

К разработке аналитической модели косоугольного резания

д.т.н. Оленин Л.Д.¹, д.т.н. Сторчак М.Г.², Леквишвили М.А.¹
¹Университет машиностроения +7(916)9674832, olenin@mail.ru

²Институт металлорежущих станков Штутгартского университета, Германия
 +49(0)71168583831, michael.storchak@ifw.uni-stuttgart.de

Аннотация. В работе представлены результаты анализа косоугольного резания как достаточно общего случая процесса резания. Анализ выполнен энергетическим методом с использованием экстремальных положений механики сплошной среды. Процесс резания рассматривается в работе как совокупность двух одновременно протекающих актов: стружкообразования и непрерывного образования новых поверхностей. Таких поверхностей выделяется, две: обработанная поверхность заготовки и наружная поверхность стружки. Кроме того, в работе приводятся результаты сопоставительных расчетов силы резания, выполненных методом конечных элементов в среде *DEFORM-3D*, а также результаты экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных условиях.

Ключевые слова: косоугольное резание, скорость резания, деформационное упрочнение, работа распространения трещины, скорость схода стружки, контактное трение, мощность пластической деформации, давление резания.

Обозначения, встречающиеся в тексте:

q_3^n – нормальное давление на задней поверхности режущего клина;

μ – коэффициент трения;

$\dot{\varepsilon}_i$ – интенсивность скорости деформации;

$\dot{\varepsilon}_x; \dot{\varepsilon}_y; \dot{\varepsilon}_z$ – линейные компоненты скорости деформации;

$\dot{\gamma}_{xy}; \dot{\gamma}_{zx}; \dot{\gamma}_{zy}$ – угловые (сдвиговые) компоненты скорости деформации;

Δt_1 – время, за которое отделяемая от заготовки частица пересекает физический слой сдвига, который является очагом деформации в зоне стружкообразования;

$\Delta \bar{\varepsilon}_i$ – приращение итоговой деформации при стружкообразовании;

$\bar{\gamma}_{zy}$ – деформация относительного сдвига в плоскости *ZY*;

$\Delta \varepsilon; (\Delta \varepsilon_i)$ – приращение деформации при стружкообразовании;

Z – относительная скорость схода стружки (в долях от скорости резания), соответствующая минимальному значению q_{zl} ;

q_{zl} – доля давления резания, подводимая через переднюю поверхность;

Δq_ε – доля давления резания, связанная с деформацией в плоскости сдвига;

Δq_p – доля давления резания, связанная с образованием новых поверхностей;

C_p – приведенный коэффициент контактного трения на передней поверхности;

B – константа, характеризующая склонность материала к упрочнению;

$\Delta \varepsilon$ – накопленная деформация в стружке;

a_p – удельная работа распространения трещины [кгс/мм];

a_r – ударная вязкость, определенная по испытанию образца с надрезом $r = 0,3$ мм, [кгс/мм];

a_R – ударная вязкость, определенная по испытанию образца с надрезом $R = 0,6$ мм, [кгс/мм];

R, r – значения радиусов надрезов [мм];

σ_B – предел прочности обрабатываемого материала [кгс/мм²];

a и *b* – глубина и ширина резания режущей кромки [мм];

ρ – угол трения;

P_z – сила резания [кгс];

$\lambda, \alpha, \varphi, \varphi_1$ – соответственно: угол наклона главной режущей кромки; главный задний угол; главный угол в плане; вспомогательный угол в плане;

HV - твердость по Бринеллю;

V - скорость резания [м/мин].

Расчет режимов резания традиционно вели с использованием эмпирических зависимостей. Несмотря на надежность и кажущуюся универсальность метода, попытка учета дополнительных факторов вызывает лавинообразное увеличение количества опытов, а применяемый аппарат степенных функций не обеспечивает описания влияния всех факторов. Применение бурно развивающихся в последние три десятилетия конечно-элементных методов также существенно ограничивается отсутствием реологических моделей обрабатываемых материалов, описывающих как деформационное и скоростное упрочнение, так и разупрочнение, обусловленное температурным фактором. Широкое практическое применение метода сдерживается также отсутствием моделей контактного трения и недостаточного быстродействия расчетного процесса.

