

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РЕЗАНИЯ

**Постановка проблемы.** В настоящее время высокоскоростное резание рассматривается одним из основных направлений интенсификации процесса резания и обеспечения высококачественной обработки деталей машин. Для его осуществления ведущими станкоинструментальными фирмами разработаны высокооборотные металлорежущие станки с ЧПУ типа “обрабатывающий центр” и прогрессивные конструкции сборных режущих инструментов из твердых сплавов с износостойкими покрытиями, которые все шире используются на предприятиях Украины. Вместе с тем, на практике технологические возможности высокоскоростного резания используются не в полной мере, поскольку рекомендуемые и применяемые в производственных условиях скорости резания не столь существенно отличаются от традиционных. Это связано, в первую очередь, с высокими затратами на режущие инструменты и, соответственно, высокой себестоимостью изготавливаемой машиностроительной продукции, что снижает ее конкурентоспособность. Поэтому изыскание новых технологических возможностей эффективного применения высокоскоростного резания является актуальной задачей машиностроения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Несмотря на большое количество работ, посвященных высокоскоростному резанию, в них фактически отсутствуют теоретические решения, устанавливающие аналитические связи между температурой и скоростью резания [1-3]. Это не позволяет в обобщенном виде обосновать и выявить условия существенного увеличения скорости резания при обеспечении заданной температуры резания. Отсутствуют также теоретические решения, на основе которых можно доказать перспективность применения высокоскоростного резания с точки зрения существенного уменьшения технологической себестоимости обработки и определить оптимальные условия обработки. Все это указывает на необходимость проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований по раскрытию физической сути и выявлению технологических возможностей высокоскоростного резания, определению областей его эффективного применения на отечественных машиностроительных предприятиях. В связи с этим, настоящая работа является дальнейшим развитием цикла работ [4-6], посвященных изучению закономерностей и особенностей высокоскоростного резания и разработке рекомендаций по его эффективному использованию.

**Цель работы** – определение технологических возможностей эффективного применения высокоскоростного резания на основе теоретических исследований условий уменьшения технологической себестоимости обработки с учетом температурного фактора.

**Изложение основного материала.** Для решения поставленной задачи воспользуемся аналитической зависимостью для определения температуры резания, возникающей на задней поверхности резца при продольном точении (рис. 1) [6]:

$$\theta = f \cdot HV \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot V}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (1)$$

где  $f$  – коэффициент трения резца с обрабатываемым материалом;  $HV$  – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу),  $\text{Н/мм}^2$ ;  $h$  – длина площадки износа на задней поверхности резца, м;  $V$  – скорость резания, м/с;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К).

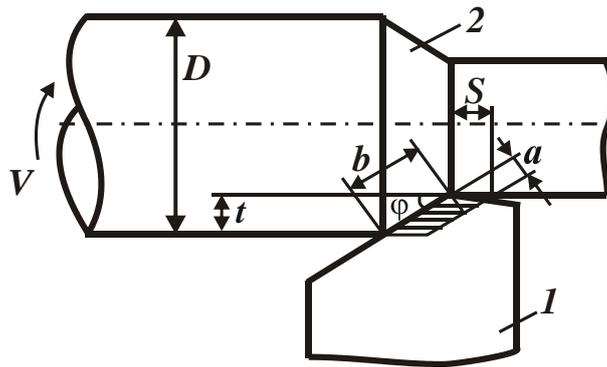


Рис. 1. Расчетная схема продольного точения: 1 – резец; 2 – обрабатываемая деталь.

Зависимость (1) позволяет в явном виде оценить влияние скорости резания  $V$  на температуру резания  $\theta$ , что важно при анализе технологических возможностей высокоскоростной обработки. Как видно, температура резания  $\theta$  тем больше, чем больше скорость резания  $V$  и длина площадки износа на задней поверхности резца  $h$ . Следовательно, для того, чтобы осуществить высокоскоростную обработку при условии обеспечения заданной температуры резания  $\theta$  необходимо уменьшить параметр  $h$ . Однако это, очевидно, ведет к снижению стойкости инструмента и увеличению расхода инструментов при обработке партии деталей. В итоге возникает неопределенность: что эффективнее - увеличивать скорость резания  $V$  или параметр  $h$ , поскольку увеличение  $V$  предполагает увеличение производительности обработки, а увеличение  $h$  – снижение расхода инструментов. В данном случае критерием оптимальности следует рассматривать технологическую себестоимость обработки  $C$  при продольном точении для двух основных изменяющихся статей затрат, учитывающих затраты по заработной плате рабочего за обработку партии деталей и затраты на инструмент [5]:

$$C = N \cdot \tau_0 \cdot S_1 \cdot k_D + N \cdot \frac{\tau_0}{T} \cdot Ц, \quad (2)$$

где  $N$  – количество изготавливаемых деталей;  $\tau_0$  – основное технологическое время обработки, с;  $S_1$  – тарифная ставка рабочего, грн/с;  $k_D$  – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего;  $T$  – стойкость режущего инструмента, с;  $Ц$  – цена инструмента, грн.

