

Вычислительная система для определения режимов резания

С. В. Швець¹⁾, У. С. Швець²⁾^{1), 2)} Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007, Сумы, Украина

Article info:

Paper received:

15 May 2015

The final version of the paper received:

18 May 2015

Paper accepted online:

05 November 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ shvets46@yandex.ua²⁾ shvets46@yandex.ua

В статье рассмотрена физическая модель процесса резания, которая содержит новые для теории резания понятия, такие как КПД системы резания, предельная работа инструмента, показатель пластичности обрабатываемого материала. Созданная на этой основе математическая модель позволяет не только представлять имеющиеся знания из области обработки металлов, но и присоединять к ним новые. Предложена компактная расчетная программа, не требующая больших баз данных, позволяющая вычислять режимы резания без любых предварительных стойкостных испытаний инструмента и обрабатываемых материалов. Проектирование происходит методом выбора оптимальных параметров механической обработки при работе виртуального оборудования.

Ключевые слова: сила резания, работа резания, КПД, стойкость инструмента, режим резания, шероховатость.

1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с недостаточным уровнем исследования явлений при формировании стружки не существует достоверной физической модели данного процесса. Поэтому невозможно сформировать математические выражения, достоверные в любых условиях обработки. Количество неизвестных параметров, к сожалению, превосходит количество уравнений, отражающих физические явления в зоне резания. В связи с этим широко применяются эмпирические выражения, которые являются, по существу, «чёрным ящиком». Такие модели требуют значительного количества эмпирических данных и являются справедливыми в пределах проведенного эксперимента.

Очень часто режимы резания устанавливаются по аналогии, на основании практического опыта. В результате нет никаких неоспоримых доказательств того, что они оптимальны как с точки зрения работоспособности инструмента и производительности процесса, так и с точки зрения создания необходимых параметров качества обработанной поверхности.

При проектировании процесса резания обращают внимание на следующие его параметры: режим резания – V, s, t ; геометрию лезвия – $\gamma, \alpha, \phi, \lambda, \beta, r_B, \rho$; стойкость инструмента – T ; машинное время – τ ; параметры шероховатости обработанной поверхности – Ra, Rz ; температуру резания – θ ; коэффициент усадки стружки – K ; составляющие силы резания – P_x, P_y, P_z ; напряжение – σ ; износ лезвия – h ; форму и изменения нароста на вершине лезвия – H ; свойства обрабатываемого и инструментального материалов – O, I .

Элементы множества

$D = \{V, s, t, \gamma, \alpha, \phi, \lambda, \beta, r_B, \rho, O, I\}$ являются исходными данными. При осуществлении процесса только свойства обрабатываемого материала O остаются постоянными, но только в случае, если он не подвергается предварительному физическому воздействию (такому, как высокие и низкие температуры, пластические деформации и т. д.).

В процессе проектирования технологического процесса стремятся обеспечить необходимую стойкость T , параметры шероховатости обработанной поверхности Ra, Rz , максимальную производительность τ и минимальную стоимость механической обработки C . Целью процесса проектирования является оптимизация значений элементов множества $E = \{T, Ra, Rz, \tau, C\}$.

Элементы множества $Q = \{\theta, K, P_x, P_y, P_z,$

$\sigma, h, H\}$ используются для контроля и анализа процесса проектирования, обобщения практических наблюдений и для объяснения результатов научных исследований.

Традиционно множество E формируется на основе эмпирических выражений, которые не отражают физические модели, ограничены значениями параметров их создания и использованием больших баз данных.

Причина этого кроется в том факте, что процесс резания является сложной комбинацией упругих и предельных пластических деформаций, вызывающих разрушение материала. В зоне резания создается неоднородная деформация, после разрушения в

локальной области там же, под действием высоких температур и давлений, возможна адгезия. Поэтому любая известная теория деформаций и разрушения не может полностью описать конкретный процесс формирования стружки, поскольку каждая ограниченная область в зоне резания характеризуется только ей присущим состоянием.

Таким образом, у системы резания есть следующие координаты:

$$Co = (D, E, Q).$$

Связать их между собой математическими зависимостями – значит создать математическую модель процесса резания.

Целью настоящей статьи является совершенствование физической модели процесса резания для уравнивания числа неизвестных и количества уравнений, образующих его математическую модель.

