

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

Швец С. В.

Предложена методика, согласно которой проектирование операции точения, обеспечение стойкости инструмента и параметров шероховатости обработанной поверхности достигается без совместных стойкостных испытаний обрабатываемого и инструментального материалов. Создание перехода сводится к достижению на экране необходимых значений стойкости инструмента и параметров шероховатости поверхности за счет изменения и контроля параметров режима резания и основных характеристик процесса точения. При этом в базу данных обрабатываемых материалов входят параметры зависимостей напряжений от деформаций, полученных при стандартных испытаниях на прочность, а также коэффициенты и показатели степени в выражении для расчета температуры резания. База данных инструментальных материалов состоит из пределов прочности при сжатии, критических температур и предельных чисел циклов используемых материалов.

Запропонована методика, згідно якої проектування операції точіння, забезпечення стійкості інструменту і параметрів шорсткості обробленої поверхні досягається без спільних стійкісних випробувань оброблюваного і інструментального матеріалів. Створення переходу зводиться до досягнення на екрані необхідних значень стійкості інструменту і параметрів шорсткості поверхні за рахунок зміни і контролю параметрів режиму різання і основних характеристик процесу точіння. При цьому у базу даних оброблюваних матеріалів входять параметри залежностей напружень від деформацій, отриманих при стандартних випробуваннях на міцність, а також коефіцієнти і показники ступеню у виразі для розрахунку температури різання. База даних інструментальних матеріалів складається з меж міцності при стискуванні, критичних температур і граничних кількостей циклів використовуваних матеріалів.

The technique according to which operation designing turning, maintenance of firmness of the tool and parameters of a roughness of the processed surface is reached without joint tests of processed and tool materials is offered. Transition creation is reduced to achievement on the screen of necessary values of firmness of the tool and parameters of a roughness of a surface at the expense of change and the control of parameters of a mode of cutting and the basic characteristics of process turning. Thus the database of processed materials includes parameters of dependences of pressure from the deformations received at standard tests for durability, and also factors and exponents in expression for calculation of temperature of cutting. The database of tool materials consists of strength at compression, critical temperatures and limiting numbers of cycles of used materials.

Швец С. В.

канд. техн. наук, доц. СумГУ  
shvets46@yandex.ru

СумГУ – Сумский государственный университет, г. Сумы.

УДК 621.9

Швец С. В.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

Автоматизация проектирования переходов токарной операции на основе компьютерного моделирования сокращает время технологической подготовки производства, повышает надёжность и качество процессов формообразования.

При проектировании технологических процессов механической обработки возникает необходимость в определении параметров режима резания. Практика резания металлов накопила огромный нормативно-справочный материал, с помощью которого можно назначить режим резания [1–3]. Существует громоздкий табличный метод, который требует анализа большого количества справочной информации. Аналитический метод более предпочтителен, так как сводится к расчету по эмпирическим формулам. Созданы специальные программы-калькуляторы [4]. Но получить подобную универсальную программу для всех случаев практически не реально. Так как приходится учитывать огромное количество параметров связанных с обрабатываемым материалом, инструментом, видом обработки. Все параметры эмпирических формул установлены для конкретных условий и при изменении хотя бы одного из них автоматически изменяются все другие, что еще более усложняет процесс назначения режимов резания. Справочный материал для эмпирических выражений, получают на основании длительных стойкостных испытаний [5]. Поэтому режим резания устанавливается преимущественно по аналогии, на основании практического опыта.

Совершенствование физической модели системы резания и разработка соответствующей ей математической модели позволят аналитически оптимизировать условия резания, многократно сокращая расходы материальных и временных ресурсов. При разработке операции технологического процесса первостепенной задачей является обеспечение некоторого значения стойкости инструмента и параметров шероховатости обработанной поверхности.

Целью работы является создание математической модели процесса точения, пригодной для устранения эмпирических зависимостей и совершенствования программного обеспечения системы проектирования токарной операции.

Основными параметрами модели являются предельная работа инструмента и выполненная за некоторый отрезок времени работа в системе резания.

