

В.С. ВАКУЛЮК

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЯХ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

С использованием изотропных первоначальных деформаций изучены закономерности распределения остаточных напряжений в плоской детали с глубокими симметричными надрезами после поверхностного упрочнения в зависимости от геометрии концентраторов и вариантов упрочнения. Установлено, что на величину и характер распределения остаточных напряжений существенное влияние оказывают угол раскрытия концентратора и упрочнение впадины концентратора. *Закономерности распределения остаточных напряжений; первоначальные деформации; плоская деталь с концентраторами; варианты упрочнения детали*

Обработка дробью и микрошариками деталей с надрезами, имеющими небольшие углы раскрытия, ведёт, как правило, к неравномерному упрочнению поверхности концентраторов. Такая же картина упрочнения наблюдается и при обкатывании роликами надрезов без продольной подачи. Схему упрочнения в этих случаях можно привести к деформированию только впадин концентраторов или к более интенсивному упрочнению впадин по сравнению с другими поверхностями концентраторов. Выбор наиболее рациональных схем поверхностного упрочнения деталей можно проводить на основе теоретического анализа распределения сжимающих остаточных напряжений в их поверхностном слое при различных вариантах упрочнения. Исследование закономерностей распределения остаточных напряжений в плоской детали с глубокими симметричными надрезами при упрочнении впадины и явилось целью настоящей работы.

Расчёт остаточных напряжений проводился методом конечных элементов (МКЭ) по изотропным первоначальным деформациям [1, 2] поверхностного слоя детали для случая плоской деформации. В силу симметрии исследуемой детали на конечные элементы треугольной формы разбивалась её четвертая часть, показанная на рис. 1.

В расчётах были приняты следующие геометрические параметры:  $d = 1,0$  мм,  $D = 2,5$  мм,  $b = 6,25$  мм, радиус впадины  $R$  изменялся от 0,25 мм до 1,25 мм, а угол раскрытия концентратора  $\beta$  принимался равным  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ .

Толщина слоя  $\delta$  с первоначальной деформацией (на рис. 1 этот слой затемнён) задавалась равной 0,1 мм и 0,2 мм и постоянной по всей впадине. Такая толщина деформированного поверхностного слоя детали примерно соответствует упрочнению микрошариками (0,1 мм) и дробью на гидродробеструйной установке (0,2 мм) [2, 3]. В исследовании принималось: модуль продольной упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , величина однородной первоначальной деформации  $\varepsilon_0 = 1,56 \cdot 10^{-3}$ .

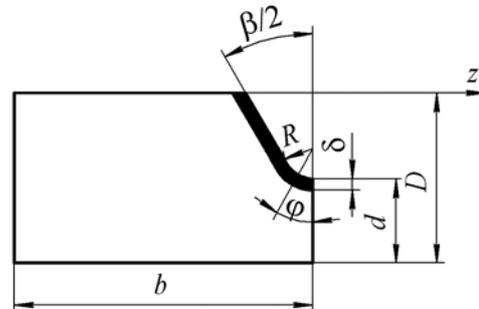


Рис. 1. Область детали, разбиваемая на конечные элементы

Результаты расчёта представлены на рис. 2, где показана зависимость меридиональных остаточных напряжений  $\sigma_\varphi$  (осевых  $\sigma_z$  – в наименьшем сечении) у поверхности детали при различных толщинах деформированного слоя от  $S_0 = \frac{1}{2} R(\pi - \beta)$  – половины длины дуги контура впадины концентратора. Остаточные напряжения здесь приведены к относительному параметру  $K$ , который вычисляется по следующей формуле:

$$K = \frac{\sigma_\varphi}{\sigma_{\delta \rightarrow 0}},$$

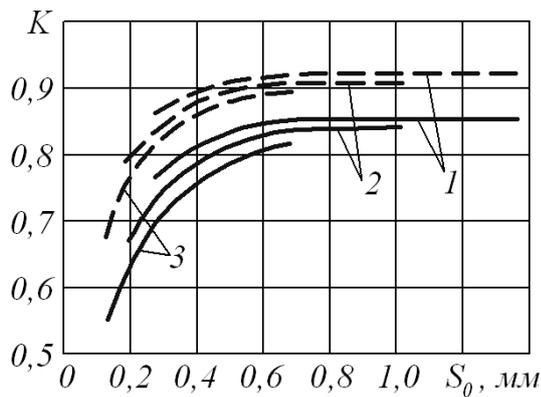
где  $\sigma_\varphi$  – меридиональные остаточные напряжения, вычисленные МКЭ,  $\sigma_{\delta \rightarrow 0} = \frac{E\varepsilon_0}{1-\mu^2}$  –

