

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ T - Q ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

© 2017 В.И. Свирищев¹, С.В. Тарасов¹, А. Н. Савлов², И. М. Кузьминок¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

²АО «Новомет-Пермь»

Статья поступила в редакцию 30.06.2017

Рассмотрена методика установления оптимального сочетания управляемых параметров резания различных методов обработки на основе T - Q характеристик процессов резания. T - Q характеристики позволяют наблюдать работоспособность режущего инструмента во всем диапазоне изменения сочетания параметров режима обработки и могут служить показателем обрабатываемости различных материалов резания. Критериями обрабатываемости могут служить постоянные T - Q характеристики: S_r и показатель n , значения которых являются базой для экономической оценки эффективности процесса обработки. Эффективность осуществления обработки заключается в минимальной себестоимости обработки поверхности при требуемых показателях её качества. Расчет сочетания управляемых параметров режима обработки для различных методов обработки выполняется по выражениям для констант стойкости T инструмента, в диапазонах ее изменения в зависимости от стадии обработки, для практического использования рекомендуется сочетания обеспечивающие оптимальную скорость съема материала Q_0 . Дан пример применения методики для процесса точения наружной цилиндрической поверхности современной режущей пластиной сборного резца.

Ключевые слова: параметры режима обработки, T - Q характеристики процесса резания, минимальная себестоимость, оптимальная скорость съема материала, константы стойкости инструмента.

Проектирование операций механической обработки элементарных поверхностей деталей машин на современном технологическом оборудовании с ЧПУ требует обоснованного назначения сочетания управляемых параметров режима обработки, обеспечивающих требуемые характеристики качества обрабатываемых поверхностей по показателям точности и шероховатости [1]. Согласно рекомендаций официальных изданий отечественной справочной литературы [2] и руководств по металлообработке фирм производителей инструмента (Sandvik, Seco, Iscar, Taegu – Tec, Kennametal и др.) параметры режима резания при обработке элементарных поверхностей рассчитаны на применение режущих инструментов с оптимальными значениями геометрических параметров режущей части, и зависят от характера обработки, группы обрабатываемости материала, стадии обработки (черновая, чистовая, отделочная), материала режущей части инструмента и ее стойкости, состояния исходной заготовки и оборудования.

Свирищев Валентин Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения». E-mail: tms2@pstu.ru

Тарасов Степан Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения». E-mail: tms2@pstu.ru

Савлов Алексей Николаевич, инженер-технолог.

E-mail: savlov@novomet.ru

Кузьминок Иван Михайлович, студент.

E-mail: kuzmenokivan1992@gmail.com

Разнообразие предлагаемых рекомендаций по выбору параметров режима резания при обработке одних и тех же элементарных поверхностей деталей инструментом различных фирм производителей, в условиях современной рыночной экономики, не учитывает эффективности обработки поверхностей для конкретных производственно-технологических условий изготовления деталей при обеспечении требуемых показателей качества.

Эффективность обработки зависит от стойкости режущего инструмента, сочетания параметров режима резания, времени затрачиваемого на смену инструмента и его расхода. С увеличением параметров режима резания машинное время на обработку поверхности уменьшается, но в тоже время уменьшается период стойкости режущих кромок инструмента и растут затраты, связанные с расходом инструмента. В какой то момент эти затраты достигают таких значений, которые приводят к увеличению себестоимости и уменьшению производительности обработки. Особенно часто такие ситуации возникают при обработке труднообрабатываемых материалов, и в наибольшей степени определяет производительность обработки поверхности и показатели ее качества.

Известны решения по предварительному расчету сочетания управляемых параметров режима обработки по принятым критериям оптимальности из групп экономических или технико-экономических критериев [3]. Эти ре-

шения позволяют существенно повысить качество обработанных поверхностей, однако не обеспечивают достаточную эффективность обработки поверхности. Обусловлено это тем, что при решении задач оптимизации параметров режима обработки в состав математической модели не входят технические ограничения, учитывающие зависимость стойкости инструмента от управляемых параметров режима обработки, определяющих скорость съема материала при обработке. Отмеченное не позволяет использовать потенциальные возможности повышения эффективности процессов обработки при минимальной себестоимости и обеспечении требуемых показателей качества обрабатываемых поверхностей.