2. ОГРАНИЧЕНИЕ РАБОТЫ ИНСТРУМЕНТА

Чтобы уравнивать количество неизвестных параметров и количество уравнений в математической модели процесса резания, необходимо совершенствовать физическую модель. Если на современном уровне развития науки о резании металлов невозможно соединить достижения термодинамики и статистической физики при математическом моделировании, тогда следует изменить физическую модель. Необходимо использовать такой комплексный параметр, который объединяет положения статистики и термодинамики.

Таким параметром является работа. Лезвие заданной формы из конкретного материала способно до определенной величины износа выполнить работу. Предельная работа пластин стандартных форм и размеров из различных материалов может быть установлена экспериментально [1, 2, 3].

Вычисление предельной работы лезвия основывается на следующих соображениях. В правильно выбранном инструментальном материале, при соответствующих условиях обработки и режимах резания износ инструмента главным образом зависит от усталостных явлений, которые развиваются под влиянием циклического нагружения микронеровностей его поверхности объемами обрабатываемого материала. При этом выполняется некоторая работа. Элементарная работа, выполненная при разрушении слоя инструментального материала, равна:

$$dA = \sigma_e \cdot u \cdot dW,$$

где σ_e – предел прочности инструментального материала;

u – предельное, разрушающее значение циклов для инструментального материала;

W – разрушенный в результате износа объем.

Отсюда возможно записать, что:

$$A = \sigma_e u \int dW.$$

Для инженерных вычислений изношенного объема используем формулу [4]

$$W = 7,38 \cdot 10^5 \frac{t^{0,41} (r_g)^{0,35} h^{2,11}}{(\varphi^1)^{0,25} \alpha \varepsilon^{1,92}}.$$

где φ^1 – вспомогательный угол в плане;

$\varepsilon = 180 - (\varphi + \varphi^1)$ – угол при вершине.

Таким образом, при заданном значении износа по задней поверхности h , предельное значение работы инструмента, а значит и всей системы резания, вычисляется как

$$A = 7,38 \cdot 10^5 \frac{t^{0,41} (r_g)^{0,35} h^{2,11}}{(\varphi^1)^{0,25} \alpha \varepsilon^{1,92}} \cdot \sigma_e \cdot u. \quad (1)$$

В данной формуле значение коэффициента u может быть уменьшено, если механизм износа отличается от усталостного. Например, имеют место повышенные абразивные свойства обрабатываемого материала, близкая к критической температура в зоне резания или другие состояния.

3. РАБОТА СИСТЕМЫ РЕЗАНИЯ

В настоящее время невозможно вычислить точное значение работы совершаемой системой резания. Учитывая коэффициент полезного действия системы резания и удельную работу разрушения образца из обрабатываемого материала при стандартных испытаниях на прочность, можно получить приближенное значение работы, совершаемой в процессе резания. Удельная работа разрушения образца в ходе стандартного испытания

$$A_0 = \int_0^{\varepsilon_e} \sigma(e) de, \quad (2)$$

где σ – напряжение;

e – относительная деформация;

ε_e – предельная относительная деформация.

Из-за сложности процессов, происходящих при отрыве стружки от поверхности заготовки, мощность резания превышает мощность разрыва испытываемого образца. Отношение удельной работы разрушения образца в ходе стандартного испытания (2) к удельной работе системы резания (которая равна $A_1 = \frac{P_z}{s \cdot t}$) можно назвать коэффициентом полезного действия системы резания (КПД) ω :

$$\omega = \frac{s \cdot t}{P_z} \int_0^{\varepsilon_e} \sigma(e) de. \quad (3)$$

Числовое значение коэффициента полезного действия системы резания – показатель эффективности потребления энергии.

Точное значение P_z в формуле (3) для конкретных условий механической обработки может быть установлено только экспериментально. В связи с этим расчет номинального значения КПД предлагается выполнять по эмпирической формуле

$$\omega = 0,91 \cdot \frac{V^{0,14} \cdot s^{0,48} \cdot t^{0,15}}{k_s (1 - k_R)}, \quad (4)$$

где k_s, k_R – коэффициенты, учитывающие влияние пластичности обрабатываемого материала на процесс резания (будут рассмотрены ниже).

