

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ С НАДРЕЗАМИ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ВЫДЕРЖКЕ

Глебов В.Е.

Самарский государственный технический университет, г. Самара,
glebov.ve@samgtu.ru

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, надрез, остаточные напряжения, пластические деформации, ползучесть, релаксация напряжений

Для повышения материал- и ресурсоемкости деталей на машиностроительных производствах применяют различные упрочняющие технологии, в частности, поверхностное пластическое деформирование (ППД). Упрочненные детали и элементы конструкций впоследствии зачастую эксплуатируют при высоких температурах, что сопровождается проявлением реологических свойств материала – явлением ползучести. Изучение этого процесса является важным, поскольку накопление деформации ползучести приводит к снижению (по модулю) сжимающих технологических остаточных напряжений (ОН), а значит, нивелирует полезный эффект ППД. Более того, поверхность деталей может быть «ослаблена» на этапе их производства конструктивным и функциональным назначением (надрезы, канавки, галтели) или приобретенными дефектами от воздействий внешней среды при эксплуатации, и изучение релаксации ОН в условиях ползучести в таких деталях является не менее важной задачей.

В данной работе изучается релаксация ОН при термоэкспозиции с температурой $T = 700^\circ \text{C}$ в течение 100 часов после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) цилиндров радиуса $a = 3.76 \text{ мм}$ из сплава ЭИ698 с нанесенными на их боковую поверхность: 1) одиночного полукруглого надреза радиуса $\rho = \{0.1, 0.3, 0.5\} \text{ мм}$ (рис. 1); 2) серии периодически расположенных надрезов полукруглого профиля радиуса $\rho = \{0.1, 0.3\} \text{ мм}$ при числе надрезов $n = \{3, 5, 7\}$ (рис. 2); 3) одиночного квадратного надреза с длиной стороны $d = \{0.1, 0.3\} \text{ мм}$ (рис. 3); 4) одиночного V-образного надреза глубины $s = \{0.1, 0.3\} \text{ мм}$ и углом раскрытия $\varphi = \{1^\circ, 5^\circ, 15^\circ\}$ (рис. 4). Используются стандартные обозначения компонент тензоров ОН и пластических деформаций (ПД) и стандартная цилиндрическая система координат.

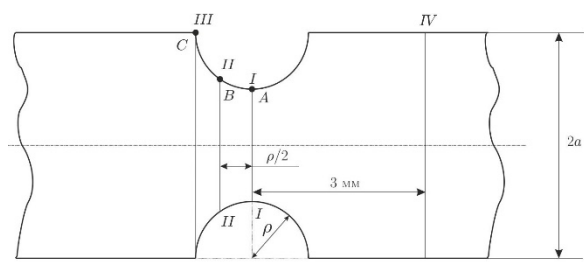


Рис. 1 - Схематическое изображение цилиндра с одиночным полукруглым концентратором

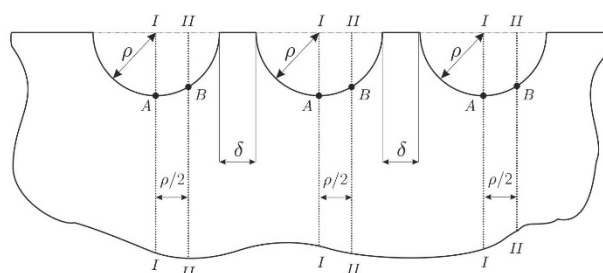


Рис. 2 - Схематическое изображение серии периодически расположенных полукруглых надрезов

Предварительно, с целью проверки адекватности используемого в дальнейшем численного метода, решена задача реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния (НДС) в гладком (бездефектном) цилиндре из сплава ЭИ698 на основе феноменологического метода [1] восстановления НДС по частично известным экспериментальным данным, метода расчета по первоначальным деформациям на основе [2], и численного метода конечных элементов. На основе теории установившейся ползучести

методом конечных элементов рассчитана релаксация ОН в гладком цилиндре шагами по времени.

Разработанный метод расчета релаксации ОН в гладком цилиндре без принципиальных изменений переносится на цилиндры с надрезами: требуются лишь новые конечно-элементные сетки, в которых удалена часть материала, соответствующая области надреза, а в оставшейся области распределение начальных ПД полагается таким же, как и в гладком цилиндре. Однако в цилиндрах с надрезами квадратной и V-образной формы в результате реконструкции НДС после упрочнения при решении задачи в упругой постановке возникают нереалистичные (для ЭИ698) значения ОН (порядка 1500-2500 МПа). Поэтому решение задачи реконструкции для цилиндров с надрезами этого типа выполнялось в упругопластической постановке для учета возникновения вторичных ПД от нанесения надреза. В качестве примера на рис. 5 приведены расчетные значения компоненты $\sigma_z = \sigma_z(h)$ тензора ОН после упрочнения в сечении I-I цилиндра с V-образным надрезом при $c = 0.1$ мм, $\varphi = 1^\circ$ ($h = a - r - c$, см. рис. 4) в упругой (маркер 1) и упругопластической постановках (маркер 2). Видно, что учет появления вторичных ПД приводит к физически приемлемым расчетным значениям.

