

## Расчет и проектирование машиностроительных конструкций

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ**

Ю.В. БЕЛОУСОВ, канд. техн. наук, доцент

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

*В статье рассмотрено моделирование силового взаимодействия инструмента и заготовки при механической обработке. Получены расчетные зависимости для определения деформаций материала заготовки под режущим клином, а также величины заднего угла инструмента.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** усилия резания, задний угол инструмента, упругие перемещения, относительная деформация.

Изделия современного машиностроения требуют от конструкционных материалов высоких эксплуатационных свойств, определяющих их работоспособность и ресурс. Традиционные конструкционные материалы на основе металлов и их сплавов в ряде случаев не в состоянии удовлетворить этим требованиям. Поэтому широкое применение получают также полимерные, композиционные материалы, обладающие целым рядом положительных свойств: высокие удельные прочностные и упругие характеристики, стойкость к агрессивным химическим средам, низкая тепло- и электропроводность, высокие триботехнические характеристики и др.

Заготовительные операции не обеспечивают заданной точности и качества функциональных поверхностей деталей. Раскрой материала с помощью алмаза и гидроабразивная резка приводят к появлению большого дефектного слоя, что также требует последующей механической обработки. Поэтому, при расширении областей использования полимерных и композиционных материалов в различных отраслях машиностроения, актуальной является разработка научно обоснованной технологии их механической лезвийной обработки, опирающейся на моделирование процессов разрушения резанием с дифференцированным учетом их специфических физико-химических свойств.

В процессе резания материал заготовки под режущей кромкой инструмента деформируется. Деформации исчезают после прохода инструмента. По мере затупления инструмента усилия резания увеличиваются. При этом величина заднего угла оказывает существенное влияние на стойкость инструмента и силу резания. Выбор оптимального значения заднего угла должен производиться с учетом деформации поверхностных слоев заготовки. При небольшой величине заднего угла материал прижимается к задней поверхности инструмента. Это приводит к увеличению силы резания за счет трения между обрабатываемым материалом и задней поверхностью инструмента. В результате наблюдается нагревание инструмента, возникает нежелательное «засаливание» поверхности или образуются прижоги материала.

При исследовании силового взаимодействия инструмента и заготовки обычно полагают [2, 3], что на заготовку из вершины режущего клина действует результирующая сила резания равная сумме нормальной ( $P$ ) и тангенциальной ( $R$ ) ее составляющих (рис. 1). Однако составляющая силы резания  $R$  определяет процессы в зоне стружкообразования и действует со стороны передней поверхности инструмента. На обработанную поверхность действует лишь нор-

мальная составляющая  $P$  и вызванная ей сила трения  $Q$  (сила трения на передней поверхности инструмента на рис. 1 не показана).

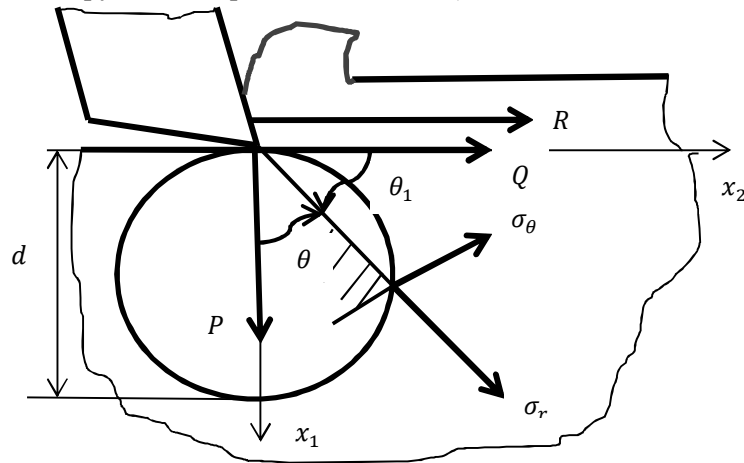


Рис. 1. Силы, действующие на поверхностный слой заготовки

Согласно [1], перемещение точек упругой полуплоскости под действием только одной сосредоточенной вертикальной силы  $P$  на ее границе:

$$u_r = A \sin \theta + B \cos \theta - \frac{2P}{\pi E} \chi_1 \ln r \cos \theta - \frac{P}{\pi E} (\chi_1 - \chi_2) \theta \sin \theta, \quad (1)$$

$$u_\theta = Cr + A \cos \theta - B \sin \theta + \frac{2P}{\pi E} [\chi_1 \ln r \sin \theta + \chi_2 \sin \theta + \frac{1}{2} (\chi_1 - \chi_2) (\sin \theta - \theta \cos \theta)]. \quad (2)$$

В нашем случае, как для плоской деформации,  $\chi_1 = 1 - \nu^2$ ,  $\chi_2 = \nu(1 + \nu)$ , где  $\nu$  – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

Для нахождения постоянных интегрирования  $A, B, C$  допустим, что условия закрепления таковы, что точки оси  $x_1$  не имеют поперечных перемещений, т. е.  $u_\theta = 0$  при  $\theta = 0$ , поэтому  $A = C = 0$ .

