

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Г. В. УЖИК

ТЕОРИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛА

(Представлено академиком Е. А. Чудаковым 7 VII 1949)

1. Несущей способностью металла нами названа его способность выдерживать нагрузку на образце с острой и глубокой круговой выточкой (надрезом) или, что то же, выдерживать действие концентрации напряжений.

В подавляющем большинстве случаев наиболее ослабленными местами изделий, приготовленных из металла (многочисленные детали всевозможных машин, элементы различных сооружений и т. п.), являются именно участки действия концентрации напряжений (различные вырезы, отверстия, места переходов от больших сечений к меньшим и т. п.). И наоборот, в местах, где отсутствует концентрация напряжений, как правило, никогда или очень редко возникает опасность поломки и разрушения металлического изделия при его нагружении. Поэтому с точки зрения оценки пригодности металла для изготовления тех или иных изделий решающее значение имеет его способность выдерживать действие концентрации напряжений, т. е. его несущая способность.

Между тем, основным показателем при оценке свойств металла и выборе его для различных изделий в настоящее время является предел прочности, устанавливаемый на гладких образцах, т. е. при отсутствии концентрации напряжений. Этот показатель не может поэтому характеризовать несущую способность металла: неудовлетворительность его для этой цели стала уже общепризнанной.

Можно показать, что при хрупком разрушении под действием концентрации напряжений основным показателем несущей способности металла является отношение между его сопротивлением отрыву R_{σ} (^{1, 2}) и сопротивлением сдвигу σ_s , т. е. R_{σ}/σ_s .

Это следует из основного условия разрушения от отрыва под действием наибольшего осевого напряжения при упруго-пластической стадии деформации образца с круговой глубокой выточкой (¹):

$$\sigma_{1s} = \frac{\sigma_1 \sigma_s}{\sigma_1 - \sigma_3} = R_{\sigma}, \text{ откуда } \frac{R_{\sigma}}{\sigma_s} = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_1}} = f(\cos \nu_1).$$

2. Среди возможных способов увеличения несущей способности, начиная от $R_{\sigma}/\sigma_s = 1,0$, наиболее доступными, повидимому, являются все те, которые позволяют увеличить $R_{\sigma}/\sigma_s > 1,0$, до некоторого наиболее выгодного значения, за счет снижения, главным образом, σ_s при сохранении или же незначительном уменьшении сопротивления отрыву R_{σ} .

Некоторые из этих способов могут быть основаны на обработке поверхностного слоя вблизи мест концентрации напряжений. В этом случае для получения наибольшей несущей способности необходимо установить, на какой глубине, т. е. при какой толщине слоя, должна быть произведена обработка с целью снижения σ_s предела текучести, насколько должен быть снижен предел текучести и др.

Для решения этой задачи необходимо рассмотреть условия прочности образца с круговой глубокой выточкой, материал которого на некоторой глубине t и в остальной части сечения обладает различными свойствами.

При анализе распределения напряжений мы будем пользоваться теми же допущениями и методом, что и ранее (1).

Для исходного состояния материала (т. е. до поверхностной обработки) эпюра распределения осевых напряжений в какой-то момент упруго-пластической стадии деформации такого образца будет следовать (рис. 1) по *MYEF* (1).

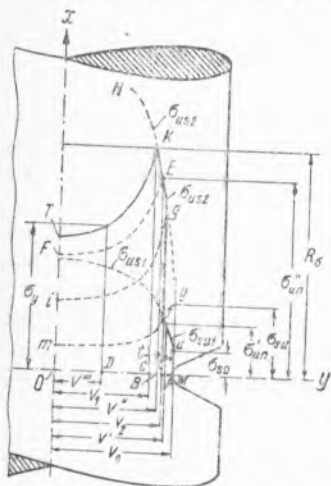


Рис. 1. Распределение напряжений в упруго-пластической стадии деформации при уменьшении предела текучести в поверхностном слое (на глубине t) с σ_{su} до σ_{s0}

При нагружении такого же образца после поверхностной обработки на глубине t , в результате которой предел текучести в исходном состоянии σ_{su} уменьшается на этой глубине до σ_{s0} , распределение напряжений будет другим:

1) При нагрузке, соответствующей распространению пластических деформаций на глубине t , распределение напряжений представлено на рис. 1 эпюрой *Mafm*, причем участок эпюры *Maf* соответствует зоне упруго-пластических деформаций, участок *fm* — зоне преобладающих упругих деформаций.

2) При дальнейшем увеличении нагрузки и распространении пластической деформации в область, не подвергшуюся поверхностной обработке, например на глубину *MB*, эпюра распределения напряжений будет следовать по *MafgEF*.

3) В момент разрушения при нагрузке P_p распределение напряжений представлено эпюрой *MfgKT*.