Предельная работа инструмента равна предельной работе всей системы, рассчитывается на основании механических свойств инструментального материала и геометрии лезвия [6] (предел прочности при сжатии  $\sigma_b$ , задний угол  $\alpha$ , угол при вершине  $\varepsilon$ , вспомогательный угол в плане  $\varphi'$  и радиус при вершине  $r$ ):

$$A = 7,384 \cdot 10^5 \cdot \sigma_b \cdot p \frac{t^{0,41} r^{0,35} h^{2,11}}{(\varphi')^{0,25} \alpha \varepsilon^{1,92}}.$$

В этом выражении значение усталостного коэффициента  $p$  приближается к количеству разрушающих циклов  $u$ :  $p = (0,5, \dots, 0,9)u$ ,  $t$  – глубина резания,  $h$  – предельный износ по задней поверхности.

Если инструментальный материал задан в виде МНП, то предельная работа для системы резания может быть установлена по эмпирической зависимости [7].

Следующая задача – определение работы резания. Это полная работа, расходуемая на деформирование и разрушение обрабатываемого материала в процессе резания, на преодоление сил, возникающих на контактных поверхностях лезвия. Она зависит от схемы сил, действующих при создании в обрабатываемом материале критических напряжений

и от изменений свойств обрабатываемого материала в процессе резания. Не всегда степень пластической деформации в зоне резания соответствует минимально необходимой. Неизвестным остается соотношение между работой изгиба и сжатия. На передней поверхности возможно как сухое трение, так и явление адгезии. Остаются неизвестными значения изменяющихся в процессе резания параметров механических свойств обрабатываемого материала. Все это не позволяет известными методами рассчитать работу, совершаемую в системе резания.

Выход из неразрешимой пока что ситуации заключается в определении работы резания через исходные характеристики обрабатываемого материала и КПД системы резания. Очевидно, что система резания, с точки зрения расхода энергии, всегда будет менее эффективная, чем система, создаваемая при разрыве образца на испытательной машине. Соотношение удельной работы при разрушении образца из обрабатываемого материала и работы резания, необходимой для превращения в стружку единицы объема металла назовем КПД системы резания. При расчетах можно использовать номинальную зависимость КПД от параметров процесса резания. При необходимости повышения точности расчетов для конкретной пары «инструмент-материал» ее можно уточнить.

Таким образом, рассчитать работу в системе резания можно по механическим свойствам обрабатываемого материала с учетом коэффициента полезного действия системы резания. При этом база данных обрабатываемого материала содержит предел прочности при сжатии  $\sigma_b$ , предельное относительное удлинение  $e_b$ , предел пропорциональности  $\sigma_{ну}$  и соответствующее относительное удлинение  $e_{ну}$ . Удельная работа при разрушении образца в процессе стандартного испытания:

$$A_0 = \int \sigma(e) de.$$

Коэффициент полезного действия системы резания определяется по формулам  $\omega = \omega_v \omega_s \omega_t (k_s + 1)$ ;  $\omega_v = v^{0,14}$ ;  $\omega_s = 1,3s^{0,48}$ ;  $\omega_t = 0,7t^{0,15}$ .

А удельная работа в системе резания  $A_p = A_0 / \omega$ .

Коэффициент  $k_s$  учитывает влияние на процесс резания пластических свойств обрабатываемого материала. Для его расчета используется показатель пластичности  $\eta = \frac{e_b}{\sigma_b}$  ( $e_b$  – относительное удлинение в %,  $\sigma_b$  – предел прочности при сжатии в кг/мм<sup>2</sup> или  $e_b$  – безразмерное,  $\sigma_b$  – в ГПа):

$$a = 580\eta^{0,24}; \quad k_s = 0,33 \left( \frac{v + 350}{a} \right) e^{-\left( \frac{v+350}{a} \right)^6}.$$

С увеличением пластичности материала расширяется интервал скоростей резания, при которых наблюдаются значительные пластические деформации, и область максимальных пластических деформаций смещается в сторону высоких скоростей.

