

УДК 621.9.07

В.П. Ларшин, д-р техн. наук, проф., Одес. нац. политехн. ун-т,
Н.В. Лищенко, канд. техн. наук, Одес. нац. акад. пищевых технологий,
С.Н. Макаров, канд. техн. наук, КП “Теплоснабжение города Одессы”,
А.В. Якимов, д-р техн. наук, проф., Одес. нац. политехн. ун-т

АНАЛИЗ И РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.М. Макаров, О.В. Якимов. **Аналіз і регулювання стійкості різального інструменту.** Подано аналіз взаємозв'язку між збільшенням стійкості різального інструменту і відповідними змінами режимних параметрів різання. Показано шляхи регулювання стійкості різального інструменту за рахунок зазначених змін режимних параметрів.

В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.Н. Макаров, А.В. Якимов. **Анализ и регулирование стойкости режущего инструмента.** Приведен анализ взаимосвязи между увеличением стойкости режущего инструмента и соответствующими изменениями режимных параметров резания. Показаны пути регулирования стойкости режущего инструмента за счет указанных изменений режимных параметров.

V.P. Larshin, N.V. Lishchenko, S.N. Makarov, A.V. Yakimov. **Analysis and regulation of cutting tools durability.** An analysis of interrelation between cutting tools durability increment and cutting conditions parameters corresponding changes is given. The ways to regulate the cutting tool life by means of the mentioned cutting conditions parameters changing are shown.

Высокоскоростная механическая обработка (в зарубежной литературе High Speed Machining или HSM) относится к одному из перспективных направлений развития современной технологии машиностроения [1], которое сформировалось в 40-х годах прошлого века и с тех пор является перспективным. Вначале повышение скорости резания на обычных станках практиковали передовые рабочие, используя твердосплавные резцы ВК6, ВК8, Т15К6. Тогда под “скоростной обработкой” понимали механическую обработку с повышенными (по сравнению с нормами) скоростями резания. И уже тогда при чистовой обработке заготовок при скоростных точении и фрезеровании были достигнуты скорости резания порядка 400...700 м/мин [2].

Одной из проблем высокоскоростного резания является влияние смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) как технологического резерва повышения стойкости режущего инструмента (РИ). Хотя известны примеры высокоскоростного резания и без применения каких-либо СОТС или с использованием специальных жидкостных СОТС с малой вязкостью, подаваемых под давлением струей воздуха в соответствии с принципом минимального количества смазки [3]. Это имеет место, например, на токарных обрабатывающих центрах Mazatrol 640TN IVS-2000 (фирма MAZAK, Япония), MILLTURN M35-G (фирма WFL Millturn Technologies, Австрия) и других современных станках с ЧПУ.

Отсутствие рекомендаций и технологических исследований по высокоскоростному резанию сдерживает развитие этого прогрессивного направления. В этой связи выполним анализ взаимосвязи между двумя технологическими резервами: приращением периода стойкости РИ и приращениями режимных параметров резания (скорости резания, подачи, глубины резания). При этом возрастание, например, скорости резания, приводит к соответствующему уменьшению периода стойкости, например, до его базового значения, по отношению к которому имело место приращение периода стойкости. Причины, приведшие к росту периода стойкости, здесь не рассматриваются. Такими причинами могут быть применение более эффективных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) или твердой технологической смазки, нового инструментального материала, изменение геометрических параметров режущих лезвий, улучшение обрабатываемости материала заготовки и т.п.

В соответствии с “расширенным” уравнением Ф.У. Тейлора стойкость РИ связана с режимами резания [4] как

$$T = \frac{C}{V^{1/n} s^{1/n_1} t^{1/n_2}}, \quad (1)$$

где V — скорость резания;

s — подача;

t — глубина резания;

C — постоянная величина, соответствующая конкретной комбинации “инструмент-заготовка” и конкретной геометрии РИ;

$1/n$, $1/n_1$, $1/n_2$ — показатели степени при скорости резания, подаче и глубине резания, соответственно, причем $1/n > 1/n_1 > 1/n_2$.

