

АНАЛИЗ РЕСУРСА СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Наведено аналіз взаємозв'язку між збільшенням стійкості різального інструменту і збільшеннями режимних параметрів різання.

An analysis of interrelation between cutting tool life increment and cutting conditions parameters increments is given.

Высокоскоростная механическая обработка (в зарубежной литературе High Speed Machining или HSM) относится к одному из перспективных направлений развития современной технологии машиностроения [1]. Это направление сформировалось в 40-х годах прошлого века и с тех пор является перманентным. Вначале повышение скорости резания на обычных станках практиковали передовые рабочие, используя твёрдосплавные резцы (BK6, BK8, T15K6). Тогда под «скоростной обработкой» понимали механическую обработку с повышенными (по сравнению с нормами) скоростями резания. И уже тогда при чистовой обработке заготовок при точении (скоростное точение) и фрезеровании (скоростное фрезерование) были достигнуты скорости резания порядка 400-700 м/мин [2].

Одним из многих (и не менее важным, чем другие) аспектов проблемы высокоскоростного резания является выяснения влияния смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), как технологического резерва повышения скорости резания. Хотя известны многочисленные примеры высокоскоростного резания без применения каких-либо СОТС или с использованием специальных жидкостных СОТС типа Castrol (например, на японских токарных обрабатывающих центрах Mazatrol 640TN IVS-2000, WFL MILLTURN M35-G и других станках с ЧПУ).

Однако, отсутствие рекомендаций и технологических исследований по высокоскоростному резанию сдерживает развитие этого прогрессивного направления на станках с ЧПУ. В этой связи в данной работе производится анализ взаимосвязи между двумя технологическими резервами: приращением периода стойкости режущего инструмента и приращениями режимных параметров резания (скорости резания, подачи, глубины резания) которые становятся возможным вследствие этого. При этом возрастание, например скорости резания, приводит к соответствующему уменьшению периода стойкости, например, до базового его значения (по отношению к которому имело место приращение периода стойкости). Причины, приведшие к росту периода стойкости, в работе не рассматриваются. Такими причинами могут быть, например, применение более эффективной СОЖ или твёрдой технологической смазки, применение нового инструментального материала изменение геометрических параметров режущих лезвий, улучшение обрабатываемости материала заготовки и т.п.

В соответствии с «расширенным» уравнением Ф. У. Тейлора стойкость режущего инструмента (T) следующим образом связана с режимами резания [4, с.177]

$$T = \frac{K}{v^{1/n} \cdot f^{1/n_1} \cdot d^{1/n_2}}, \quad (1)$$

где v – скорость резания (в отечественной литературе V_T); f – подача (в отечественной литературе s); d – глубина резания (в отечественной литературе t); K – постоянная величина, соответствующая данной комбинации «инструмент-заготовка» и данной геометрии инструмента (в отечественной литературе C); $1/n$, $1/n_1$, $1/n_2$ – показатели степени при скорости резания, подаче и глубине резания, соответственно, причём $1/n > 1/n_1 > 1/n_2$.

Например, при резании стали твёрдосплавными резацами эта формула (с учётом обозначений в отечественной литературе) имеет вид [5, с.11]

$$T = \frac{C}{V_T^5 \cdot s^{1,5} \cdot t^{0,75}} \quad (2)$$

Видно, что показатели степени при скорости, подаче и глубине резания соотносятся между собой как 5 : 1,5 : 0,75 или 1 : 0,3 : 0,15. Это означает, что скорость резания оказывает наибольшее влияние на стойкость режущего инструмента, за ней следуют подача и глубина резания [5, с.11].

Численное значение величины C можно найти в каждом конкретном случае. Например, при точении стали твёрдостью HB190 проходными резацами с пластинками твёрдого сплава T15K6 (в интервале $0,75 \leq s \leq 0,3$ мм/об) [5, с.14].

$$V_T = \frac{371}{T^{0,2} \cdot s^{0,35} \cdot t^{0,15}} \cdot K_v, \quad (3)$$

где K_v – коэффициент, учитывающий влияние на скорость резания изменённых условий резания (по отношению к базовым условиям), $K_v = 1$.

Возведём обе части этого уравнения в степень 5 (величина обратная числу $0,2 = 1/5$). Получаем

$$T = \frac{7,0286 \cdot 10^{12} \cdot K_v^5}{V_T^5 \cdot s^{1,75} \cdot t^{0,75}} \quad (4)$$

Сравнивая выражения (3) и (4), видим, что $C = 7,0286 \cdot 10^{12} \cdot K_v^5$. Если условия базовые, то есть $K_v = 1$, тогда $C = 7,0286 \cdot 10^{12}$.

