

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

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

The main idea consists in making internal efforts ensuring external pipe layer tightening on the inside. Due to an external craze layer is a stress concentrator, the plastic layer is formed under the external craze layer before it is formed on the pipe inner side. When appearing the plastic layer the state is fixed, the internal stressing is stopped. Then the dislocation plastic behavior procedure is examined. With dislocation leaving the plastic area capacity lessens. After the time we decrease the internal pressure step-by-step, which results in crack bank closing.

Целью работы является разработка модели упрочнения трубопроводов в процессе эксплуатации, основанной на использовании поверхностной поврежденности. 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 [1]. Данные процессы отрицательно сказываются на прочности трубопроводов, так как со временем микрорастрескивание и микрошероховатость инициирует образование магистральных трещин.

Как известно, каждая микротрещина (шероховатость) локально является концентратором напряжений, так что в вершине микротрещин может возникать пластичность. В случае достаточно близкого расположения поверхностных трещин пластические зоны сливаются и образуют тонкий подповерхностный пластический слой. Дадим оценку глубины поврежденности поверхностного слоя. Средняя длина усталостных трещин l по отношению к внешнему радиусу трубы составляет $\frac{l}{R} = (1...10) \cdot 10^{-5}$ [1]. Таким образом, при среднем радиусе трубы глубина поврежденного слоя оценивается как $(1...10) \cdot 10^{-6}$ м. Объем поврежденного слоя погонного метра трубы можно оценить как $V_{п.с.} = \pi((2...20) \cdot 10^{-6})^3$.

Идея разработки метода упрочнения труб в процессе эксплуатации заключается в создании внутренних усилий, обеспечивающих стягивание внешнего слоя трубы изнутри. На практике в качестве внешней нагрузки реально использовать только внутреннее давление. Под действием внутреннего давления поле упругих напряжений для неповрежденных труб, как известно, достигает максимума на внутренней стороне трубы, здесь начинается пластическое течение (рисунок 1).

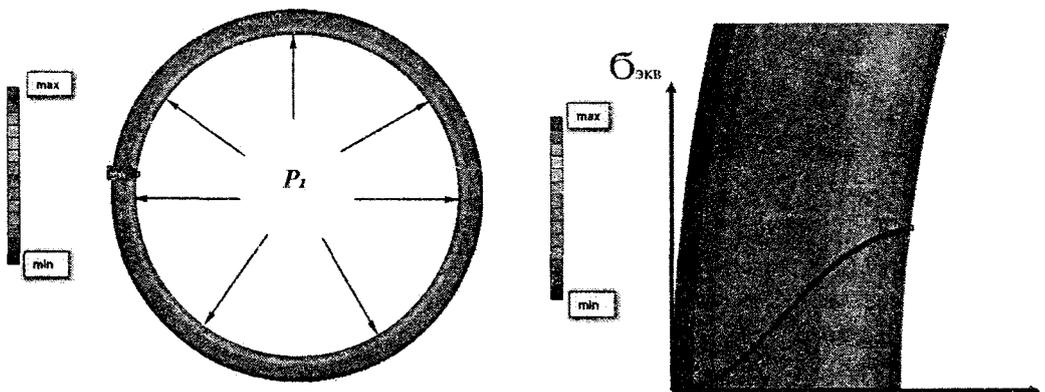


Рисунок 1 – Напряжения, соответствующие трубе без микротрещин в поверхностных слоях

Вследствие того, что внешний микротрещиноватый слой является концентратором напряжений, под ним может образоваться пластический слой раньше или одновременно с пластическим слоем на внутренней стороне трубы (рисунок 2).

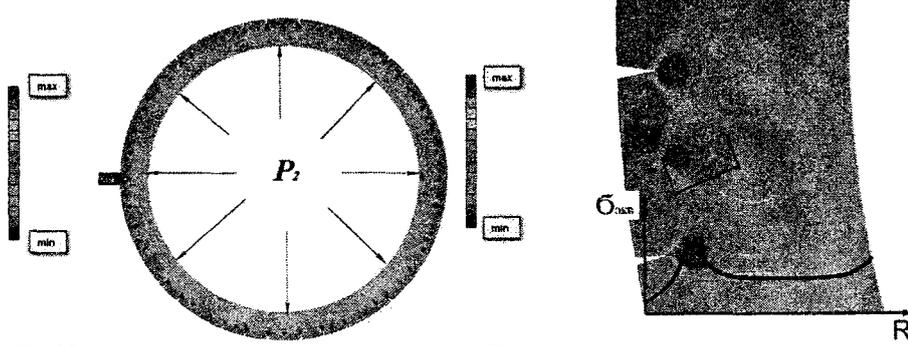


Рисунок 2 – Напряжения, соответствующие трубе с микротрещинами в поверхностных слоях

Таким образом, появляется возможность ввести подповерхностный слой в пластическое состояние, сохраняя при этом внутренний слой трубы в упругой зоне или пластическом состоянии.

Как известно, ширина пластического слоя в соответствии с моделью Дагдейла-Мухелишвили для плосконапряженного и плоскодеформированного состояния определяется соответственно формулами: $r_p = \frac{K_1^2}{2\pi\sigma_m^2}$, $r_p = \frac{K_1^2}{2\pi\sigma_m^2} \cdot (1-2\nu)^2$, где K_1 – критический коэффициент интенсивности напряжений, ν – коэффициент Пуассона, σ_m – предел текучести материала.

