Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. С. Вакулюк, В. П. Сазанов, А. А. Филиппов, О. С. Афанасьева, Закономерности распределения остаточных напряжений при упрочнении концентратора, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2009, выпуск 2(), 107–113

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu713>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.205.225.156

26 апреля 2023 г., 15:24:26

УДК 539.319:539.4.014

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УПРОЧНЕНИИ КОНЦЕНТРАТОРА

В. С. Вакулюк¹, В. П. Сазанов², А. А. Филиппов¹,
О. С. Афанасьева³

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва, 443086, Самара, Московское ш., 34.

² ЗАО «Волжское конструкторское бюро ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королёва», 443009, Самара, ул. Псковская, 24.

³ Самарский государственный технический университет, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mails: sopromat@ssau.ru, afa@pm.samgtu.ru

С помощью изотропных первоначальных деформаций изучено распределение 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 надреза и упрочнение впадины концентратора.

Ключевые слова: *схемы упрочнения детали, распределение остаточных напряжений, первоначальные деформации, плоская деталь с концентраторами.*

Обработка дробью деталей с надрезами, имеющими небольшие углы раскрытия, ведёт, как правило, к неравномерному упрочнению поверхностных слоёв 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 детали с глубокими симметричными надрезами (см. рис. 1) при упрочнении впадины и явилось целью настоящей работы.

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

В расчётах были приняты следующие геометрические параметры: $d=1$ мм, $D=2,5$ мм, $b=6,25$ мм, радиус впадины R изменялся от 0,25 до 1,25 мм, а угол раскрытия концентратора β принимался равным 60, 90 и 120°. Толщина слоя δ с первоначальной деформацией (на рис. 2 этот слой затемнён)

Владимир Степанович Вакулюк (к.т.н., доц.), доцент, каф. сопротивления материалов. Вячеслав Петрович Сазанов, начальник сектора. Александр Александрович Филиппов, аспирант, каф. сопротивления материалов. Ольга Сергеевна Афанасьева, аспирант, каф. прикладной математики и информатики.

Рис. 1. Исследуемая деталь

Рис. 2. Область детали, разбиваемая на конечные элементы

задавалась равной 0,1 и 0,2 мм и постоянной по всей впадине. Также принималось, что модуль продольной упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, однородная первоначальная деформация $\varepsilon_0 = 1,56 \cdot 10^{-3}$.

Результаты расчёта приведены на рис. 3, где показана зависимость меридиональных остаточных напряжений σ_φ в наименьшем сечении у поверхности детали при различных толщинах деформированного слоя от $S_0 = R(\pi - \beta)/2$ — половины длины дуги контура впадины концентратора. Остаточные напряжения здесь приведены к относительному параметру K , который определяется по следующей формуле:

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

где σ_φ — меридиональные остаточные напряжения, вычисленные по методу конечных элементов, $\sigma_{\delta \rightarrow 0} = Ez_0/(1 - \mu^2)$ — остаточные напряжения при упрочнении бесконечно тонкого слоя детали.

Анализ результатов расчёта (см. рис. 3) показывает, что распределение остаточных напряжений при упрочнении впадины концентратора аналогично распределению осевых остаточных напряжений в гладкой детали при упрочнении малых по протяжённости зон, где также наблюдается снижение остаточных напряжений при уменьшении 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.

На рис. 4 приведено распределение остаточных напряжений по дуге $S = R\varphi$ контура впадины концентратора при $\beta = 60^\circ$ и 120° на расстоянии от поверхности $a = 0,025$ мм и $0,175$ мм для $R = 0,25$ мм и $1,25$ 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 R и β .

На рис. 5 представлено распределение осевых остаточных напряжений σ_z по толщине поверхностного слоя a в наименьшем сечении детали для некоторых вариантов размеров концентраторов. Из приведённых данных следует, что при упрочнении впадин малых размеров происходит существенное изменение характера распределения сжимающих остаточных напряжений по

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

Рис. 4. Распределение остаточных напряжений при $\delta = 0,2$ мм во впадине концентратора на различном расстоянии от поверхности (сплошная линия $a = 0,025$ мм, штриховая линия $a = 0,175$ 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, $\beta = 60^\circ$

толщине детали, выражающееся в перемещении экстремума от поверхности вглубь детали и в появлении достаточно высоких значений растягивающих остаточных напряжений под упрочнённым слоем (варианты а, б), что может оказать отрицательное влияние на сопротивление усталости детали [1].