По формуле (2) была сделана предварительная количественная оценка влияния режимов резания на стойкость инструмента (т.е. 1 : 0,3 : 0,15). Исходя из формулы (4) эта оценка существенно не изменилась и составляет 1 : 0,35 : 0,15. Следует отметить, что эта оценка предварительная и укрупнённая. Она не характеризует количественную долю (вклад) каждой составляющей режима резания в общую для всех стойкость режущего инструмента.

Заменяя для упрощения V_T на V , преобразуем выражение (4) к виду

$$T = \frac{C}{V^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^\gamma}, \quad (5)$$

где $C = 7,0286 \cdot 10^{12}$, $\alpha = 5$; $\beta = 1,75$; и $\gamma = 0,75$.

Далее ищем полный дифференциал функции $T = T(V, s, t)$. Имеем

$$dT = \frac{\partial T}{\partial V} \cdot dV + \frac{\partial T}{\partial s} \cdot ds + \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dt \quad (6)$$

Найдём выражение (6) применительно к зависимости (5). Заменяем знак бесконечно малого приращения d на конечное достаточно малое приращение Δ . Получим следующую величину приращения стойкости режущего инструмента ΔT в зависимости от величин приращений режимных параметров ΔV , Δs и Δt .

$$\Delta T = -C \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \Delta V}{V^{\alpha+1} \cdot s^\beta \cdot t^\gamma} + \frac{\beta \cdot \Delta s}{V^\alpha \cdot s^{\beta+1} \cdot t^\gamma} + \frac{\gamma \cdot \Delta t}{V^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^{\gamma+1}} \right) \quad (7)$$

или

$$\Delta T = -\frac{C}{V^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^\gamma} \cdot \left(\alpha \frac{\Delta V}{V} + \beta \frac{\Delta s}{s} + \gamma \frac{\Delta t}{t} \right). \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что приращение стойкости ΔT предопределяется суммой масштабированных относительных изменений режимных параметров V , s и t с масштабными (весовыми) коэффици-

циентами α , β и γ , соответственно. Знак минус перед этим выражением показывает, что положительные приращения параметров V , s и t приводят к уменьшению стойкости ΔT .

Если режимные параметры резания увеличить на 10 % (относительные изменения параметров будут равны 0,1), то выражение (8) принимает вид

$$\Delta T = -\frac{C}{V^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^\gamma} \cdot (0,1\alpha + 0,1\beta + 0,1\gamma).$$

Подставляя численные значения базовых величин $V_0 = 200$ м/мин, $s_0 = 0,2$ мм/об и $t_0 = 6$ мм, получаем

$$\begin{aligned} \Delta T &= -\frac{7,0286 \cdot 10^{12}}{200^5 \cdot 0,2^{1,75} \cdot 6^{0,75}} \cdot (0,1) \cdot (5 + 1,75 + 0,75) = \\ &= -95,5 \cdot 0,1 \cdot 7,5 = -95,5 \cdot 0,75 = -71,6 \text{ мин.} \end{aligned}$$

В этом выражении величина 95,5 мин представляет собой базовое значение стойкости T_0 режущего инструмента, а коэффициент 0,75 – долю стойкости, забираемую увеличением всех режимных параметров на 10 %. Т.е.

$$\Delta T = -T_0 \cdot 0,1 \cdot (\alpha + \beta + \gamma). \quad (9)$$

С учётом формулы (5) выражение (8) можно привести к виду

$$\frac{\Delta T}{T} = -\left(\alpha \frac{\Delta V}{V} + \beta \frac{\Delta s}{s} + \gamma \frac{\Delta t}{t} \right). \quad (10)$$

В выражении (10) $T = T_0 = T(V_0, s_0, t_0)$, $V = V_0$, $s = s_0$ и $t = t_0$. С учётом выражения (9) для 10 % – ого увеличения всех режимных параметров получаем

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{-71,6}{95,5} = -0,75 = -0,1 \cdot (5 + 1,75 + 0,75).$$

Таким образом, при одновременном увеличении всех режимных параметров на 10 %, стойкость режущего инструмента уменьшается на 75 %, причём вклад в эти 75 % отдельных режимных параметров V , s и t соответственно составляет: 50 %, 17,5 % и 7,5 %.