Как будет показано далее, из-за особенностей процесса резания точность вычисления параметров режима резания невысока. Поэтому результаты, полученные при помощи формулы (4), можно считать удовлетворительными. Таким образом, удельная работа системы резания вычисляется исходя из механических свойств обрабатываемого материала и КПД системы резания:

$$A_1 = \frac{A_0}{\omega}. \quad (5)$$

4. ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА

Зависимости коэффициента усадки стружки и параметра шероховатости обработанной поверхности от скорости резания при точении стали 45 показаны на рис. 1. С увеличением скорости резания шероховатость и коэффициент усадки стружки уменьшаются. Очевидно, что такая зависимость параметра Ra и усадки стружки от скорости резания связана с уменьшением пластической деформации в зоне резания.

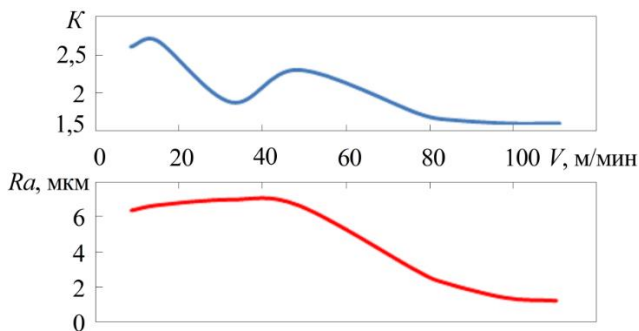


Рис. 1. Влияние скорости резания на параметр шероховатости поверхности Ra и коэффициент усадки стружки K : Обрабатываемый материал – сталь 45, подача $s = 0,26$ мм/об; глубина резания $t = 0,5$ мм

С увеличением пластичности обрабатываемого материала расширяется интервал скоростей резания, в пределах которого пластические деформации особенно развиты. Влияние скорости резания и свойств материала на упомянутые выше коэффициенты k_s и k_R аппроксимируется следующими выражениями:

$$k_s = \frac{0,33 \cdot (V + 350)}{(580\eta^{0,24}) \cdot \exp\left(\left(\frac{V + 350}{580\eta^{0,24}}\right)^6\right)}; \quad k_R = 1 - 2,5 \cdot k_s,$$

где $\eta = e_s / \sigma_s$ – показатель пластичности обрабатываемого материала [2]; ГПа⁻¹ (σ_s – предел прочности).

Существуют два основных фактора при резании, связанных с механизмом формирования стружки, которые влияют на параметры шероховатости обработанной поверхности: геометрический (набор геометрических элементов и параметров движения лезвия) и пластический (пластическое развитие деформации в зоне резания). Очевидно, что шероховатость формируется также под влиянием микрогеометрии режущих кромок и вибраций, но данные факторы не являются следствием процесса резания, а определяются качеством инструмента, оборудования и приспособлений.

Для вычисления геометрически сформированной высоты шероховатости используются известные формулы [5]:

$$Rz = s \cdot \frac{\tan \varphi^1 \cdot \tan \varphi}{\tan \varphi^1 + \tan \varphi} + \frac{r_g}{\tan \varphi^1 + \tan \varphi} \times \left[\tan \varphi^1 \left(1 - \frac{1}{\cos \varphi} \right) + \tan \varphi \left(1 - \frac{1}{\cos \varphi^1} \right) \right], \quad (6)$$

$$Rz = r_g - \frac{\sqrt{4(r_g)^2 - s}}{2}, \quad (7)$$

$$Rz = r_g (1 - \cos \varphi) + s \cdot \sin \varphi \cos \varphi - \sin \varphi \sqrt{s \cdot \sin \varphi (2r_g - s \cdot \sin \varphi)}, \quad (8)$$

$$Rz = r_g (1 - \cos \varphi^1) + s \cdot \sin \varphi^1 \cos \varphi^1 - \sin \varphi^1 \sqrt{s \cdot \sin \varphi^1 (2r_g - s \cdot \sin \varphi^1)}. \quad (9)$$

Если ось x совмещена со средней линией профиля поверхности, то среднее арифметическое отклонение профиля определено формулой

$$Ra = \frac{1}{l} \left(\int_0^{x_a} |y(x)| dx + \int_{x_a}^{x_b} |y(x)| dx + \dots + \int_{x_n}^l |y(x)| dx \right), \quad (10)$$

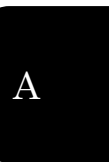
где l – длина базовой линии;

x_a, x_b, \dots, x_n – координаты, ограничивающие функцию $y(x)$ на оси x .