Для повышения точности расчетов (для адаптации расчетной программы к реальным условиям обработки) необходимо уточнить зависимость КПД от условий резания [8]. КПД определяется по формуле:

$$\omega = \frac{stA_0}{Ct^x s^y v^z}. \quad (1)$$

Эксперимент заключает в определении зависимости главной составляющей силы резания от параметров режима резания:

$$Pz = Ct^x s^y v^z.$$

Логарифмируя это выражение, представим его в виде полинома:

$$\ln Pz = \ln C + x \ln t + y \ln s + z \ln v.$$

Изменяя значения  $v, s, t$  определяем  $n$  раз соответствующие значения  $Pz$ .

Аппроксимация зависимости  $Pz$  методом наименьших квадратов возможна, в случае

$$\text{если } U = \sum_{i=1}^n [\ln Pz_i - (\ln C + x \ln t_i + y \ln s_i + z \ln v_i)]^2 \rightarrow \min.$$

$$\text{При этом } \frac{\partial U}{\partial (\ln C)} = 0, \frac{\partial U}{\partial x} = 0, \frac{\partial U}{\partial y} = 0, \frac{\partial U}{\partial z} = 0.$$

После дифференцирования функции  $U$  получаем систему из четырех уравнений:

$$\begin{cases} n \ln C + x \sum_{i=1}^n \ln t_i + y \sum_{i=1}^n \ln s_i + z \sum_{i=1}^n \ln v_i = \sum_{i=1}^n \ln Pz_i \\ \ln C \sum_{i=1}^n \ln t_i + x \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 + y \sum_{i=1}^n \ln t_i \ln s_i + z \sum_{i=1}^n \ln t_i \ln v_i = \sum_{i=1}^n \ln Pz_i \ln t_i \\ \ln C \sum_{i=1}^n \ln s_i + x \sum_{i=1}^n \ln t_i \ln s_i + y \sum_{i=1}^n (\ln s_i)^2 + z \sum_{i=1}^n \ln s_i \ln v_i = \sum_{i=1}^n \ln Pz_i \ln s_i \\ \ln C \sum_{i=1}^n \ln v_i + x \sum_{i=1}^n \ln t_i \ln v_i + y \sum_{i=1}^n \ln v_i \ln s_i + z \sum_{i=1}^n (\ln v_i)^2 = \sum_{i=1}^n \ln Pz_i \ln v_i. \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, получаем значения  $\ln C, x, y, z$  для формулы (1).

По предложенной математической модели создана компьютерная программа, позволяющая (рис. 1) рассчитывать КПД системы резания  $\omega$ , главную составляющую силы резания  $Pz$ , температуру резания  $\theta$ , предельную работу резания системы резания  $A$ , стойкость инструмента  $T$ , коэффициент усадки  $K$ , машинное время  $\tau$ , текущее значение работы резания  $A_p$ , расход ресурса работоспособности лезвия  $R$ , износ резца по задней поверхности,  $h_3$ .

Геометрия резца				Размеры заготовки		Режим резания	
Главный угол в плане, $\phi$	60	Длина, L	250	Подача, S	0.07		
Угол при вершине, $\epsilon$	90	Диаметр, d	85	Обороты, n	500		
Вспомогательный угол в плане, $\phi'$	30	Колич. дет., N	1	Глубина рез., t	0.7		
Задний угол, $\alpha$	12	СМЕНИТЬ ЗАГОТОВКУ					
Радиус при вершине, r	0.4						
Предельный износ, h	0.4						
сила	температура	износ	коэф. усадки	ресурс резца	КПД системы		
$P_z = 7$	$\theta = 746^\circ$	$h_3 = 0.06$	$K = 3.4$	$R = 1.59$	$\omega = 0.465$		
скорость	время	$R_z$	$R_a$	стойкость			
$V = 133.5$	$\tau = 7.1$	$R_z = 3.85$	$R_a = 1.17$	$T = 124.1$			
работа резания		$A_p = 6716249$					
предельная работа		$A = 421931826$					

Рис. 1. Исходные данные и результат расчета

По известной геометрии лезвия, параметрам движения и пластическим свойствам материала также рассчитываются параметры шероховатости обработанной поверхности,  $R_a$  и  $R_z$  [5]. Действительная высота шероховатости чаще всего с высотой остаточного гребешка не совпадает. Истинные причины изменения параметров шероховатости поверхности в условиях пластической деформации различной интенсивности следующие.