В этой связи представляется целесообразным и обоснованным для повышения информативности и ускорения расчетов процессов резания в качестве базовых использовать физические уравнения, полученные на основе аналитического исследования механики деформирования. Вместе с тем известные модели, как правило, дают заниженные значения силы резания, так как учитывают не все составляющие мощности резания. В частности они не учитывают мощности разрушения, связанной с образованием новых поверхностей при отделении срезаемого слоя от заготовки, а также не учитывают влияние угла наклона главной режущей кромки на деформацию срезаемого слоя, деформационное упрочнение и, как результат, на составляющие силы резания при стружкообразовании.

Обнадеживающие результаты получены при исследованиях механики процесса резания как непрерывного процесса пластического деформирования материала, обладающего деформационным упрочнением с использованием энергетического метода анализа [1] [2].

В предлагаемой работе представлены результаты анализа процесса косоугольного резания материала, обладающего деформационным упрочнением, как достаточно общего случая процесса резания. Анализ выполнен энергетическим методом с использованием экстремальных положений механики сплошной среды и положений теории пластического течения материала.

Базовые положения и допущения, принятые в работе.

Процесс резания рассматривается в работе как совокупность двух одновременно протекающих актов непрерывного пластического деформирования материала, обладающего деформационным упрочнением – стружкообразования и непрерывного образования двух новых поверхностей. Таких поверхностей две: обработанная поверхность заготовки и наружная поверхность стружки.

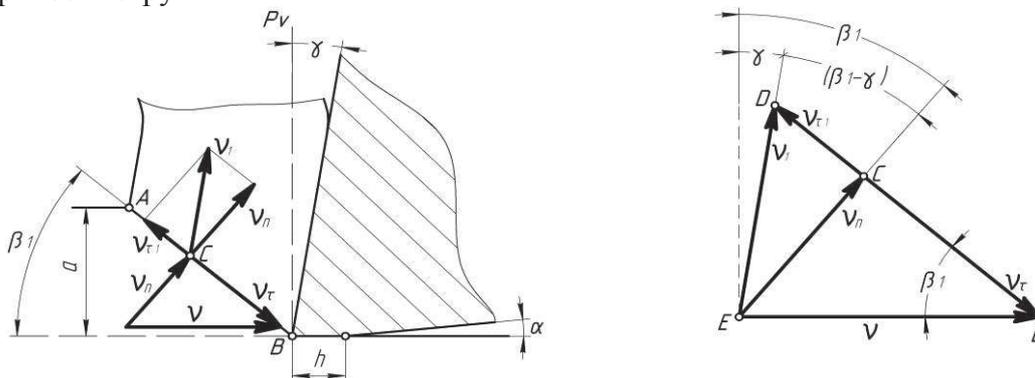


Рисунок 1. Схема стружкообразования и план скоростей в плоскости ZY [1]

Поле скоростей при стружкообразовании разрывно и определяется на основе схемы резания с единой плоскостью сдвига (рисунок 1). Границей разрыва скоростей является плоскость сдвига, на ней тангенциальные скорости терпят разрыв, а нормальная скорость сохраняет свое значение.

Новые поверхности при стружкообразовании образуются в плоскости резания за счет

распространения трещины в направлении вектора скорости резания.

Обрабатываемый материал считается жестко-пластичным, обладающим деформационным упрочнением.

Трение на передней и задней поверхностях режущего клина ограничено предельной величиной и подчиняется закону Амонтона-Кулона, то есть пропорционально нормальному давлению в контакте. Контакт по задней поверхности режущего клина ограничивается площадками износа.

Для определения нормального давления на задней поверхности режущего клина, использовано решение задачи о вдавливании плоского негладкого пуансона в полупространство [3]:

$$q_3^n = \frac{1 + 0,5\pi}{1 - 1,36\mu}. \quad (1)$$

В соответствии с теорией пластического течения в общем случае интенсивность скорости деформации равна:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y)^2 + (\dot{\varepsilon}_y - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_x)^2 + \frac{3}{2}(\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{zx}^2)}. \quad (2)$$

В случае прямоугольного резания, когда угол наклона главной режущей кромки равен нулю, при стружкообразовании имеет место так называемая «плоская» деформация сдвига. В этом случае три линейные и два из трёх сдвиговых компонента скорости деформации равны нулю. Это достаточно распространённый, но частный случай резания.

