

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.914

А.В. Аверченков, Е.Ю. Кукло

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ОПЕРАЦИЙ МЕХАНООБРАБОТКИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Проведено математическое моделирование процедуры определения затрат для операций механообработки при фрезеровании перетачиваемым инструментом и инструментом со сменными многогранными пластинами. Рассмотрены вопросы использования полученной модели в автоматизированной системе выбора режущего инструмента и назначения режимов резания для снижения себестоимости механообработки.

Ключевые слова: себестоимость, режимы резания, оптимизация, фрезерование, автоматизированная система, математическое моделирование.

Любое промышленное предприятие заинтересовано в увеличении прибыли - либо за счет снижения себестоимости изделия, либо за счет повышения отпускной цены. На начальных этапах жизненного цикла продукции - конструкторско-технологического проектирования и изготовления - можно повлиять только на себестоимость. Эффективность процесса механообработки существенно влияет на себестоимость изготовления детали на этих этапах. Правильно выбранный инструмент, при условии его эффективного применения, с рациональными режимами резания, может значительно сократить себестоимость изготовления детали, тем самым увеличить рентабельность производства.

Режимы резания и структура затрат предприятия оказывают большее влияние на стоимость готовых деталей по сравнению со сроком службы инструмента и его стоимостью. Согласно исследованиям мирового лидера по производству инструмента SandvikCoromant [3], выгоднее использовать более дорогие инструменты, но работающие на высоких режимах резания, чем дешевые инструменты с низкой производительностью. Так, повышение режимов резания на 20% снизит затраты на производство одной детали более чем на 10%, поскольку это уменьшит машинное время, затраты на эксплуатацию металлорежущего оборудования и накладные расходы, в которых учитывается заработная плата операторов. А увеличение срока службы инструмента на 50% или снижение его стоимости на 30% приведет к общему снижению затрат на изготовление одной детали всего лишь на 1-2%, так как затраты на инструменты, по исследованиям ведущих производителей инструмента [5], в среднем составляют 3-5% от производственных затрат.

Эффективность применения инструмента может быть оценена разными способами, например по критерию минимальной себестоимости, максимальной производительности либо точности обработки и качества поверхности. Суммарная себестоимость обработки является наиболее объективным критерием. Именно ее снижение приводит к уменьшению себестоимости изделия. Ее можно рассчитать по формуле [1]

$$C = B_c t_M + B_c t_{cm} \frac{t_M}{T} + G_n \frac{t_M}{T},$$

где  $B_c$  – полная себестоимость одной минуты работы станка и станочника без затрат на режущий инструмент;  $t_M$  – машинное время обработки;  $t_{cm}$  – время смены затупившегося инструмента;  $G_n$  – затраты, обусловленные эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости между переточками;  $T$  – стойкость инструмента.

Приведенная формула подходит для перетачиваемого инструмента, но не учитывает особенности применения сменных многогранных пластин (СМП). Для этого случая, с уче-

том стоимости приобретаемого инструмента через его амортизацию, предлагается использовать зависимость [8]

$$C = B_c t_M + B_c t_{cm} \frac{t_M}{T} + \left( \frac{\Gamma_{\Phi}}{T_{\Phi}} + \frac{z \Gamma_{\pi}}{n_c} \right) \frac{t_M}{T},$$

где  $\Gamma_{\Phi}$  – стоимость корпуса фрезы,  $T_{\Phi}$  – его ресурс;  $\Gamma_{\pi}$  – стоимость СПМ;  $z$  – число зубьев фрезы;  $n_c$  – число режущих кромок пластины.

Зачастую присутствие оператора обязательно не во время всего процесса обработки, а только для смены инструмента и заготовки, наладки станка и запуска программы обработки. Тогда предложенная формула примет вид

$$C = B_c t_{cm} \frac{t_M}{T} + \left( \frac{\Gamma_{\Phi}}{T_{\Phi}} + \frac{z \Gamma_{\pi}}{n_c} \right) \frac{t_M}{T}$$

или

$$C = \frac{t_M}{T} \left( B_c t_{cm} + \frac{\Gamma_{\Phi}}{T_{\Phi}} + \frac{z \Gamma_{\pi}}{n_c} \right).$$

Данные формулы определяют зависимость суммарной себестоимости механообработки от затрат на приобретение, переточку, настройку и замену инструмента, а также на эксплуатацию металлорежущего оборудования и заработную плату рабочих.