Таким образом, 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 детали с концентратором.

Были изучены закономерности остаточных напряжений при различных вариантах упрочнения детали с концентратором. Рассматривались возможные на практике варианты упрочнения деталей, приведённые на рис. 6, где зона с первоначальными деформациями толщиной δ затемнена. По варианту а упрочняется вся поверхность детали, по варианту б — только криволинейная часть впадин надрезов, а по в — вся поверхность детали, кроме криволинейной части впадин надрезов.

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, поэтому в качестве параметра, характеризующего это положение, была выбрана величина S_0 , используемая в первой части исследования. На рис. 7 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 а с уменьшением радиуса впадины R и с увеличением угла раскрытия концентратора β , т. е. 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 напряжений гладкого образца.

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

Рис. 5. Осьевые остаточные напряжения σ_z при $\delta = 0,2$ мм в наименьшем сечении детали: а — $R = 0,25$ 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. 6. Варианты упрочнения детали

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 а. 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].

Остаточные напряжения при упрочнении по варианту в равны разности напряжений вариантов а и б, причём угол β в этом случае оказывает наименьшее влияние по сравнению с другими вариантами. Уменьшение S_0 при неупрочнённой впадине ведёт к возрастанию напряжений в наименьшем сечении детали, и при достаточно малых величинах S_0 остаточные напряжения могут быть больше, чем при упрочнении самой впадины (вариант б). Это обстоя-

тельство необходимо учитывать при выборе метода поверхностного упрочнения, а также режимов и вариантов обработки деталей с концентраторами напряжений.

На рис. 8 показано изменение меридиональных остаточных напряжений σ_φ по дуге контура впадины концентратора. 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 [3], а по варианту б она может зарождаться и в других сечениях. При

Рис. 7. Распределение остаточных напряжений σ_φ в наименьшем сечении образца (варианты упрочнения: сплошная линия — а, штриховая линия — б, штрих-пунктирная линия — в) на расстоянии 0,025 мм от поверхности: 1 — $\beta = 60^\circ$; 2 — $\beta = 90^\circ$; 3 — $\beta = 120^\circ$

Рис. 8. Распределение остаточных напряжений σ_φ по дуге контура впадины концентратора (варианты упрочнения: сплошная линия — а, штриховая линия — б, штрих-пунктирная линия — 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, $\beta = 60^\circ$

упрочнении по варианту а 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.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию (проект РНП 2.1.1/3397) и РФФИ (проект № 07–01–00478–а).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов В. Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивления усталости // *Известия вузов. Машиностроение*, 1987. — № 7. — С. 3–6.
2. Белозёров В. В., Махатилова А. И., Туровский М. Л., Шифрин А. М. Остаточные макронапряжения при обкатывании без продольной подачи // *Вестник машиностроения*, 1986. — № 10. — С. 59–61.
3. Павлов В. Ф., Курпичёв В. А., Иванов В. Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. — Самара: СНЦ РАН, 2008. — 64 с.

Поступила в редакцию 20/VII/2009;
в окончательном варианте — 31/VIII/2009.

MSC: 74C05

PATTERNS OF DISTRIBUTION OF RESIDUAL STRESSES AT HARDENING CONCENTRATOR

V. S. Vakuluk¹, V. P. Sazanov², A. A. Philippov¹, O. S. Afanasieva³

¹ S. P. Korolyov Samara State Aerospace University,
34, Moskovskoe sh., Samara, 443086.

² Volga Design Office of Rocket and Space Corporation "Energia" named after S. P. Korolev,
24, Pskovskaya str., Samara, 443009.

³ Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100.

E-mails: sopromat@ssau.ru, afa@pm.samgtu.ru

Distribution of residual stresses in a flat specimen with deep symmetric cuts after surface hardening in compliance with geometry of concentrators and hardening variants is studied with the help of isotropic initial deformations. It is established that corner disclosing of a cut and hardening of a hollow concentrator essentially influence the size and character distribution of residual stresses.

Key words: flat detail with concentrators, plans a detail of hardening, distribution of residual stresses, initial deformations.

Original article submitted 20/VII/2009;
revision submitted 31/VIII/2009.

Vladimir S. Vakuluk (Ph. D. (Techn)), Associate Professor, Dept. of Resistance Materials.
Vyaceslav P. Sazanov, Sector Chief. Alexandr A. Philippov, Postgraduate Student, Dept. of Resistance Materials. Ol'ga S. Afanasieva, Postgraduate Student, Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.