

А.Б.Кравченко

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ РЕЗАНИЕМ

Аналитическому определению остаточных напряжений при резании в литературе посвящено весьма ограниченное число работ. При анализе схемы нагружения инструмента принималась силовая ситуация, характерная для абсолютно острого инструмента. В реальных же условиях с самого начала резания инструмент начинает изнашиваться.

Здесь принято, что силовой контакт между задней поверхностью резца и деталью может быть представлен опорой в виде треугольника. Последнее вытекает, например, из работы [1]. В связи с этим равнодействующая сил резания приложена так, как показано на рис.1. Методически удобно треугольную нагрузку представить в виде  $n$  рядов прямоугольников (параллелограммов). На рис.2 в качестве примера

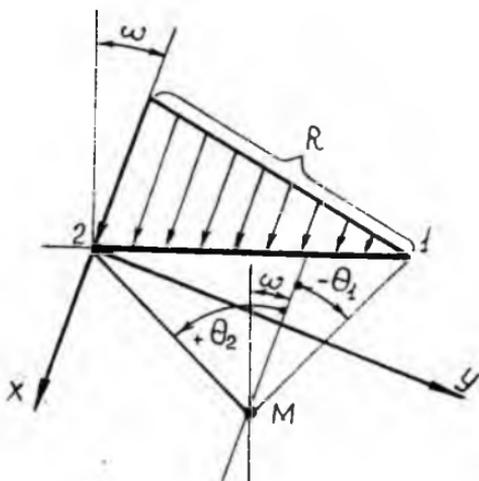
показана замена треугольника нагружения четырьмя рядами параллелограммов. В общем случае, если длину контакта резца и изделия  $W$  разбить  $n$  частей, то получим определенное количество параллелограммов. Из построения на рис.2 следует, что треугольная нагрузка может быть заменена параллелограммами, общее количество которых составит

$$i = \frac{n^2}{2} + \frac{n}{2}$$

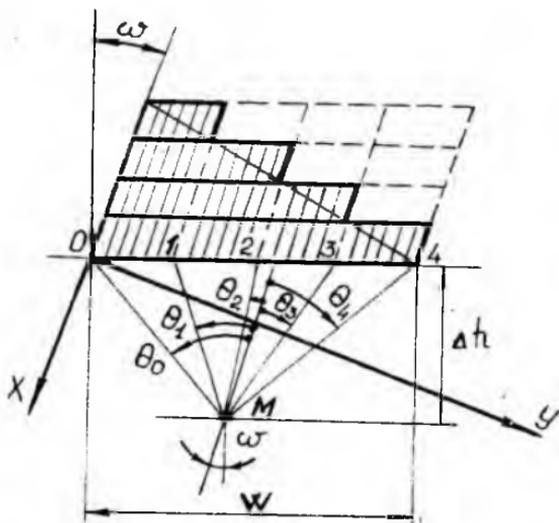
Интенсивность нагрузки, приходящаяся на единицу длины параллелограмма,  $q_0 = \frac{R}{ia}$ , где  $a = \frac{W}{n}$ ,

поэтому 
$$q_0 = \frac{2R}{(n+1)W}$$

В связи с тем, что нагрузка наклонена под углом  $\omega$ , в формулах для определения напряжений интенсивность нагрузки должна быть приложена нормально к оси  $y$  [2], рис.2, т.е.



Р и с. 1. Распределение равнодействующей нагрузки  $R$



Р и с. 2. Схема нагружения для расчета напряжений в точке М

$$q_0' = \frac{2R}{(n+1)W \cos \omega}$$

Формулы для расчета упругих напряжений при прямоугольном нагружении, как известно, имеют вид:

$$\sigma_x = -\frac{q_0'}{2\pi b} \left[ 2(\theta_2 - \theta_1) + (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \right];$$

$$\sigma_y = -\frac{q_0'}{2\pi b} \left[ 2(\theta_2 - \theta_1) - (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \right];$$

$$\tau_{xy} = -\frac{q_0'}{2\pi b} (\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2).$$

Если записать эти формулы для каждого параллелограмма нагрузки с учетом их расположения по высоте, принятой индексации (см. рис. 2) и просуммировать их, получим зависимости для расчета напряжений в любой точке:

$$\sigma_x = -\frac{R}{\pi b(n+1)W \cos \omega} \left[ 2(n\theta_0 - \sum_{i=1}^n \theta_i) + (n \sin 2\theta_0 - \sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i) \right];$$

$$\sigma_y = -\frac{R}{\pi b(n+1)W \cos \omega} \left[ 2(n\theta_0 - \sum_{i=1}^n \theta_i) - (n \sin 2\theta_0 - \sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i) \right];$$

$$\tau_{xy} = -\frac{R}{\pi b(n+1)W \cos \omega} \left( \sum_{i=1}^n \cos 2\theta_i - n \cos 2\theta_0 \right).$$

