

РЕКОНСТРУКЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ПОСЛЕ ДВУСТОРОННЕГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОГО ЦИЛИНДРА

М.М. Акинфиева, В.П. Радченко

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Обоснование. Надежность — один из важнейших эксплуатационных показателей различных конструкций, повышение которого может привести к росту производительности. Технологические способы повышения прочности деталей являются востребованными направлениями в развитии производства. Технологией повышения сопротивляемости материала разрушению является упрочнение. Один из распространенных видов упрочнения — поверхностное пластическое деформирование (ППД), все его методы основаны на пластических свойствах металлов, способных принимать остаточные напряжения без нарушения целостности и объема деталей. Положительное влияние ППД связывают с образованием в тонком приповерхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Отсюда следует задача определения их величин и характера распределения по глубине упрочненного слоя, значимость решения данной задачи заключается в том, что информация о напряженно-деформированном состоянии детали необходима для расчета ее прочности в процессе эксплуатации.

Цель — разработка универсальной математической модели реконструкции полей остаточных напряжений.

Методы. Рассматривается обратная краевая задача реконструкции остаточных напряжений в тонкостенной трубке после поверхностного двустороннего упрочнения. Предложена математическая модель реконструкции остаточных напряжений [1]:

$$\begin{aligned}\sigma_r(r) &= \frac{1}{r} \int_{R_1}^r \sigma_\theta(\xi) d\xi, R_1 \leq r \leq R_2 (R_1 = 5 \text{ мм}, R_2 = 6 \text{ мм}), \\ q_\theta(r) &= \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1+\alpha\nu)^2 E} r^{\frac{2+\alpha}{1+\alpha\nu}} \int_{R_1}^r \xi^{\frac{1+\alpha-\alpha\nu}{1+\alpha\nu}} (\sigma_r(\xi) + (1+\alpha)\sigma_\theta(\xi)) d\xi + \frac{1+\nu}{(1+\alpha\nu)E} (\nu\sigma_r(r) - (1-\nu)\sigma_\theta(r)), \\ q_z(r) &= \alpha q_\theta(r), q_r = -q_\theta(r)(1+\alpha), \\ \varepsilon_z^0 &= \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \xi \left[q_z(\xi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_r(\xi) + \sigma_\theta(\xi)) \right] d\xi, \\ \sigma_z(r) &= E(\varepsilon_z^0 - q_z(r)) + \nu(\sigma_r(r) + \sigma_\theta(r)).\end{aligned}\tag{1}$$

Для аппроксимации окружной компоненты тензора остаточных напряжений была использована функциональная зависимость:

$$\sigma_\theta(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left[-\frac{(R_2 - r + h_1^*)^2}{b_1^2}\right] - \sigma_2 \exp\left[-\frac{(r - R_1 - h_2^*)^2}{b_2^2}\right],$$

для идентификации неизвестных параметров $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, b_1, b_2$ были использованы функциональные уравнения, полученные из прохождения эпюры остаточных напряжений через четыре характерные точки и условия самоуравновешенности. В нулевом приближении было решено аппроксимировать отдельно напряжения в области внутреннего и внешнего радиусов. Так же было решено уточнить неизвестные параметры σ_0, σ_1 , и σ_2 с помощью метода наименьших квадратов.

Реализация математической модели (1) затруднялась тем, что параметр α на практике определяется апостериорно, поэтому параметр α изменялся с малым шагом и для каждого нового значения реализовался расчет по формулам (1) до тех пор, пока функционал

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{zi} - \sigma_{zi}^3)^2}{\sum_{i=1}^N (\sigma_{zi}^3)^2}}, \quad i = \overline{1, N},$$

не достиг своего минимума, значение данного параметра оказалось равно 0,3 и 3,3 для состояния поставки и после поверхностного двустороннего упрочнения соответственно.

Результаты. Разработана математическая модель реконструкции полей остаточных напряжений и методики идентификации параметров математической модели для аппроксимации $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$. Разработано новое программное обеспечение на языке программирования Python. Решение поставленной задачи в данном ПО было реализовано с помощью библиотеки SymPy, что позволило получить аналитические выражения для всех компонент тензоров остаточных напряжений и деформаций. Поставленная задача также была решена численно, погрешность вычислений оказалась меньше 0,001.

Выводы. Анализ полученных результатов показал, что в состоянии поставки в области внутреннего радиуса наблюдаются сжимающие остаточные напряжения, а в области внешнего радиуса — растягивающие напряжения, такое распределение напряжений представляет собой неблагоприятный фактор, так как скорость процесса разрушения может возрасти. После поверхностного пластического упрочнения на обеих поверхностях формируются так называемые благоприятные остаточные напряжения, что можно оценить как положительное явление с точки зрения технологической практики.

Проверка математической модели для реконструкции полей остаточных напряжений экспериментальными данными показала соответствие расчетных и опытных данных тонкостенной трубки из сплава X18H10T.

Ключевые слова: полый цилиндр; состояние поставки; двустороннее упрочнение; остаточные напряжения и деформации; экспериментальные.

Список литературы

1. Радченко В.П., Павлов В.Ф., Саушкин М.Н. Исследование влияния анизотропии поверхностного пластического упрочнения на распределение остаточных напряжений в полых и сплошных цилиндрических образцах // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 1. С. 130–147.

Сведения об авторах:

Мария Михайловна Акинфиева — студентка, группа 2-ИАИТ-10М, институт автоматизации и информационных технологий; Самарский государственный технический университет, Самара, Россия. E-mail: mar.akinfiyeva@mail.ru

Владимир Павлович Радченко — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика»; Самарский государственный технический университет, Самара, Россия.