

## МЕХАНИКА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

*Албагачиев А.Ю.*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
Москва*

**Ключевые слова:** уравнения механики, сплошная среда, резание материалов, скорость течения, сила резания.

**Аннотация.** На основе решения дифференциальных уравнений в частных производных механики деформируемого твёрдого тела разработана теория резания, включающая формулы для расчета гидростатического давления, силы резания, глубины пластической деформации, накопленной деформации, нароста на острие резца, стружколома без использования эмпирических коэффициентов.

## MECHANICS OF CUTTING MATERIALS

*Albagachiev A.Yu.*

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow*

**Keywords:** equations of mechanics, continuous medium, cutting of materials, flow velocity, cutting force.

**Abstract.** Based on the solution of partial differential equations of deformable solid mechanics, a cutting theory has been developed that includes formulas for calculating: hydrostatic pressure, cutting force, depth of plastic deformation, accumulated deformation, growth on the tip of the cutter, chip breaker, without using empirical coefficients.

Одним из основных направлений современного развития механообработки является повышение качества поверхности обрабатываемых деталей, поскольку от этого напрямую зависит надёжность и долговечность создаваемых машин и устройств. Для прогнозирования показателей качества, которые получатся в результате механической обработки, прежде всего необходимо высокоточное определение напряжённо-деформированного состояния заготовки в процессе её обработки с заданными режимами. Определение напряжённо-деформированного состояния также необходимо и для прогнозирования стойкости металлорежущего инструмента, а также для определения энергетических затрат и выбора необходимого металлообрабатывающего оборудования.

В настоящее время конкретные расчёты различных параметров процессов механической обработки, обеспечивающих требуемые показатели качества изготавливаемых изделий, производятся с помощью большого количества разнообразных эмпирических выражений, а повышение технологической эффективности достигается преимущественно изобретательским путём. Многие наблюдаемые физические закономерности (например, различные виды стружки) до сих пор не имеют никакого объяснения с позиции механики деформируемого твёрдого тела. Для совершенствования существующих процессов металлообработки не путём случайных догадок и озарений, а вполне целенаправленно, необходимо создание прочной теории данных процессов, т.е.

такой теории, которая в полном соответствии с уровнем современной науки позволяет с достаточной точностью и надёжностью оценить влияние различных факторов на результаты процесса. Только такая теория позволит выполнять оптимизацию процессов металлообработки расчётным путём и с достаточной достоверностью прогнозировать результаты, которые получатся при тех или иных изменениях геометрии инструмента или режимов воздействия на исходную заготовку.

Цель – на основе механики деформируемого твёрдого тела разработать теорию резания металлов, позволяющая впервые дать строгое математическое объяснение многих экспериментальных закономерностей и обеспечивающая получение высокоточных расчётных формул без использования каких-либо экспериментальных поправочных коэффициентов.

**Новая теория** резания разработана на основе решения уравнений механики деформируемого твёрдого тела [1-4]. Рисунок 1 отображает начальные условия и следующие исходные уравнения:

– кинематические уравнения Коши, связывающие скорости деформации со скоростями течения:

$$\begin{cases} \xi_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}, \\ \xi_y = \frac{\partial v_y}{\partial y}, \\ \eta_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}; \end{cases} \quad (1)$$

– уравнения связи напряжений со скоростями деформации Леви–Мизеса:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma + \frac{2 \sigma_s}{3 \xi_i} \xi_x, \\ \sigma_y = \sigma + \frac{2 \sigma_s}{3 \xi_i} \xi_y, \\ \tau_{xy} = \frac{1 \sigma_s}{3 \xi_i} \eta_{xy}; \end{cases} \quad (2)$$

– уравнения равновесия:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0; \end{cases} \quad (3)$$

– условие несжимаемости (условие постоянства объёма):

$$\xi_x + \xi_y = 0; \quad (4)$$

– интенсивности скоростей деформации:

$$\xi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\xi_x - \xi_y)^2 + \xi_x^2 + \xi_y^2 + \frac{3}{2} \eta_{xy}^2}. \quad (5)$$