Обрабатываемость материалов - это комплексное физико-технологическое свойство материалов: оно зависит с одной стороны от химического состава, структуры и физико-механических свойств материала, а с другой, от вида режущего инструмента и условий обработки. При выборе критерия обрабатываемости следует исходить из следующего: во первых, выбранный критерий должен иметь физическую основу для оценки обрабатываемости и, во вторых, должен быть обобщенным, т.е. быть связанным в той или иной мере с другими показателями процесса и прежде всего с производительностью и себестоимостью процесса обработки.

Увеличение параметров режима обработки приводит к росту нагрузки на режущие кромки инструмента и, следовательно, уменьшает их стойкость. Такова общая тенденция влияния параметров режима обработки на стойкость инструмента. Если за основу влияния на стойкость режимного фактора принять скорость съема материала Q в единицах объема или веса, независимо от того, каким сочетанием параметров режима обработки достигается данное значение Q , то получение зависимости стойкости режущего инструмента от режимов обработки и ее практическое использование значительно упрощается. В основу такого подхода заложен тот факт, что работоспособность режущего инструмента и его стойкость зависят от нагрузки на режущие кромки, от того, какое количество материала и с какой скоростью переходит в стружку.

Результат большого числа исследований показывают связь таких показателей процессов обработки, как сила резания, износ и стойкость инструмента со скоростью съема материала [4, 5]. Зависимость стойкости T режущего инструмента от скорости съема материала выражается степенной зависимостью, которую называют T - Q характеристикой процесса резания

$$T = C_T / Q^n, \quad (1)$$

где Q - скорость съема материала за период стойкости T режущего инструмента, мм³/мин;

C_T - коэффициент зависящий от условий обработки; n - показатель степени, выражающий интенсивность уменьшения стойкости инструмента от сочетания параметров режима обработки. Величины C_T и n зависят от свойств обрабатываемого материала, характеристик режущего инструмента и условий, в которых выполняется процесс обработки.

Если известна зависимость T - Q характеристики процесса резания и задана стойкость T режущего инструмента, то по формуле (1) можно определить значение скорости съема материала Q и назначить соответствующее сочетание управляемых параметров режима обработки. T - Q характеристики позволяют определять работоспособность режущего инструмента во всем диапазоне рекомендуемых сочетаний параметров режима обработки и могут служить показателями обрабатываемости различных материалов резанием. Критериями обрабатываемости могут служить численные значения постоянных T - Q характеристики (C_T и n), которые являются основой для экономической оценки эффективности процессов обработки.

Себестоимость обработки элементарной поверхности C_{on} представим в виде суммы двух затрат

$$C_{on} = C_{з.с.} + C_{у.р.}, \quad (2)$$

где $C_{з.с.}$ - затраты с цеховыми накладными расходами, приходящимися на операцию; $C_{у.р.}$ - затраты на режущий инструмент, приходящиеся на операцию.

Затраты, связанные с амортизацией оборудования и оснастки, расходом электроэнергии, эксплуатацией помещений не учитываем так как их величина не изменяется в данной постановке задачи.

Затраты на зарплату, приходящиеся на операцию, рассчитывают по формуле

$$C_{з.с.} = C_{з.м.с.} \cdot (t_{мах.} + t_{см} / N), \quad (3)$$

где $C_{з.м.с.}$ - тарифная ставка рабочего с учетом накладных расходов; $t_{мах.}$ - машинное время обработки поверхности, равное M/Q , M - объем снимаемого материала при обработке поверхности; $t_{см.}$ - время затрачиваемое на смену режущего инструмента; N - количество деталей обрабатываемых за период стойкости T режущего инструмента,

$$N = T / t_{мах.}.$$

Затраты на режущий инструмент, зависящие от его расхода, определяются по формуле

$$C_{у.р.} = S \cdot t_{мах.} / T, \quad (4)$$

где S - покупная стоимость режущего инструмента.