При точении стали твердостью НВ190 проходными резцами с пластинками твердого сплава Т15К6 (в интервале $0,75 \leq s \leq 0,3$ мм/об) [5]

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

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

Возведем обе части этого уравнения в степень 5 (величина, обратная числу $0,2 = 1/5$), тогда

$$T = \frac{7,0286 \cdot 10^{12} K_v^5}{V^5 s^{1,75} t^{0,75}}. \quad (3)$$

Видно, что показатели степени при скорости, подаче и глубине резания соотносятся между собой как $5 : 1,75 : 0,75$ или $1 : 0,35 : 0,15$, т.е. скорость резания оказывает наибольшее влияние на стойкость РИ, за ней следуют подача и глубина резания.

Сравнивая выражения (2) и (3), видим, что $C = 7,0286 \cdot 10^{12} K_v^5$. Если условия базовые, т.е. $K_v = 1$, $C = 7,0286 \cdot 10^{12}$.

Преобразуем выражение (3) к виду

$$T = \frac{C}{V^\alpha s^\beta t^\gamma}, \quad (4)$$

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

Далее ищем полный дифференциал выражения (4), которое представляет собой функцию $T = T(V, s, t)$. Имеем

$$dT = \frac{\partial T}{\partial V} dV + \frac{\partial T}{\partial s} ds + \frac{\partial T}{\partial t} dt. \quad (5)$$

Найдем выражение (5) применительно к зависимости (4). Заменяем знак бесконечно малого приращения d на конечное малое приращение Δ . Получим величину приращения стойкости режущего инструмента ΔT в зависимости от величин приращений режимных параметров ΔV , Δs и Δt

$$\Delta T = -C \left(\frac{\alpha \Delta V}{V^{\alpha+1} s^\beta t^\gamma} + \frac{\beta \Delta s}{V^\alpha s^{\beta+1} t^\gamma} + \frac{\gamma \Delta t}{V^\alpha s^\beta t^{\gamma+1}} \right) \quad (6)$$

или

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

Из формулы (7) видно, что приращение стойкости ΔT предопределяется суммой масштабированных относительных изменений режимных параметров V , s и t с весовыми коэффициентами 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 (7) принимает вид

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

Подставляя численные значения базовых величин $V_6 = 200$ м/мин, $s_6 = 0,2$ мм/об и $t_6 = 6$ мм, получаем

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

В этом выражении величина 95,5 мин представляет собой базовое значение стойкости T_6 режущего инструмента, а коэффициент 0,75 — долю стойкости, уменьшаемую за счет увеличения всех режимных параметров на 10 %, т.е.

$$\Delta T = -T_6 0,1(\alpha + \beta + \gamma). \quad (8)$$

С учетом формулы (4) выражение (7) можно привести к виду

$$\frac{\Delta T}{T} = -\left(\alpha \frac{\Delta V}{V} + \beta \frac{\Delta s}{s} + \gamma \frac{\Delta t}{t} \right). \quad (9)$$

В выражении (9) $T = T_6 = T(V_6, s_6, t_6)$, $V = V_6$, $s = s_6$ и $t = t_6$. С учетом выражения (8) для 10 %-го увеличения всех режимных параметров получаем

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

Таким образом, при одновременном увеличении всех режимных параметров на 10 % стойкость режущего инструмента уменьшается на 75 %, причем 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 [6]

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x s^y} K_v. \quad (10)$$

Из анализа (10) следует, что всякое увеличение стойкости T от некоторого исходного (базового) значения $T_{\dot{a}}$ до нового значения T_i может быть преобразовано в увеличение скорости резания V . В свою очередь, указанное увеличение скорости резания V приведет к уменьшению стойкости от нового значения T_i до базового значения $T_{\dot{a}}$.

Введем обозначение

$$\left(\frac{T_i}{T_{\dot{a}}} \right)^m = K_T, \quad (11)$$

т.е.
$$\frac{T_i}{T_{\dot{a}}} = K_T^{1/m}, \quad (12)$$

где K_T — коэффициент технологической эффективности, учитывающий взаимосвязь между приращением периода стойкости режущего инструмента и приращением скорости резания, причем $K_T \geq 1$, если $T_i > T_{\dot{a}}$, и $K_T \leq 1$, если $T_i < T_{\dot{a}}$.