Решая уравнение (1) относительно скорости резания v_T , допускаемой инструментом, получаем известную зависимость [3, с.261, с. 265]

$$v_T = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot s^y} \cdot K_v. \quad (11)$$

С учётом принятых в формуле (1) обозначений, в этой зависимости $C_v \cdot K_v = K^n$, $m = n$, $y = n/n_1$, $x = n/n_2$.

Из анализа уравнения (11) следует, что всякое увеличение стойкости T от некоторого исходного (базового) значения T_0 до нового значения T_n может быть преобразовано в увеличение скорости резания v_T с одновременным понижением стойкости от нового значения T_n до базового значения T_0 .

Введём обозначение

$$\left(\frac{T_n}{T_0} \right)^m = K_T, \text{ т.е. } \frac{T_n}{T_0} = K_T^{1/m}. \quad (12, 13)$$

Здесь K_T – коэффициент технологической эффективности, учитывающий взаимосвязь между приращением периода стойкости режущего инструмента и приращением скорости резания, причём $K_T \geq 1$, если $T_n > T_0$ и $K_T \leq 1$, если $T_n < T_0$.

Получаем

$$v_T = \frac{C_v \cdot K_T}{T_n^m \cdot t^x \cdot s^y} \cdot K_v. \quad (14)$$

Если $m \leq 1$ (например $m = 0,2$) и $1/m$ – целое число (например $1/m = 5$), то формулу (12) можно записать в виде

$$K_T = \left(\frac{T_H}{T_0}\right)^m = \frac{1}{m} \sqrt[m]{\frac{T_H}{T_0}} \quad \text{или} \quad K_T = \sqrt[5]{\frac{T_H}{T_0}}. \quad (15, 16)$$

Таким образом, коэффициент технологической эффективности K_T в рассматриваемом случае равен корню пятой степени из отношения нового и базового периодов стойкости режущего инструмента.

Выражение (14) с учётом зависимости (12) может быть представлено в виде

$$v_T = \frac{C_v}{\left(\frac{T_H}{K_T^{1/m}}\right)^m \cdot t^x \cdot s^y} \cdot K_v = \frac{C_v}{T_0^m \cdot t^x \cdot s^y} \cdot K_v. \quad (17)$$

Выражение (17) показывает, что при одновременном увеличении стойкости режущего инструмента (от базового значения T_0 до нового значения T_H) и скорости резания (в K_T раз) зависимость скорость резания от стойкости режущего инструмента $T = T_0$ и от режимных параметров t и s остаётся прежней, т.е. той самой какой она была до использования технологической новации. Другими словами, увеличение стойкости равносильно увеличению коэффициента K_v в формуле для скорости резания в K_T раз.

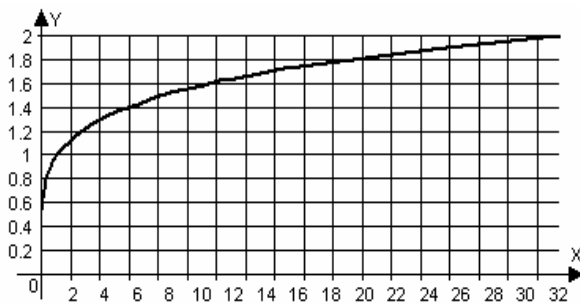


Рис.1 Влияние увеличения периода стойкости режущего инструмента на увеличение скорости резания:

$$X = \frac{T_H}{T_0} = K_T^{1/m}; \quad Y = K_T = \left(\frac{T_H}{T_0}\right)^m$$

Коэффициент K_T можно определить, например, из сравнения двух кривых износа режущего инструмента, одна из которых определена в условиях применения какого-либо технологического новшества, а другая – в исходных (базовых) условиях. Например, при использовании более эффективной СОЖ (технологическое новшество) скорость резания можно увеличить, сохраняя то же самое (базовое) значение стойкости режущего инструмента, которое было при использовании традиционной СОЖ.