Подставляя (3) и (4) в (2) и преобразовав получим

$$C_{o.n.} = C_{з.м.с.} \cdot M \cdot Q^{-1} + C_{з.м.с.} \cdot M \cdot \frac{t_{см.}}{C_T} \cdot Q^{n-1} + S \cdot \frac{M \cdot Q^{n-1}}{C_T}. \quad (5)$$

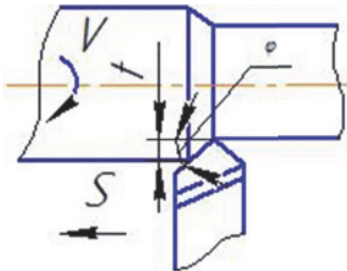
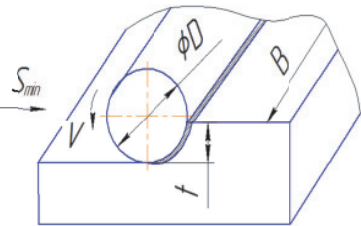
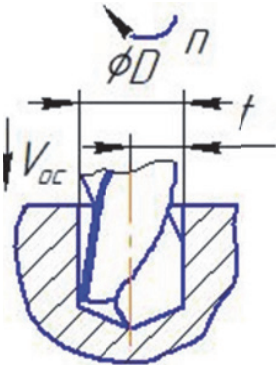
Выражение (5) определяет зависимость себестоимости обработки на операции от скорости съема материала. Первое слагаемое определяет зарплату станочника за машинное время работы. Второе слагаемое – это зарплату станочника за время, затрачиваемое на смену режущего инструмента, приходящееся на обработку поверхности. Третье слагаемое – это затраты, связанные с расходом режущего инструмента при обработке поверхности. Два последних слагаемых выражают непроизводительные затраты, приходящиеся на обработку поверхности.

Оптимальное значение скорости съема материала Q_0 , соответствующее минимуму себестоимости можно найти, продифференцировав выражение (5) по Q и приравняв производную к нулю

$$Q_0 = \left(\frac{C_{з.м.с.}}{(n-1) \cdot (C_{з.м.с.} \cdot t_{см} / C_T + S / C_T)} \right)^{1/n}. \quad (6)$$

Для практического использования формулы (6) необходимо знание постоянных C_T и n в функциональной зависимости (1). С увеличением коэффициента C_T второе и третье слагаемое в формуле (5) пропорционально уменьшаются. Показатель степени n характеризует наклон T - Q характеристики, представленной в виде прямой при логарифмическом масштабе по осям систе-

Таблица 1. Аналитические зависимости для расчета скорости съема материала Q

Метод обработки	Схема и управляемые параметры режима обработки	Аналитическая зависимость для расчета скорости съема материала Q
Точение		$Q = V \cdot S \cdot t,$ <p>где V - скорость резания, мм/мин, S - подача, мм/об, t - глубина резания, мм.</p> $Q = V \cdot S \cdot t \cdot 10^3 \text{ мм}^3 / \text{мин.}$
Фрезерование		$Q = B \cdot t \cdot S_{\min}$ <p>где B - ширина фрезерования, мм, t - глубина резания, мм, $S_{\min} = S_z \cdot z \cdot n_{\phi}$, мм / мин, S_z - подача на зуб фрезы, z - число зубьев фрезы,</p> $n_{\phi} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D},$ <p>V - скорость резания, м/мин, D - диаметр фрезы, мм.</p> $Q = \frac{B \cdot t \cdot V \cdot S_z \cdot z \cdot 10^3}{\pi \cdot D}, \text{ мм}^3 / \text{мин.}$
Сверление		$Q = F \cdot V_{oc},$ <p>где F - площадь отверстия, мм²,</p> $F = \frac{\pi \cdot D^2}{4},$ <p>D - диаметр отверстия, мм, $V_{oc} = S \cdot n_{св}$, S - осевая подача, мм/об,</p> $n_{св} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D},$ <p>V - скорость сверления, м/мин.</p> $Q = \frac{V \cdot D \cdot S \cdot 10^3}{4}, \text{ мм}^3 / \text{мин.}$