Контактная информация: (846) 267-45-26, 267-45-27

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/13944).

остаточные напряжения при упрочнении бесконечно тонкого слоя детали [1].

Анализ результатов расчёта (рис. 2) показывает, что распределение остаточных напряжений при упрочнении впадины концентратора аналогично распределению осевых остаточных напряжений в гладкой детали при упрочнении малых по протяжённости зон [2, 3], где также наблюдалось снижение остаточных напряжений при уменьшении длины зоны деформирования. На величину остаточных напряжений влияет не только радиус концентратора  $R$ , но и угол раскрытия  $\beta$ , причём влияние угла раскрытия с увеличением радиуса уменьшается. Уменьшается также влияние угла и при меньших толщинах упрочнённого слоя. При упрочнении впадины концентратора увеличение толщины деформированного слоя приводит к уменьшению остаточных напряжений в наименьшем сечении детали.

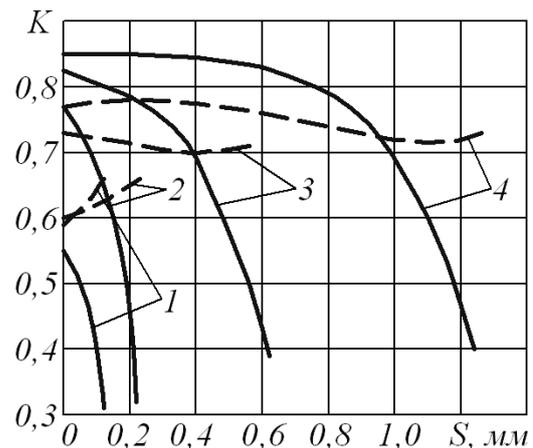


**Рис. 2.** Распределение меридиональных остаточных напряжений в наименьшем сечении у поверхности детали  
(—  $\delta = 0,2$  мм; ----  $\delta = 0,1$  мм):  
1 —  $\beta = 60^\circ$ ; 2 —  $\beta = 90^\circ$ ; 3 —  $\beta = 120^\circ$

На рис. 3 приведено распределение остаточных напряжений по дуге  $S = R \cdot \phi$  контура впадины концентратора при  $\beta = 60^\circ$  и  $120^\circ$  на расстоянии от поверхности  $a = 0,025$  мм и  $a = 0,175$  мм для  $R = 0,25$  мм и  $R = 1,25$  мм. Можно видеть, что независимо от размера концентратора у его поверхности происходит падение остаточных напряжений при удалении от наименьшего сечения детали, однако с увеличением расстояния от поверхности происходит стабилизация напряжений по контуру впадины при рассматриваемых значениях радиуса  $R$  и угла раскрытия концентратора  $\beta$ .