Имея значения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ , находим главные напряжения по известной зависимости

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2},$$

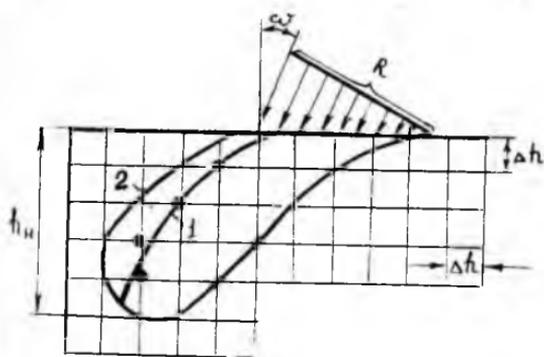
интенсивность напряжений по формуле

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2},$$

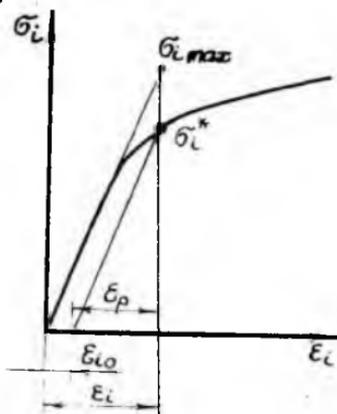
а также направления главных площадок по формуле

$$\tan 2\beta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Расчет проводится для ряда сечений под обработанной поверхностью на расстоянии  $\Delta h$  (рис.3). Кривая 1 соответствует точкам, в которых  $\sigma_i = \sigma_{i \max}$ , а кривая 2 - точкам, где  $\sigma_i = \sigma_r$ .



Р и с. 3. Определение зоны пластической деформации: 1 - кривая  $\sigma_{i \max}$ ; 2 - граница пластических деформаций



Р и с. 4. График зависимости  $\sigma_i = f(\epsilon_i)$

Таким образом, глубина деформационного упрочнения представляет собою величину  $h_n$  (рис.3). В точках, соответствующих  $\sigma_{i \max}$ , развиваются максимальные деформации. При движении инструмента (нагрузки) эти точки переходят под заднюю поверхность инструмента, формируя остаточное напряженное состояние. Остаточные напряжения могут быть определены на основании теоремы Генки. На рис.4 приведена деформационная зависимость в координатах  $\sigma_i - \epsilon_i$ . Используя функцию  $\sigma_i = f(\epsilon_i)$ , которая хорошо аппроксимируется степенной зависимостью, находим величину действительных напряжений  $\sigma_i^*$ , которые развиваются в искомой точке тела с учетом пластических деформаций [4]:

$$\sigma_i^* = A \epsilon_i^m$$

Согласно теореме Генки остаточные напряжения представляют собою разность между истинными напряжениями  $\sigma_i^*$  и фиктивными  $\sigma_{i \max}$  в предположении, что металл деформируется только упруго:

$$\sigma_0 = \sigma_i^* - \sigma_{i \max}$$

В общем случае на каждую точку деформируемого тела действуют напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ . С учетом закона Гука составляющие деформаций будут

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu (\sigma_2 + \sigma_3)];$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu (\sigma_1 + \sigma_3)];$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu (\sigma_1 + \sigma_2)].$$

При разгрузке тела (см. рис. 4) деформации разгрузки составят:

$$\varepsilon_{1p} = \frac{1}{E} [\sigma_1^* - \mu (\sigma_2^* + \sigma_3^*)];$$

$$\varepsilon_{2p} = \frac{1}{E} [\sigma_2^* - \mu (\sigma_1^* + \sigma_3^*)];$$

$$\varepsilon_{3p} = \frac{1}{E} [\sigma_3^* - \mu (\sigma_1^* + \sigma_2^*)],$$

где  $\sigma_1^*$ ,  $\sigma_2^*$ ,  $\sigma_3^*$  соответственно равны:  $\sigma_1^* = \psi \sigma_1$ ;  $\sigma_2^* = \psi \sigma_2$ ;  $\sigma_3^* = \psi \sigma_3$ .

