

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**А. В. Чигарев, М. В. Ручан, Т. В. Шукевич**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

Для труб, работающих под внутренним давлением в сложном процессе усталости материалов, можно выделить несколько моделей усталостного накопления повреждений в поверхностном слое: микрорастрескивание без выкрашивания и образование микротрещин, микрошероховатость за счет коррозии. Данные процессы отрицательно сказываются на прочности трубопроводов, так как со временем микрорастрескивание и микрошероховатость образуют магистральные трещины.

В работе предлагается модель упрочнения трубы под действием внутреннего давления, что соответствует упрочнению трубопровода без вывода его из эксплуатации. Данная модель действительна на стадии, когда трещиноватость в поверхностном слое носит начальный характер.

Макроскопически степень поврежденности  $\delta$  описывается функцией поврежденности, равной разнице объемов трещиноватого слоя и начального объема, деленная на начальный объем:

$$\Delta = \frac{V_1 - V_0}{V_0}.$$

Таким образом, залечивание трещиноватости будет соответствовать  $V_1 \rightarrow V_0$ , т. е.  $\Delta \rightarrow 0$ .

Уруго-пластическая модель микротрещины будет соответствовать модели Дагдейла-Панасюка-Леонова. В данной модели взаимодействие берегов трещин, отстоящих друг от друга, пренебрежительно мало, т. е. считают, что поверхность свободна от напряжений. В концевой области трещины находится узкая пластическая зона длиной  $a$ , где на расстоянии  $v$  интенсивно действуют силы атомного притяжения. Следовательно, проблема залечивания трещиноватости является проблемой сведения берегов трещины до расстояния  $v_1 \leq v$ .

Возможно два метода решения данной проблемы. Первый – это создание внешних стягивающих напряжений, однако на работающем трубопроводе это весьма дорогостоящее мероприятие. Второй метод – это создание внутренних усилий, обеспечивающих стягивание внешнего

слоя изнутри. Для создания поля остаточных напряжений воспользуемся тем, что поверхностный слой при некоторой нагрузке переходит в пластическое состояние. На практике в качестве внешней нагрузки реально использовать только внутреннее давление. Под действием внутреннего давления поле упругих напряжений достигает максимума на внутренней стороне трубы, здесь начинается пластическое течение. Однако за счет того, что внешний микротрещиноватый слой является концентратором напряжений, под ним образуется пластический слой, ширина которого определяется в соответствии с моделью Дагдейла-Мусхелишвили (полос пластичности).

Как известно, объем тела зависит от плотности распределения дислокаций, а его изменение вычисляется по формуле

$$\frac{V - V_0}{V_0} = -\frac{1}{K} \left( 1 + \frac{\nu_1 + 2\nu_2 + 8\nu_3/3}{K} \right) \cdot W_d - \frac{\lambda + 2\mu + \nu_2 + 4\nu_3/3}{\mu K} \cdot W_S, \quad (1)$$

где  $W_d$  – энергия упругого всестороннего расширения;  
 $W_S$  – энергия сдвига [1];

$$W_d = \frac{Kb^2}{8\pi^2(R^2 - r_0^2)} \cdot \left( \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \right)^2 \cdot \ln \frac{R}{r_0}; \quad (2)$$

$$W_S = \frac{\mu b^2}{6\pi^2(R^2 - r_0^2)} \cdot \frac{1 - \nu + \nu^2}{(1 - \nu)^2} \cdot \ln \frac{R}{r_0}. \quad (3)$$

Объемное расширение на единицу длины дислокации:

$$\delta_V = \pi(R^2 - r_0^2) \cdot \langle \theta \rangle; \quad (4)$$

$$\langle \theta \rangle = \frac{V - V_0}{V_0}.$$

Можно связать с энергией упругой деформации  $\omega$  на единицу длины дислокации:

$$\delta_V = \frac{1}{3} \left( \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} \cdot \frac{1}{K} \left( \frac{dK}{dp} - 1 \right) + \frac{1 + \nu + \nu^2}{1 - \nu} \cdot \frac{2}{\mu} \left( \frac{d\mu}{dp} - \mu \right) \right) \cdot \omega. \quad (5)$$

Таким образом, дислокация создает положительное объемное расширение, т. е. уменьшает плотность материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Теодосиу, К. Упругие модели дефектов в кристаллах / К. Теодосиу // Мир. – 1985. – С. 276–288.