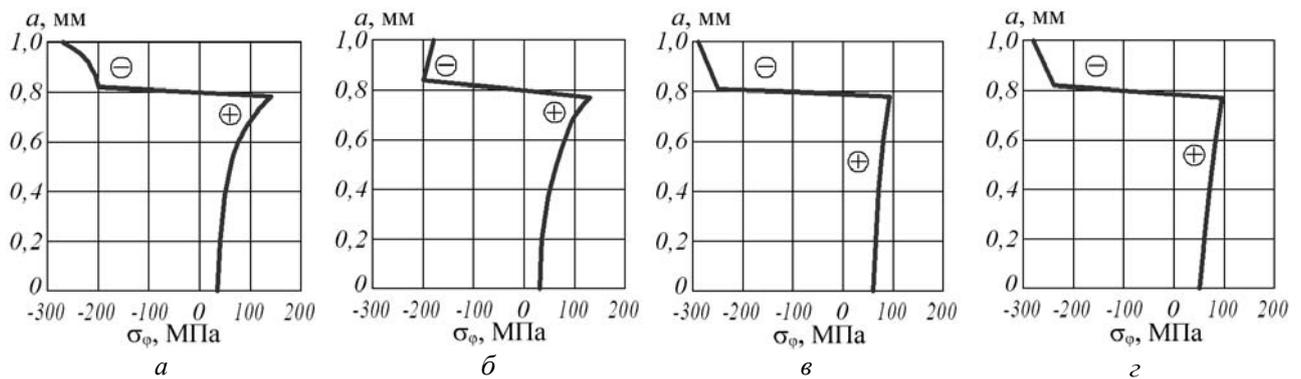
На рис. 4 представлено распределение меридиональных остаточных напряжений  $\sigma_\phi$  по толщине поверхностного слоя  $a$  в наименьшем сечении детали при  $d = 1,0$  мм (рис. 1) для

некоторых вариантов размеров концентраторов. Из приведённых данных следует, что при упрочнении впадин малых размеров происходит существенное изменение характера распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине наименьшего сечения детали, выражающееся в перемещении экстремума от поверхности вглубь детали и в появлении достаточно высоких значений растягивающих остаточных напряжений под упрочнённым слоем (варианты *a, б*). Появление такого распределения остаточных напряжений может оказать отрицательное влияние на сопротивление усталости детали [4–6]. Поэтому упрочнение впадин надрезов без упрочнения боковых поверхностей может привести к меньшему повышению сопротивления усталости за счёт сжимающих остаточных напряжений, чем при упрочнении зон большей протяжённости, что необходимо учитывать при выборе оптимальных вариантов и методов упрочнения деталей с концентраторами.

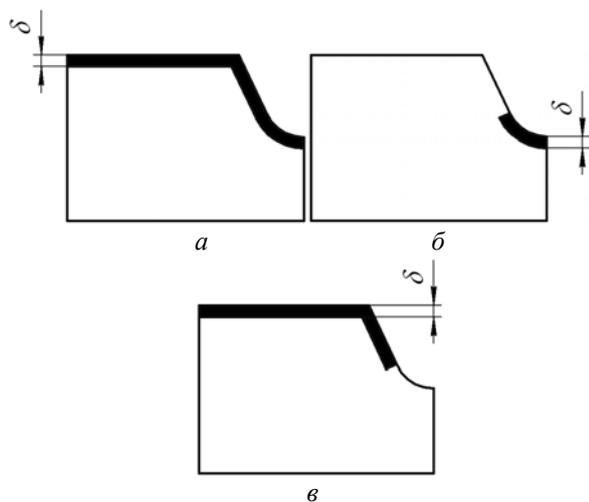


**Рис. 3.** Распределение меридиональных остаточных напряжений при  $\delta = 0,2$  мм во впадине концентратора на различном расстоянии от поверхности  
(—  $a = 0,025$  мм; ----  $a = 0,175$  мм):  
1 —  $R = 0,25$  мм,  $\beta = 120^\circ$ ; 2 —  $R = 0,25$  мм,  $\beta = 60^\circ$ ;  
3 —  $R = 1,25$  мм,  $\beta = 120^\circ$ ; 4 —  $R = 1,25$  мм,  $\beta = 60^\circ$

Далее были изучены закономерности распределения остаточных напряжений при различных вариантах упрочнения деталей с глубокими V-образными надрезами. Рассматривались возможные на практике варианты упрочнения деталей, приведённые на рис. 5, где зона с первоначальными деформациями толщиной  $\delta$  затемнена. По варианту *a* упрочняется вся поверхность детали, *б* — только криволинейная часть впадин надрезов, *в* — вся поверхность детали, кроме криволинейной части впадин надрезов.