Получаем

$$V = \frac{C_v K_T}{T_i^m t^x s^y} K_v. \quad (13)$$

Если $m \leq 1$ (например, $m=0,2$) и $1/m$ — целое число (например, $1/m=5$), то формулу (11) можно записать в виде

$$K_T = \left(\frac{T_i}{T_{\dot{a}}} \right)^m = \frac{1}{m} \sqrt[m]{\frac{T_i}{T_{\dot{a}}}} \quad (14)$$

или
$$K_T = \sqrt[5]{\frac{T_i}{T_{\dot{a}}}}. \quad (15)$$

Выражение (13) с учетом зависимости (11) может быть представлено в виде

$$v_T = \frac{C_v}{\left(\frac{T_i}{K_T^{1/m}} \right)^m t^x s^y} K_v = \frac{C_v}{T_{\dot{a}}^m t^x s^y} K_v. \quad (16)$$

Выражение (16) показывает, что при одновременном увеличении стойкости РИ от базового значения $T_{\dot{a}}$ до нового значения T_i и скорости резания (в K_T раз) зависимость скорости резания от стойкости РИ и от режимных параметров t и s остается прежней, т.е. такой какой она была до использования технологической новации. Другими словами, увеличение стойкости РИ равносильно увеличению коэффициента K_v в формуле для скорости резания в K_T раз.

Влияние ресурса стойкости РИ на ресурс скорости резания можно показать графически (рис. 1). Видно, что увеличение периода стойкости РИ (X), например, в 32 раза ($T_i / T_{\dot{a}} = 32$) позволит увеличить скорость резания Y в два раза ($K_T = 2$). Уменьшение периода стойкости РИ в 32 раза ($T_i / T_{\dot{a}} = 1/32$), приводит к необходимости уменьшения скорости резания в два раза

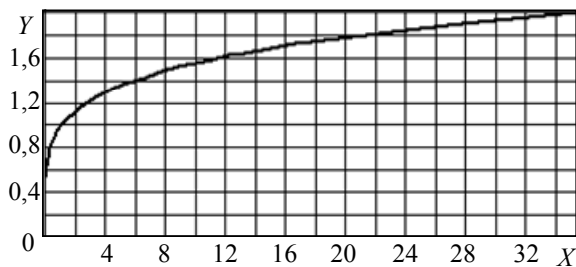


Рис. 1. Влияние увеличения периода стойкости РИ на увеличение скорости резания

($K_T = 1/2$). Это обусловлено тем, что $32^{0,2} = 2$, а $(1/32)^{0,2} = 1/2$. Коэффициент K_T можно определить, например, из сравнения двух кривых износа режущего инструмента, одна из которых определена в условиях применения какой-либо технологической новации, а другая — в исходных условиях.

Например, при использовании более эффективной СОЖ (технологическая новация) скорость резания можно увеличить, сохраняя то же самое значение стойкости режущего инструмента, которое было при использовании традиционной СОЖ.

Аналогично введенному поправочному коэффициенту $K_T = K_{T(v)}$ 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 РИ при той же самой скорости резания. Для этого преобразуем выражение (4) в следующие две зависимости:

$$s = \frac{(CK_v^\alpha)^{1/\beta} K_{T(s)}}{T_i^{1/\beta} v^{\alpha/\beta} t^{\gamma/\beta}}, \tag{17}$$

$$t = \frac{(CK_v^\alpha)^{1/\gamma} K_{T(t)}}{T_i^{1/\gamma} v^{\alpha/\gamma} s^{\beta/\gamma}}. \tag{18}$$

Сравнивая зависимости (17 и 18) с формулами (13)...(15), видим, что вместо показателя степени $m = 1/\alpha = 0,2$ в выражениях (17) и (18) используются показатели степени $1/\beta = 1/1,75 = 0,57143$ и $1/\gamma = 1/0,75 = 1,333$. Следовательно, если

$$K_{T(v)} = \left(\frac{T_i}{\dot{O}_a}\right)^m = \left(\frac{T_i}{\dot{O}_a}\right)^{1/\alpha}, \tag{19}$$

то
$$K_{T(s)} = \left(\frac{T_i}{\dot{O}_a}\right)^{1/\beta} \tag{20}$$

и
$$K_{T(t)} = \left(\frac{T_i}{\dot{O}_a}\right)^{1/\gamma}. \tag{21}$$

На рисунке 1 показана зависимость (19). Аналогичные зависимости показаны для выражений (19)...(21) (рис. 2).