Чтобы найти постоянную  $B$  допустим, что на глубине  $x_1 = d$  при  $\theta = 0$  вертикальное перемещение равно нулю. Тогда

$$u_{r(\theta=0)} = B - \frac{2P}{\pi E} \chi_1 \ln d = 0,$$

откуда

$$B = \frac{2P}{\pi E} \chi_1 \ln d, \text{ а } u_{r(\theta=0)} = \frac{2P}{\pi E} \chi_1 \ln \frac{d}{r}.$$

Найдем вертикальное перемещение границы полуплоскости за силой  $Q$ . Полагая  $\theta = -\pi/2$ , получим:

$$u_{\theta(-\pi/2)} = \frac{2P}{\pi E} \left[ \chi_1 \ln \frac{d}{r} - \frac{1}{2} (\chi_1 + \chi_2) \right].$$

Аналогично можно получить перемещения границы полуплоскости от горизонтальной силы  $Q$ . Можно показать, что компоненты перемещения в данном случае задаются теми же уравнениями (1) и (2). Однако угол  $\theta_1$  здесь необходимо отсчитывать от направления силы  $Q$ .

Для нахождения постоянных интегрирования в этом случае допустим, что точки оси  $x_2$  (границы полуплоскости) не имеют вертикальных перемещений, т. е.  $u_\theta^I = 0$  при  $\theta_1 = 0$ , а при  $x_2 = d$  и  $\theta_1 = 0$  горизонтальные перемещения равны нулю ( $u_r^I = 0$ ), откуда

$$A = C = 0, \quad B = \frac{2Q}{\pi E} \chi_1 \ln d.$$

Перемещение границы полуплоскости:

$$u_{r(\theta=\frac{\pi}{2})}^{\perp} = \frac{2Q}{\pi E} \chi_1 \ln \frac{d}{r}; \quad u_{\theta(\theta=\frac{\pi}{2})}^{\perp} = 0.$$

Имея решения для вертикальной и горизонтальной сосредоточенных сил, получим суммарное перемещение точек границы упругой полуплоскости:

$$u_{r\Sigma} = \frac{2}{\pi E} \chi_1 \ln \frac{d}{r} (P + Q), \quad u_{\theta\Sigma} = \frac{2P}{\pi E} \left[ \chi_1 \ln \frac{d}{r} - \frac{1}{2} (\chi_1 + \chi_2) \right].$$

Тогда точка  $A$  границы упругой полуплоскости за инструментом переместится в положение  $A_1$  (рис. 2). Изогнутая поверхность под клином будет описываться кривой, определяемой уравнениями:

$$x_1 = \frac{2P}{\pi E} \left[ \chi_1 \ln \frac{d}{r} - \frac{1}{2} (\chi_1 + \chi_2) \right], \quad x_2 = -r + \frac{2}{\pi E} \chi_1 \ln \frac{d}{r} (P + Q).$$

Определим угол наклона касательной к этой кривой:

$$\frac{dx_1}{dx_2} = \frac{dx_1}{dr} / \frac{dx_2}{dr}.$$

Определим величину производных:

$$\frac{dx_1}{dr} = -\frac{2P\chi_1}{\pi E r}, \quad \frac{dx_2}{dr} = -1 - \frac{2(P+Q)\chi_1}{\pi E r}.$$

Тогда

$$\frac{dx_1}{dx_2} = \frac{2P\chi_1}{\pi E r + 2(P+Q)\chi_1}.$$

Поскольку  $Q = fP$ , где  $f$  – коэффициент внешнего трения скольжения обрабатываемого и инструментального материалов, то

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dx_1}{dx_2} = \frac{2P\chi_1}{\pi E r + 2P(1+f)\chi_1}.$$

