

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЁННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

© 2011 А. В. Чирков¹, В. П. Сазанов², В. А. Самойлов¹, Ю. С. Ларионова¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²Волжское конструкторское бюро Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королёва, г. Самара

Показано, что для моделирования перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах после опережающего поверхностного деформирования возможно использовать метод первоначальных деформаций.

Опережающее поверхностное пластическое деформирование, первоначальные деформации, остаточные напряжения, метод конечных элементов.

Решалась задача о перераспределении остаточных напряжений в цилиндрических деталях после нанесения концентратора на упрочнённую поверхность, т.е. после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОПД).

Распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя гладкой детали находится экспериментально методом колец и полосок [1]. Этот метод достаточно обоснован и отработан для применения в лабораторных условиях. Применение расчётных комплексов типа MSC.Nastran\ MSC.Patran при определении остаточных напряжений в зоне концентратора после опережающего поверхностного пластического деформирования по первоначальным деформациям основано на сведении задачи теории упругости к температурной задаче теории термоупругости.

В общем случае материал, находящийся внутри элемента, может получать первоначальные деформации, обусловленные различными факторами. Если обозначить пропорциональную первоначальным деформациям матрицу через $\{\varepsilon_0\}$, то напряжения $\{\sigma\}$ в соответствии с законом Гука

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}), \quad (1)$$

где $[D]$ – матрица упругости, содержащая характеристики материала, $\{\varepsilon\}$ – матрица полной деформации, E – модуль продольной упругости материала, μ – коэффициент Пуассона.

В случае осесимметричной задачи, рассматриваемой в настоящем исследовании,

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta, \tau_{rz}]. \quad (2)$$

Если в качестве первоначальных рассматривать температурные деформации, то

$$\{\varepsilon_0\} = \alpha T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} (1 + \mu). \quad (3)$$

В связи с тем, что температурный коэффициент линейного расширения α есть величина постоянная, то при отсутствии действия внешних сил на свободное тело в области, удалённой от краевых зон, существует прямая зависимость между температурным полем и напряжениями. Причём в свободном теле температурные деформации, вызывающие напряжения, возникают только при неравномерном температурном поле.

С точки зрения использования современных расчётных комплексов, реализующих метод конечных элементов для моделирования напряжённо-деформированного состояния деталей и образцов, которые имеют упрочнённый поверхностный слой с известным распределением остаточных напряжений по его толщине a , возможно заменить зависимость $\sigma = \sigma(a)$ зависимостью $T = T(a)$ в виде математического выражения или в табличной форме.

Возможность использования материалов, изотропных по упругим свойствам, но с разными температурными коэффициентами линейного расширения по направлениям выбранной системы координат, позволяет моделировать любое заранее известное рас-

пределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя.

Исследовалось остаточное напряжённо-деформированное состояние цилиндрического образца диаметром $D = 15$ мм (рис. 1,а) из стали 45, а также цилиндрических образцов диаметром $D = 10$ мм и $D = 25$ мм (рис. 1,б-в) из стали 20. Гладкие образцы из стали 45 упрочнялись гидродробеструйной обработкой (ГДО), а образцы из стали 20 обкаткой роликом (ОР) с усилием $P = 0,5$ кН и $P = 1,0$ кН и пневмодробеструйной обработкой (ПДО). После упрочнения на образцы наносился концентратор в

виде кругового надреза полукруглого профиля: на образцы из стали 45 – радиусом $R=0,3$ мм (рис. 1,а), а на образцы из стали 20 – $R=0,3$ мм и $R=0,5$ мм (рис. 1,з). В результате нанесения надреза в образце происходит перераспределение остаточных напряжений. Методом колец и полосок была получена исходная эпюра осевых остаточных напряжений σ_z для гладких образцов (рис. 2). Для стали 45 решение задачи получено по более ранним методикам аналитическим способом и методом конечных элементов.