Видно, что гораздо эффективнее без увеличения скорости резания увеличивать подачу (кривая 2) или глубину резания (кривая 3). При увеличении стойкости инструмента в 8 раз скорость резания, подачу и глубину резания можно увеличить соответственно в 1,5, в 3,4 и в 16 раз.

Составляющие силы резания, например, при точении находят по формуле [6]

$$P_{z,y,x} = 10C_p t^x s^y v^n K_p, \tag{22}$$

где постоянная величина C_p и показатели степени x , y и n для каждой из составляющих силы резания взяты из табличных данных [6].

В формуле (22) 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 соответственно при наружном продольном точении и растачивании [6]. Следовательно, с увеличением скорости резания при прочих равных условиях составляющие силы резания при точении уменьшаются.

Таким образом, повышение скорости резания за счет использования, более эффективной СОЖ будет связано с уменьшением сил резания при точении и растачивании. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению упругих отжатый в технологической системе при фиксированной ее жесткости. То есть преобразование ресурса стойкости РИ в ресурс увеличения скорости резания одновременно приведет к увеличению точности обработки по выполняемому размеру (за счет уменьшения упругих отжатый).

Увеличение периода стойкости РИ (вследствие внедрения какой-либо технологической новации) в рамках предлагаемой математической модели процесса резания можно использовать по нескольким направлениям совершенствования технологии механической обработки:

1. Увеличить скорость резания v при сохранении прежнего значения стойкости инструмента, что позволит уменьшить тангенциальную P_z и радиальную P_y составляющие силы резания. Это приведет, с одной стороны, к уменьшению температуры в зоне резания (при уменьшении P_z), с другой, к увеличению точности получаемого размера (наружного или внутреннего диаметра обрабатываемой заготовки).

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.

3. Частично увеличить скорость резания V и при прежнем 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, а скорость резания остается прежней.

Известно, что связь между скоростью резания V и частотой вращения шпинделя n выражается зависимостью

$$V = \frac{\pi d n}{1000}, \tag{23}$$

где d — диаметр обрабатываемой заготовки, мм.

Приравнявая выражения (13) и (23), получаем условие для минимизации машинного времени обработки

$$ns^y \leq \frac{1000 C_v K_T K_v}{\pi d T^m t^x}. \tag{24}$$

Видно, что при неизменной частоте вращения n шпинделя изделия величина s^y возрастает в K_T раз. Следовательно, подача s может быть увеличена в $K_T^{1/y}$ раз, причем величина y может принимать значения от 0,2 до 0,45 [6]. Таким образом, подачу s можно увеличить в

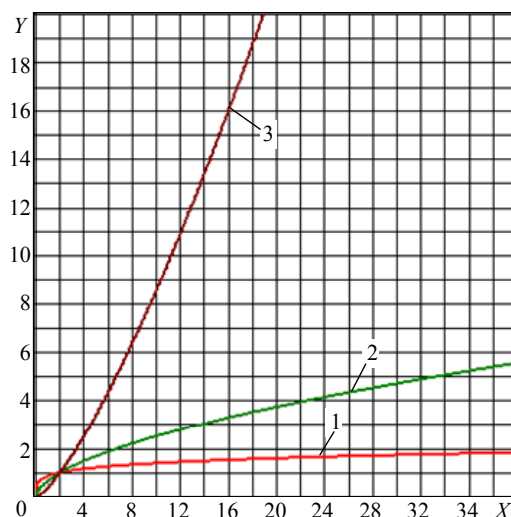


Рис. 2. Соотношения между ресурсом увеличения стойкости РИ $X = \frac{T_n}{T_6}$ и ресурсами увеличения режимных параметров резания: коэффициент эффективности $Y = K_{T(v)}(1)$, $Y = K_{T(s)}(2)$ и $Y = K_{T(t)}(3)$

