

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Розглянута задача розробки математичного забезпечення підсистеми САПР ТП для дослідження механічної обробки конструкційних матеріалів при точінні на верстатах із ЧПК. Розроблені уточнююча математична модель та алгоритм визначення оптимальних параметрів режимів різання.

***Ключові слова:** математичне моделювання, алгоритм, оптимальні параметри, режим різання.*

Рассмотрена задача разработки математического обеспечения подсистемы САПР ТП для исследования механической обработки конструкционных материалов при точении на станках из ЧПК. Разработаны уточняющая математическая модель и алгоритм определения оптимальных параметров режимов резания.

***Ключевые слова:** математическое моделирование, алгоритм, оптимальные параметры, режим резания.*

The problem of research of turning of constructive materials at NPC machine-tools has been considered. The specified mathematical model and algorithm of definition of optimal parameters of cutting conditions are developed.

***Keywords:** mathematical model, algorithm, optimal parameters, cutting conditions.*

Постановка задачі. Определение оптимальных режимов резания относится к числу важнейших технико-экономических задач современного машиностроения, так как от правильности выбора режимов зависят производительность, себестоимость и точность обработки, расход инструмента, качество поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей. Значение этой задачи особенно возрастает в связи с широкой автоматизацией машиностроительного производства, применением станков с числовым программным управлением и автоматических станочных линий, новых конструкционных материалов, разработкой САПР технологических процессов (ТП) механической обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. В известных публикациях [1-4], посвященных данной проблеме, оптимизационные математические модели построены в основном на основе упрощенных функциональных зависимостей и не учитывают все необходимые ограничения, в результате чего полученные математические модели не всегда отвечают условиям точности и адекватности. Это вызывает необходимость уточнения полученных решений и оптимизационных математических моделей, описывающих процесс резания.

Целью данной работы является создание уточненной математической модели для исследования оптимальных параметров режимов резания при токарной обработке конструкционных материалов.

Изложение основного материала. Рассмотрим токарную операцию при продольном точении наружной поверхности диаметра D на станке с ЧПУ для одноинструментальной наладки. В качестве управляемых параметров принимаются продольная подача суппорта s и скорость резания v , выраженная через частоту вращения шпинделя n . Глубина резания t является неуправляемым параметром и принимается постоянной. Выбор глубины резания обусловлен припуском на обработку. В результате вычислений определяются подача суппорта, частота вращения шпинделя и основное технологическое время обработки.

Оптимизация процесса механической обработки формулируется следующим образом. Найти значения переменных $\bar{x} = (x_1, x_2)$, минимизирующих вектор целевой функции $F = f(\bar{x})$ в области существования допустимых решений Ω , заданной ограничениями $R_i(\bar{x}) \leq R_i^0$ ($i = \overline{1, m}$), $\bar{x} \in \Omega$, где $R_i(\bar{x})$ – функциональная зависимость от исходных параметров i -й характеристики процесса резания; R_i^0 – предельное значение i -й характеристики процесса резания.

В качестве критерия оптимальности принято основное технологическое время механической обработки T_0 . Экстремальное значение функции цели ищется в виде $F = \min(T_0)$ или $F = C/(n \cdot s)$, где C – постоянная величина, не зависящая от параметров режимов резания n и s . Из этого выражения следует, что значение функции F стремится к минимуму, когда произведение $n \cdot s$ принимает максимальные значения. После преобразований целевая функция приводится к виду

$$F = n \cdot s \rightarrow \max. \quad (1)$$

В качестве функции цели может быть использован также критерий минимальной себестоимости или обобщенный критерий, состоящий из скалярной суммы частных критериев.

Область существования допустимых решений ограничивается функциональными зависимостями $R_i(\bar{x})$, аппроксимирующими основные закономерности процесса резания и определяемыми кинематикой станка, характеристиками режущего инструмента, техническими требованиями к обработке. Технические ограничения строятся на основе известных зависимостей [5]. Выбор технических ограничений определяется конкретными условиями технологического, конструктивного и организационно-производственного характера. Рассмотрим некоторые из основных технологических ограничений.

Ограничение по стойкости инструмента находится из условия $v_p \leq v$ и устанавливает зависимость между скоростью резания, заданной стойкостью, геометрией резца, глубиной резания, продольной подачей суппорта и механическими свойствами обрабатываемого материала [5]. Допустимая скорость резания при точении определяется по формуле:

$$v = \frac{C_v K_v}{T^m t^{x_v} s^{y_v}}. \quad (2)$$

С другой стороны, действительная скорость резания определяется кинематикой станка согласно зависимости

$$v_p = \pi D n / 10^3. \quad (3)$$

После подстановки в исходное неравенство выражений (2), (3) и стандартных преобразований получим ограничение по стойкости инструмента:

$$ns^{y_v} \leq \frac{10^3 C_v K_v}{\pi D T^m t^{x_v}}, \quad (4)$$

где C_v – постоянный коэффициент, характеризующий нормативные условия обработки; K_v – поправочный коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала, состояние поверхности заготовки, характеристики режущего инструмента; T – заданная стойкость инструмента, мин; m – показатель относительной стойкости; s – подача, мм/об; x_v, y_v – показатели степеней переменных в формуле скорости резания.