Аналогично тому, как был введен поправочный коэффициент $K_T = K_{T(v)}$ на скорость резания, можно ввести поправочные коэффициенты на подачу $K_{T(s)}$ и глубину резания $K_{T(t)}$, которые показывают во сколько раз можно увеличить подачу и глубину резания, чтобы использовать ресурс увеличения стойкости режущего инструмента при той же самой скорости резания. Для этого преобразуем выражение (5) в следующие две зависимости для определения подачи s и глубины резания t :

$$s = \frac{(C \cdot K_v^\alpha)^{1/\beta} \cdot K_{T(s)}}{T_H^{1/\beta} \cdot v^{\alpha/\beta} \cdot t^{\gamma/\beta}}, \quad t = \frac{(C \cdot K_v^\alpha)^{1/\gamma} \cdot K_{T(t)}}{T_H^{1/\gamma} \cdot v^{\alpha/\gamma} \cdot s^{\beta/\gamma}}. \quad (18, 19)$$

Сравнивая эти зависимости с формулами (14)-(16), видим, что вместо показателя степени $m = 1/\alpha = 0,2$ в выражениях (18) и (19) используются показатели степени

Влияние ресурса (запаса) стойкости режущего инструмента на ресурс (запас) скорости резания можно показать графически (рис.1).

Видно, что увеличение периода стойкости инструмента (величина X на рис.1), например, в 32 раза, то есть $T_H/T_0=32$, позволит увеличить скорость резания (величина Y на рисунке) в 2 раза ($K_T = 2$), а его уменьшение в 32 раза, то есть $T_H/T_0 = 1/32$, приводит к необходимости уменьшить скорость резания в 2 раза ($K_T = 1/2$). Это обусловлено тем, что $32^{0,2} = 2$, а $(1/32)^{0,2} = 1/2$.

$1/\beta = 1/1,75 = 0,57143$ и $1/\gamma = 1/0,75 = 1,333$. Следовательно, если

$$K_{T(v)} = \left(\frac{T_H}{T_0}\right)^m = \left(\frac{T_H}{T_0}\right)^{1/\alpha},$$

то $K_{T(s)} = \left(\frac{T_H}{T_0}\right)^{1/\beta}$ и $K_{T(t)} = \left(\frac{T_H}{T_0}\right)^{1/\gamma}$. (20, 21, 22)

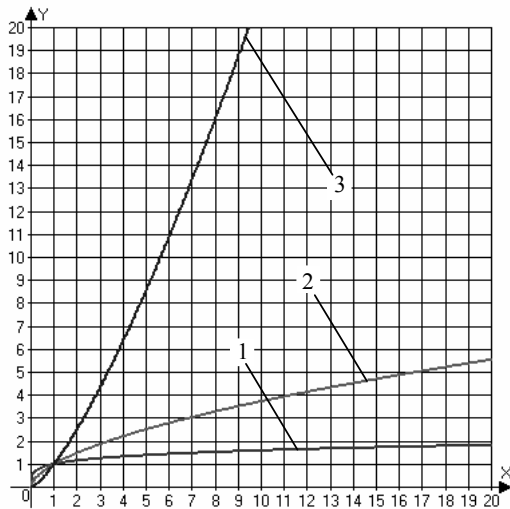


Рис.2 Соотношения между ресурсом увеличения стойкости режущего инструмента ($X = \frac{T_H}{T_0}$) и ресурсами увеличения режимных параметров резания (Y): кривые 1,2 и 3 представляют собой коэффициенты эффективности $Y = K_{T(v)}$, $Y = K_{T(s)}$ и $Y = K_{T(t)}$, соответственно

Подобно тому, как на рис.1 была показана зависимость (20), на рис.2 одновременно показаны зависимости (20)-(22).

Видно, что гораздо эффективнее (с точки зрения производительности обработки) без увеличения скорости резания увеличивать подачу (кривая 2 на рис.2) или глубину резания (кривая 3 на рис.2). Например, при увеличении стойкости инструмента в 8 раз скорость резания, подачу и глубину резания можно увеличить, соответственно, в 1,5 раза, в 3,4 раза и в 16 раз.

Составляющие силы резания, например, при точении находят по формуле [3, с.271]

$$P_{z,y,x} = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^n \cdot K_p, \quad (23)$$

где постоянная величина C_p и показатели степени x , y и n для каждой из составляющих силы резания приведены в табличных данных [3, с.273-274, табл. 22].

В формуле (23) показатель степени $n \leq 0$, например, $n = -0,15$, $n = -0,3$ и $n = -0,4$ для составляющих сил резания P_z , P_y и P_x , соответ-

ственно, при наружном продольном точении и растачивании [3, с. 273, табл.22]. Следовательно, с увеличением скорости резания (при прочих равных условиях) составляющие силы резания при точении уменьшаются. Например, при увеличении скорости резания в 2 и в 4 раза новое значение силы резания P_z составит 90,1 % и 80,1 %, соответственно, от прежнего его значения, так как $2^{-0,15} = 0,901$, а $4^{-0,15} = 0,801$. Уменьшение составляющей силы резания P_y при тех же условиях составит 81 % и 66 %, соответственно.

