

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 β принимался равным 60° , 90° и 120° .

Толщина слоя δ 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 $\varepsilon_0 = 1,56 \cdot 10^{-3}$.

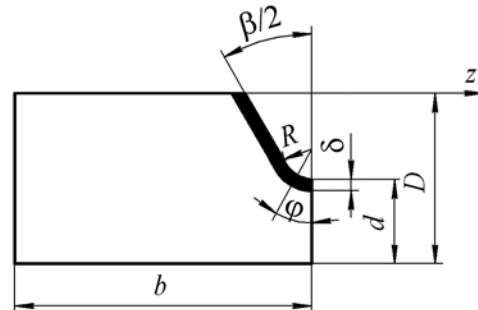


Рис. 1. Область детали, разбиваемая на конечные элементы

Результаты расчёта представлены на рис. 2, где показана зависимость меридиональных остаточных напряжений σ_φ (осевых σ_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 σ_φ – 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 β , 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.

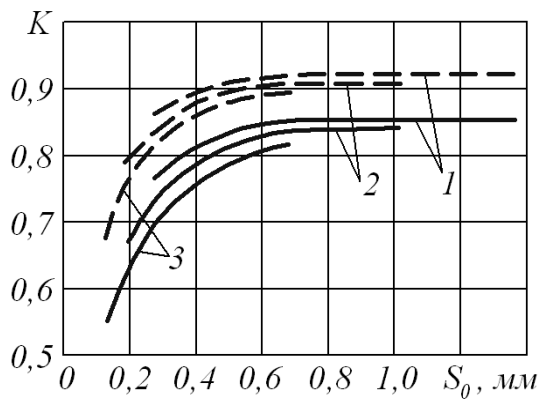


Рис. 2. Распределение меридиональных остаточных напряжений в наименьшем сечении у поверхности детали
(— $\delta = 0,2$ мм; ---- $\delta = 0,1$ мм):
1 — $\beta = 60^\circ$; 2 — $\beta = 90^\circ$; 3 — $\beta = 120^\circ$

На рис. 3 приведено распределение остаточных напряжений по дуге $S = R \cdot \varphi$ контура впадины концентратора при $\beta = 60^\circ$ и 120° 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 β .

На рис. 4 представлено распределение меридиональных остаточных напряжений σ_φ 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.

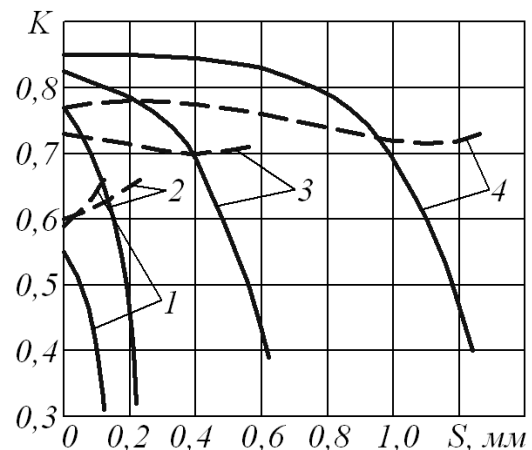


Рис. 3. Распределение меридиональных остаточных напряжений при $\delta = 0,2$ мм во впадине концентратора на различном расстоянии от поверхности
(— $a = 0,025$ мм; ---- $a = 0,175$ мм):
1 — $R = 0,25$ мм, $\beta = 120^\circ$; 2 — $R = 0,25$ мм, $\beta = 60^\circ$;
3 — $R = 1,25$ мм, $\beta = 120^\circ$; 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 δ затемнена. По варианту *a* упрочняется вся поверхность детали, *б* — только криволинейная часть впадин надрезов, *в* — вся поверхность детали, кроме криволинейной части впадин надрезов.