Следует заметить, что величина  $\frac{t_M}{T}$ , выражающая количество обрабатываемых заготовок, на которое хватит инструмента, зависит только от режимов и параметров обработки (для одного конкретного инструмента), в то время как вся величина в скобках для конкретного инструмента является постоянной. Это замечание следует использовать для минимизации расчетов при оптимизации режимов резания для выбранного инструмента.

Таким образом, проанализировав формулу расчета себестоимости, можно заметить, что для конкретного перетачиваемого инструмента, как и для инструмента со сменными твердосплавными пластинами, себестоимость зависит от времени обработки и стойкости инструмента, в то время как оставшиеся составляющие постоянны (параметры инструмента, стоимость, время замены, нормативы оплаты труда). Однако как время обработки, так и стойкость инструмента не являются регулирующими параметрами (т.е. теми, которые можно изменять напрямую) при механообработке, поэтому больший интерес представляет зависимость себестоимости обработки от режимов резания, которые задаются непосредственно и определяют, в свою очередь, стойкость и время обработки. Используя известные формулы зависимости скорости резания от частоты вращения шпинделя и основного закона стойкости [2]

$$n = \frac{1000 v}{\pi D},$$

$$T = \frac{C^v D^q}{v^m c^x f_z^y B^u z^p} k_v,$$

а также формулу расчёта времени обработки [3]

$$t_M = \frac{kL}{n z f_z},$$

можно перейти к следующей зависимости:

$$t_M = \frac{kL\pi D}{1000 v z f_z},$$

где  $C_v$  – коэффициент влияния материалов заготовки и фрезы;  $D$  – диаметр фрезы;  $v$  – скорость резания;  $f_z$  – подача на зуб;  $t$ ,  $L$ ,  $B$  – глубина, длина и ширина фрезерования;  $q$ ,  $m$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $u$ ,  $p$  – показатели степени;  $k$  – количество проходов для обработки припуска по всей глубине резания;  $k_v$  – поправочный коэффициент на изменённые условия обработки;  $n$  – частота вращения шпинделя.

Перечисленные показатели степеней и коэффициенты для отечественных инструментов можно найти в справочных таблицах, однако для современных зарубежных инструментов они не задаются. Для них стойкость инструмента является не расчетным, а исходным параметром. В каталогах обычно указываются скорость резания (при стойкости 15 мин), а также зависимости ее от твердости обрабатываемого материала ( $K_{НВ}$ ) и расчетной стойкости. Эти данные получены эмпирическим путем и позволяют уточнить режимы резания для конкретных условий обработки.

Действительную скорость резания можно найти по формуле [4]

$$v_d = v_s K_{НВ} K_t K_h,$$

где  $v_s$  – скорость резания при  $T = 15$  мин, твердости заготовки НВ 180;  $K_{НВ}$  – коэффициент зависимости скорости резания от твердости материала;  $K_h$  – коэффициент зависимости скорости резания от средней толщины стружки;  $K_t$  – поправочный коэффициент на действительное время контакта  $T_d$ .

Поправочный коэффициент  $K_{НВ}$  можно найти напрямую из табл. 1 [8], зная группу обрабатываемого материала и его твердость.

Таблица 1

Значения поправочного коэффициента  $K_{НВ}$

Группа материала	Твердость материала			
	140	180	220	260
Р	1,19	1	0,85	0,75
М	1,23	1	0,85	0,72
К	1,19	1	0,91	0,85

При необходимости при расчётах можно интерполировать табличные данные, для определения промежуточных значений.

Коэффициент зависимости скорости резания от средней толщины стружки ( $K_h$ ) определяется по справочным таблицам исходя из обрабатываемого и инструментального материалов, а также средней толщины стружки ( $h_m$ ), рассчитываемой по формуле [4]

$$h_m = f_s \frac{2 \left( \frac{b_1 + b_2}{D} \right)}{\arccos\left(-2 \frac{b_1}{D}\right) - \arccos\left(2 \frac{b_2}{D}\right)} \cdot \sin \varphi,$$

где  $\varphi$  – главный угол в плане;  $b_1, b_2$  – расстояния от краев фрезерования до оси фрезы (рис. 1).