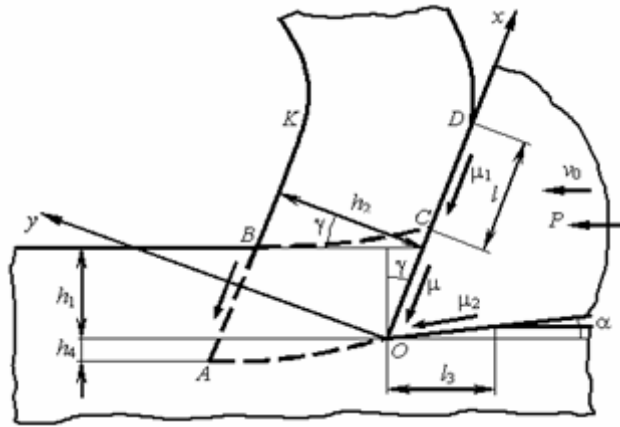


Рис. 1. Схема резания

В уравнениях (1)-(5) и на рисунке использованы следующие обозначения:  $v$  — скорость;  $\xi_i$  — скорость (интенсивность скоростей) деформации;  $e_i$  — накопленная деформация (степень деформации);  $\sigma_s$  — напряжение текучести;  $\sigma_i$  — интенсивность напряжений;  $\sigma$  — гидростатическое давление (среднее нормальное напряжение);  $\tau_s$  — напряжение текучести при сдвиге;  $\tau_k$  — касательное напряжение на контактной поверхности (напряжение контактного трения);  $\beta$  — коэффициент Лоде;  $\mu$  — коэффициент трения по напряжению текучести;  $f$  — коэффициент трения по нормальному напряжению;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $E$  — модуль упругости;  $P$  — главная сила резания или деформирования;  $\alpha$  — передний угол резца в  $^\circ$ ;  $\varphi$  — угол наклона поверхности сдвига относительно обработанной поверхности заготовки;  $h_1$  — толщина срезаемого слоя металла;  $h_2$  — толщина стружки;  $S$  — площадь поверхности;  $\sigma_{s0}$  — предел текучести в зависимости от температуры;  $t$  — время;  $\delta, \%$  — расхождение расчетных данных с экспериментами.

Таким образом, выражения (1)-(5) образуют замкнутую систему 10 дифференциальных уравнений в частных производных относительно 10 неизвестных величин:  $v_x, v_y, \xi_x, \xi_y, \xi_i, \eta_{xy}, \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma$ .

Для скоростей течения  $v_y$  имеем следующие начальные и граничные условия

$$\begin{aligned} v_y &= v_0 \cdot \cos \alpha \text{ при } y = 0, \\ v_y &= 0 \text{ при } y = h_2. \end{aligned}$$

После решения системы (1)-(5) с учетом пластического течения металла при заданных граничных условиях впервые разработана теория резания, включающая формулы для расчета: гидростатического давления  $\sigma$ ; силы резания  $P$ ; глубины пластической деформации  $h_3$ ; накопленной деформации  $e_{icp}$ ; нароста на острие резца; стружколома без использования эмпирических коэффициентов.

$$\begin{aligned} \sigma &= -\beta \sigma_s \left[ 0,5 + \mu_1 \frac{l}{h_2} + (0,5 + \mu) \left( \frac{h_1}{h_2 \cos \alpha} - \frac{x}{h_2} \right) \right], \\ P &= \beta \sigma_s h_1 \left[ 1 + \frac{h_2}{4h_1 \cos \alpha} + \mu \operatorname{tg} \alpha + \mu_1 \frac{l}{h_1} \sin \alpha + \mu_2 \frac{l_1}{h_1} \cos \alpha + \mu_1 \frac{l}{h_2} + \frac{(0,5 + \mu) h_1}{2h_2 \cos \alpha} \right]. \end{aligned}$$

$$h_3 = \frac{h_2}{0,5 + \mu} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{(0,5 + \mu)} \left[ \frac{1}{4\sqrt{3}} + \frac{\pi}{9} + \mu \sqrt{\frac{1}{3} - \mu^2} - \frac{1}{3} \arcsin(\sqrt{3}\mu) \right] \right\}$$

$$e_{icp} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left( 1 + e^{-\frac{s \cos \alpha}{h_2}} \right) \cdot \left( 2 + \sqrt{1 + \frac{1}{\frac{1}{3\mu^2} - 1}} \right) \frac{s \cos \alpha}{h_2}.$$