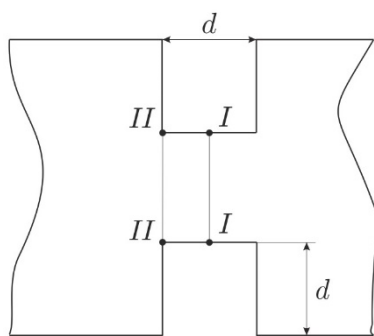


Рис. 3 - Схематическое изображение профиля квадратного надреза

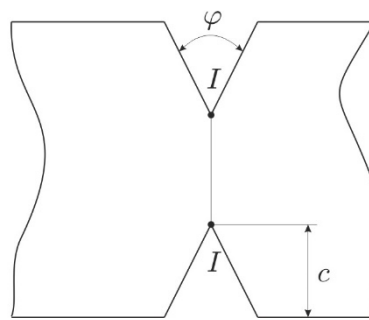


Рис. 4 - Схематическое изображение V-образного надреза

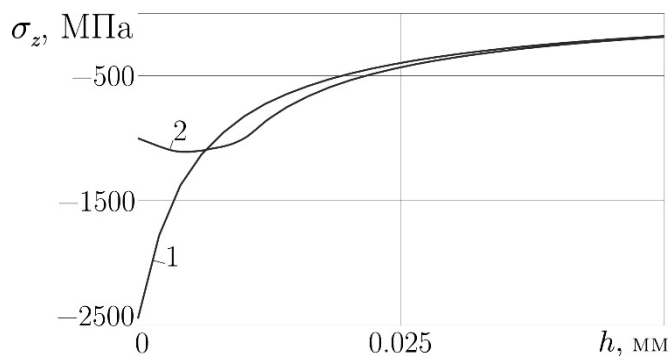


Рис. 5 - Расчетные значения компоненты $\sigma_z = \sigma_z(h)$ в цилиндре с V-образным надрезом

На рис. 6 и 7 в качестве примеров приведены расчетные данные релаксации компоненты $\sigma_\theta = \sigma_\theta(h)$ тензора ОН в цилиндре с одиночным полукруглым надрезом в сечении I-I (см. рис. 1) при $\rho = 0.1$ мм ($h = a - r - \rho$, см. рис. 1) и с квадратным надрезом в «опасном» сечении II-II при $d = 0.1$ мм ($h = a - r - d$, см. рис. 3). Маркеры на графиках: 1 – данные после упрочнения при $T = 20^\circ$ С, 2 – температурная нагрузка до $T = 700^\circ$ С, 3 – после ползучести при $T = 700^\circ$ С в течение 10 часов, 4 – после ползучести в течение 100 часов, 5 – температурная разгрузка до $T = 20^\circ$ С.

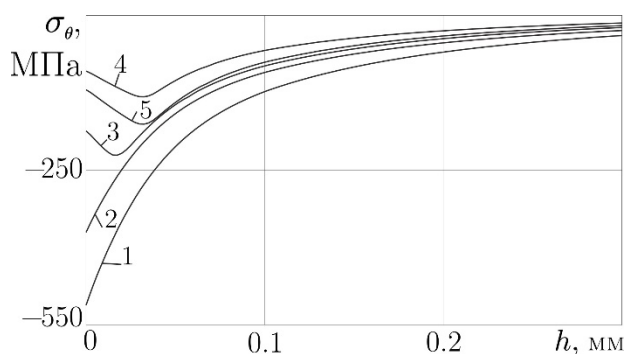


Рис. 6 - Релаксация компоненты $\sigma_\theta = \sigma_\theta(h)$ тензора ОН в сечении I-I цилиндра с полукруглым надрезом

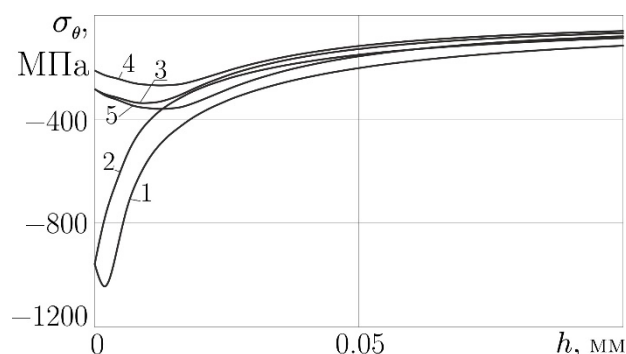


Рис. 7 - Релаксация компоненты $\sigma_\theta = \sigma_\theta(h)$ тензора ОН в сечении II-II цилиндра с квадратным надрезом

Отметим, что независимо от формы и параметров надреза на их дне после полного цикла нагружения (от упрочнения до температурной разгрузки после ползучести в течение 100 часов) наблюдаются отрицательные значения компонент тензора ОН, что является позитивным фактором при оценке эффективности ОППД.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № РНФ 23-29-00434).

Список литературы

1. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях – М.: Машиностроение-1, 2005. – 226 с.
2. Павлов В. Ф., Столяров А. К., Павлович Л. И. Исследование остаточных напряжений в резьбе болтов по первоначальным деформациям // Проблемы прочности, 1987. № 5. С. 117–119.

Сведения об авторе

Глебов В.Е., аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика». Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела.

RELAXATION OF RESIDUAL STRESSES IN SURFACE-HARDENED INCISED CYLINDERS UNDER CREEP CONDITIONS DURING THERMAL EXPOSURE

Glebov V.E.

Samara State Technical University, Samara, Russia, glebov.ve@samgtu.ru

Keywords: surface plastic deformation, incision, residual stresses, plastic deformations, creep, stress relaxation

The relaxation of residual stresses after hardening in cylinders with semicircular, square, and V-shaped incisions has been numerically calculated.