

В.Ф.Павлов

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ  
НАДРЕЗА

Для разделения наклепа и остаточных напряжений, созданных поверхностным пластическим деформированием, на образец наносится надрез, глубина которого превышает толщину наклепанного слоя. Ненаклепанный материал на дне надреза испытывает сжимающие остаточные напряжения, вызванные перераспределением остаточных напряжений гладкого образца. Задача о перераспределении напряжений рассматривалась в работах [1, 2], где были получены простые формулы для дополнительных напряжений на дне надреза.

Для объяснения результатов усталостных испытаний надрезанных образцов нужно также знать напряжения в области наименьшего сечения, примыкающей к дну надреза. Определение этих напряжений и является содержанием настоящей статьи.

Общая формула для дополнительных осевых остаточных напряжений в наименьшем сечении образца с полуэллиптическим надрезом (рис. 1) получена в работе [2]:

$$\sigma_{\theta}(\xi) = \frac{1+c}{1-c\xi^{-2}} \left[ \lambda(\xi) + \sum_{k=0,2,\dots}^{2m} A_k \mu_k(\xi) \right], \quad (1)$$

где  $c = \frac{a-b}{a+b}$ ,  $\xi = \frac{y(1+c) + \sqrt{y^2(1+c)^2 - 4a^2c}}{2a}$ ,

$$\lambda(\xi) = 2u(\xi) + (1-c) \left[ \frac{\xi^2-1}{\xi^2-c} \xi u(\xi) \right]'$$

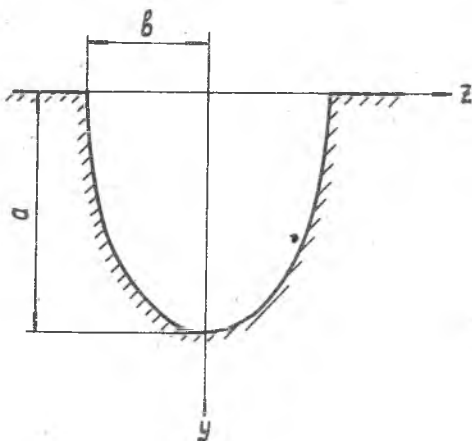


Рис. I

$$u(\xi) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_z(\theta) \frac{(1+\xi^2) \sin^2 \theta}{1-2\xi^2 \cos 2\theta + \xi^4} d\theta, \quad \theta = \arccos \frac{y}{a},$$

$\sigma_z(\theta)$  - осевые остаточные напряжения гладкой детали,

$$A_0 = \frac{\pi(1+c)^2}{8\xi} \sigma_{z0}, \quad A_k = (-1)^k k^3 \frac{\pi(1+c)^2}{32} (\sigma_{zk} + \sigma_{z,k-2}), \quad k=2,4,\dots,$$

$\sigma_{zk} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_z(\theta) \sin \theta \sin(k+1)\theta d\theta$ ,  $\mu_k(\xi)$  - коэффициенты, зависящие от  $\xi$  и  $c$ . За характером зависимости между  $\xi$  и  $y$  можно проследить по графикам, изображенным на рис. 2.

В работе [1] было высказано предположение, что зависимость (I) не должна существенно отличаться от закона изменения напряжений при растяжении аналогичного образца с мелким надрезом [3]. В соответствии с этим заменим (I) приближенной формулой

$$\sigma_\theta(\xi) = \frac{\sigma_0(1)(1-c)}{\xi^2-c} \left\{ 1 - \frac{(\xi^2-1)[(3-c)\xi^2-(1+c)c]}{4(\xi^2-c)^2} \right\}, \quad (2)$$

где

$$\sigma_0(1) = \sqrt{\frac{t}{\rho}} \int_0^1 \left[ \frac{4}{\pi\sqrt{1-\xi^2}} + 0,37 \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{(1+\sqrt{\frac{\rho}{t}})^2} \right] \sigma_z(\xi) d\xi, \quad (3)$$

$$\xi = \frac{y}{t}.$$

Осевое напряжение на дне надреза  $\sigma_0(1)$  выражено через глубину надреза  $t=a$  и радиус кривизны на дне  $\rho$ . Выражение (3) получено из (I) в работе [2].