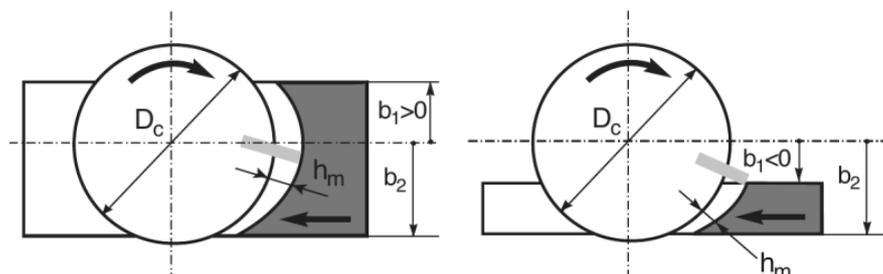


Рис. 1. Расстояния от краев фрезерования до оси фрезы

Коэффициент зависимости скорости резания от действительного времени контакта ( $K_t$ ) определяется по табл. 2 [4] исходя из действительного времени контакта фрезы с заготовкой, рассчитываемого по формуле

$$T_d = \frac{TL_k}{\pi D},$$

где  $L_k$  — длина дуги контакта фрезы с заготовкой.

Используя тригонометрические преобразования,  $T_d$  можно рассчитать так:

$$T_d = T(\arcsin(2 \frac{b_1}{D}) + \arcsin(2 \frac{b_2}{D})).$$

Таблица 2

Значения поправочного коэффициента  $K_t$

Стойкость, мин	10	15	20	25	30	45	60
Коэффициент коррекции $K_t$	1,1	1	0,95	0,9	0,87	0,8	0,75

Интерполируя таблицу методом наименьших квадратов, получим следующую расчётную формулу для коэффициента коррекции  $K_t$ :

$$K_t = -1041.77 \left( \frac{T(\arcsin(2 \frac{b_1}{D}) + \arcsin(2 \frac{b_2}{D}))}{2\pi} \right)^{0.000188181425144759} + 104323.$$

С учетом всех описанных данных конечная формула расчета себестоимости для инструмента со сменными многогранными пластинами будет иметь вид

$$C = \frac{KL\pi D}{1000v_s K_{HB} K_t K_H f_z T} \left( B_c t_{cm} + \frac{T_d}{T_\phi} + \frac{\pi T_d}{n_c} \right) \rightarrow \text{млн.}$$

Она позволяет перейти к построению зависимости себестоимости механообработки при фрезеровании от режимов резания ( $v_s, f_z$ ), параметров инструмента ( $D, z, \varphi, n_c, \Gamma_\phi, T_\phi, \Gamma_n$ ), условий обработки ( $L, b_1, b_2, K_{HB}, K_t, K_H, T$ ) и структуры затрат предприятия ( $B_c$ ).

Согласно рекомендации для обработки торцевой поверхности, ширина фрезерования не должна превышать  $\frac{2}{3}$  диаметра фрезы [3]:

$$b_1 + b_2 \leq \frac{2}{3} D.$$

В случае обработки поверхностей, когда материал заготовки ограничивает фрезу (пазы, карманы и т.п.),

$$b_1 + b_2 \geq D.$$

Ограничения на выбор подачи  $f_z$  при черновом фрезеровании являются [3]:

- мощность станка;
- жесткость несущей системы;
- несущая способность выбранной режущей пластины по максимальной толщине стружки  $h_{max}$ .

Требуемая для обработки мощность не должна превышать мощность станка [4]:

$$P = \frac{a_p a_e f k_c}{60 \times 10^6} \leq P_{ст},$$

где  $a_p, a_e$  - глубина и ширина фрезерования,  $f$  – минутная подача,  $k_c$  – удельная сила резания, т.е.

$$\frac{a_p (b_1 + b_2) \frac{1000 \cdot v}{\pi D} \pi f k_c}{60 \cdot 10^6} \leq P_{ст}.$$

В общем случае предельные значения максимальной толщины стружки  $h_{max}$  зависят от толщины пластины [4]:

Толщина пластины, мм	Менее 3,18	3,18...3,97	,76...5,56	6,35 и более
$h_{max}$ , мм	0,1...0,15	0,2	0,3	0,4...0,7

Ограничения, накладываемые на подачу на зуб [4]:

- если центр фрезы находится вне заготовки (рис. 2а),

$$f_z \leq \frac{1}{2} \frac{h_{\max}}{\sqrt{\frac{b}{D} \left(1 - \frac{b}{D}\right)} \sin \varphi},$$

