

## ОЦЕНКА ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СМЫКАНИЯ БЕРЕГОВ ТРЕЩИНЫ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ТРУБЫ

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

*The purpose of the article consists in developing the methodology which will enable to extend the pipeline life expectancy not taking it out of service. The dislocation plastic behavior procedure is examined. With dislocation leaving the plastic area capacity lessens. Eventually, the time during which the plastic layer area will be down by the amount that is equal to the total craze area is essential. After this time we decrease the internal pressure step-by-step, which results in crack bank closing.*

Влияние шероховатости поверхности на концентрацию напряжений рассматривалось многими авторами [1,2]. Однако вопрос использования этого эффекта для создания упрочненного подповерхностного слоя ставится и решается, по-видимому, впервые. Для ответа на поставленный вопрос необходимо решить задачу о возможности возникновения пластического слоя в подповерхностном слое за счет трещиноватости поверхностного слоя. Эта задача может быть решена в рамках механики деформированного твердого тела. Вторая задача важная для практики это оценка величины и времени выдержки внутреннего давления. Вопрос о величине давления решается на основе ответа на первый вопрос. Решение второй задачи может быть осуществлено разными методами, один из которых рассматривается в данной работе.

Рассмотрим влияние трещиноватости (шероховатости) поверхности трубы на напряженное состояние в подповерхностном слое. Применим метод малого параметра для решения задачи определения напряжений. В качестве безразмерного малого параметра, по которому будем вести разложение выберем  $\varepsilon = h/R$ , где  $h$  – средняя глубина микротрещин,  $R$  – радиус внешней поверхности неповрежденной трубы.

Были сделаны следующие предположения:

- Площадь трещиноватого кольца уменьшится на суммарную площадь трещин. То есть на поверхность выйдет такое количество дислокаций, суммарная площадь которых равна по величине суммарной площади трещин.

- Скорость дислокаций непрерывна.

- Интенсивность деформаций ползучести определяется степенным законом.

Расчет временных параметров проведен для поверхностной микротрещины, моделью которой является тонкий разрез. Смыкание берегов трещины будет происходить по модели типа «замок-молния». За счет того, что дислокации выходя на поверхность фрактализуют ее [3].

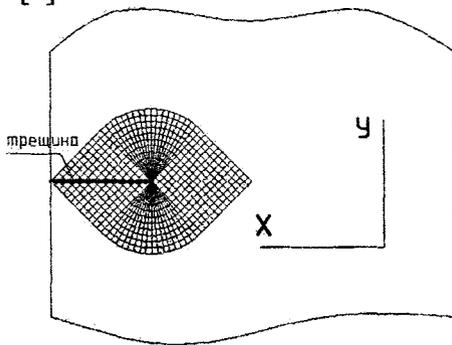


Рисунок 1 – Линии скольжения

Материал в окрестности трещины находится в пластическом состоянии, причем считаем, что материал сжимаем, т.е. условие пластичности зависит от

первого инварианта. Движение дислокаций происходит под действием напряжений чистого сдвига по направлениям линий скольжения (рисунок 1).

Вдоль линии  $\alpha$  направлена скорость  $U$ , а вдоль линии  $\beta$  – скорость  $V$ . Примем, что скорость дислокаций величина постоянная в данном материале, причем  $V_{\text{дис}} = V = U$ ; следовательно, результирующая скорость движения дислокации направлена по вертикальной оси. Интенсивность деформаций ползучести определяется степенным законом

$$\dot{\varepsilon} = B_1 \cdot \sigma^m, \quad (1)$$

где  $B_1$ ,  $m$  – постоянные, характерные для данного материала ( $B_1$  – коэффициент ползучести,  $m$  – показатель ползучести). Таким образом, скорость накопления дислокаций на поверхности трещины прямо пропорциональна напряжению.

Для определения распределения напряжений в окрестностях поверхности трубы компонент напряжения представим в виде суммы компонентов напряжений в упругой трубе при отсутствии шероховатостей на ее границе и возмущений в напряжениях, вызванные шероховатостью границы:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \sigma_{rr}^0 + \varepsilon \cdot \sigma_{rr}^1 \\ \sigma_{\theta\theta} &= \sigma_{\theta\theta}^0 + \varepsilon \cdot \sigma_{\theta\theta}^1 \\ \sigma_{r\theta} &= \sigma_{r\theta}^0 + \varepsilon \cdot \sigma_{r\theta}^1, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma_{rr}^0, \sigma_{r\theta}^0, \sigma_{\theta\theta}^0$  – значение напряжений в упругой трубе при отсутствии шероховатостей на ее границе,  $\sigma_{rr}^1, \sigma_{r\theta}^1, \sigma_{\theta\theta}^1$  – возмущения в напряжениях, вызванные шероховатостью границы.