$K_T^{2,2} \dots K_T^5$, т.е. почти во столько же раз, во сколько реально возросла стойкость инструмента. Значение K_T^5 точно равно отношению нового и прежнего значений периода стойкости РИ, если в формулах (2) и (3) коэффициент $m = 0,2$.

Известно общее представление о статистической природе ресурса стойкости РИ. Вследствие неизбежных флуктуаций в процессе износа одни и те же РИ имеют разный период стойкости. Статистическая кривая распределения срока службы РИ часто имеет вид кривой Гаусса. При этом ширина поля рассеяния стойкости РИ может превышать минимально возможную их стойкость. Современная практика смены резцов учитывает колебания срока службы путем смены всех резцов в начале левой части кривой распределения с тем, чтобы предотвратить случаи их поломки. В этом случае большинство резцов будет заменяться раньше, чем они изнасятся. При наличии датчика состояния РИ по износу все они сменялись бы при определенном уровне износа, так что каждый из них заменяется в нужный момент времени, который соответствует этому РИ. При использовании датчика износа каждый РИ работает большее время. Это означает, что учет фактической стойкости, например, методом диагностики состояния технологической системы резания, позволит в два и более раз увеличить машинное время обработки одним и тем же РИ. Это один из существенных резервов повышения эффективности обработки резанием на дорогостоящих станках с ЧПУ. Как правило, на таких станках применяется дорогостоящий РИ фирмы SANDVIK Coromant (Швеция). В то же время из представленных теоретических исследований вытекает второй не менее важный технологический резерв. Для существенного увеличения стойкости РИ в связи с необходимостью окончания обработки детали, начатой этим РИ, можно незначительно уменьшить скорость резания, что существенно увеличит приращение стойкости резца (см. рисунок 1).

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 возрастет в $\frac{T_n}{T_0} = K_T^{1/m}$ раз.

2. Небольшое уменьшение скорости резания, например, на 8 %, позволяет в два раза увеличить стойкость инструмента. Этим эффектом можно пользоваться в тех случаях, когда необходимо увеличивать время работы РИ по мере его затупления (при необходимости увеличить стойкость РИ, чтобы закончить начатую обработку детали).

3. Без изменения скорости резания подачу и глубину резания можно увеличить более существенно, чем скорость резания. Увеличение скорости резания в два раза можно заменить увеличением подачи и глубины резания в 3,4 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 обработке заготовок на станках с ЧПУ.

Литература

1. Мануйленко, В.М. Условия эффективного применения высокоскоростной обработки / В.М. Мануйленко // Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка. — Вип. 61. — Харків: ХНТУСГ, 2007. — С. 279 — 283.
2. Шульман, П.А. Скоростная обработка металлов резанием / П.А. Шульман, В.А. Кузнецов, Г.Л. Хагт, Г.Н. Яковлев. — К.: Машгиз, укр. отд-ние, 1951. — 109 с.
3. Liao, Y.S. Mechanism of Minimum Quantity Lubrication in High-Speed Milling of Hardened Steel / Y.S. Liao, H.V. Lin // ELSEVIER Intern. J. of Machine Tools & Manufacture). — 2007. — Vol. 47. — P. 1660 — 1666.
4. Армарево, И.Дж.А. Обработка металлов резанием / И.Дж.А. Армарево, Р.Х. Браун; пер. с англ. В.А. Пастунова. — М.: Машиностроение, 1977. — 325 с.

5. Фельдштейн, Э.И. Методика назначения наивыгоднейших режимов резания / Э.И. Фельдштейн. — Минск: Высш. шк., 1963. — 74 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / Под ред. А.Г.Косиловой, Р.К.Мещерякова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 496 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Усов А.В.

Поступила в редакцию 15 июня 2010 г.