Стойкость режущего инструмента (резца)  $T$  можно определить на основе зависимости (1), рассматривая  $h = T \cdot V_{изн}$ , где  $V_{изн}$  – скорость износа резца на задней поверхности (скорость увеличения площадки износа резца на задней поверхности), м/с. Если представить  $V_{изн} = k_1 \cdot V^{n_1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}$  (где  $k_1, n_1, n_2, n_3$  – величины, зависящие от физико-механических свойств инструментального материала;  $t$  – глубина резания, м;  $S$  – подача, м/об), то зависимость (1) выразится:

$$\theta = f \cdot HV \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_1 \cdot T \cdot V^{n_1+1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (3)$$

Как следует из зависимости (3), увеличение скорости резания  $V$  при обеспечении заданной температуры резания  $\theta$  предполагает уменьшение стойкости режущего инструмента  $T$ , что согласуется с практикой обработки материала резанием.

Разрешая зависимость (3) относительно стойкости режущего инструмента  $T$ , получим

$$T = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}{2k_1 \cdot f^2 \cdot HV^2 \cdot V^{n_1+1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}} \quad (4)$$

Таким образом, установлена аналитическая зависимость для определения стойкости режущего инструмента  $T$ . Она включает механические и теплофизические характеристики обрабатываемого материала и позволяет в обобщенном виде определить степень влияния различных параметров на стойкость режущего инструмента  $T$ . Очевидно, наибольшее влияние на  $T$  оказывают параметры  $\theta$ ,  $f$  и  $HV$ , которые входят в зависимость (4) во второй степени. Из параметров режима резания наибольшее влияние на стойкость режущего инструмента  $T$  оказывает скорость резания  $V$ , с увеличением которой  $T$  интенсивно уменьшается. Это соответствует классической эмпирической зависимости для определения стойкости режущего инструмента  $T$  [1]:

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}, \quad (5)$$

где  $C_4, m_1, q, p$  – постоянные для определенных условий обработки ( $m_1 > p > q; m_1 > 1$ ).

Структурно зависимости (4) и (5) фактически идентичны, рассматривая

$$C_4 = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}{2 \cdot k_1 \cdot f^2 \cdot HV^2}. \quad (6)$$

В конечном итоге получена аналитическая зависимость (4) для определения стойкости режущего инструмента  $T$ , которая адекватно описывает закономерности износа резца на задней поверхности с позиции преобладающего влияния при резании температурного фактора. Исходя из этого, при анализе технологической себестоимости обработки  $C$  можно использовать как эмпирическую зависимость (5), так и аналитическую зависимость (4). Поэтому, подставляя зависимость (4) в (2), получено

$$C = N \cdot \tau_0 \cdot S_1 \cdot k_D + N \cdot \tau_0 \cdot \Pi \cdot \frac{2 \cdot k_1 \cdot f^2 \cdot HV^2 \cdot V^{n_1+1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}. \quad (7)$$

$$C \text{ учетом } m_1 = n_1 + 1; q = n_2; p = n_3; \tau_0 = i \cdot \frac{L}{S_{np}} = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot \Pi \cdot L}{V \cdot t \cdot S} \text{ зависи-}$$

мость (7) для продольного точения принимает вид

$$C = \mathcal{G}_{\text{сум}} \cdot \left( \frac{S_1 \cdot k_D}{V \cdot t \cdot S} + \frac{\Pi}{C_4} \cdot V^{m_1-1} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-1} \right), \quad (8)$$

где  $i = \Pi/t$  – количество продольных ходов инструмента;  $\Pi$  – величина снимаемого припуска, м;  $L$  – длина хода инструмента, м;  $S_{np} = V \cdot \frac{S}{\pi \cdot D_{dem}}$  – скорость продольной подачи, м/с;  $D_{dem}$  – диаметр детали, м;  $\mathcal{G}_{\text{сум}} = \pi \cdot D_{dem} \cdot \Pi \cdot L \cdot N$  – суммарный объем материала, снимаемого со всех  $N$  обрабатываемых деталей, м<sup>3</sup>.