Создан алгоритм [2] для автоматического выбора одной из указанных выше формул для расчета параметра шероховатости без учета влияния пластических деформаций. Геометрически шероховатость сформирована в комбинации геометрии лезвия и движения подачи.

На высоких скоростях резания, когда пластическая деформация является незначительной, расчетные значения параметра шероховатости достаточно хорошо соответствуют экспериментальным. С увеличением степени пластической деформации зоны резания (при малых скоростях резания) экспериментальные значения резко отклоняются от расчетных.

Принимая во внимание состояние стружкообразования [2, 6, 7] и анализируя формы профиля поверхности, можно выделить три основных причины влияния пластической деформации на окончательное создание высоты микронеровности. Во-первых, сдвиг слоев металла в результате разрушения с последующим «залечиванием» в области пластической зоны у вершины лезвия. Эта зона может развиваться



и выходить на поверхность детали. После прохода лезвия часть ее закрепляется на остаточном гребешке. На вершине микронеровности образуется нарост, высота которого ограничена вспомогательной режущей кромкой лезвия. Значение измененной высоты микронеровности определяется коэффициентом k_s .

Во-вторых, в результате наличия пластической области на передней поверхности лезвия радиус кривизны линии скольжения, по которой металл отделяется от заготовки, меньше радиуса вершины лезвия.

При точении стали 45 со скоростью резания $V = 49$ м/мин и больше наросты на микронеровности отсутствовали. Однако радиусы кривизны созданных впадин отличались от радиуса вершины (рис. 2). Средний радиус кривизны впадин был $R = 0,22$ мм (радиус вершины лезвия $r_B = 0,8$ мм). Таким образом, радиус кривизны линии скольжения, по которой стружка отделяется от заготовки, в k_R раз больше радиуса вершины r_B . Следовательно, в данном случае увеличение шероховатости происходит не за счет высоты микронеровности, а за счет увеличения глубины ее впадины.

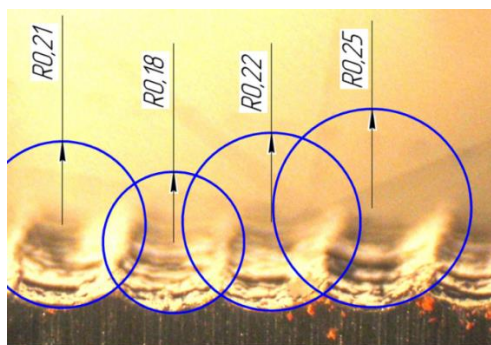


Рис. 2. Профиль микронеровности: $V = 49$ м/мин; $s = 0,38$ мм/об; $t = 0,3$ мм; $r_B = 0,8$ мм; $\varphi = 93^\circ$; $\varphi_1 = 27^\circ$; обрабатываемый материал – сталь 45; инструментальный материал – T15K6

Вычислить Rz и Ra при значительной пластической деформации в зоне резания возможно, используя ранее предлагаемые зависимости (6–10), приняв вместо заданной подачи s фиктивное значение подачи:

$$s_{\text{фискт}} = s(1 + k_s), \quad (11)$$

а вместо радиуса вершины лезвия фиктивный радиус

$$R_{\text{фискт}} = r_B \cdot k_R. \quad (12)$$

В-третьих, наблюдается пластическое изменение остаточного гребешка в результате неразрушающей деформации в основной плоскости. Однако, данный фактор настолько ничтожен, по сравнению с первыми двумя, что им можно пренебречь.

5. КАСКАДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Механические свойства материала и размеры заготовки, геометрия реза, предельный износ по зад-

ней поверхности, параметры движения, расположение инструмента и заготовки – исходные данные для вычисления (рис. 3).

Значение A_0 вычисляется по формуле (2), КПД системы резания – по (3) или (4).

Удельная работа резания рассчитывается по формуле (5). Далее легко вычислить главную составляющую силы резания: $P_z = A_1 \cdot s \cdot t$. Посредством выражения (1) определена максимальная работа системы резания A , что позволяет вычислять стойкость инструмента $T = A / (P_z \cdot V)$. По формулам (6–10), принимая во внимание влияние пластической деформации (11, 12), вычисляются Rz и Ra .

Время, необходимое для полной механической обработки заготовки:

$$\tau = L / (n \cdot s),$$

где L – длина заготовки;
 n – частота вращения.