Всегда при обработке материалов, обладающих в той или иной мере свойствами пластичности, у вершины лезвия создается пластическая зона.

Часть зоны повышенной пластичности, благодаря своей подвижности, может вытесняться на обработанную поверхность. Таким образом, на вершине остаточного гребешка образуется нарост, высота которого ограничивается вспомогательной режущей кромкой. Величина пластического вытеснения металла  $W$  при конкретных значениях геометрии лезвия и подачи определяет высоту сформированной неровности  $h_n$ .

Ориентировочно рассчитать  $h_n$  и стандартные параметры шероховатости можно по известным зависимостям для расчета высоты геометрически образованной неровности  $h_z$ , подставляя вместо значения подачи  $S$  фиктивную подачу  $S_\phi = S + W$ . Если  $W$  выразить в долях от  $S$ , например  $W = k_S S$ , то тогда  $S_\phi = S(1 + k_S)$ .

Для расчета геометрически формируемой высоты остаточного гребешка используются известные формулы [9]:

$$h_z = S \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi^1 \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi^1 + \operatorname{tg} \varphi} + \frac{r}{\operatorname{tg} \varphi^1 + \operatorname{tg} \varphi} \left[ \operatorname{tg} \varphi^1 \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right) + \operatorname{tg} \varphi \left( 1 - \frac{1}{\cos \varphi^1} \right) \right];$$

$$h_z = r - \frac{\sqrt{4r^2 - S}}{2};$$

$$h_z = r(1 - \cos \varphi) + S \cdot \sin \varphi \cos \varphi - \sin \varphi \sqrt{S \cdot \sin \varphi (2r - S \cdot \sin \varphi)};$$

$$h_z = r(1 - \cos \varphi^1) + S \sin \varphi^1 \cos \varphi^1 - \sin \varphi^1 \sqrt{S \sin \varphi^1 (2r - S \sin \varphi^1)}.$$

Микроскопическое исследование обработанной поверхности показывает, что среднее значение радиуса кривизны впадины может быть меньше радиуса при вершине лезвия.

Объяснить подобное явление можно с учетом форм линий скольжения, создаваемых в обрабатываемом материале при резании.

Следовательно, в этом случае шероховатость увеличивается не за счет роста остаточного гребешка, а за счет увеличения глубины впадины. Используя значение радиуса кривизны впадины микронеровности  $R_\phi$  (их можно назвать фиктивными радиусами при вершине лезвия), можно рассчитать параметры шероховатости по зависимостям, созданным для определения высоты геометрически образованной неровности  $h_z$ .

Пластическое изменение формы металла перед лезвием (вспучивание) также сказывается на высоте микронеровности. Это еще один механизм создания пластической составляющей шероховатости. Вклад его намного меньше, чем движение пластической зоны вдоль вспомогательной режущей кромки или уменьшение радиуса кривизны линии скольжения.

Анализ форм микронеровностей с учетом условий стружкообразования позволяет выделить три основные причины создания пластической составляющей. Во-первых, возможен сдвиг соседних слоев в результате разрушения с последующим «залечиванием» в области пластической зоны у вершины лезвия. Эта зона может развиваться и выходить на наружную поверхность заготовки. После прохода лезвия остается на остаточном гребешке в виде нароста. Во-вторых, в результате присутствия пластической области перед вершиной лезвия радиус кривизны линии скольжения, по которой металл отделяется от заготовки, меньше радиуса при вершине лезвия. В-третьих, происходит пластическое изменение остаточного гребешка в результате действия неразрушающих деформаций в основной плоскости.