В случае косоугольного резания угол наклона режущей кромки не равен нулю и схема деформации при стружкообразовании не является плоской [1]. При этом компоненты скорости деформации равны:

$$\dot{\varepsilon}_x = \dot{\varepsilon}_y = \dot{\varepsilon}_z = \dot{\gamma}_{xy} = 0; \quad (3)$$

$$\dot{\gamma}_{yx} = \lambda / \Delta\tau_1; \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}_{zx} = \bar{\lambda}_{xy} / \Delta\tau_1. \quad (5)$$

Подстановкой величин компонентов, составляющих скорости деформации, в уравнение (2) получили величину интенсивности скорости деформации при стружкообразовании:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\dot{\gamma}_{zy}^2 + \dot{\gamma}_{yx}^2}. \quad (6)$$

По определению скорость деформации равна:

$$\varepsilon_i = \Delta\varepsilon_i / \Delta\tau_i. \quad (7)$$

Подставляя $\dot{\varepsilon}_i$ из уравнения (7), $\dot{\gamma}_{yx}$ из уравнения (4), а $\dot{\gamma}_{zy}$ из уравнения (5) в уравнение (6), получаем:

$$\frac{\Delta\bar{\varepsilon}_i}{\Delta\tau_i} = \frac{1}{\Delta\tau_i\sqrt{3}} \sqrt{\bar{\gamma}_{zx}^2 + \lambda^2}. \quad (8)$$

Откуда находим:

$$\Delta\bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\bar{\gamma}_{zx}^2 + \lambda^2}. \quad (9)$$

Итоговая деформация сдвига в плоскости ZY определена в соответствии с приведенным на рисунке 1 планом скоростей, сдвиговая деформация в плоскости резания принята равной углу наклона главной режущей кромки [1]:

$$\bar{\gamma}_{zy} = \frac{1}{\cos\gamma} \left(\zeta + \frac{1}{\zeta} - 2\sin\gamma \right) \quad (10)$$

$$\bar{\gamma}_{zy} = \lambda \quad (11)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}\cos\gamma} \sqrt{\left(\zeta + \frac{1}{\zeta} - 2\sin\gamma \right)^2 + \lambda^2 \cos^2\gamma} \quad (12)$$

Расчеты силы резания по аналитической модели выполнялись с использованием следующих формул:

$$q_{z1} = \frac{\Delta q_\varepsilon + \Delta q_p}{1 - C_\rho \cdot \zeta} \quad (13)$$

$$\Delta q_\varepsilon = \left(1 + B \frac{\Delta \varepsilon}{2}\right) \cdot \Delta \varepsilon \quad (14)$$

$$\Delta q_p = \frac{a_p \cdot \sum b_i h_i}{\sigma_B \cdot a \cdot b} \cdot \frac{1 + \zeta}{2} \quad (15)$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \gamma} \cdot \sqrt{\left(\zeta + \frac{1}{\zeta} - 2 \sin \gamma\right)^2 + \lambda^2 \cos^2 \gamma} \quad (16)$$

$$C_\rho = \frac{\sin(\rho)}{\cos(\gamma - \rho)} \quad (17)$$

$$P_z = \sigma_B \cdot q_{z1} \cdot a \cdot b \quad (18)$$

Результаты расчетов с использованием аналитической модели сравнивались с результатами расчетов по конечно-элементной модели, а также с результатами экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории Института станков (Штутгарт, Германия). Экспериментальная установка это по существу строгальный станок с перемещением стола (ползуна) при помощи программируемого линейного электродвигателя. Станина станка выполнена из полимербетон. Резец устанавливается в специальной державке, конструкция которой обеспечивает установку резца с нужным углом наклона главной режущей кромки λ . Режим свободного резания обеспечивался за счет использования заготовки, ширина b которой меньше ширины режущей кромки.

Глубина резания устанавливалась за счет перемещения суппорта вдоль вертикальной оси и контролировалась индикатором часового типа. Управление скоростью резания бесступенчатое, применялась программа *SimoCom*.

Для исследований использовались следующие углы резания: $\gamma = 8^\circ$; $\alpha = 4^\circ$; $\varphi = 90^\circ$; $\varphi_1 = 0^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; 15° ; 45° .

Эксперименты проводились на образцах из стали 45. Предварительно заготовки были подвержены термической обработки из трех этапов: 1. 1150°C , 5 часов, затем охлаждение в газовой атмосфере; 2. 860°C , 0,5 часа, затем охлаждение на воздухе; 3. 650°C , 4 часа, затем охлаждение в печи.