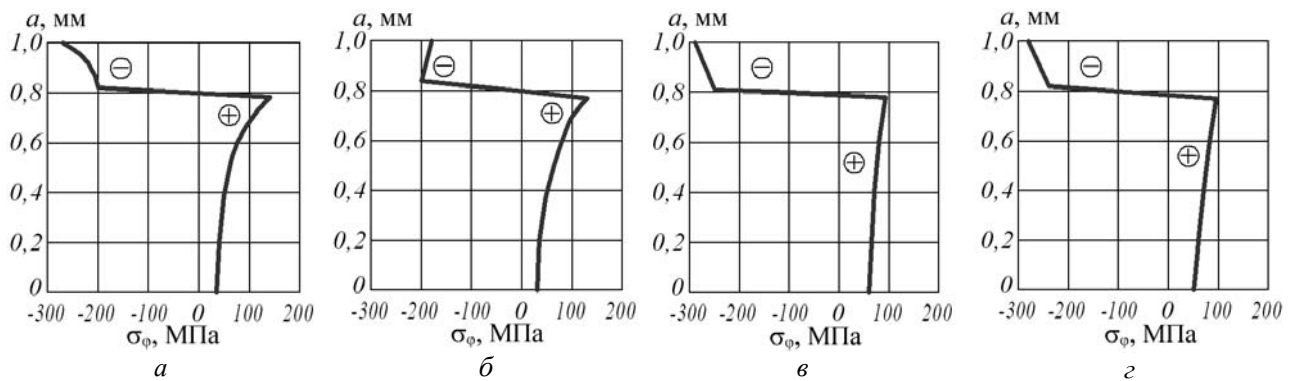


Рис. 4. Распределение меридиональных остаточных напряжений σ_ϕ при $d = 1,0$ мм и $\delta = 0,2$ мм в наименьшем сечении детали: $a - R = 0,25$ мм, $\beta = 120^\circ$; $б - R = 0,25$ мм, $\beta = 60^\circ$; $в - R = 1,25$ мм, $\beta = 120^\circ$; $г - R = 1,25$ мм, $\beta = 60^\circ$

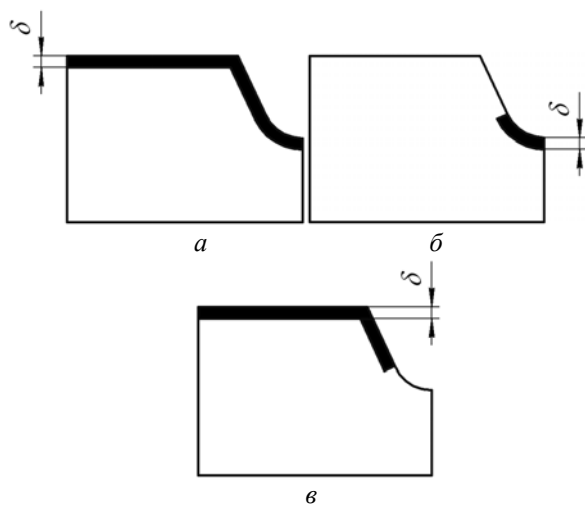


Рис. 5. Варианты упрочнения детали с концентратором

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 σ_ϕ 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 β , 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 β остаточные напряжения в этих вариантах с увеличением R стремятся к одной и той же величине. Кроме того, необходимо указать на более существенное влияние угла β 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].

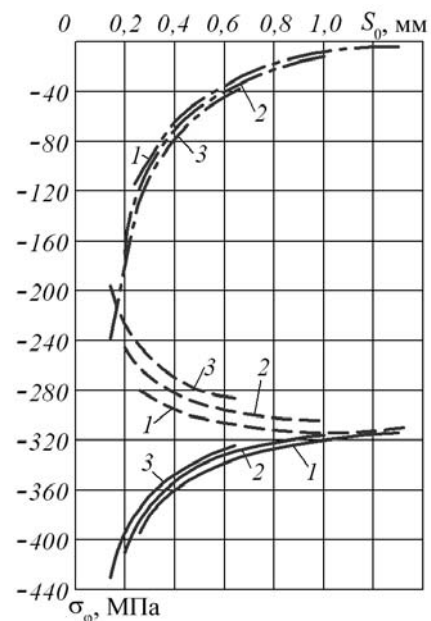


Рис. 6. Распределение меридиональных остаточных напряжений σ_ϕ в наименьшем сечении образца (варианты упрочнения — a , $---$ $б$, $- \cdot -$ $в$) на расстоянии $0,025$ мм от поверхности: 1 — $\beta = 60^\circ$; 2 — $\beta = 90^\circ$; 3 — $\beta = 120^\circ$

Остаточные напряжения при упрочнении по варианту $в$ равны разности напряжений вариантов a и $б$, причём угол β 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].

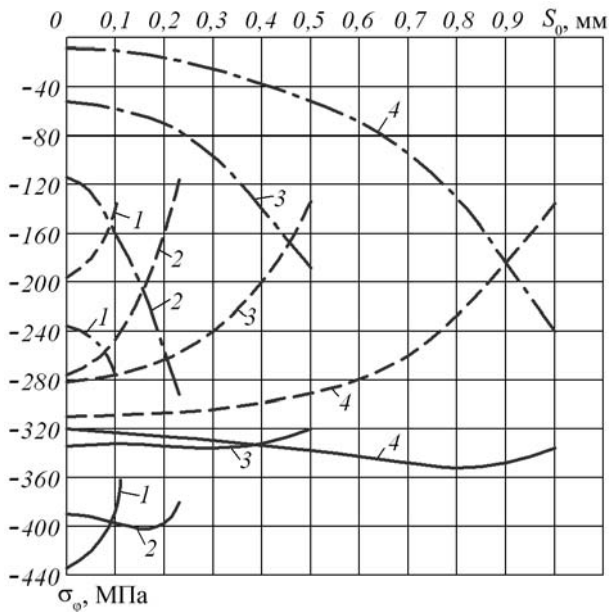


Рис. 7. Распределение меридиональных остаточных напряжений σ_ϕ по дуге контура впадины концентратора (варианты упрочнения — *a*, — — — *б*, — · — *в*)

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 σ_ϕ 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 β . При упрочнении по

этому варианту увеличение R и уменьшение β 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.