Таким образом, повышение скорости резания за счёт использования, например, более эффективной СОЖ будет связано с уменьшением сил резания при точении и растачивании. Это, в свою очередь, приведёт к уменьшению упругих отжатий в технологической системе при фиксированной её жёсткости. То есть преобразование ресурса стойкости режущего инструмента в ресурс увеличения скорости резания одновременно приведёт к увеличению точности обработки по выполняемому размеру (за счёт уменьшения упругих отжатий).

Увеличение периода стойкости режущего инструмента (вследствие внедрения каких-либо технологических новшеств) в рамках предлагаемой математической модели процесса резания можно использовать по нескольким направлениям совершенствования технологии механической обработки.

1. Увеличить скорость резания (v) при сохранении прежнего (базового) значения стойкости инструмента, что позволит (при прочих равных условиях) уменьшить тангенциальную (P_z) и радиальную (P_y) составляющие силы резания. Это приведёт, с одной стороны, к уменьшению температуры в зоне

резания, с другой – к увеличению точности получаемого размера (наружного или внутреннего диаметра обрабатываемой заготовки), соответственно.

2. Оставить скорость резания (v) без изменения и при той же глубине резания (равной припуску на обработку) увеличить подачу (s) или глубину резания (t) таким образом, чтобы сохранить требуемую стойкость (T) режущего инструмента без изменения (на первоначальном базовом уровне).

3. Частично увеличить скорость резания (v) и при прежнем (базовом) значении стойкости инструмента увеличить подачу (s).

Определим возможное увеличение подачи для второго случая, т.е. когда ресурс стойкости инструмента полностью преобразуется в ресурс увеличения подачи (s), а скорость резания остаётся прежней.

Известно, что связь между скоростью резания (v) и частотой вращения шпинделя (n) выражается зависимостью

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}, \quad (24)$$

где d - диаметр обрабатываемой заготовки, мм.

Приравнявая выражения (14) и (24), получаем условие для минимизации машинного времени обработки

$$n \cdot s^y \leq \frac{1000 \cdot C_v \cdot K_T \cdot K_v}{\pi \cdot d \cdot T^m \cdot t^x}. \quad (25)$$

Видно, что при неизменной частоте вращения шпинделя изделия (n) величина s^y возрастает в K_T раз. Следовательно, подача (s) может быть увеличена в $K_T^{1/y}$ раз, причём величина y может принимать значения, например, от 0,2 до 0,45 [3, с.269, табл.17]. Таким образом, подачу (s) можно увеличить в $K_T^{2,2} \dots K_T^5$, т.е. почти во столько же раз, во сколько реально возросла стойкость инструмента (значение K_T^5 точно равно отношению нового и прежнего (базового) значений периода стойкости инструмента, если в формулах (3) и (4) коэффициент $m = 0,2$).

Подводя итоги проведенного анализа можно сформулировать следующие выводы.

1. Введен коэффициент технологической эффективности (K_T), показывающий во сколько раз может быть увеличен какой либо режимный параметр резания, если при прочих равных условиях стойкость инструмента, например, за счёт применения более эффективной СОЖ, возрастёт в $\frac{T_H}{T_0} = K_T^{1/m}$ раз.

2. Существенное возрастание стойкости инструмента, например, в 8 раз, при прочих равных условиях приводит к гораздо меньшему (в 1,5 раза) возрастанию скорости резания.

3. Без изменения скорости резания подачу и глубину резания можно увеличить более существенно, чем скорость резания (например, в 3,4 раза и в 16 раз, соответственно, при прочих равных условиях).

4. Выполненный анализ математической модели процесса резания применим для оценки эффективности различных технологических новаций, которые находят применение при лезвийной механической обработке заготовок на современных станках с ЧПУ.

Список литературы

1. Мануйленко В.М. Условия эффективного применения высокоскоростной обработки. — Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. — Вип.61. — Харків: ХНТУСГ, 2007. — с. 279- 283.
2. Шульман П.А., Кузнецов В.А., Хаєт Г.Л., Яковлев Г.Н. Скоростная обработка металлов резанием: К.: Укр.отд. машгиз, 1951. — 109 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 496 с.
4. Армарего И. Дж. А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. Пер. с англ. В.А.Пастунова. — М.: Машиностроение, 1977. — 325 с.
- Фельдштейн Э.И. Методика назначения наиболее выгодных режимов резания. — Минск: Высшая школа, 1963. — 74 с.