Согласно модели Гросса (рисунок 3) критический коэффициент интенсивности напряжений в свою очередь определяется как:

$$K_1 = \sigma_\theta \sqrt{\pi \cdot l} \cdot Y, \quad (1)$$

где $Y = 1,12 - 0,23\lambda + 10,55\lambda^2 - 21,72\lambda^3 + 30,39\lambda^4$ – поправочный показатель;

$\lambda = \frac{l}{b} \leq 0,7$, где l – длина трещины, b – ширина пластины.

Таким образом, примерная оценка ширины пластического слоя при плоскодеформированном состоянии составляет $r_p = (2,7 \dots 27) \cdot 10^{-7}$ м.

Объем пластического слоя погонного метра трубы:
 $V_{n.n.} = \pi(5 \dots 50) \cdot 10^{-5}$.

При появлении пластического слоя напряженно-деформированное состояние фиксируется, за счет прекращения внутреннего нагружения. Сигналом для прекращения нагружения может служить появление сигналов акустической эмиссии [2].

Рассмотрим дислокационный механизм упрочнения подповерхностного слоя. Как известно, пластичность связана с активизацией дислокаций и их движением [3]. Дислокации стремятся к устью трещины и выходят на поверхность, в результате чего изменяется геометрия трещины, т.е. энергия, необходимая для образования свободных поверхностей трещин будет способствовать фрактализации берегов трещины, при этом площадь берегов будет увеличиваться, а длина трещины останется неизменной.

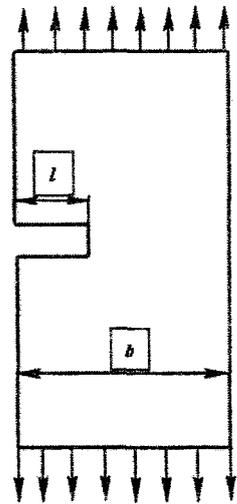


Рисунок 3 – Модель Гросса

Согласно работам Зеегера и Хаазена (1958г.) [3], объем тела зависит от плотности распределения дислокаций, а его изменение вычисляется по формуле (2)

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

где W_d – энергия упругого всестороннего расширения, W_s – энергия сдвига, определяемые по формуле 3 и 4 соответственно:

$$W_d = \frac{Kb^2}{8\pi^2(R^2 - r_0^2)} \cdot \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \right)^2 \cdot \ln \frac{R}{r_0} \quad (3)$$

$$W_s = \frac{\mu b^2}{6\pi^2(R^2 - r_0^2)} \cdot \frac{1-\nu+\nu^2}{(1-\nu)^2} \cdot \ln \frac{R}{r_0} \quad (4)$$

Объемное расширение на единицу длины дислокации, определяемое формулой

$$\delta_v = \pi(R^2 - r_0^2) \cdot \langle \theta \rangle, \quad \langle \theta \rangle = \frac{V-V_0}{V_0} \quad (5)$$

можно связать с энергией упругой деформации ω на единицу длины дислокации:

$$\delta_v = \frac{1}{3} \left(\frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu} \cdot \frac{1}{K} \left(\frac{dK}{dp} - 1 \right) + \frac{1+\nu+\nu^2}{1-\nu} \cdot \frac{2}{\mu} \left(\frac{d\mu}{dp} - \frac{\mu}{p} \right) \right) \cdot \omega \quad (6)$$

Таким образом, дислокация создает положительное объемное расширение, т.е. уменьшает плотность материала, следовательно, с выходом дислокаций увеличивается плотность материала, а геометрия пластической зоны соответственно изменяется и уменьшается.

По истечении времени, когда объем пластического слоя уменьшится на величину равную суммарному объему микротрещин, постепенно снижаем внутреннее давление, результатом чего явится стягивание поверхностного слоя и смыкание берегов трещин. Необходимо подчеркнуть, что как такового залечивания трещин не произойдет, поскольку поверхности трещин подвергнуты химическому окислению.

Таким образом, сочетание подходов, основанных на теории пластичности и теории дислокаций, позволяет в принципе предложить модель создания упрочненного слоя методом наклепа за счет использования поверхностного трещиноватого слоя как концентратора напряжений. Подобная ситуация может на практике возникнуть после некоторого времени эксплуатации, когда концентрация трещин достигнет величины, при которой пластические зоны в устьях отдельных микротрещин сольются в единый подповерхностный слой, находящийся в пластическом состоянии.

Вопросы о том, трещиноватость какого типа может давать необходимую концентрацию напряжений в подповерхностном слое, оценку времени выдержки трубы при заданном давлении рассмотрены в статье [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Коцаньда, С. Усталостное растрескивание металлов / С. Коцаньда. – М.: Металлургия, 1990. – С. 93–134.
2. Баранов, В.М. Применение акустической эмиссии для исследования и контроля коррозионных процессов / В.М. Баранов. – М.: МИФИ, 1990. – С. 72.
3. Теодосиу, К. Упругие модели дефектов в кристаллах / К. Теодосиу. – Мир, 1985. – С. 352.
4. Чигарев, А.В. Оценка временных параметров смыкания берегов трещины, расположенных в поверхностном слое трубы / А.В. Чигарев, Т.В. Шукевич, М.В. Ручан // НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА»-2011: сб. материалов VII Междунар. науч.-техн. конфер.

Поступила 28.12.11