- если центр фрезы находится внутри заготовки (рис. 2б),

$$f_z \leq \frac{h_{\max}}{\sin \varphi}.$$

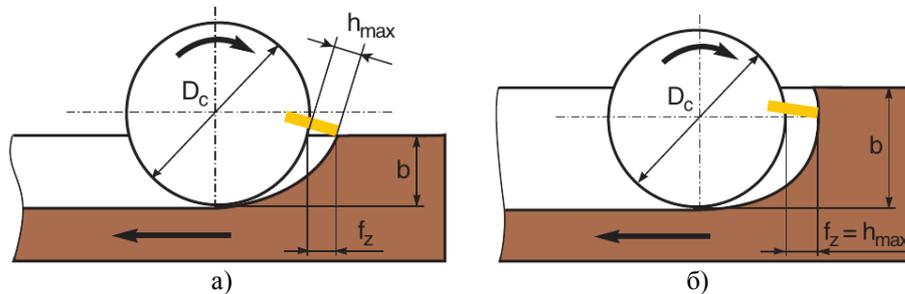


Рис. 2. Максимальная толщина стружки

При чистовом фрезеровании ограничение на подачу со стороны получаемой шероховатости поверхности можно выразить формулой [8]

$$h = 1000 \frac{f_z^2}{8R_e} \text{ нм},$$

где  $R_e$  – радиус при вершине пластины.

Следовательно, ограничение для подачи на зуб имеет вид

$$f_z = \sqrt{\frac{R_e h}{125}}.$$

В случае использования при обработке пластин с зачистной фаской подача на оборот не должна превышать длину зачистной фаски [4]:

$$z f_z \leq L_f.$$

Следовательно, ограничение для подачи на зуб имеет вид

$$f_z \leq \frac{L_f}{z}.$$

Представленную математическую модель рекомендуется использовать для расчета режимов резания в автоматизированной системе выбора фрезерного инструмента [6]. Такая система определит режущий инструмент различных производителей, подходящий для заданных условий обработки, и для каждого выбранного инструмента рассчитает режимы резания, стойкость, а также себестоимость механической обработки, по которой будет проходить оптимизация и выбор наиболее подходящего инструмента [9].

Создаваемая автоматизированная система позволит сократить трудозатраты технолога-программиста при выборе фрезерного инструмента, стратегии обработки и назначении режимов резания, а также затраты на механообработку - благодаря расчету наиболее производительных режимов резания, выбору более производительного инструмента либо более дешевого, но не уступающего по характеристикам [7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безъязычный, В.Ф. Расчет режимов резания: учеб.-метод. пособие /В.Ф. Безъязычный, И.Н.Аверьянов, А.В. Кордюков. – М.: Машиностроение, 2010.– 270 с.
2. Виноградов, Д.В. Высокопроизводительная обработка металлов резанием /Д.В. Виноградов.– М.: Полиграфия, 2003. – 301 с.
3. SANDVIK Coromant Technicalguide. Руководство по металлообработке: Технический справочник от SANDVIK Coromant. - 2000. - 169 с.
4. Аверченков, В.И. Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ: монография / В.И. Аверченков, А.В. Аверченков, М.В. Терехов, Е.Ю. Кукло. - Брянск: БГТУ, 2010. – 148с.

5. Как найти лучший метод повышения производительности: Рекомендации SANDVIK Coromant. – Режим доступа: <http://www.tulaspecinstr.ru/files/proizvoditelnost.pdf>.
6. Аверченков, А.В. Автоматизация процедуры выбора современного фрезерного металлорежущего инструмента / А.В. Аверченков, Е.Ю. Кукло // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2011. - № 4. - С. 81-85.
7. Аверченков, А.В. Повышение эффективности виртуальной подготовки производства на основе выбора оптимального режущего инструмента и стратегий обработки /А.В. Аверченков //Вестн. ТГТУ. - 2011. - Т. 17. - №3. - С. 767-774.
8. Mitsubishi Materials. Токарный инструмент, вращающийся инструмент, инструментальные системы: общ. каталог 2007-2009 / Mitsubishi Materials Corporation. - 1085 с.
9. Аверченков, А.В. Автоматизация выбора оптимального режущего инструмента для многофункционального технологического оборудования с ЧПУ / А.В. Аверченков, М.В.Терехов // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2010. - № 1. - С. 13-21.

Материал поступил в редколлегию 21.03.14.