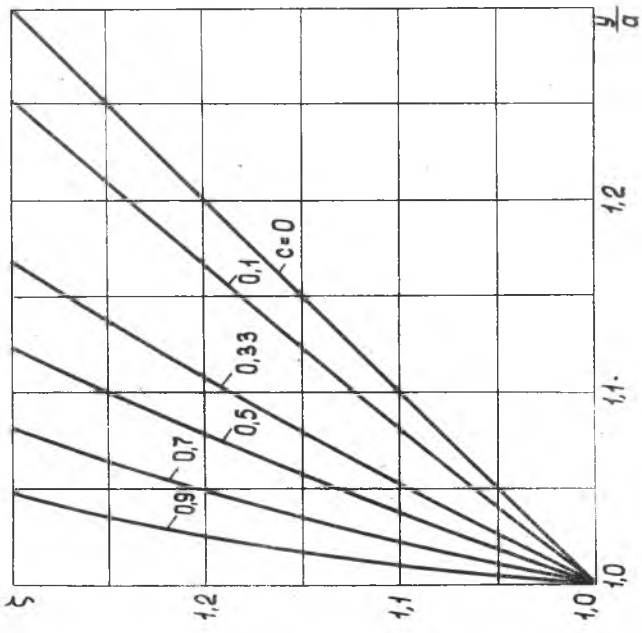


Рис. 2

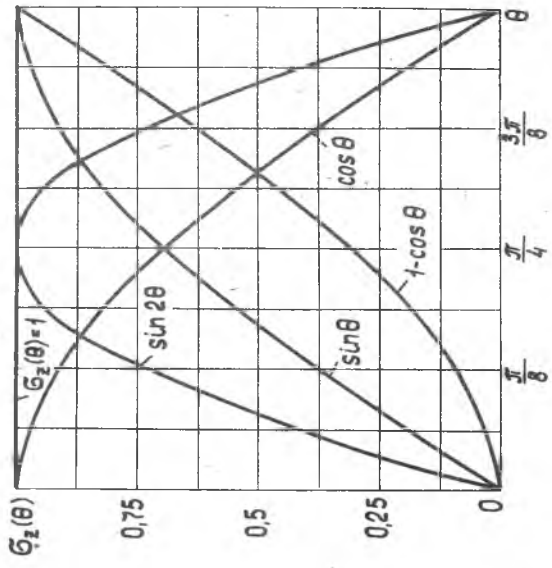


Рис. 3

Для подтверждения возможности замены были произведены расчеты по формулам (1) и (2) для различных законов изменения остаточных напряжений гладкого образца, показанных на рис. 3. Итоги расчетов с использованием  $\sigma_z(\theta) = 1 - \cos \theta$ , которому соответствуют наибольшие ошибки, приведены в табл. I.

Таблица I

$\xi$	Ошибка вычислений по формуле (2), %					
	$c=0$	$c=0,1$	$c=0,3$	$c=0,5$	$c=0,7$	$c=0,9$
1,0	0	0	0	0	0	0
1,01	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8
1,02	3,2	3,3	3,3	3,5	3,4	3,4
1,03	4,7	4,8	4,9	5,0	5,0	4,8
1,04	6,1	6,2	6,3	6,5	6,4	6,1
1,05	7,5	7,6	7,7	7,9	7,8	7,3
1,10	13,3	13,4	13,6	13,7	13,4	11,7

Можно видеть, что до  $\xi = 1,03$  ошибки формулы (2) не превышают 5%, а до  $\xi = 1,07$  - 10%. Области таких размеров обычно используются при исследовании закономерностей усталостных разрушений. Следовательно, формула (2) может применяться для расчета остаточных напряжений возле дна надреза.

Для анализа результатов усталостных испытаний необходимо также знать распределение радиальных дополнительных остаточных напряжений вблизи от дна надреза. По данным работы [2] для этих напряжений в наименьшем сечении образца можно получить следующую формулу:

$$\sigma_p(\xi) = \frac{4}{1-c\xi^{-2}} \left[ (1+c)u(\xi) + \sum_{k=0,2,\dots}^{2m} A_k \sqrt{k}(\xi) \right] - \sigma_\theta(\xi), \quad (4)$$

где  $\sqrt{k}(\xi)$  - коэффициенты, зависящие от  $\xi$  и  $c$ .

Результаты расчетов по формуле (4) для остаточных напряжений гладкой детали, изменяющихся по характерному для практики закону  $\sigma_z(\theta) = 1 - \cos \theta$ , представлены на рис. 4.