Механические свойства стали: $170 \dots 176 \text{ HB}$; $a_p - 10,944 \text{ кгс/мм}$; $B - 0,2708$; $\sigma_1 - 72,726 \text{ кгс/мм}^2$; $\sigma_2 - 92,1616 \text{ кгс/мм}^2$; $\sigma_B - 56,67 \text{ кгс/мм}^2$.

Работа распространения трещины a_p определялась по результатам обработки испытаний на ударную вязкость на основе метода экстраполяции [4]. Использовалась следующая зависимость, полученная Л.Д. Олениным:

$$a_p = \frac{a_r \cdot R - a_R \cdot r}{R - r} \quad (19)$$

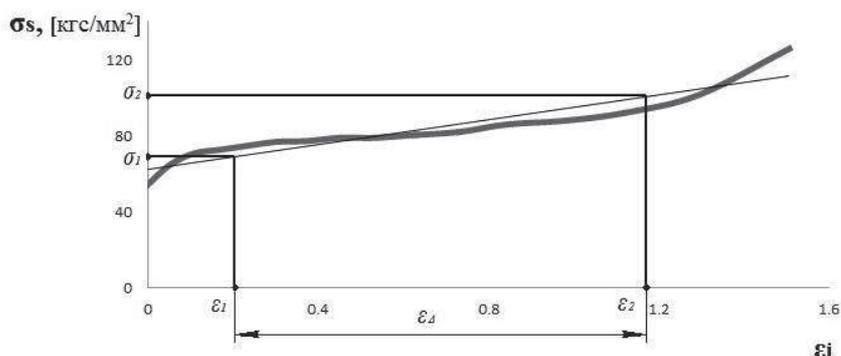


Рисунок 2. Кривая упрочнения и ее аппроксимация для стали 45

Значения B , σ_1 и σ_2 определялись по кривой упрочнения для стали 45, приведенной на рисунке 2.

Для измерения силы P_z , P_x , P_y использовался трех-компонентный динамометр, взаимодействующий с платформой, на которой закреплялась заготовка.

Эксперименты по резанию были проведены по следующей схеме для каждого угла $\lambda=0, 15$ и 45 (таблица 1).

Чтобы исключить влияние износа на геометрию инструмента, СМП менялись после проведения серии из десяти экспериментов. Кроме того, геометрия СМП и радиус закругления дополнительно измерялись с помощью микроскопа.

Таблица 1

Значения режимов резания

Сталь 45	V_c , м/мин/ a_p , мм	150
	0,1	5
	0,2	5
	0,3	5

Расчеты на основе метода конечных элементов выполнялись в среде *DEFORM-3D* (рисунок 3). В качестве модели трения использовалась модель сухого трения Амонтона-Кулона. Коэффициент трения μ принимался равным 0,4. В качестве критерия разрушения использовалось условие достижения накопленной (логарифмической) деформации равной 1.

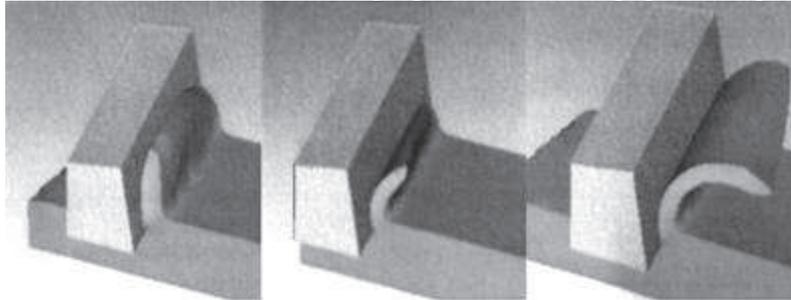


Рисунок 3. Процесс свободного резания

В качестве реологической модели материала использовалась модель *Johnson-Cook* [5]:

$$\bar{\sigma} = (A + B \cdot \bar{\epsilon}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right) \cdot \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right)^\alpha \cdot (D - E \cdot T^{*m}) \cdot T^* = \frac{(T - T_{raum})}{T_{schmelz} - T_{raum}} \quad (20)$$

$$D = D_0 \cdot \exp \left[k \cdot (T - T_b)^\beta \right]$$

В расчетах в качестве коэффициентов модели использовались стандартные значения коэффициентов, определенные в работе [5] для стали AISI 1045 (сталь 45):