Ограничение по мощности главного привода движения станка выражается условием $N \leq N_3 \eta$, где N_3 – мощность электродвигателя главного привода станка, кВт; N – эффективная мощность, затрачиваемая на процесс резания [5], кВт; η – КПД кинематической цепи от электродвигателя к инструменту. Данное ограничение в основном применяется при черновой обработке.

Эффективная мощность, затрачиваемая на процесс резания, определяется зависимостью

$$N = P_z v / (6120 \cdot 60), \quad (5)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания (Н), которая согласно [5] определяется как

$$P_z = 10 C_{P_z} t^{x_{P_z}} s^{y_{P_z}} v^{n_{P_z}} K_{P_z}.$$

Подставляя в выражение (5) значение составляющей силы резания P_z и подставив затем данное выражение в приведенное неравенство, после преобразований получим для второго технического ограничения

$$n^{n_{P_z}+1} s^{y_{P_z}} \leq \frac{6120(10^3)^{n_{P_z}+1} N \eta}{C_{P_z} t^{x_{P_z}} (\pi D^{n_{P_z}+1}) K_{P_z}}. \quad (6)$$

Здесь: C_{P_z} – коэффициент, характеризующий условия обработки; t – глубина резания, мм; s – продольная подача, мм/об; v – скорость резания, м/мин; K_{P_z} – поправочный коэффициент, учитывающий условия обработки; $x_{P_z}, y_{P_z}, n_{P_z}$ – показатели степени переменных.

Предельные продольная подача резца и частота вращения шпинделя, определяемые кинематическими характеристиками станка и рекомендуемые для выполняемого вида обработки, ограничивают область допустимых решений неравенствами:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}; \quad s_{\min} \leq s \leq s_{\max}. \quad (7)$$

Ограничение по точности обработки, определяемое жесткостью технологической системы, характеризуется отклонением $y_{\max} \leq \Delta$. В основу его положено условие, при котором величина прогиба y_{\max} заготовки под действием радиальной составляющей силы резания P_y ограничивается предельно допустимой величиной отжима резца $\Delta = \varphi(\delta)$, зависящей от допуска δ на диаметр детали. Наибольшая величина прогиба заготовки, рассматриваемой как упругая балка, в зависимости от метода закрепления определяется по формуле:

$$y_{\max} = \frac{P_y \cdot L_0^3}{\alpha \cdot E_0 \cdot I},$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания, Н [5]; L_0 – расстояние между опорами или вылет заготовки, м; E_0 – модуль упругости обрабатываемого материала, МПа; I – момент инерции поперечного сечения заготовки в месте искомого прогиба, м⁴; α – коэффициент, учитывающий жесткость закрепления заготовки.

При обработке конструкционных материалов высота микронеровностей $R = \varphi(n, s, t, \gamma, r, D)$ тесно связана с интенсивностью износа инструмента. Факторами, влияющими на интенсивность износа, являются: скорость и глубина резания, продольная подача, передний угол инструмента γ , марка инструментального материала, радиус при вершине резца в плане r , диаметр обрабатываемой детали D , жесткость технологической системы.

Ограничение по шероховатости поверхности для чистовой обработки определяется из условия $R_a \geq R$, а по продольной составляющей силы резания, допускаемой прочностью механизма подачи станка, выражается отношением $P_n \geq P_x$, где R_a, R – заданная и получаемая шероховатость обрабатываемой поверхности, мкм; P_n, P_x – допускаемая механизмом подачи и действующая продольная сила резания. На область допустимых решений влияют также ограничения по прочности и жесткости державки резца, зависящие от тангенциальной составляющей силы резания P_z , геометрических характеристик и материала державки. Случайные факторы учитываются косвенно соответствующими коэффициентами.

Приведенные технические ограничения и целевая функция (1) составляют математическую модель процесса резания для токарной операции, которая описывает основные связи оптимизируемых параметров с техническими характеристиками технологической системы. Основной особенностью зависимостей (1), (4), (6), (7) является нелинейность. Введя параметры $x_1 = \ln n$, $x_2 = \ln(100s)$, и выполнив переход к логарифмическим координатам, преобразуем полученную математическую модель к линейному виду:

$$\begin{aligned}
 & x_1 + y_v x_2 \leq b_1; \\
 & (n_{pz} + 1)x_1 + y_{pz} x_2 \leq b_2; \\
 & x_1 \geq b_3; \\
 & x_1 \leq b_4; \\
 & x_2 \geq b_5; \\
 & x_2 \leq b_6; \\
 & n_{py} x_1 + y_{py} x_2 \leq b_7; \\
 & -k_1 x_1 + k_2 x_2 \leq b_8; \\
 & n_{px} x_1 + y_{px} x_2 \leq b_9; \\
 & n_{pz} x_1 + y_{pz} x_2 \leq b_{10}; \\
 & n_{pz} x_1 + y_{pz} x_2 \leq b_{11}; \\
 & x_1 \geq 0; \quad x_2 \geq 0; \\
 & F = x_1 + x_2 \rightarrow \max.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Здесь: $y_v, y_{pz}, y_{pz}, y_{pz}, n_{pz}, n_{pz}, n_{pz}$ – показатели степени переменных в технических ограничениях; k_1, k_2 – показатели степени переменных в ограничении шероховатости. Параметры b_i ($i = \overline{1, 11}$) представляют собой натуральный логарифм правой части ограничений, включая зависимости (4), (6), (7).

Полученная модель (8) описывает основные связи оптимизируемых параметров с технологическими характеристиками токарной операции. После несложных преобразований система неравенств (8) приводится к каноническому виду:

$$A \cdot x = B; C \cdot x = 0; \quad (9)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = \overline{1,13}),$$

где A, C – матрицы коэффициентов системы технических ограничений и целевой функции; B – матрица значений правой части неравенств (8); x – матрица переменных.

Задача (9) решается симплексным методом [6], однако могут быть использованы и другие численные методы. Решение сводится к отысканию среди допустимых неотрицательных значений вектора \bar{x} на границе области Ω таких x_1^* и x_2^* , при которых целевая функция принимает экстремальные значения. Переход от нормированных значений найденных параметров к натуральным величинам выполняется по формулам:

$$n^* = \exp(x_1^*); s^* = \exp(x_2^*)/100.$$

В ряде случаев предварительный анализ функциональных зависимостей позволяет упростить алгоритм выбора оптимальных режимов обработки.

Результаты исследований. На основе приведенной математической модели разработано программное обеспечение подсистемы САПР расчета оптимальных параметров режимов резания для токарной операции. Исходными данными для данной задачи служат характеристики детали, режущего инструмента, оборудования и обрабатываемого материала, содержащиеся в технологических базах данных. Наличие баз данных, составляющих информационное обеспечение данной автоматизированной подсистемы, позволяет САПР ТП легко адаптироваться к различным производственным условиям.

С использованием разработанного на основе приведенной математической модели алгоритма расчета выполнено исследование зависимости основных параметров режимов резания n, s и основного времени обработки T_0 вала длиной 500 мм. Материал детали – конструкционная сталь 40ХН2МА. Длина обрабатываемой поверхности составляет 300 мм. Обработка производится на станке 16К20Ф3 проходными резцами из твердого сплава Т15К6 и Т5К10 с охлаждением СОЖ. Радиус при вершине резца составляет $r = 1$ мм.

В табл.1 приведены результаты расчета оптимальных параметров режимов резания при чистовой обработке вала в зависимости от диаметра D обрабатываемой наружной поверхности. Глубина резания $t = 0,5$ мм. Зависимость параметров оптимальных режимов резания при черновой обработке от глубины срезаемого слоя t для вала с $D = 100$ мм представлены в табл. 2.

Таблица 1

Зависимость параметров режимов резания от диаметра обрабатываемого вала

Диаметр вала, D , мм	60	120	180
Параметры рез.			
T_0 , мин	2,58	3,87	4,96
n , об/мин	800	400	250
s , мм/об	0,15	0,20	0,25

Зависимость параметров режимов резания от глубины резания

Глубина рез. t , мм	1,0	2,0	3,0
Параметры рез.			
T_0 , мин	0,62	0,97	1,11
n , об/мин	500	400	400
s , мм/об	1,00	0,80	0,7

Из приведенных данных видно, что полученные численные результаты лежат в области рекомендуемых параметров [5; 7]. При этом сокращается время механической обработки T_0 . Каждому значению подачи соответствует оптимальная скорость резания, при работе на которой достигается минимальное время обработки.

Выводы. Разработанная уточненная оптимизационная математическая модель, описывающая процесс резания конструкционных материалов при точении, и созданный на ее основе алгоритм расчета позволяют существенно повысить качество проектных решений и производительность проектирования, снизить трудоемкость технологических операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каиров О.С. САПР технологичних процесів. – Миколаїв: НУК, 2007. – 150 с.
2. Капустин Н.М. Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1980. – 256 с.
3. Сикора Е.А. Оптимизация процессов обработки резанием с применением вычислительных машин. – М.: Машиностроение, 1983. – 226 с.
4. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / Под ред. С.Н. Корчака. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 496 с.
6. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: В 2-х кн. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – Кн. 1. – 349 с.
7. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Часть 1. Токарные, сверлильные и фрезерные станки. – М.: Машиностроение, 1978. – 538 с.

Рецензенти: д.т.н., професор Фісун М.Т.,
к.т.н., професор Соловйов С.М.

© Каиров А.С., Латанская Л.А., 2009

Стаття надійшла до редколегії 11.05.09