Таким образом, основные параметры системы резания и элементы множества E определены. Элементы множества Q рассчитываются для контроля процесса проектирования и для анализа его результата. Полная работа резания

$$A_c = A_1 \cdot V \cdot s \cdot t \cdot \tau.$$

Если $A_c \geq A$, это означает, что износ инструмента достиг критического значения. Расход ресурса работоспособности лезвия $R_w = 100(A_c / A)$.

Потребление ресурса может быть оценено по усадке стружки. Согласно [2, 8] коэффициент усадки стружки функционально связан с удельной работой резания A_1 и с пределом пропорциональности обрабатываемого материала $\sigma_{mц}$:

$$K = \exp\left(\chi + 1 \sqrt{\frac{A_1}{2\sigma_{mц}}}\right),$$

где $\chi = (\ln \sigma_e - \ln \sigma_{mц}) / (\ln e_e - \ln e_{mц})$ – показатель упрочнения обрабатываемого материала (σ_e – предел прочности, e_e – разрушающая деформация, $e_{mц}$ – максимальная упругая деформация).

При выборе материала инструмента, кроме механических свойств, необходимо учитывать его критическую температуру $\theta_{кр}$. Температура резания определена как $\theta = k(A_1)^q$. Значения k и q установлены экспериментально. При проектировании операции обработки резанием необходимо управлять значением температуры резания (см. рис. 3), поскольку при $\theta \geq \theta_{кр}$ инструментальный материал теряет свои режущие свойства.

Таким образом, механические свойства материала инструмента и обрабатываемого материала позволяют прогнозировать функциональное соотношение между основными характеристиками процесса резания.

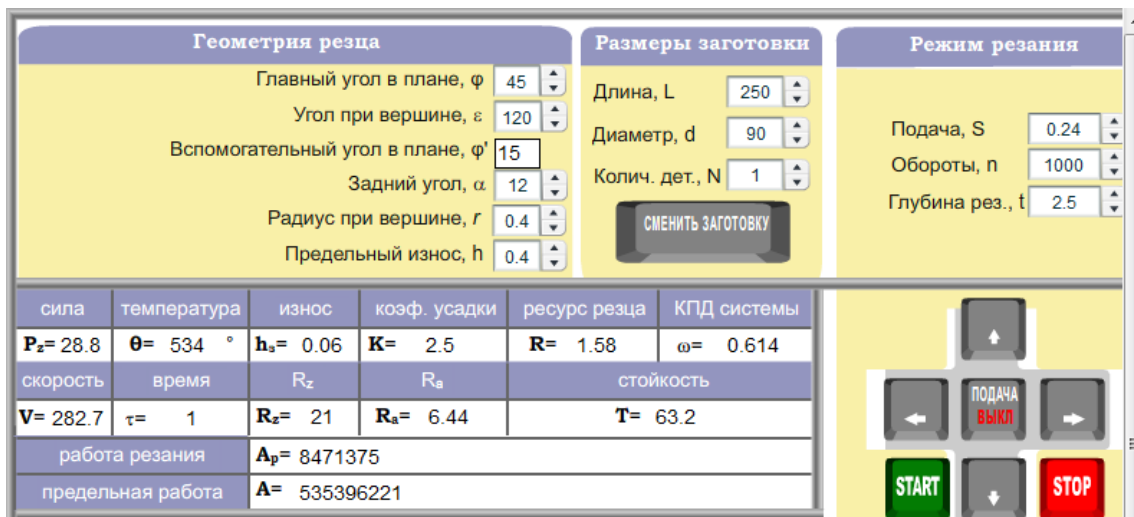


Рис. 3. Расчет характеристик обработки резанием

6. НАДЕЖНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Известно, что результаты вычислений параметров обработки резанием подлежат корректировке на рабочем месте. Несмотря на то, что современные технологии позволяют производить конструкционные и инструментальные материалы с механическими свойствами, мало отличающимися от номинальных значений, интервал изменения стойкости инструмента при одинаковых условиях эксплуатации является довольно большим. Причина состоит в том, что взаимодействия в системе резания образуют стохастический процесс $\{M(\tau, z), \tau \in T, z \in Z\}$, определяемый семейством случайных величин Z , которые являются функцией времени T .

Например, если во время одного эксперимента измерить значения сил (в пределах точности устройства измерения), то замена испытательного стенда приводит к значительным отличиям среди результатов эксперимента. Значения сил могут отличаться в несколько раз и при неизменных условиях испытаний.