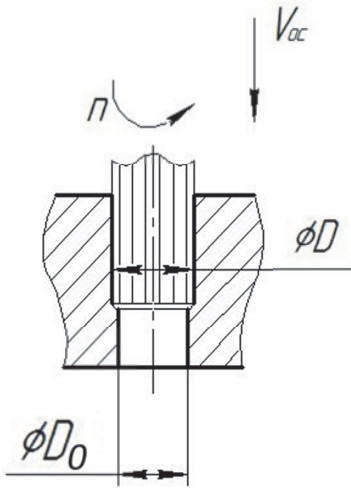
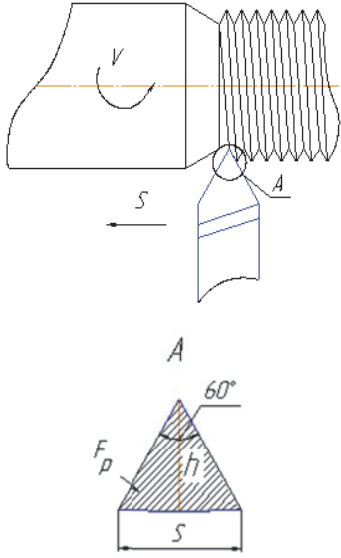
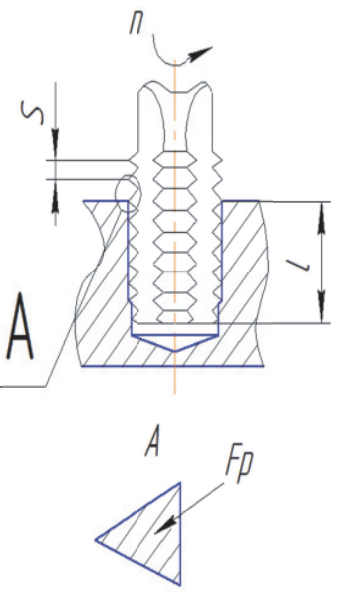
Продолжение табл. 1		
<p>Зенкерование и развертывание</p>		$Q = F_p \cdot V_{oc},$ <p>где F_p – площадь среза, мм²</p> $F_p = \frac{\pi \cdot (D - D_0)^2}{4},$ <p>D – диаметр отверстия, мм, D_0 – диаметр предварительно обработанного отверстия, мм,</p> $V_{oc} = S \cdot n,$ $n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D},$ <p>V – скорость резания, м/мин,</p> $V_{oc} = \frac{S \cdot V \cdot 10^3}{\pi \cdot D}.$ $Q = \frac{V \cdot (D - D_0)^2 \cdot S \cdot 10^3}{4 \cdot D}, \text{ мм}^3 / \text{мин.}$
<p>Нарезание метрической резьбы резцом</p>		$Q = \frac{F_p \cdot V}{i},$ <p>где F_p – площадь сечения резьбового профиля, мм²,</p> $F_p = \frac{1}{2} \cdot S^2 \cdot \cos 30^\circ,$ <p>S – шаг резьбы, V – скорость нарезания резьбы, м/мин, i – число проходов.</p> $Q = \frac{V \cdot S^2 \cdot 10^3}{2 \cdot i} \cdot \cos 30^\circ, \text{ мм}^3 / \text{мин.}$
<p>Нарезание метрической резьбы метчиком</p>		$Q = W / \tau,$ <p>где</p> <p>W – объем снимаемого материала, мм³,</p> $W = F_l \cdot \frac{l}{S} \cdot \pi \cdot (D - \frac{4}{3} \cdot S \cdot \cos 30^\circ),$ $F_l = \frac{1}{2} \cdot S^2 \cdot \cos 30^\circ, \text{ мм}^2,$ <p>S – шаг резьбы, мм, l – длина резьбы, мм, D – диаметр резьбы, τ – время нарезания резьбы, мин,</p> $\tau = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{V \cdot 10^3 \cdot S},$ <p>V – скорость нарезания резьбы, м/мин.</p> $Q = \frac{(D - \frac{4}{3} \cdot S \cdot \cos 30^\circ) \cdot S^2 \cdot V \cdot 10^3 \cdot \cos 30^\circ}{2 \cdot D}, \text{ мм}^3 / \text{мин.}$