Очевидно, что при  $r \rightarrow 0$ ,  $\sigma_r \rightarrow \infty$ . Это означает, что вблизи точки приложения сил образуется зона пластического деформирования материала. Диаметр круга пластической зоны на границе упругой полуплоскости

$$d = \frac{2Q}{\pi \sigma_{r_{\max}}},$$

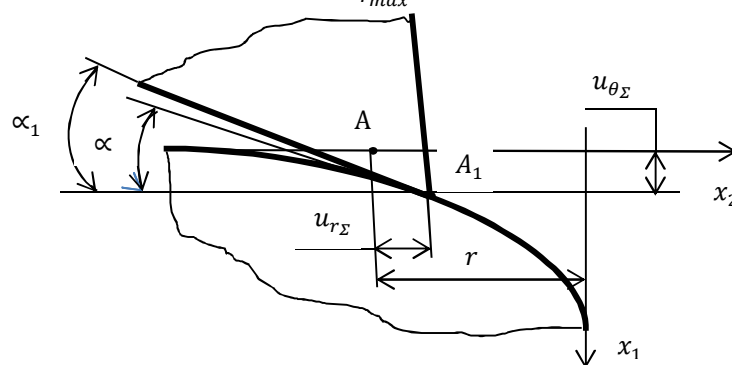


Рис. 2. Деформация поверхности заготовки под режущим клином инструмента

где  $\sigma_{r_{\max}}$  – максимальное значение нормального напряжения, при котором материал имеет упругие деформации.

В частности, для металлов  $\sigma_{r_{\max}} = \sigma_T(\sigma_{0,2})$ , поэтому

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\chi_1}{\frac{fE}{\sigma_{r_{\max}}} + (1+f)\chi_1}.$$

Вторым слагаемым в знаменателе можно пренебречь. Окончательно получим:

$$tg\alpha = \frac{\sigma_{rmax}}{fE} (1 - \nu^2) = \frac{\varepsilon(1 - \nu^2)}{f}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – соответствующая относительная деформация материала.

Чтобы исключить трение между задней поверхностью инструмента и обрабатываемым материалом необходимо, чтобы задний угол инструмента  $\alpha_1$  был больше угла  $\alpha$ , определяемого по формуле (3).

При резании металлов коэффициент внешнего трения скольжения обрабатываемого и инструментального материалов  $f$  может достигать больших значений, порядка единицы и более. В этом случае

$$tg\alpha \approx \frac{\sigma_T}{E} = \varepsilon_{упр},$$

где  $\varepsilon_{упр}$  – относительная деформация, соответствующая границе упругой зоны на диаграмме растяжения материала.

В частности, для условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ :  $tg\alpha \approx 0,002$ , а  $\alpha_{min} \approx 0,15^\circ$ . Расчеты показывают, что для большинства металлов, применяемых в машиностроении, минимально необходимый задний угол инструмента не превышает  $0,5^\circ$ . Однако для уменьшения износа средние значения задних углов проходных токарных резцов, предназначенных для резания металлов с подачами  $S \leq 0,25$  мм/об,  $\alpha_{cp} = 12^\circ$ . При увеличении подачи среднее значение заднего угла уменьшается до  $\alpha_{cp} = 8^\circ$ .

Для полимерных материалов величина минимального заднего угла инструмента значительно возрастает. Средние значения задних углов  $\alpha_{cp} = 10^\circ \dots 30^\circ$ .

У композитного материала матрица обладает более высокими упругими свойствами, что и является причиной упругого последействия материала. Величина заднего угла инструмента, соответствующего модулю нормального растяжения эпоксидной смолы (30...50 Мпа), будет равна  $\alpha_{cp} = 24^\circ \dots 36^\circ$ .

#### Л и т е р а т у р а

1. *Зубчанинов В. Г.* Основы теории упругости и пластичности: Учебник для машиностроит. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 368 с.
2. *Deithard T.* Einteilige waelzfraezer vertreiben kosten aus der Scrienfertigung// *WB Werkstatt und Betrieb*. 2015. №3. – P. 30-32.
3. *Hoffman N.P., Stolz U.* Ontransient growth of wear pattern properties// *Wear*. – 2010. Vol. 268. – №7-8. – P. 886-892.

#### R e f e r e n c e s

1. *Zubchaninov, V.G.* (1990). *Osnovy Teorii Uprugosti i Plastichnosti*: Ucheb. dlya mashinostroit. spets. vuzov, Moscow: Vyssh. shk., 368 p.
2. *Deithard, T.* (2015). Einteilige waelzfraezer vertreiben kosten aus der Scrienfertigung, *WB Werkstatt und Betrieb*, №3, p. 30-32.
3. *Hoffman, N.P., Stolz, U.* (2010). Ontransient growth of wear pattern properties, *Wear*, Vol. 268, №7-8, p. 886-892.

### MODELLING OF FORCE INTERACTION OF THE TOOL DURING MECHANICAL MACHINING

Yu.V. Belousov

*Moscow State Technical University after N. Bauman*

In the article, the simulation of force interaction of tool and workpiece during machining is considered. The calculated dependences for the determination of deformations of the workpiece material under cutting wedge and the minimum value of the rake angle of the tool are given.

KEY WORDS: cutting forces, the rake angle of the tool, elastic displacements, relative deformation.