Как видно, технологическая себестоимость обработки  $C$  неоднозначно зависит от скорости резания  $V$ . Следовательно, имеет место экстремум (минимум) зависимости  $C$  от  $V$ . Подчиняя зависимость (8) необходимому условию экстремума  $C'_V = 0$ , определим экстремальные значения технологической себестоимости обработки  $C$  и скорости резания  $V$ :

$$C_{min} = \mathcal{G}_{\text{сум}} \cdot m_1 \cdot \left( \frac{S_1 \cdot k_D}{m_1 - 1} \right)^{1-\frac{1}{m_1}} \cdot \left( \frac{\Pi}{C_4} \right)^{\frac{1}{m_1}} \cdot \frac{1}{t^{\frac{1-q}{m_1}} \cdot S^{\frac{1-p}{m_1}}}; \quad (9)$$

$$V_{экстр} = \left[ \frac{S_1 \cdot k_D \cdot C_4}{(m_1 - 1) \cdot \Pi \cdot t^q \cdot S^p} \right]^{\frac{1}{m_1}}. \quad (10)$$

С учетом  $m_1 = n_1 + 1$ ;  $q = n_2$ ;  $p = n_3$  и зависимости (6), имеем:

$$C_{min} = g_{сум} \cdot (n_1 + 1) \cdot \left( \frac{S_1 \cdot k_D}{n_1} \right)^{\frac{n_1}{n_1 + 1}} \cdot \left( \frac{2 \cdot k_1 \cdot f^2 \cdot HV^2 \cdot \Pi}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2} \right)^{\frac{1}{n_1 + 1}} \cdot \frac{1}{t^{\frac{1 - n_2}{n_1 + 1}} \cdot S^{\frac{1 - n_3}{n_1 + 1}}}; \quad (11)$$

$$V_{экстр} = \left[ \frac{S_1 \cdot k_D \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}{2 \cdot k_1 \cdot n_1 \cdot f^2 \cdot HV^2 \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3} \cdot \Pi} \right]^{\frac{1}{n_1 + 1}}. \quad (12)$$

Из зависимости (11) следует, что минимум технологической себестоимости обработки  $C_{min}$  обусловлен как экономическими параметрами  $S_1$ ,  $k_D$ ,  $\Pi$ , так и характеристиками обрабатываемого материала. Например, чем больше твердость обрабатываемого материала  $HV$  и меньше его теплофизические характеристики  $c$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$ , тем больше  $C_{min}$ . Уменьшение коэффициента трения режущего инструмента с обрабатываемым материалом  $f$  ведет к уменьшению  $C_{min}$ , а уменьшение температуры резания  $\theta$ , наоборот, к увеличению  $C_{min}$ .

Увеличение глубины резания  $t$  и подачи  $S$  однозначно ведет к уменьшению  $C_{min}$ , что предполагает реализацию при резании максимально возможных значений  $t$ ,  $S$ .

Увеличение механических характеристик  $f$ ,  $HV$  и уменьшение теплофизических характеристик обрабатываемого материала  $c$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$ , как следует из зависимости (12), ведет к уменьшению экстремальной (оптимальной) скорости резания  $V_{экстр}$ , при которой технологическая себестоимость обработки принимает минимальное значение  $C_{min}$ . Увеличение глубины резания  $t$  и подачи  $S$  ограничивает увеличение  $V_{экстр}$ .

Таким образом, показано, что увеличение экстремальной (оптимальной) скорости резания  $V_{экстр}$  и осуществление высокоскоростной обработки возможно главным образом за счет увеличения предельной температуры резания  $\theta$  и уменьшения коэффициента трения режущего инструмента с обрабатываемым материалом  $f$ , которые входят в зависимость (12) с наибольшей степенью. Увеличение этих параметров предполагает применение инструментальных материалов, характеризующихся низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью при повышенных температурах резания, например, синтетических сверхтвердых материалов (эльбора и т.д.), твердых сплавов с износостойкими покрытиями.

С учетом зависимости (12) можно определить экстремальную (оптимальную) производительность обработки  $Q_{экстр} = V_{экстр} \cdot t \cdot S$  и экстремальную (оптимальную) стойкость режущего инструмента  $T$  в точке минимума технологической себестоимости обработки:

$$Q_{экстр} = \left( \frac{S_1 \cdot k_D \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}{2 \cdot k_1 \cdot n_1 \cdot f^2 \cdot HV^2 \cdot \Pi} \right)^{\frac{1}{n_1 + 1}} \cdot t^{\frac{1 - n_2}{n_1 + 1}} \cdot S^{\frac{1 - n_3}{n_1 + 1}}. \quad (13)$$

$$T_{экстр} = \frac{n_1 \cdot \Pi}{S_1 \cdot k_D}. \quad (14)$$

Как видно, производительность обработки  $Q_{экстр}$  изменяется по закону изменения скорости резания  $V_{экстр}$  с тем отличием, что глубина резания  $t$  и подача  $S$  входят в числитель зависимости (13), и их увеличение приводит к увеличению  $Q_{экстр}$ .