Таблица 2. Зависимость управляемых параметров режима обработки от констант стойкости инструмента

Метод обработки	Управляемые параметры режима обработки	Функциональные зависимости
Фрезерование	$S_{об}, t$	$S_{об} \cdot t^{1-x} = \frac{C_T^{1/n} \cdot T^{(m-1/n)} \cdot S_z^y \cdot z^p \cdot \pi}{C_v \cdot 10^3 \cdot D^{g-1} \cdot B^{1-u}}$
Сверление	S	$S^{1-y} = \frac{4 \cdot C_T^{1/n} \cdot T^{(m-1/n)}}{C_v \cdot 10^3 D^{g+1}}$
Зенкерование и развёртывание	S, t	$S^{1-y} \cdot t^{-x} = \frac{4 \cdot C_T^{1/n} \cdot T^{(m-1/n)}}{C_v \cdot 10^3 \cdot D^{g-1} \cdot (D - D_0)^2}$
Нарезание метрической резьбы резцом	S, i	$S^{2-y} \cdot i^{1-x} = \frac{2 \cdot C_T^{1/n} \cdot T^{(m-1/n)}}{C_v \cdot 10^3}$
Нарезание метрической резьбы метчиком	S	$(D - \frac{4}{3} \cdot S \cdot \cos 30) \cdot S^{2-y} = \frac{2 \cdot C_T^{1/n} \cdot T^{(m-1/n)}}{C_v \cdot 10^3 \cdot D^{g-1} \cdot \cos 30}$

Обозначения, приведенные в табл. 2: $S_{об} = S_z \cdot z$.

мы координат, и значительно влияет на абсциссу кривой минимума себестоимости: более пологой прямой T - Q характеристики соответствует большее значение Q . Методика определения постоянных C_T и n T - Q характеристики описана в работе [6]. Задав при выполнении операции сочетание управляемых параметров режима обработки, обеспечивающих оптимальную скорость съема материала Q_0 , гарантированно будет обеспечено повышение эффективности обработки элементарных поверхностей при требуемых показателях их качества.

Приведем получение аналитических зависимостей для расчета скорости съема материала при различных методах формообразования элементарных поверхностей (табл. 1).

Установим функциональные зависимости управляемых параметров режима различных методов обработки с численными значениями констант, зависящих от принятой стойкости T режущего инструмента, с использованием полученных аналитических зависимостей для расчета скорости съема материала Q .

При точении управляющими параметрами режима обработки являются:

t – глубина резания, S – подача инструмента. Скорость резания V , согласно [2], определяют из выражения

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y},$$

в котором значениям коэффициента C_v и показателей степени (m, x, y) выбираются из таблиц справочника. Подставив в выражение Q ,

приведенное в таблице 1 для точения, и приравняв его к Q , найденное из выражения (1), получим

$$\frac{C_v \cdot S \cdot t \cdot 10^3}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} = \left(\frac{C_T}{T}\right)^{1/n}. \quad (7)$$

Преобразовав (7), получим функциональную зависимость управляемых параметров режима точения с численным значением константы, соответствующую принятой стойкости инструмента T , в виде

$$t^{1-x} \cdot S^{1-y} = \frac{C_T^{1/n} \cdot T^{(m-1/n)}}{C_v \cdot 10^3}. \quad (8)$$

Правая часть зависимости (8), является константой, из которой методом перебора при фиксированном значении одного из управляемых параметров режима точения рассчитываются численные значения второго параметра.

Выполнив по приведенному алгоритму преобразования для других методов обработки, приведем полученные функциональные зависимости управляемых параметров режима обработки от констант (табл. 2).