Для нахождения решения применяется метод разложения по относительной высоте шероховатостей (глубины микротрещин). Флуктуации напряжений зависит от  $H = H(\theta)$ , которая определяет характер функциональной зависимости поверхности от угла  $\theta$ .

Запишем граничные условия для упругой трубы под действием внутреннего давления:

$$\begin{aligned} r = a & & r = b \\ \sigma_{rr}^0 &= -p & \sigma_{rr}^0 = 0 \\ \sigma_{r\theta}^0 &= 0 & \sigma_{r\theta}^0 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

где  $p$  – внутреннее давление

Решением поставленной задачи в нулевом приближении будет следующее распределение напряжений:

$$\sigma_{rr}^0 = \frac{p \cdot a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right), \quad \sigma_{\theta\theta}^0 = \frac{p \cdot a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right), \quad \sigma_{r\theta}^0 = 0. \quad (4)$$

Далее запишем граничные условия для определения возмущений в напряжениях, которые при  $r = b$  принимают следующий вид:

$$\sigma_{rr}^1 = -W \cdot \left( \frac{a^2 \cdot p}{b^2 - a^2} \right), \quad \sigma_{r\theta}^1 = \frac{\partial W}{\partial \theta} \cdot \left( \frac{a^2 \cdot p}{b^2 - a^2} \right), \quad \sigma_{\theta\theta}^1 = 0, \quad (5)$$

где  $W = H(\theta)$  – функция, определяющая глубину трещин.

Тогда решение задачи с учетом шероховатостей запишется в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^1 &= \frac{b}{r} \cdot H \cdot \left( \frac{a^2 \cdot p}{b^2 - a^2} \right) \cdot (\sin 2\theta + \cos 2\theta) \\ \sigma_{r\theta}^1 &= \frac{b}{r} \cdot \left[ \frac{H}{2} \cdot \left( \frac{a^2 \cdot p}{b^2 - a^2} \right) \cdot (\cos 2\theta - \sin 2\theta - 1) + \frac{\partial H}{\partial \theta} \cdot b \right] \\ \sigma_{\theta\theta}^1 &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, решением задачи с учетом шероховатостей будет сумма решений в нулевом и первом приближении:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{p \cdot a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right) + \frac{b}{r} \cdot H \cdot \left( \frac{a^2 \cdot p}{b^2 - a^2} \right) \cdot (\sin 2\theta + \cos 2\theta) \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{p \cdot a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{b}{r} \cdot \left[ \frac{H}{2} \cdot \left( \frac{a^2 \cdot p}{b^2 - a^2} \right) \cdot (\cos 2\theta - \sin 2\theta - 1) + \frac{\partial H}{\partial \theta} \cdot b \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Так как в решение задачи производная от функции  $H$ , то возможность возникновения концентрации напряжений в подповерхностном слое будет зависеть от характера шероховатостей, т.е. не всякая шероховатость будет являться концентратором. Если  $H(\theta)$  – гладкая функция, то  $\frac{\partial H}{\partial \theta}$  должна быть достаточно большой, то есть  $H(\theta)$  должна изменяться достаточно быстро и часто.

Для определения времени накопления дислокаций на поверхности, необходимых для закрытия одной трещины, воспользуемся следующей методикой. Будем считать, что дислокация условно представляет собой некоторое материальное тело с условной площадью. Следовательно, для закрытия трещины необходимо определенное количество дислокаций, суммарная площадь которых будет равна площади трещины. Построив для данного вида трещины поле скольжения с необходимой частотой линий, разделим берег трещины на количество  $n$  равных отрезков, соответствующее выбранному шагу (рисунок 2).

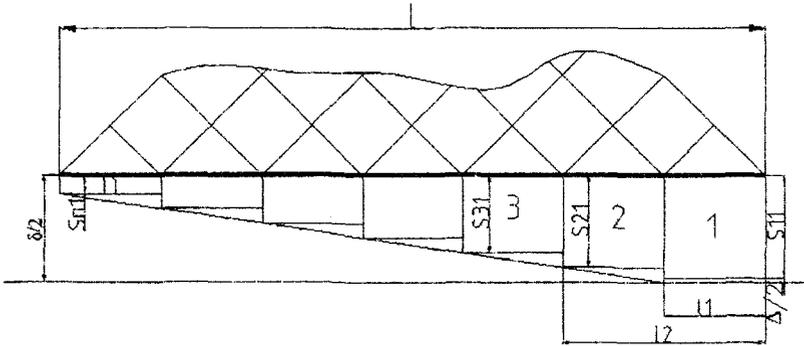


Рисунок 2 – Расчетная модель половины трещины областей  $S_{ji}$ , где  $i$  – номер области,  $j$  – индекс времени, за которое произошло перемещение области

