

**МОДИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РАСЧЁТА  
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОЙ  
ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ БАЛКЕ  
ПРИ НАЛИЧИИ НАДРЕЗА ПОЛУКРУГЛОГО ПРОФИЛЯ**

Шишкин Д. М.

Филиал Самарского государственного технического университета, г. Сызрань,  
shishkin.dim@yandex.ru

*Ключевые слова:* балка, полукруглый надрез, опережающее поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, модифицированный метод, ANSYS.

Востребованность в применении методов поверхностного пластического деформирования (ППД) в отрасли авиадвигателестроения обосновывается значительным повышением прочностных свойств деталей за счёт наведения тонкого приповерхностного слоя сжимающих остаточных напряжений (ОН) при неизменной материалоёмкости. Оценить уровень таких напряжений и характер их распределения в упрочнённых элементах конструкций без применения вычислительных программных комплексов не всегда представляется возможным, особенно если речь идёт о деталях сложной геометрической формы. В этой связи возникает острая необходимость в разработке новых и совершенствовании уже существующих численных методов расчёта полей напряжённо-деформированного состояния (НДС) упрочнённых деталей.

Настоящая работа посвящена модификации существующего численного метода расчёта полей ОН и пластических деформаций (ПД) в программной среде инженерного анализа ANSYS Mechanical APDL, представленного в работе [1]. Реализация метода осуществлялась на примере решения упругой задачи для гладкой «бездефектной» поверхностно упрочнённой призматической балки из сплава ЭП742, а также для аналогичной балки, ослабленной сквозным надрезом полукруглого профиля с радиусом  $\rho = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,5\}$  мм.

Алгоритм модифицированного метода сводится к следующей последовательности. Первый этап заключается в восстановлении полей ОН и ПД после ультразвукового упрочнения верхней грани гладкой «бездефектной» балки, совмещённой с плоскостью  $xOz$  в декартовой системе координат  $Oxyz$ , посредством аппроксимации известной экспериментальной зависимости  $\sigma_x = \sigma_x(y)$ . На втором этапе задаётся неоднородное температурное поле  $T = T(y)$  с меньшим градиентом температур (на упрочнённой грани задаётся температура  $T_1 = 30^\circ\text{C}$  (вместо  $T_1 = 400^\circ\text{C}$  [1]), на грань, противоположную упрочнённой,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ , остальные грани теплоизолированы), после чего из решения температурной задачи с граничными условиями первого рода становятся известными коэффициенты температурного расширения  $\beta_i = \beta_i[T(y)]$  ( $i = x, y, z$ ), при этом температурные деформации полагаются равными остаточным ПД. Отличие третьего этапа при решении задачи фиктивной термоупругости для гладкой балки заключается в задании постоянного значения модуля Юнга  $E = 2,21 \cdot 10^5$  МПа, не зависящего от температуры, и коэффициента Пуассона  $\nu = 0,3$  (в работе [1] –  $\nu = 0,4999$ ).

Методика расчёта полей ОН в балке с концентратором напряжений полукруглого профиля основывается на вышеописанном модифицированном методе для гладкого «бездефектного» образца и реализовывалась в соответствии с технологией опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД). Для этого в качестве исходных данных использовалось НДС упрочнённой гладкой балки, после чего осуществлялся процесс удаления части объёма балки с наведёнными упрочнением ОН и ПД, представляющего полукруглый надрез, что приводило к перераспределению ОН вблизи надреза.

По полученным значениям численных расчётов ОН по исходному методу и модифицированному для гладкой «бездефектной» балки (рис. 1,а) и балки с концентратором напряжений (рис. 1,б) был проведён сравнительный анализ результатов. Маркерами показаны

результаты численных расчётов ОН  $\sigma_x = \sigma_x(h)$ , полученных по исходному методу, пунктирными линиями – по модифицированному методу. Сплошной линией отмечены результаты расчёта ОН, полученные на основе аппроксимации для гладкой балки.

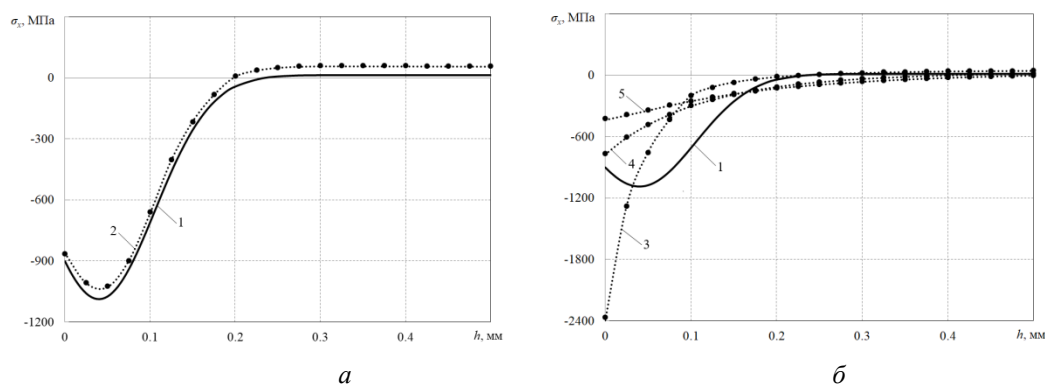


Рисунок 1 – Распределение ОН  $\sigma_x = \sigma_x(h)$  по глубине упрочнённого гладкого образца (а) и упрочнённого образца с надрезом (б): 1 – по аппроксимации для гладкой балки; 2 – гладкая балка, 3 – при  $\rho = 0,1$  мм, 4 – при  $\rho = 0,2$  мм, 5 – при  $\rho = 0,3$  мм

Из представленных графиков видно, что численные результаты, полученные по обоим методам расчёта ОН, практически идентичны как для случая упрочнённой гладкой «бездефектной» балки, так и для упрочнённой балки с полукруглым надрезом. Следует отметить, что представленный модифицированный метод расчёта более универсален по отношению к исходному [1], поскольку отсутствует зависимость модуля Юнга от температуры при имитации упрочнения, что может быть очень важным при решении задач о релаксации полей ОН с учётом неупругого деформирования (ползучести) в условиях высоких температур.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 23-29-00434).

### 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 авторе

Шишкин Дмитрий Михайлович, к.т.н., доцент кафедры «ТМС». Область научных интересов: численные методы механики упрочнённых конструкций с концентраторами напряжений.

## MODIFICATION OF THE NUMERICAL METHOD FOR CALCULATION RESIDUAL STRESSES IN A SURFACE-HARDENING PRISMATIC BEAM WITH A SEMICIRCULAR PROFILE NOTCH

Shishkin D. M.

Branch of Samara State Technical University, Syzran, Russia, shishkin.dim@yandex.ru

*Keywords: beam, semicircular notch, advanced surface plastic deformation, residual stresses, modified method, ANSYS.*

A modification of the numerical method for calculating residual stresses in a surface-hardening smooth beam and a similar beam with semicircular profile notch is presented.