Точность выведенных теоретических формул подтверждена многочисленными (около 600) сопоставлениями результатов расчета с экспериментальными данными ведущих специалистов в области механической обработки металлов в машиностроении (табл. 1, 2).

Табл. 1. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений силы резания различных материалов при  $\varphi=45^0$  и длине контакта по задней поверхности инструмента  $L=0,15$  мм

Материал	$t$ , мм	$S_{об}$ , м/об	$\gamma$	$\kappa_c$	$e_{icp}$	$\sigma_s$ , МПа	$\theta$ , $^0C$	$\sigma_{s\theta}$ , МПа	$P_z$ , Н	$P_{z\varphi}$ , Н	$\Delta$ , %
Сталь Э	0,50	0,21	$8^0$	2,47	1,568	900	910	627,0	224,0	222	0,9
Сталь 10	0,50	0,21	$0^0$	2,73	1,580	907	890	637,9	233,2	236	1,2
Сталь 10	0,50	0,21	$8^0$	2,47	1,568	905	890	636,5	227,4	228	0,3
Сталь 20	0,50	0,21	$8^0$	2,47	1,568	950	980	639,7	228,5	225	1,5
Сталь 45	0,50	0,21	$8^0$	2,47	1,568	1100	1000	733,3	262,0	255	2,7
Сталь У8А	0,50	0,21	$8^0$	2,47	1,568	1300	1000	866,7	309,6	296	4,4
Сталь У12А	0,50	0,21	$8^0$	2,47	1,568	1400	1000	933,3	333,4	314	5,8
40ХП2МЛ	1,00	0,21	$10^0$	2,40	1,562	1350	1000	900,0	624,5	580	7,1
40ХП2МЛ	1,00	0,30	$10^0$	2,40	1,562	1350	1000	900,0	853,4	850	0,4

Табл. 2. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений силы резания стали 40ХН2МА в зависимости от длины контакта  $L$  заготовки с задней поверхностью резца при  $t=1$  мм,  $S_{об}=0,3$  мм/об,  $\gamma=10^0$ ,  $\varphi=45^0$ ,  $\kappa_c=2,4$ ,  $e_i=1,562$ ,  $\sigma_s=1300$  МПа,  $\theta=1200^0C$ ,  $\sigma_{s\theta}=900$  МПа

$L$ , мм	$P_z$ , Н	$P_{z\varphi}$ , Н	$\delta$ , %
0,0	743,1	760	2,3
0,1	816,7	820	0,4
0,2	890,2	880	1,1
0,3	963,7	930	3,5
0,4	1037,2	990	4,5

Расчеты, проведенные по разработанной теории резания, показали хорошую сходимость с экспериментальными данными не только для резания, но и для других видов обработки, таких как фрезерование и строгание. Это позволяет рекомендовать ее для использования при разработке двойников и цифровых технологических процессов в машиностроении.

**Список литературы**

1. Воронцов А.Л. Технологические задачи теории пластичности. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 3. – 475 с.

2. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
3. Ильюшин А.А. Труды. – М.: Физматлит, 2003. – Т. 1. – 352 с.
4. Vorontsov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Yu., Savkin A.I. Development of a New Theory of Thermal Cutting Processes. 1. Introduction // Russian Engineering Research. 2010, vol. 30, no. 1, pp. 48-59.

Сведения об авторе:

*Албагачиев Али Юсупович* – д.т.н., профессор, заведующий отделом.