Экстремальная (оптимальная) стойкость режущего инструмента  $T_{экстр}$  определяется экономическими параметрами  $S_1, k_D, Ц$ . Поскольку между  $V_{экстр}$  и  $T_{экстр}$  согласно зависимости (4) существует обратная связь, то за счет уменьшения цены режущего инструмента  $Ц$  можно уменьшать  $T_{экстр}$  и существенно увеличивать  $V_{экстр}$ . Это указывает на возможность реализации высокоскоростного резания.

Исходя из зависимости (11), можно видеть, что уменьшение цены режущего инструмента  $Ц$  также способствует уменьшению технологической себестоимости обработки  $C_{min}$ . Следовательно, цена режущего инструмента  $Ц$  является, пожалуй, основным параметром, определяющим возможности осуществления высокоскоростного резания, т.к. увеличение скорости резания  $V_{экстр}$  предполагает уменьшение  $T_{экстр}$ , а это возможно лишь при условии уменьшения цены режущего инструмента  $Ц$ .

Для удобства анализа зависимость (11) можно представить в обобщенном виде:

$$C_{min} = g_{сум} \cdot \frac{S_1 \cdot k_D}{Q_{экстр}} \cdot \left( 1 + \frac{1}{n_1} \right). \quad (15)$$

Как видно, добиться уменьшения минимальной технологической себестоимости обработки  $C_{min}$  можно, главным образом, за счет увеличения экстремальной (оптимальной) производительности обработки  $Q_{экстр}$ , т.е. увеличения скорости резания  $V_{экстр}$ . Следовательно, основным направлением снижения технологической себестоимости обработки необходимо рассматривать применение высокоскоростного резания. Однако для этого необходимо обеспечить условия существенного увеличения скорости резания  $V_{экстр}$ , вытекающие из зависимости (12). Прежде всего – это снижение цены режущего инструмента  $Ц$  и применение инструментальных материалов, обладающих высокой износостойкостью в условиях повышенных температур резания.

Таким образом, в работе по критерию наименьшей технологической себестоимости обработки обоснованы основные направления повышения эффективности процессов резания, которые состоят, главным образом, в существенном увеличении скорости резания, т.е. в переходе в область высокоскоростного резания.

## ВЫВОДЫ

В работе предложен теоретический подход к определению стойкости режущего инструмента на основе учета температурного фактора. В результате получена аналитическая зависимость для определения стойкости режущего инструмента, которая аналогична классической эмпирической зависимости, однако дополнительно включает механические и теплофизические характеристики обрабатываемого материала и температуру резания. Ее использование открывает новые технологические возможности изыскания путей повышения эффективности процессов обработки, в особенности за счет применения высокоскоростного резания. Также теоретически установле-

но, что основным условием уменьшения технологической себестоимости обработки является увеличение скорости резания за счет снижения цены режущего инструмента и применения инструментальных материалов, обладающих высокой износостойкостью в условиях повышенных температур резания. Таким образом, в работе теоретически обоснованы условия практической реализации высокоскоростного резания и даны рекомендации по его эффективному применению.

#### *Перечень ссылок*

1. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов / *В.Ф. Бобров.* – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. *Грановский Г.И.* Резание металлов: учебник / *Г.И. Грановский, В.Г. Грановский* – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
3. *Армарего И. Дж. А.* Обработка металлов резанием / *И. Дж. А. Армарего, Р.Х. Браун.* – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
4. *Новиков Ф.В.* Разработка эффективных технологий механической обработки деталей машин / *Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх* // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов. – Х.: ХНАДУ, вып. 29, 2011. – С. 212-215.
5. *Новиков Ф.В.* Определение оптимальных условий механической обработки деталей машин по критерию наименьшей себестоимости / *Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, Е.Ю. Бенин* // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ “Приазов. держ. техн. ун-т”, 2012. – №1 (24). – 2012. – С. 241-247.
6. *Жовтобрюх В.А.* Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / *В.А. Жовтобрюх.* – Мариуполь, 2012. – 21 с.

Рецензент: д. т. н., проф. В. В. Суглобов

*Статья поступила 01.12.2014*