

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОЙ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ БАЛКЕ

Радченко В. П., Шишкин Д. М.

Самарский государственный технический университет, г. Самара,

[shishkin.dim@yandex.ru](mailto:shishkin.dim@yandex.ru)

*Ключевые слова:* балка, концентратор, остаточные напряжения, поверхностное упрочнение, численный метод

В авиадвигателестроении хорошо известны способы увеличения усталостной прочности изделий поверхностным пластическим деформированием (ППД) за счёт наведения слоя сжимающих остаточных напряжений (ОН), которые компенсируют действие эксплуатационных напряжений растяжения. Наличие в деталях концентраторов напряжений существенно снижает их прочностной ресурс, поэтому основной вопрос возникает к эффективности применения методов упрочнения к таким телам. Несмотря на глубокое и длительное развитие теории упрочнения, большинство методов оценки ОН применимы лишь к телам с гладкой «бездефектной» структурой поверхности.

Работа посвящена оценке ОН и пластических деформаций (ПД) в изотропной упрочнённой призматической балке на основе параметрического анализа геометрии одиночного концентратора типа сквозного надреза полукруглой, квадратной и V-образной формы. Исследование выполнено на примере балки квадратного сечения  $100 \times 10 \times 10$  мм из жаропрочного сплава ЭП742, верхняя грань которой подвергалась дробеструйному поверхностному упрочнению. Декартова система координат выбиралась таким образом, что плоскость  $xOz$  совмещалась с упрочнённой гранью, а ось  $Oy$  – по глубине упрочнённого слоя. В качестве исходных данных использовались экспериментальные сведения для аналогичного гладкого «бездефектного» образца, приведённые в работе [1].

Сначала решалась задача балки с надрезом полукруглой формы радиуса  $\rho = \{0,1; 0,3\}$  мм по известному распределению экспериментальной компоненты тензора напряжений  $\sigma_x = \sigma_x(y)$  для гладкого образца. Для этого рассматриваемая задача была сведена к решению фиктивной температурной задачи в упругой и упругопластической постановках с целью сравнительного анализа полученных результатов.

Процедура численного расчёта была реализована в программном конечно-элементном пакете ANSYS Mechanical APDL и состояла из поэтапного решения. На первом этапе реконструкция полей ОН и ПД в упрочнённом слое выполнялась для балки с гладкой «бездефектной» поверхностью по известным аналитическим зависимостям, приведённым в работе [1]. Второй этап заключался в расчёте коэффициентов температурного расширения  $\beta_i = \beta_i[T(y)]$  ( $i = x, y, z$ ) из решения температурной задачи с граничными условиями первого рода при условии равенства между температурными и остаточными пластическими деформациями. На третьем этапе реализовалась процедура опережающего поверхностного пластического деформирования, т.е. из расчётной модели удалялся объём материала с наведёнными ОН, соответствующий концентратору полукруглого профиля. В результате происходило перераспределение ОН в области концентратора, которое определялось из решения термоупругой или термоупругопластической задач.

В ходе сравнительного анализа было установлено существенное расхождение полученных результатов решения в упругой и упругопластической постановках для всех компонент ОН  $\sigma_i = \sigma_i(y)$  вблизи вершины надреза при  $\rho = 0,1$  мм, но полученные напряжения в обеих канавках при  $\rho = 0,3$  мм имели практически одинаковые значения. Это обосновано тем фактом, что в первом случае размер концентратора напряжений не превышает толщину упрочнённого слоя  $H = 0,2$  мм, где наблюдаются наибольшие (по модулю) сжимающие

напряжения. Во втором случае полукруглый надрез выходит за границу упрочнённого слоя в основной материал, где действие ОН сжатия меньше и не превышает предел текучести.

На основе полученных результатов в работе было проведено аналогичное исследование расчётных значений ОН для призматической упрочнённой балки с надрезом квадратного (со сторонами  $a = \{0,1; 0,3\}$  мм) и V-образного (глубиной  $b = \{0,1; 0,3\}$  мм, углом раскрытия  $\varphi = \{15^\circ; 30^\circ; 40^\circ\}$  и радиусом при вершине  $\rho_0 = 0,01$  мм) профиля. По полученным результатам было установлено, что значительное расхождение между результатами сжимающих напряжений из решения задач фиктивной термоупругости и термоупругопластичности наблюдается в случае балки с V-образным вырезом независимо от рассматриваемых в работе значений параметра  $b$ .

Обобщая полученные в работе результаты, можно сделать вывод, что решение задач подобного рода следует проводить с учётом зоны пластичности материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-01-00550а).

### Список литературы

1. Радченко В. П., Афанасьева О. С., Глебов В. Е. Влияние технологии поверхностного пластического упрочнения, остаточных напряжений и граничных условий на выпучивание балки / Вестн. Перм. нац. иссл. политехн. ун-та. Механика. 2020. № 1. С. 87-98. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.1.07.

### Сведения об авторах

Радченко Владимир Павлович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедры «ПМИИ». Область научных интересов: математические модели неупругого деформирования и разрушения материалов поверхностно упрочнённых конструкций.

Шишкин Дмитрий Михайлович, аспирант кафедры «ПМИИ». Область научных интересов: численные методы механики упрочнённых конструкций с концентраторами напряжений.

## A PARAMETRIC ANALYSIS OF THE INFLUENCE GEOMETRICAL PROPERTIES OF THE STRESS CONCENTRATOR ON STRESS-STRAIN STATE IN SURFACE-HARDENING OF THE PRISMATIC BEAM

Radchenko V. P., Shishkin. D. M.

Samara State Technical University, Samara, Russia, [shishkin.dim@mail.ru](mailto:shishkin.dim@mail.ru)

*Keywords: beam, concentrator, residual stresses, surface-hardening, numerical method*

The numerical method for solving the tasks about the distribution of residual stresses for surface-hardening beam with a stress concentrator of the semicircular, square and V-shaped profile in elastic and elastoplastic settings was developed and realized.