**Рис. 4.** Распределение меридиональных остаточных напряжений  $\sigma_\phi$  при  $d = 1,0$  мм и  $\delta = 0,2$  мм в наименьшем сечении детали:  $a - R = 0,25$  мм,  $\beta = 120^\circ$ ;  $б - R = 0,25$  мм,  $\beta = 60^\circ$ ;  $в - R = 1,25$  мм,  $\beta = 120^\circ$ ;  $г - R = 1,25$  мм,  $\beta = 60^\circ$

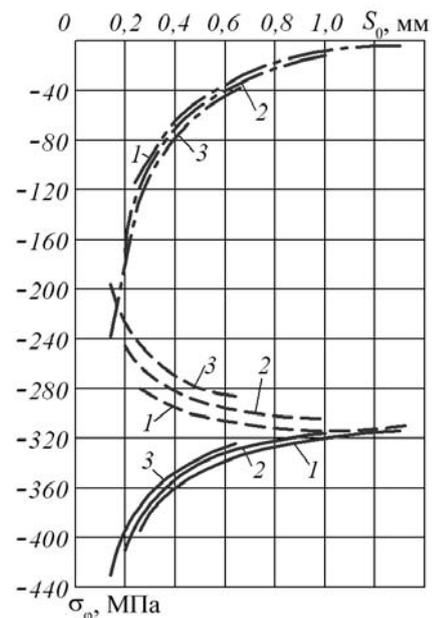


**Рис. 5.** Варианты упрочнения детали с концентратором

Проведённые расчёты показали, что при всех вариантах упрочнения остаточные напряжения в области впадины надреза, в конечном счёте, зависят от взаимного положения точек перехода криволинейной части концентратора в прямолинейную. В связи с этим параметром, характеризующим положение указанных точек, было выбрано значение половины дуги контура впадины концентратора  $S_0$ , используемое в первой части исследования. На рис. 6 приведено распределение меридиональных остаточных напряжений  $\sigma_\phi$  в зависимости от  $S_0$  в наименьшем сечении детали на расстоянии  $0,025$  мм от поверхности. Можно видеть, что при упрочнении детали по варианту  $a$  с уменьшением радиуса впадины  $R$  и с увеличением угла раскрытия концентратора  $\beta$ , то есть с уменьшением  $S_0$ , остаточные напряжения увеличиваются. Увеличение  $S_0$  в рассматриваемом диапазоне параметров приводит к уменьшению остаточных напряжений, которые в пределе стремятся к величине остаточных напряжений гладкой детали.

При упрочнении по варианту  $б$  уменьшение  $S_0$  приводит к противоположному по отношению к варианту  $a$  результату, однако следует отметить,

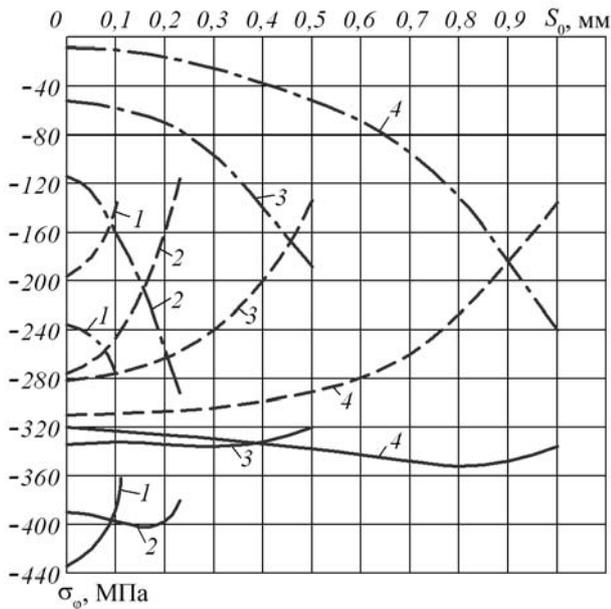
что при одинаковых углах  $\beta$  остаточные напряжения в этих вариантах с увеличением  $R$  стремятся к одной и той же величине. Кроме того, необходимо указать на более существенное влияние угла  $\beta$  на остаточные напряжения при упрочнении по варианту  $б$ , чем по варианту  $a$ . Падение напряжений (вариант  $б$ ) с уменьшением  $S_0$  аналогично эффекту, наблюдаемому при упрочнении зон малой протяжённости гладких деталей, когда длина упрочняемой зоны соизмерима с толщиной деформируемого слоя [2, 3].