Параметр  $\psi$  определяется на основании данных по определению интенсивности напряжений (см. рис. 4):

$$\psi = \frac{\sigma_i^*}{\sigma_i \max}$$

Таким образом, остаточные деформации будут следующими:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_1 - \varepsilon_{1p};$$

$$\varepsilon_{20} = \varepsilon_2 - \varepsilon_{2p};$$

$$\varepsilon_{30} = \varepsilon_3 - \varepsilon_{3p}.$$

Определение составляющих остаточных деформаций ясно из рис. 5. Остаточные деформации  $\varepsilon_{10}$  и  $\varepsilon_{20}$  действуют в плоскости чертежа, остаточная деформация  $\varepsilon_{30}$  действует перпендикулярно плоскости чертежа. Имея главные деформации, можно получить необходимые данные в любом направлении, используя известную зависимость:

$$\varepsilon_{\tau} = \varepsilon_{10} \ell^2 + \varepsilon_{20} m^2 + \varepsilon_{30} n^2,$$

где  $\varepsilon_{\tau}$  - относительная линейная деформация частицы в произвольном направлении;  $\ell$ ,  $m$ ,  $n$  - направляющие косинусы.

Из рис. 5 следует, что в направлении резания (тангенциальном)  $\ell_{\tau} = \sin(\omega \pm \beta)$ ;  $m_{\tau} = \cos(\omega \pm \beta)$ ;  $n_{\tau} = 0$ ,

в перпендикулярном направлении (осевые)  $\epsilon_0 = 0$ ;  $m_0 = 0$ ;  $n_0 = 1$ .

Поэтому

$$\epsilon_x = \epsilon_{10} \sin^2(\omega \pm \beta) + \epsilon_{20} \cos^2(\omega \pm \beta); \epsilon_0 = \epsilon_{30}$$

Остаточные деформации вызывают наведенные в подповерхностном слое издедли остаточных напряжений, которые могут быть определены по формулам, вытекающим из закона Гука:

$$\sigma_x = \frac{\epsilon_x + \mu \epsilon_0}{1 - \mu^2} E;$$

$$\sigma_y = \frac{\epsilon_0 + \mu \epsilon_x}{1 - \mu^2} E,$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона для упругой области.

При расчете остаточных деформаций и напряжений необходимо учитывать напряженное состояние.

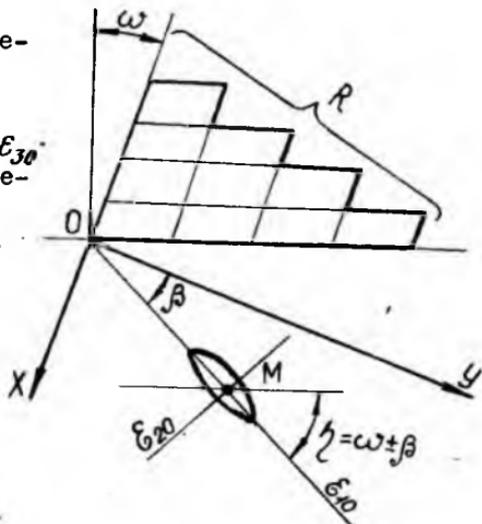
При плоской деформации  $\epsilon_0 = 0$ .

Обработка широкой пластины — что характерно для фрезерования — протягивания. Плоское напряженное состояние  $\epsilon_y = \epsilon_{30}$ . Обработка узкой пластины — строгание, точение.

При выводе формул для расчета остаточных напряжений не учитывалось влияние температурного фактора. При этом имелось в виду, что при разрушении обрабатываемого материала (резании) относительные деформации  $\epsilon$  достигают 10...20% и более. Тепловые эффекты при резивной обработке сопровождаются относительными деформациями, не превосходящими величины  $\epsilon < 0,5\%$ . Приведенные формулы справедливы при обработке материалов, для которых характерно элементное стружкообразование, т.е. титановых сплавов, закаленных сталей, цинковых сплавов, бронзы, чугуна.

## Л и т е р а т у р а

1. О с т а ф ь е в В.А. Физические основы процесса резания металлов. — Киев: Вища школа, 1976.
2. Ф р о х т М.Ф. Фотоупругость. Т.2.—М.:ГИИЛ, 1950.
3. Б и р г е р И.А. Круглые пластинки и оболочки вращения.—М.:Оборонгиз, 1964.
3. М а л и н и н Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести.—М.:Машиностроение, 1968.



Р и с. 5. К определению составляющих остаточных деформаций