Трещина имеет длину  $l$ , тогда  $l_1 = \frac{l}{n}$ ,  $l_n = \frac{l}{n} \cdot \left( \sum_1^n 1^n \right)$ . Величина  $\Delta/2$  определяет

половину расстояния между берегами, на котором начинают действовать молекулярные силы притяжения. Следовательно, берег трещины должен сомкнуться на расстояние  $S_{11} = \frac{\delta}{2} - \frac{\Delta}{2}$ , где  $\frac{\delta}{2}$  – половина раскрытия берегов трещины. Поскольку

скорость накопления дислокаций на поверхности, а, следовательно, и скорость смыкания берегов в области 1 больше, чем в области 2, то за равный промежуток времени  $t_1$  трещина сомкнется на расстояние  $S_{11}$  в области 1 и на расстояние  $S_{21}$  в области 2, причем  $S_{11} > S_{21}$ . Тогда

$$t_1 = \frac{S_{11}}{V_{11}} = \frac{S_{21}}{V_{21}} \Rightarrow S_{21} = \frac{S_{11} \cdot B_1 \left( \frac{K_1}{4\sqrt{2\pi} \cdot 2l} \right)^m}{B_1 \left( \frac{K_1}{4\sqrt{2\pi} \cdot l} \right)^m} = S_{11} \cdot 2^{-m/2}, \quad (8)$$

где  $V_{11}, V_{21}$  – скорости смыкания первой и второй области соответственно при длине трещины равной  $l$ .

Для уменьшения длины трещины на величину  $l_2$ , необходимо, чтобы берега трещины в области 2 переместились на расстояние  $S_{21} + S_{22}$  за время  $t_2$  (рисунок 3). Причем при изменении длины изменится  $K_1$ , следовательно, необходимо произвести перерасчет напряжений в окрестности трещины при новой длине трещине и нагрузки.

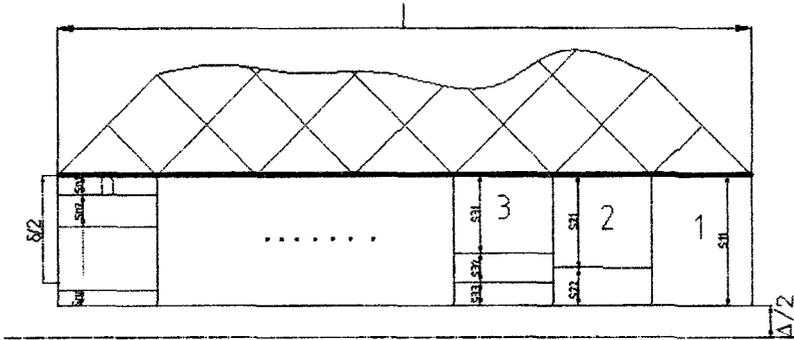


Рисунок 3 – Движение областей берега трещины с течением времени

Тогда  $S_{22} = S_{11} - S_{21} = S_{11} - S_{11} \cdot 2^{-m/2}$  и  $t_2 = t_1 + \frac{S_{22}}{B_1 \cdot \sigma_{i2}^m}$ , где  $\sigma_{i2}$  – напряжения в области 2 при длине трещины  $(l - l_1)$

Выполняя аналогичные действия для каждой области, найдем время закрытия трещины:

$$t_n = \sum_{k=1}^n \frac{S_{kk}}{B_1 \cdot \sigma_{ik}^m}, \quad (9)$$

где  $S_{kk} = S_{11} + \sum_{p=1}^{k-2} ((-1) \cdot S_{pp} (k - (p - 1)))^{-m/2} - S_{(k-1)(k-1)} \cdot 2^{-m/2}$ ,  $k=(3...n)$ ,  $k, n \in N$

Таким образом, в принципы сочетания методов теории пластичности и теории дислокаций позволяют построить модели подповерхностного упрочнения трубы в процессе эксплуатации, а также дать оценку времени выдержки давления для получения наклепа подповерхностного слоя. Для практической реализации предлагаемого метода необходимо проведение экспериментов на испытательном полигоне, по результатам которых возможно сделать выводы о практической значимости данного подхода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хус, А. Шероховатость поверхностей теоретико-вероятностный подход / А. Хус, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – Наука, 1998.
2. Коцаньда, С. Усталостное разрушение металлов / С. Коцаньда. – М.: Металлургия, 1976.
3. Труды VI международного симпозиума по фракталам в физике. – Италия. – 1985.

Поступила 28.12.11