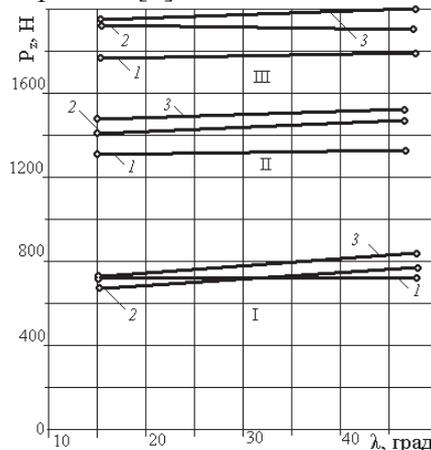


Рисунок 4. Сравнительные результаты экспериментальных и аналитических исследований: I - $V=50$, $a=0,1$; II - $V=50$, $a=0,2$; III - $V=50$, $a=0,3$; 1 - расчетные данные по аналитической методике; 2 – расчетные данные по МКЭ; 3 – экспериментальные данные

Сравнительные результаты экспериментальных и аналитических исследований представлены на рисунке 4.

$$A = 553 \text{ МПа}; B = 601 \text{ МПа}; C = 0,0134; D_0 = 1; E = 1; n = 0,234; m = 1; \beta = 0^\circ; \\ \alpha = 0^\circ; \dot{\epsilon}_0 = 1 - s; T_{\text{raum}} = 293 \text{ К}; T_{\text{schmelz}} = 1733 \text{ К}; T_b = 1 \text{ К}; k = 0. \quad (21)$$

Литература

1. К анализу механики резания упрочняемого материала. Стружкообразование / Оленин Л.Д.: Известия МГТУ «МАМИ», 2008. №1 (2) – с. 183-190.
2. К анализу механики резания цилиндрическим сверлом с перемычкой / Оленин Л.Д.: Известия МГТУ «МАМИ», 2011, № 2 (12) – с. 180-188.
3. О контактных напряжениях при внедрении плоского и скругленного пуансонов в полупространство / Оленин Л.Д.: Материалы Международного научного симпозиума. М.: МГТУ МАМИ, 2005.
4. Металловедение: учеб. для вузов. 6-е изд. / Гуляев А.П.: М.: Металлургия, 1986 – с. 544.
5. Johnson, G.R., Cook W.H.: A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, Vol. 547, p. 541 - 547, Den Haag, 1983.

Статистическое управление производственными процессами – ключ к успеху современного промышленного предприятия

к.т.н. Локтев Д.А.
ЗАО «ИТЦ Технополис»
+7 985 764 27 89, d.loktev@technopolice.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты применения методов статистического управления процессами в современном производстве, а также основные этапы внедрения подобных систем на базе современных средств измерения и программного обеспечения.

Ключевые слова: обеспечение качества, статистическое управление процессами, SPC, пригодность процесса.

Идеальный и реальный подход к технологическим процессам

При выпуске любого изделия требования к качеству (в отличие от требований к процессу производства) предопределены на этапе конструирования изделия и не могут изменяться при изготовлении изделия. Конструктор определяет основные параметры готового изделия. Эти требования практически всегда диктуются рынком – потребителем, с одной стороны, и конкурентами, с другой. Иными словами – продукт должен полностью удовлетворять пожелания потребителя и быть при этом не хуже, а, главное, дешевле, продукта конкурента. При этом с ужесточением конкуренции на рынке, происходит постоянное ужесточение требований к продукту. После определения требований к готовому изделию, конструктор назначает требования к параметрам отдельных деталей. Эти требования превращаются в поля допусков на определенные размеры. При этом конструктор исходит из предпосылки, что технологический процесс обязательно реализует назначенные им допуски, и изделие будет иметь запланированные параметры. Назначенный конструктором допуск определяется только возможными изменениями параметров изделия и очень редко учитывает возможные сложности при изготовлении детали.

После этапа конструирования необходимо разработать технологический процесс на отдельные детали. И тут начинаются первые сложности. Технолог, планирующий технологический процесс, пытается подобрать оборудование и параметры процесса исходя из конструкторских требований. И тут появляются первые сложности. Жесткие допуски, назначенные в соответствии с требованиями рынка, могут не соответствовать возможностям оборудования или могут требовать применения современного прогрессивного более точного инструмента. В любом случае практически всегда появляется необходимость в приобретении нового обо-