Оказалось, что результаты эксперимента по определению зависимости главной составляющей силы резания от скорости резания могут быть аппроксимированы следующим выражением [9]:

$$P_z(V) = P_0 + P_a \sin\left(\frac{2\pi}{V_p}(V + V_0)\right),$$

где P_0, P_a – среднее значение и амплитуда функции $P_z(V)$;

V_0, V_p – начальная фаза и период функции $P_z(V)$.

Повторный эксперимент при тех самых условиях на другом оборудовании показал, что амплитуда и период синусоиды не изменяются. Подвержены изменениям координата средней линии и начальная фаза синусоиды. Это означает, что наблюдается различие в величине потребляемой

механической энергии системой резания при одинаковых условиях резания. Установленный факт был ранее доказан во время экспериментов А. И. Исаева, В. Ф. Боброва [10, 11].

Амплитуда аппроксимирующей синусоиды зависит от конкретных условий резания. Зависимости для черных металлов имеют период $V_p \approx 0,5$ м/с.

Положения средней линии и начальной фазы синусоиды чрезвычайно чувствительны к любым изменениям (шероховатость передней поверхности, химический состав инструментального материала и т. д.). Это главные причины дисперсии экспериментальных значений сил резания и стохастичности процесса резания.

ВЫВОД

Принимая во внимание стохастичность, присущую процессу резания, приходим к выводу, что расчетные и практические результаты полностью совпадать не могут. И эта проблема не разрешима до тех пор, пока не узнаем механизм влияния скорости резания на формирование уровня внутренней энергии при целенаправленном разрушении в обработанном материале.

Однако преимущество новой методики вычисления состоит в том, что предлагается гибкий математический подход, удобный для автоматизированных вычислений. Это особенно важно, так как математическая модель позволяет вычислять характеристики процесса резания без совместных стойкостных испытаний инструментальных и обрабатываемых материалов. Кроме того, расчетный комплекс, созданный на основе предложенной модели, способен к адаптации в конкретных производственных условиях на рабочем месте. Если вычисления будут основаны на измерениях силы резания во время резания, то их точность будет определена только отличием механических свойств материала инструмента от их средних статистических значений.

На основе передовой физической модели процесса резания была разработана математическая модель. Мо-

дель содержит новые для теории резания термины, такие как: КПД системы резания, предельная работа инструмента, показатель пластичности обрабатываемого материала.

Созданная математическая модель информативна, она позволяет не только представлять необходимое знание из теории резания металлов, но и дополнять их новыми. Расчетная программа компактна, она не требует обширных баз данных. База данных обрабатываемых материалов включает параметры диаграммы «растяжение – сжатие», полученной при стандартных испытаниях на прочность, а также коэффициенты и показатели в выражении для вычисления температуры резания. Например, для

стали 45: $\sigma_s = 0,7$ ГПа, $e_s = 0,55$, $\sigma_{нп} = 0,36$ ГПа, $e_{нп} = 0,0017$; $k = 11 \cdot 10^4$, $q = -1,2$. Параметры диаграммы могут быть представлены в форме зависимости: $\sigma = \sigma(e)$.

База данных инструментальных материалов включает сопротивление сжатию, критическую температуру и предельное число циклов. Для Т15К6: $\sigma_s = 1,1$ ГПа, $\theta_{сп} = 800$ °С, $u = 105$.

Предложенная техника проектирования – это выбор приемлемых параметров механической обработки при включении виртуального оборудования.

The computing system for definition of conditions of cutting

S. V. Shvets¹⁾, U. S. Shvets²⁾

^{1), 2)} *Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine*

The purpose of the present paper is perfecting of physical model of cutting process for an equilibration of amount of unknown parameters and amount of the equations organizing its mathematical model.

The modern level of metal cutting science does not merge achievements of thermodynamics and the statistical physics at mathematical modelling. This require to change physical model. It is necessary to use such a complex factor which merges statistics and thermodynamics laws. Work is such a complex parameter and the proposed mathematical model uses this parameter as a criteria of cutting edge workability. The advantage of new calculation concept is that the flexible mathematical approach is offered convenient for the automated calculations. It is especially important, the mathematical model allows to calculate characteristics of the cutting process at turning without any joint tests of the tool and workpiece materials.

The created mathematical model is informative. It allows not only representing necessary knowledge from the metal cutting theory, but it allows joining the new knowledge. The program for calculation is compact. It does not demand extensive databases. The workmaterial database includes the parameters of stress-strain curve gained at the standard tensile tests, as well as parameters of expression for the cutting temperature calculation.