3. В соответствии с обозначениями на рис. 1 величина разрушающей нагрузки может быть установлена из условий равновесия:

$$P_p = 2\pi c^2 \left[\int_0^{\nu} \frac{\sigma_{uy}\sigma_s}{\sigma_{uy} - \sigma_{vy}} \sin \nu \cos \nu d\nu + \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{\sigma_u''\sigma_{su}}{\sigma_u'' - \sigma_v''} \sin \nu \cos \nu d\nu + \int_{\nu_3}^{\nu_0} \frac{\sigma_u'\sigma_{s0}}{\sigma_u' - \sigma_v'} \sin \nu \cos \nu d\nu \right].$$

Метод вычисления подобных интегралов рассмотрен ранее (1). Обозначая $P_p = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5$, получим:

$$J_1 = \frac{2\pi a^2 \sigma_{su}}{(\sigma_{uc} - \sigma_{vc}) \sin^2 \nu_0} \left[(B_s - \alpha C_s) (1 - \cos \nu_1) + (B_s - A_s) \left(\frac{1}{\cos \nu_1} - 1 \right) \right],$$

$$J_2 = \frac{2\pi a^2 \sigma_{su} (B_s - \alpha C_s)}{[2(\alpha - 1) C_s - B_s] \sin^2 \nu_0} \left\{ \frac{\cos^2 \nu_2 - \cos^2 \nu_1}{2} + (1 - M_1) (\cos \nu_2 - \cos \nu_1) - \right.$$

$$\begin{aligned}
& - N_1 \ln \left(\frac{\cos v_2 - z_1}{\cos v_1 - z_1} \right) - \frac{N_2}{2} \ln \left(\frac{\cos^2 v_2 + p \cos v_2 + q}{\cos^2 v_1 + p \cos v_1 + q} \right) - \\
& - \frac{N_3 - (N_2/2)p}{\sqrt{q - p^2/4}} \left(\operatorname{arctg} \frac{\cos v_2 + p/2}{\sqrt{q - p^2/4}} - \operatorname{arctg} \frac{\cos v_1 + p/2}{\sqrt{q - p^2/4}} \right) \Big\}, \\
J_3 = & \frac{2\pi a^2 \sigma_{su} (B_s - A_s)}{[2(\alpha - 1)C_s - B_s] \sin^2 v_0} \left\{ N_4 \ln \left(\frac{\cos v_2 - z_1}{\cos v_1 - z_1} \right) + \right. \\
& + \frac{N_5}{2} \ln \left(\frac{\cos^2 v_2 + p \cos v_2 + q}{\cos^2 v_1 + p \cos v_1 + q} \right) + \frac{N_6 - (N_5/2)p}{\sqrt{q - p^2/4}} \left(\operatorname{arctg} \frac{\cos v_2 + p/2}{\sqrt{q - p^2/4}} - \right. \\
& \left. \left. - \operatorname{arctg} \frac{\cos v_1 + p/2}{\sqrt{q - p^2/4}} \right) \right\}.
\end{aligned}$$

Выражения для J_4 и J_5 те же, что и для J_2 и J_3 , но только при других значениях σ_s и $\cos v$, а именно, если в J_2 и J_3 вместо $\cos v_2$ подставить $\sin v_0$, вместо $\cos v_1$ подставить $\cos v_2$ и вместо σ_{su} подставить σ_{s0} .

Таким образом

$$P_\sigma = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 = f(\sigma_{s0}, \sigma_{su}, \cos v, k, \dots).$$

Из условия $\frac{\partial P_p}{\partial v} = 0$ и $\frac{\partial P_p}{\partial T} = 0$ может быть определено значение наибольшей несущей способности $T = R_\sigma / \sigma_{s0}$ при $(P_p)_{\max}$, а также соответствующая наибольшей нагрузке глубина обрабатываемого слоя: $t = v_0 - v_2$, характеризуемая коэффициентом $k = r/a$, поскольку $t = a - r = a(1 - k)$.

Исследование $P_p = f(\sigma_{s0}, \sigma_{su}, k, \dots)$ было проведено для ряда постоянных значений сопротивления отрыву и сопротивления сдвигу в исходном состоянии, т. е. при $B = R_\sigma / \sigma_{su} = 1,0$; $B = 2,0$ и др.

Вид функции $P_p / \sigma_{su} = f(A, k)$, где $A = \sigma_{s0} / \sigma_{su}$, для $B = 1,5$ показан на рис. 2.

Огибающая на рис. 2 представляет конечные ординаты тех кривых $P_p / \sigma_{su} = f(A, k)$, для которых условие разрушения от отрыва $R_\sigma / \sigma_{s0} = \frac{1}{1 - \sigma_v / \sigma_u}$ выполнялось.