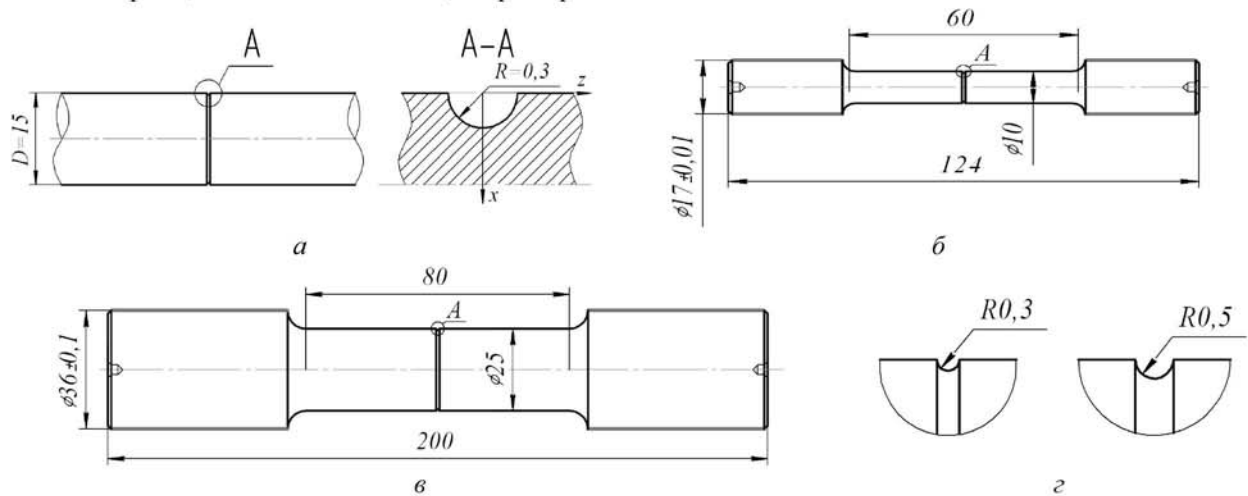


Рис. 1. Цилиндрические образцы для проведения испытаний на усталость: а – сталь 45 $D = 15$ мм, $R = 0,3$ мм, б – сталь 20 $D = 10$ мм, в – сталь 20 $D = 25$ мм; г – надрезы $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм, наносимые на образцы из стали 20

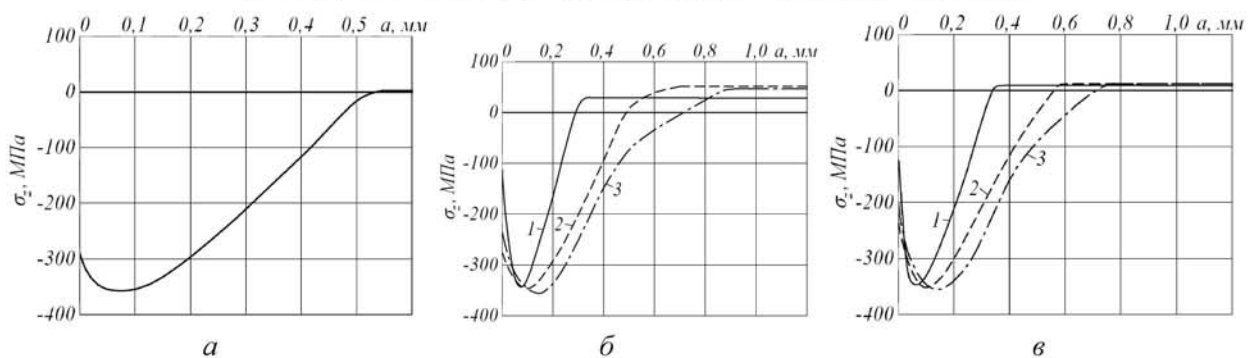


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения σ_z гладких образцов: а – сталь 45, $D = 15$ мм, ГДО; б – сталь 20, $D = 10$ мм; в – сталь 20, $D = 25$ мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

В силу симметрии образца относительно оси, а также относительно середины надреза в качестве расчётной модели представляется возможным использовать четверть осевого сечения образца (рис. 3) и рассматривать задачу в плоской осесимметричной постановке. Расчётный комплекс MSC.Patran позволяет рассматривать задачу в осесимметричной постановке с использо-

ванием плоского конечного элемента 2D Solid.

Для оптимизации вычислительных ресурсов и процедуры расчётов была разработана схема разбиения образца на конечные элементы, представленная на рис. 3.

Использованная модель позволяет сэкономить на количестве элементов и, соответственно, на времени расчёта.

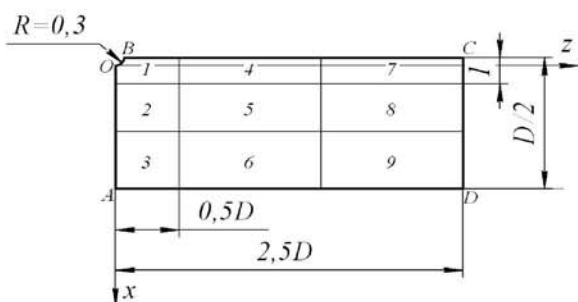


Рис. 3. Расчётная модель

Разработанная схема позволяет также с достаточной точностью рассчитать остаточные напряжения на дне надреза и по толщине наименьшего сечения, необходимые для прогнозирования предела выносливости упрочнённых образцов и деталей [2]. Размер элемента в области 1 выбирался из условий:

- обеспечения достаточного «разрешения» сетки:

значения напряжений с эпюры рис. 2 брались с шагом 0,02 мм, поэтому минимальный размер элемента должен быть хотя бы в два раза больше;

- оптимизации затрат памяти вычислительной техники:

величина оперативной памяти ограничена физической памятью рабочей станции, по-

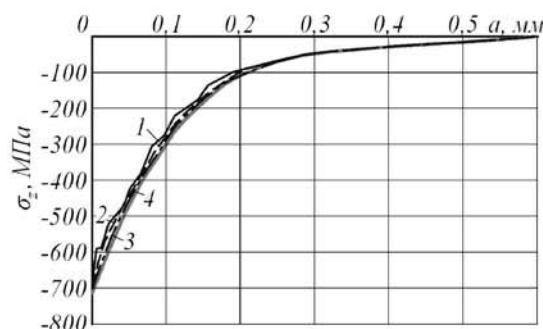
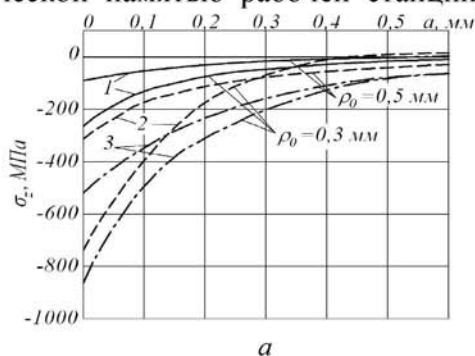


Рис. 4. Распределение суммарных осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в области дна надреза образцов из стали $D=15$ мм с круговым надрезом полу-круглого профиля радиуса $R=0,3$ мм после ГДО: 1 – модель, 2 – по более ранним методикам

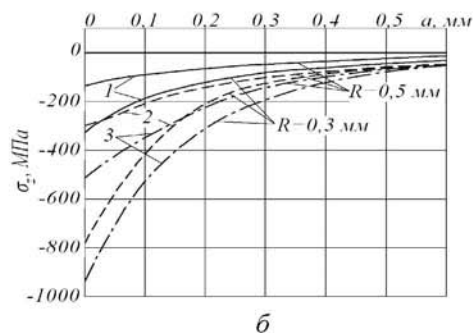


Рис. 5. Распределение суммарных остаточных напряжений σ_z по толщине поверхностного слоя a в области дна надреза образцов из стали 20 диаметром $D=10$ мм (а) и $D=25$ мм (б) после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P=0,5$ кН; 3 – ОР, $P=1,0$ кН

Таким образом, с использованием метода конечных элементов и обобщённых критериев распределения остаточных напряжений впервые решена задача по определению остаточных напряжений в цилиндрических образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования по первоначальным деформациям для образцов и деталей различного диаметра, что даёт возможность точного прогнозирования приращения предела выносливости. А на базе широкого теоретического исследования математической модели перераспреде-

этому следует ограничивать суммарное количество элементов 1-1,5 миллионами.

На разработанную конечно-элементную модель налагались граничные условия, соответствующие условиям симметрии, и температурное поле $T=T(a)$, которое задавалось в табличном виде в зависимости от соответствующей координаты x .

Распределение суммарных осевых σ_z остаточных напряжений в наименьшем сечении образца приведено на рис. 4, 5.

ния остаточных напряжений, вызванных опережающим поверхностным пластическим деформированием в деталях и образцах различного диаметра по первоначальным деформациям, найдены оптимальные параметры расчёта суммарных остаточных напряжений, которые дают возможность существенно сократить время расчётов в системе MSC.Nastran\MSC.Patran.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/13944).

Библиографический список

1. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст] / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.53. – С.32-42.
2. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.Б. Иванов.– Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.

MODELING OF REDISTRIBUTION OF RESIDUAL STRESSES IN THE CYLINDRICAL SPECIMENS AFTER ADVANCING SURFACE PLASTIC FORMING

© 2011 A. V. Chirkov¹, V. P. Sazanov², V. A. Samoylov¹, Yu. S. Larionova¹

¹Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

²Volga design bureau RSC «Energiya» of S.P. Korolyov, Samara

It is shown that for modeling of residual stresses redistribution in the strengthened cylindrical specimens after advancing surface plastic forming initial deformation method can be used.

Advancing surface plastic forming, initial deformations, residual stresses, finite elements method.

Информация об авторах

Чирков Алексей Викторович, ассистент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-27 E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Сазанов Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, начальник отдела прочности Волжского конструкторского бюро Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королёва. Тел.: (846) 267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Самойлов Виталий Андреевич, аспирант кафедры прочности, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: v.a.samoylov@list.ru. Тел.: (846)267-45-27. Область научных интересов: механика разрушения.

Ларионова Юлия Сергеевна, аспирант кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Chirkov Alexey Viktorovich, assistant of department «strength of materials», Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.

Sazanov Vyacheslav Petrovich, candidate of technical science, chief of department of Volga design bureau RSC «Energiya» of S.P. Korolyov. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.

Samoylov Vitalij Andreevich, postgraduate of department «durability», Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-27. E-mail: v.a.samoylov@list.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.

Larionova Yulia Sergeevna, postgraduate of department «strength of materials», ¹Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: 8 (846) 267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.