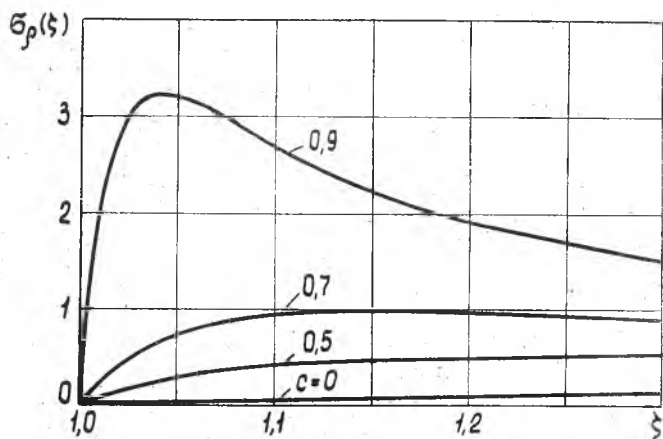


Рис. 4

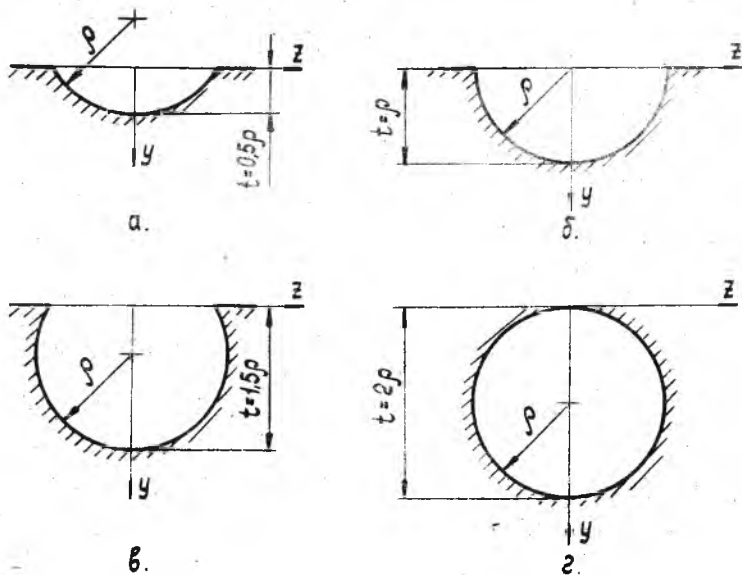


Рис. 5

С увеличением  $C$ , то есть с увеличением остроты надреза, радиальные напряжения возрастают, а их максимум смещается к дну надреза. В остром надрезе возле его дна возникает всестороннее сжатие, что препятствует релаксации остаточных напряжений при действии переменных рабочих напряжений и поэтому приводит к значительному повышению предела выносливости [4].

На рис. 5 показаны надрезы с профилем в виде части окружности. В работе [5] приводятся решения для растяжения образцов с такими надрезами. Вычитая из напряжений, полученных по формулам этой работы, номинальные значения напряжений, можно найти дополнительные остаточные напряжения при  $\sigma_z(\theta) = const$ .

Значения дополнительных напряжений  $\sigma_\theta(1)$ , вычисленные по формулам работы [5] и по формуле (3) при  $\sigma_\theta(\theta) = 1$ , приведены в табл. 2. Они, как можно видеть, практически не различаются.

Таблица 2

		$\frac{t}{\rho}$	0,5	1,0	1,5	2,0
$\sigma_\theta(1)$	с использованием результатов работы [5]		1,42	2,07	2,57	2,999
	по формуле (3)		1,45	2,07	2,56	2,969

Рассмотренные примеры позволяют считать, что значение имеет не форма, а глубина надреза  $t$  и радиус кривизны на дне  $\rho$ .

Л и т е р а т у р а

1. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях. "Вопросы прочности элементов авиационных конструкций". Труды КуАИ, вып. 60, 1973.
2. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом. "Вопросы прочности элементов авиационных конструкций". Межвузовский сборник, вып. 1, КуАИ, 1974.
3. Нейбер Г. Концентрация напряжений. ОГИЗ, 1947.
4. Куликов О.О., Пинчук Г.А., Неманов М.С. О влиянии обработки роликами на выносливость валов с надрезами. "Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклепа", ЦНИИТМАШ, кн.108, 1966.
5. Уфлянд Я.С. Биполярные координаты теории упругости. ГИТТЛ, 1950.