По данным на рис. 2 представляется возможным установить то значение предела текучести $\sigma_{s0} = A\sigma_{su}$ материала в поверхностном специально обработанном слое и ту глубину $t = a(1 - k)$, при которой несущая способность металла становится наибольшей.

Как показано на рис. 2, для случая $B = R_\sigma / \sigma_{su} = 1,5$ наибольшая несущая способность может быть получена, если $t = a(1 - 0,6) = 0,4a$ и $\sigma_{s0} = 0,38\sigma_{su}$, и тогда $R_\sigma / \sigma_{s0} = 1,5\sigma_{su} / 0,38\sigma_{su} = 3,94$. Разрушающая нагрузка при этом должна увеличиться почти в два раза в сравнении с той, которая получается на таком же образце без обработки поверхностного слоя и без снижения σ_{su} на глубине t .

Среди результатов, приведенных на рис. 2, большой интерес представляет наличие критической глубины поверхностного слоя с уменьшенным пределом текучести (посредством специальной обработки) при $k \geq k_c$, когда происходит не повышение, а снижение нагрузки P и тем больше, чем меньше $A = \sigma_{s0} / \sigma_{su}$. Таким образом, при поверхностной обработке на небольшую глубину может наблюдаться не повышение, а снижение несущей способности по сравнению с исходным состоянием.

Исследование несущей способности и увеличения нагрузки, разрушающей образец с острым надрезом, для ряда материалов с различными свойствами в исходном состоянии (различные значения

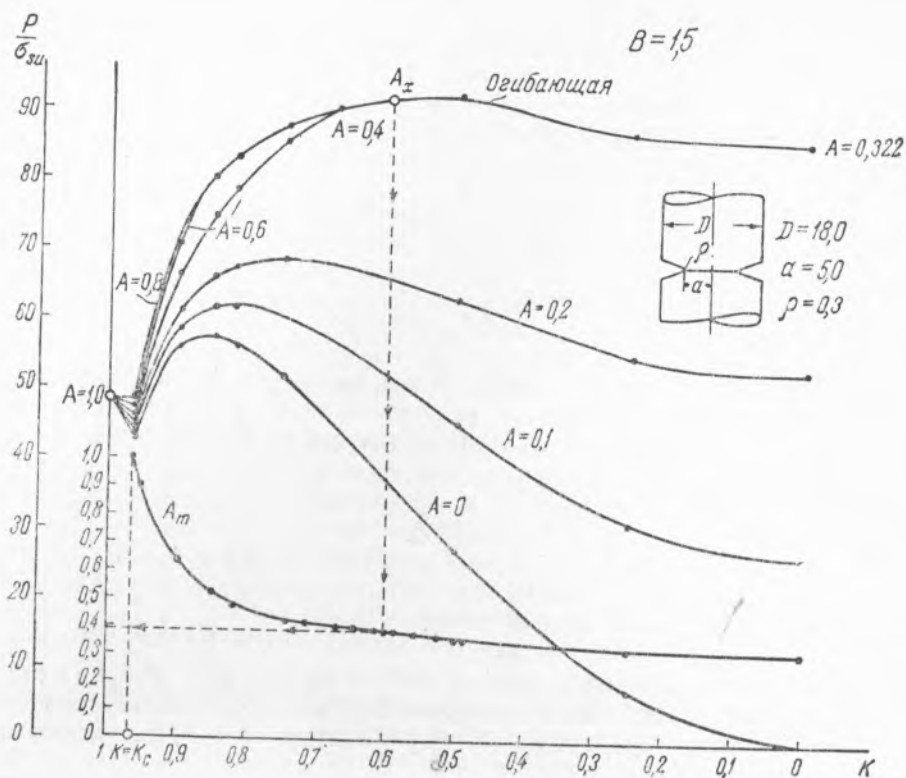


Рис. 2. Изменение нагрузки P_p в зависимости от глубины обработки поверхностного слоя $t = a(1 - k)$ и соотношений $A = \sigma_{s0} / \sigma_{su}$ при $B = R_\sigma / \sigma_{su} = 1,5 = \text{const}$

$B = R_\sigma / \sigma_{su}$) показывает, что эффект, достигаемый посредством уменьшения σ_s в поверхностном слое специальной обработкой, оказывается тем большим, чем ближе к единице R_σ / σ_{su} — отношение между сопротивлением отрыву и сопротивлением сдвигу в исходном состоянии.

Применительно к глубоким круговым выточкам результаты экспериментальной проверки вполне удовлетворительно подтвердили приведенные выше основные положения теории несущей способности металла и вытекающие из нее следствия.

Поступило
29 VI 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. В. Ужик, Изв. АН СССР, ОТН, № 10 (1949). ² Г. В. Ужик, ДАН, 64 № 4 (1949).