

РЕШЕНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ О ФОРМИРОВАНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОЙ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ БАЛКЕ С НЕСКВОЗНОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ТРЕЩИНОЙ

Радченко В.П.¹, Шишкин Д.М.²

¹Самарский государственный технический университет, г. Самара

²Филиал Самарского государственного технического университета, г. Сызрань,
shishkin.dim@yandex.ru

Ключевые слова: балка, несквозная трещина, остаточные напряжения, поверхностное упрочнение, численный метод, ANSYS.

Износ и усталостное разрушение деталей газотурбинных двигателей (ГТД) по причине попадания в них посторонних предметов и соударении с ними при эксплуатации считается самой распространённой проблемой в современном авиадвигателестроении. Частичное решение указанной проблемы заключается в повышении прочностного ресурса элементов ГТД при неизменных массогабаритных характеристиках методами поверхностного пластического деформирования (ППД) за счёт формирования в деталях тонкого слоя сжимающих остаточных напряжений (ОН), который компенсирует растягивающие эксплуатационные напряжения вблизи появляющихся трещиноподобных дефектов, таких как царапины, вмятины, сколы, порезы и т.д. Особый интерес представляет изучение характера распределения полей ОН в области концентратора напряжений при условии предварительного упрочнения наружного слоя гладкой детали методами ППД.

Представленная работа посвящена численному решению упругопластической задачи о формировании и перераспределении ОН в области центральной несквозной поперечной трещины V-образного профиля длиной $a = 3$ мм, глубиной $b = \{0,1; 0,3\}$ мм, с начальным углом раскрытия $\varphi = 15^\circ$ и радиусом скругления при вершине $r = 0,01$ мм, расположенной в изотропной поверхностно упрочнённой призматической балке квадратного сечения $100 \times 10 \times 10$ мм из сплава ЭП742. В основе решения текущей задачи были использованы исходные данные и метод реконструкции полей ОН и пластических деформаций (ПД) для гладкой «бездефектной» балки с учётом перераспределения ОН после получения сквозного надреза полукруглого профиля в соответствии с технологией опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД), подробно изложенный в работе [1]. Рассмотрим основные этапы численного решения задачи в конечно-элементном пакете ANSYS Mechanical APDL в декартовой системе координат $Oxyz$, где плоскость xOz совмещена с упрочнённой поверхностью.

На начальном этапе по известному распределению экспериментальной компоненты тензора ОН $\sigma_x = \sigma_x(y)$ для гладкой «бездефектной» балки в соответствии с аналитическими зависимостями, приведёнными в работе [1], рассчитывались поля ОН и ПД. На втором этапе вычислялись коэффициенты 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 из решения задачи фиктивной термоупругости определялось напряжённо-деформированное состояние гладкой «бездефектной» балки после поверхностного упрочнения. На четвёртом этапе в соответствии с технологией ОППД с балки удалялась часть материала с наведёнными на предыдущем этапе ОН для образования несквозной поверхностной трещины, что приводило к перераспределению напряжений вблизи дефекта при повторном решении задачи в упругопластической постановке.

Оценка характера перераспределения ОН для данной задачи выполнялась по двум контурам вдоль направляющих линий: для компоненты тензора $\sigma_x = \sigma_x(h)$ по глубине дефекта h от наружной поверхности концентратора (рис. 1,а) и для компоненты тензора $\sigma_x = \sigma_x(l_i)$ вдоль линии фронта трещины (рис. 1,б).

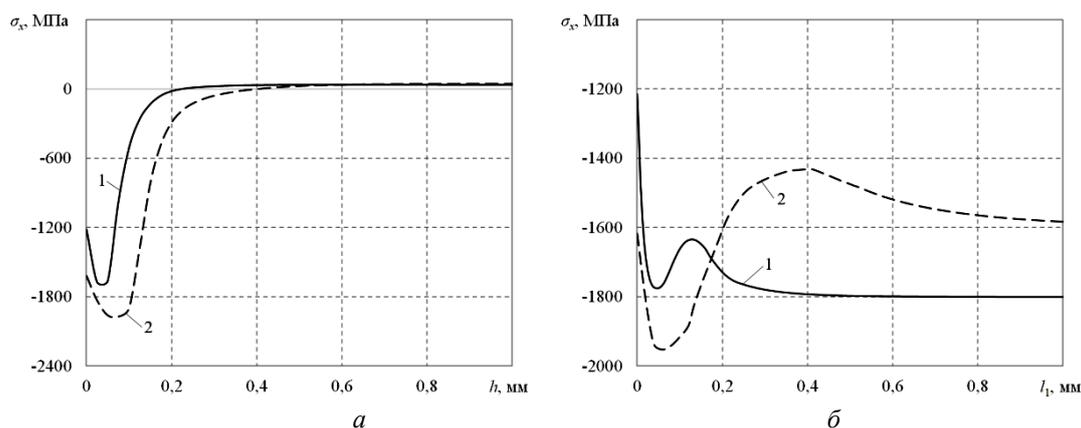


Рисунок 1 – Распределение компоненты ОН $\sigma_x = \sigma_x(h)$ по глубине дефекта от наружной поверхности (а) и компоненты ОН $\sigma_x = \sigma_x(l_1)$ вдоль линии фронта трещины (б): 1 – при $b = 0,1$ мм, 2 – при $b = 0,3$ мм

Установлено, что для обоих контуров при глубине трещины $b = 0,3$ мм в пределах начальной области раскрытия на поверхности дефекта наблюдаются бóльшие (по модулю) значения сжимающих ОН, чем при $b = 0,1$ мм. Это явление объясняется наличием дополнительных напряжений сжатия, возникающих вследствие появления изгибающих моментов в области дефекта, которые приводят к закрытию трещины, причём интенсивность установленного эффекта увеличивается по мере роста глубины дефекта.

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

Список литературы

1. Радченко В.П., Шишкин Д.М. Метод реконструкции остаточных напряжений в призматическом образце с надрезом полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования / Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20, № 4. С. 478-492. DOI: 10.18500/1816-9791-2020-20-4-478-492.

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

SOLUTION OF ELASTOPLASTIC PROBLEM OF THE FORMATION OF RESIDUAL STRESS IN SURFACE-HARDENING PRISMATIC BEAM WITH A NON-THROUGH TRANSVERSAL CRACK

Radchenko V.P.¹, Shishkin D.M.²

¹Samara State Technical University, Samara, Russia

²Branch of Samara State Technical University, Syzran, Russia, shishkin.dim@yandex.ru

Keywords: beam, non-through crack, residual stresses, surface-hardening, numerical method, ANSYS.

Numerical solution of the problem is obtained of the formation of residual stress near the non-through central crack in surface-hardening beam made of EP742 alloy.