Геометрически сформированная высота остаточного гребешка в результате присутствия пластической деформации преимущественно увеличивается за счет образования нароста на его вершине, а также за счет углубления впадины образовавшейся неровности при уменьшении радиуса кривизны линии скольжения, по которой стружка отделяется от заготовки.

Исходными данными для расчета являются: материал заготовки, размеры (диаметр, длина); материал и геометрия режущей части инструмента (обозначение МПН); предельный износ по задней поверхности (радиальный износ); параметры относительного движения и расположения инструмента и заготовки (устанавливаются при помощи органов управления станка).

По удельной работе резания легко рассчитывается главная составляющая силы резания:  $P_z = A_p St$ . Предельная работа инструмента позволяет рассчитать его стойкость  $T = \frac{A}{P_z v}$ .

Время, необходимое для полной обработки заготовки,  $\tau = \frac{L}{nS}$  ( $L$  – длина заготовки;  $n$  – частота вращения). Полная работа системы резания  $A_c = A_p v S t \tau$ . Если  $A_c \geq A$ , то это означает, что износ инструмента достиг критического значения.

Температура резания определяется как  $\theta = k (A_p)^q$ . Значения  $k$  и  $q$  определяются экспериментально после не продолжительных испытаний. При проектировании токарной операции необходимо контролировать значение температуры резания, так как при  $\theta \geq \theta_{кр}$  инструментальный материал теряет режущие свойства.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, проектирование перехода сводится к достижению на экране необходимых значений стойкости инструмента и параметров шероховатости поверхности за счет изменения и контроля параметров режима резания и основных характеристик процесса точения.

Можно выделить три основные причины создания пластической составляющей шероховатости: сдвиг слоев пластической зоны у вершины лезвия с последующим их выходом на наружную поверхность заготовки; уменьшение радиуса кривизны линии скольжения, по которой припуск отделяется от заготовки; пластическое изменение остаточного гребешка.

В базу данных обрабатываемых материалов входят параметры зависимостей напряжений от деформаций, полученных при стандартных испытаниях на прочность, а также коэффициенты и показатели степени в выражении для расчета температуры резания. База данных инструментальных материалов состоит из пределов прочности при сжатии, критических температур и предельных чисел циклов используемых материалов.

При проектировании операции точения по предложенной методике, обеспечение стойкости инструмента и параметров шероховатости обработанной поверхности достигается без совместных стойкостных испытаний обрабатываемого и инструментального материалов для создания нормативно-справочной литературы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байкалова В. Н. Расчет режимов резания / В. Н. Байкалова, А. М. Колокатов, И. Д. Малинина. – М. : МГАУ им. В. П. Горячкина, 2000. – 46 с.
2. Мироненко И. Г. Расчет режимов резания / И. Г. Мироненко. – Новосибирск : НГАВТ, 2007. – 63 с.
3. Долматовский Г. А. Справочник технолога по обработке металлов резанием / Г. А. Долматовский. – М. : Машиз, 1962. – 1236 с.
4. SecoCut – программа расчёта режимов резания [Электронный ресурс]. – Режим доступа к программе: <http://seco.sumy.ua/secocut.php>.
5. Швец С. В. Системный анализ теории резания / С. В. Швец. – Сумы : Изд-во СумГУ, 2009. – 212 с.
6. Швец С. В. Математическая модель процесса резания при точении / С. В. Швец // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск, 2010. – № 26. – С. 286–292.
7. Швец С. В. Новая концепция расчетов характеристик процесса резания / С. В. Швец // Вестник машиностроения. – 2010. – № 5. – С. 51–56.
8. Shvets S. V. Assessment of Physical Efficiency of the Cutting System / S. V. Shvets // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. – 2011. – Vol. 3, No 1. – P. 33–41.
9. Исаев А. И. Влияние материала режущей части инструмента на чистоту обработанной поверхности / А. И. Исаев // Чистовая обработка конструкционных металлов. – М. : Машиз, 1951. – С. 66–69.