**Рис. 6.** Распределение меридиональных остаточных напряжений  $\sigma_\phi$  в наименьшем сечении образца (варианты упрочнения —  $a$ ,  $б$ ,  $в$ ) на расстоянии  $0,025$  мм от поверхности: 1 —  $\beta = 60^\circ$ ; 2 —  $\beta = 90^\circ$ ; 3 —  $\beta = 120^\circ$

Остаточные напряжения при упрочнении по варианту  $в$  равны разности напряжений вариантов  $a$  и  $б$ , причём угол  $\beta$  в этом случае оказывает наименьшее влияние на остаточные напряжения по сравнению с другими вариантами. Уменьшение  $S_0$  при неупрочнённой впадине ведёт к возрастанию напряжений в

наименьшем сечении детали. При достаточно малых величинах  $S_0$  остаточные напряжения могут быть больше, чем при упрочнении самой впадины (вариант *б*). Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе метода поверхностного упрочнения, а также режимов и вариантов обработки деталей с концентраторами напряжений с целью повышения сопротивления усталости [4].



**Рис. 7.** Распределение меридиональных остаточных напряжений  $\sigma_\phi$  по дуге контура впадины концентратора (варианты упрочнения — *a*, — — — *б*, — · — *в*)

на расстоянии 0,025 мм от поверхности:

1 —  $R = 0,25$  мм,  $\beta = 120^\circ$ ; 2 —  $R = 0,25$  мм,  $\beta = 60^\circ$ ;

3 —  $R = 1,0$  мм,  $\beta = 120^\circ$ ; 4 —  $R = 1,0$  мм,  $\beta = 60^\circ$

На рис. 7 показано изменение меридиональных остаточных напряжений  $\sigma_\phi$  по дуге контура впадины концентратора  $S_0$ . Обращает на себя внимание прямо противоположный характер распределения остаточных напряжений при упрочнении по вариантам *б* и *в*, то есть в варианте *б* остаточные напряжения при удалении от наименьшего сечения существенно уменьшаются (в 1,5–2,3 раза), а в варианте *в* — увеличиваются. В связи с этим можно предположить, что при действии переменных напряжений усталостная трещина в детали, упрочнённой по варианту *в*, будет зарождаться только в её наименьшем сечении [5], а по варианту *б* — может зарождаться и в других сечениях. При упрочнении по варианту *a* зарождение усталостной трещины не в минимальном сечении возможно только при малом радиусе  $R$  и достаточно большом угле раскрытия концентратора  $\beta$ . При упрочнении по

этому варианту увеличение  $R$  и уменьшение  $\beta$  приводит к стабилизации меридиональных остаточных напряжений по контуру впадины надреза с выраженным экстремумом, расположенным несколько ниже точки перехода криволинейной части концентратора в прямолинейную.

Таким образом, проведённый расчёт показывает, что при упрочнении деталей с концентраторами необходимо стремиться к равномерному деформированию поверхностного слоя всего концентратора, которое обеспечивает не только наибольшие сжимающие остаточные напряжения в наименьшем сечении, но и более стабильные их значения по контуру впадины, что особенно важно для деталей, работающих при переменных напряжениях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
2. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / В. Ф. Павлов, А. К. Столяров, В. С. Вакулук, В. А. Кирпичёв // Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. 124 с.
3. Остаточные макронапряжения при обкатывании без продольной подачи / В. В. Белозёров, А. И. Махатилова, М. Л. Туровский, А. М. Шифрин // Вестник машиностроения. 1986. №10. С. 59–61.
4. Павлов В. Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости // Известия вузов. Машиностроение. 1987. №7. С. 3–6.
5. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. 64 с.
6. Павлов В. Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29–32.

#### ОБ АВТОРАХ

**Вакулук Владимир Степанович**, канд. техн. наук, доцент каф. сопротивления материалов Самарск. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С. П. Королёва (нац. исслед. ун-та) СГАУ, г. Самара. Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.