$V_{\text{опт}} = e^{\frac{B_1 + B_2 \ln C}{2B_3}} = e^{\frac{B_1}{2B_3} + \frac{B_2}{2B_3} \ln C} = e^{n_1 + n_2 \ln C} \quad (31)$$

Подставляя вместо значений B_1, B_2, B_3 их выражения из зависимостей (27), (28), получаем

$$n_1 = \frac{b_1 a_2 + b_2 k_2 + b_{12} a_1 k_2 + b_{12} a_2 k_1}{2b_{12} a_2 k_2} \quad (32)$$

$$n_2 = \frac{b_{12} a_2 k_2}{2b_{12} a_2 k_2} = 0,5$$

$$\text{Таким образом, } V_{\text{опт}} = e^{n_1 + 0,5 \ln C} \quad (33)$$

Как видно из рис. 1, 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 (32) для каждой марки быстрорежущей стали. В результате получили формулы для определения оптимальной скорости резания:

$$\text{для стали P18} \quad V_{\text{опт}} = e^{1,31 + 0,5 \ln C}; \quad (34)$$

$$\text{для стали P6M5} \quad V_{\text{опт}} = e^{1,32 + 0,5 \ln C}; \quad (35)$$

$$\text{для стали P6M3} \quad V_{\text{опт}} = e^{1,34 + 0,5 \ln C}. \quad (36)$$

Усредненное выражение формулы для определения оптимальных режимов зубофрезерования фрезами из быстрорежущих сталей нормальной производительности при заданной производительности операции S можно принять в следующем виде

$$V_{\text{опт}} = e^{1,32 + 0,5 \ln C} \quad (37)$$

Таким образом, оптимизация режимов резания по предлагаемой методике выполняется в следующей последовательности.

1. Выбор 3-х значений $C = VS$ и областей изменения V и S с помощью ограничений (2).

2. Экспериментальное определение зависимости $T = f(V, S)$ вида (10) для заданных областей изменения V и S .
3. Расчет коэффициентов a_1, a_2, k_1, k_2 по формулам (19) – (22).
4. Расчет коэффициента n_1 для зависимости (33) по формуле (32).
5. Расчет 3-х значений $V_{\text{опт}}$ по формуле (33) для 3-х значений C , установленных для данных условий обработки при подготовке исходных данных (см. п.1) и 3-х значений x_1, x_2 по формулам (17), (24). В формулы (17), (24) вместо V подставляют $V_{\text{опт}}$, найденные ранее по формуле (33).
6. Расчет 3-х значений T по зависимости (10) для 3-х 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_{max} для 3-х рассмотренных сочетаний C и $V_{\text{опт}}$.
8. Определение $S_{\text{опт}} = C/V_{\text{опт}}$, где C и $V_{\text{опт}}$ – значения, принятые выше в п.7.

Если условия зубообработки близки к тем, которые имели место при выполненном нами экспериментальном определении зависимости $T = f(V, S)$, то в п.п. 2, 3, 4 могут быть использованы полученные нами зависимости (11) – (13), (34) – (37).

Совместно с А.Т. Ковальковым разработана программа расчета оптимальных режимов зубофрезерования цилиндрических шестерен червячными фрезами на языке программирования Турбо-Паскаль 7.0 по описанной выше 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. –М.: Машиностроение, 1966. –372 с.
2. Сабиров М.А. Исследование вопросов оптимального резания при зубофрезеровании цилиндрических зубчатых колес червячными фрезами: Дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04/УАИ – Уфа, 1974.
3. Клушин М.И. Резание металлов: Учеб. пособие. – Горький: Изд-во М-ва высш. и сред. спец. образ. РСФСР, 1970. –4.3 – 101 с.
4. 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.
5. Режимы резания металлов. Справочник. Изд-е 4-е, перераб. и дополн. Под ред. А.Д. Корчемкина / Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич и др. –М.: НИИТАвтопром, 1995. – 456 с.
6. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения. –Мн.: Вышэйшая школа, 1987. –230 с.