Key words: cutting force, cutting work, efficiency, tool life, cutting conditions, roughness.

Обчислювальна система для визначення режимів різання

С. В. Швець¹⁾, У. С. Швець²⁾

^{1), 2)} *Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007*

Щоб узгодити кількість невідомих параметрів і кількість рівнянь у математичній моделі процесу різання, необхідно поліпшити його фізичну модель. На сучасному рівні розвитку теорії різання металів неможливо під час математичного моделювання з'єднати досягнення термодинаміки й статистичної фізики, тому необхідно використовувати деякий комплексний параметр, здатний поєднати правила статистики та термодинаміки. Таким комплексним параметром є робота. Запропонована математична модель дозволяє обчислювати режим процесу різання без додаткових стійкісних випробувань інструментального та оброблюваного матеріалів. Крім того, розрахункова система здатна до адаптації в конкретних виробничих умовах. Якщо обчислення базуватимуться на вимірах сили різання в процесі різання, то їх точність буде визначатися лише відмінністю механічних властивостей матеріалу інструменту від їх середніх статистичних значень.

Створена математична модель містить нові для теорії різання поняття, такі як: ефективність системи різання, гранична робота інструменту, показник пластичності оброблюваного матеріалу. Вона інформативна, дозволяє не лише подавати необхідні знання з теорії різання, а й приєднувати їх новими. Розрахункова програма компактна, не вимагає великих баз даних.

Ключові слова: сила різання, робота різання, КПД, стійкість інструменту, режим різання, шорсткість.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Shvets S. V. Calculation of Cutting Conditions / S. V. Shvets // Sverkhtverdye Materialy, 2001. – Vol. 1. – P. 88–91.
2. Швець С. В. Системный анализ теории резания / С. В. Швець. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2009. – 212 с.
3. Shvets S. V. New Calculation of Cutting Characteristics / S. V. Shvets // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30. – No. 5. – P. 478–483.
4. Швець С. В. Математическая модель процесса резания при точении / С. В. Швець // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сборник научных трудов. – 2010. – № 26. – С. 286–292.

5. Исаев А. И. Влияние материала режущей части инструмента на чистоту обработанной поверхности / А. И. Исаев // Чистовая обработка конструкционных металлов. – М.: Машгиз, 1951. – С. 66–69.

6. Швець С. В. Расчет шероховатости обработанной поверхности при точении / С. В. Швець // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2009. – № 4(18). – С. 27–32.

7. Швець С. В. Определение параметров шероховатости при точении / С. В. Швець, М. Б. Яненко // Вісник Сумського державного університету. – 2006. – №12 (96). – С. 116–124.

8. Швець С. В. Системний підхід до теорії різання / С. В. Швець. – Київ: УМК ВО, 1992. – 120 с.

REFERENCES

1. Shvets S. V. (2001). Calculation of Cutting Conditions. *Sverkhtverdye Materialy*. Vol. 1.
2. Shvets S. V. (2009). *Sistemnyy analiz teorii rezaniya*. Sumy: SumSU. 212 p. [in Russian].
3. Shvets S. V. (2010). *Russian Engineering Research*. Vol. 30. Issue 5.
4. Shvets S. V. (2010). *Nadiynist instrumentu ta optymizatsiya tekhnologichnykh system*. Vol. 26. [in Russian].
5. Isaev A. I. (1951). In *Chistovaya obrabotka konstruktsionnykh metallov*. Pp. 66-69 [in Russian].
6. Shvets S. V. (2009). *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*. Vol. 4(18). [in Russian].
7. Shvets S. V., Janenko M. B. (2006). *Visnyk SumDU*. Vol. 12. [in Russian].
8. Shvets S. V. (1992). *Systemnyy pidkhhid do teorii rizannya*. Kiev. NMKVO. 120 p. [in Ukraine].
9. Shvets S. V. (1996). *Problemy Prochnosti*. Vol. 3. [in Russian].
10. Isaev A. I. (1957). *Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na ostatochnye napryazheniya v poverkhnostnom sloe pri tochenii konstruktsionnykh staley*. Moscow: FVINTI. 81 p. [in Russian].
11. Bobrov V. F. (1975). *Osnovy teorii rezaniya metallov*. Moscow: Mashinostroenie. 344 p. [in Russian].