Выполним проектный расчет оптимального сочетания параметров режима чистового точения наружной цилиндрической поверхности заготовки из стали 40X (HRC22-34) режущей пластиной DNMG 150604 CN15M фирмы Sandvik, с требованием к шероховатости поверхности $Ra=1.6$ мкм. Базовые параметры режима точения для указанных условий, рекомендуемые фирмой производителем пластин, составляют: $t=1.5$ мм, $S=0.2$ мм/об.

Рассчитаем оптимальную скорость съема материала Q_0 по формуле (6) с использованием следующих исходных данных [6]: $C_{3,м.с.}=3$ руб/мин, $t_{см}=0.5$ мин, $S_{пл}=458.69$ руб, $C_T=6.8 \cdot 10^{26}$, $n=5$. Подставляя исходные данные в (6) получим $Q_0=112 \cdot 10^3$ мм³/мин.

Сохраняя неизменными базовые значения t и S , которые рекомендуются для обеспечения требуемой шероховатости при чистовом точении, определим скорость резания, обеспечивающую минимальную себестоимость точения по формуле

$$V = Q_0 / (t \cdot S) = \\ = 112 \cdot 10^3 / (1.5 \cdot 0.2) = 373 \text{ м / мин}$$

Таким образом, для описанного процесса точения оптимальное сочетание параметров режима будет: $t=1.5$ мм, $S=0.2$ мм/об, $V=373$ м/мин.

Выполнив расчет сочетания управляемых параметров режима обработки для других методов обработки по выражениям, приведенным в табл. 2, для принятой стойкости T инструмента, в диапазонах их изменения в зависимости от

стадии обработки, для практического использования рекомендуется сочетания обеспечивающие оптимальную скорость съема материала Q_0 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
2. Справочник технолога машиностроителя [под ред. А.М. Дальского]. Т. 2. М.: Машиностроение, 2003. 943 с.
3. Рыжов Э.И., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. Киев: Наука думка, 1989. 192 с.
4. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М. Машиностроение, 1989. 297 с.
5. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. Л.: Машиностроение. 1973. 134 с.
6. Определение постоянных T - Q характеристик процесса резания современным режущим инструментом при обработке элементарных поверхностей детали / В.И. Свирицев, А.Н. Савлов, В.К. Флегентов, И.В. Подборнов // СТИН. 2014. № 9. С. 17-20.

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF METHODS FOR MACHINING MATERIALS BASED ON T-Q CHARACTERISTICS OF THE CUTTING PROCESS

© 2017 V.I. Svirshchev¹, S.V. Tarasov¹, A.N. Savlov², I.M. Kuzminok¹

¹ Perm National Research Polytechnic University

² Joint-Stock Company «Novomet-Perm»

The technique of establishing the optimal combination of operated cutting parameters for various processing methods based on T - Q characteristics of cutting processes is considered. T - Q characteristics make it possible to observe the operability of the cutting tool in the entire range of variation of the combination of parameters of the processing regime and can serve as an index of the machinability of various cutting materials. Criteria of processability can serve as constant T - Q characteristics: C_T and exponent n , the values of which are the basis for the economic evaluation of the efficiency of the processing process. The efficiency of processing is the minimum cost of surface treatment with the required quality indicators. Calculation of a combination of controlled parameters of the processing mode for various processing methods is performed by expressions for the stability constants T of the tool, in the ranges of its variation depending on the stage of processing, for practical use, it is recommended that the combinations providing the optimal material removal rate Q_0 are recommended. An example of the application of the method for the process of turning the outer cylindrical surface of a modern cutting insert of a collection tool is given.

Keywords: Processing parameters, T - Q characteristics of the cutting process, minimum cost, optimal material removal rate, tool life constants.

Valentin Svirshchev, Doctor of Technics, Professor at the Innovative Technologies of Mechanical Engineering Department. E-mail tms2@pstu.ru

Stepan Tarasov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Innovative Technologies of Mechanical Engineering Department. E-mail tms2@pstu.ru

Aleksey Savlov, Engineer-Technologist.

E-mail: savlov@novomet.ru

Ivan Kuzminok, Student. E-mail: kuzmenokivan1992@gmail.com