

УДК 539.4

Л. Сосновский¹, докт. техн. наук; А. Богданович², докт. техн. наук;
В. Веселуха², В. Воробьёв³, канд. техн. наук;
А. Козик³, канд. техн. наук

¹Белорусский государственный университет транспорта
²Гродненский государственный университет им. Янки Купалы
³ОАО «Гомельтранснефть Дружба»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ НЕФТЕПРОВОДА

Резюме. Для оценивания трещиностойкости труб, изготовленных из пластичной стали, использовать подходы линейной механики разрушения проблематично ввиду несоблюдения условий плоской деформации. Один из вариантов решения проблемы состоит в экстраполяции формул линейной механики разрушения для коэффициента интенсивности напряжений (КИН) на существенно нелинейную стадию деформирования с помощью функций поправки на пластичность. В работе анализируются результаты испытаний на циклическую трещиностойкость образцов из трубной стали на основе нового инженерного подхода. Получены силовые и деформационные характеристики трещиностойкости исследуемой стали. Дан анализ построенных кинетических диаграмм усталостного разрушения и диаграмм циклического упругопластического разрушения образцов, живучести труб из исследованной стали после длительной эксплуатации.

Ключевые слова: трещиностойкость, пластичная сталь, нефтепровод, длительная эксплуатация, коэффициент интенсивности напряжений, утяжка, компактный образец, диаграмма упругопластического разрушения

L. Sosnovskiy, A. Bogdanovich, V. Veselykha, V. Vorob'ev, A. Kozik

APPLICATION OF THE DEFORMATION CRITERION OF THE CRACK GROWTH RESISTANCE FOR EVALUATION OF THE PIPES RESIDUAL LIFETIME OF THE PIPELINE LINEAR PART

Summary. To estimate the crack growth resistance of pipes made of ductile steel using a linear fracture mechanics approach is of problematic character as the conditions of plane strain are not observed. One of the ways of solution to the problem is the extrapolation of the linear fracture mechanics formulas for the stress intensity factor (SIF) on substantially nonlinear stage of deformation by means of the amendment functions on the plasticity.

The results of crack growth resistance tests of samples made of pipe steel on the basis of a new engineering approach are analyzed in the paper. The force and deformation characteristics of the crack growth resistance were received.

The analysis of kinetic fatigue failure diagrams and cyclic elastic-plastic fracture diagrams for specimens, crack growth life of tubes from the investigated steel after long-term use is presented.

Specimen's crack is oriented in axial and circumferential directions for study of anisotropy properties. The characteristics of a fatigue crack growth of investigated steel after long operation are discussed. The characteristics of cyclic crack growth resistance for pipe steel after long-term (over 30 years) of operation are determined experimentally: at absolute temperature $T = 293$ K and a critical threshold values of SIF are: $K_{th} = 4,91$ MPa, $K_{fc} = 54,75$ MPa, the values parameters of equation (6) are equal $m_k = 1,556$, $C_k = 4,0 \cdot 10^{-10}$.

The algorithm and procedure of computational experimental evaluation of crack growth life of objects operated under cyclic elastic-plastic deformation, which is based on the use of strain approach - measuring of specimen's width reduction, charting the cyclic elastic-plastic fracture diagram, for practical application are proposed. Graphical analysis of data according to crack growth life and service term of the tube of oil pipe line with a semi-elliptical longitudinal crack from damage is presented at various levels of pressure in the tube: 1, 2 and 3 MPa.

Key words: crack growth resistance, plastic steel, oil pipe line, long-term operation, stress intensity factor, reduction width, compact specimen, elastic-plastic fracture diagram.

Постановка проблеми. Обеспечение безаварийности и безопасности эксплуатации магистральных трубопроводных систем для экологии и населения в настоящее время является определяющим требованием.

В процессе длительной эксплуатации нефтепроводных труб в результате физико-химических воздействий перекачиваемого продукта и внешней среды происходит изменение структурного состояния металла, деградация его физико-механических свойств. Циклический характер нагружения приводит к накоплению необратимых усталостных повреждений. Результаты исследований показывают, что длительная эксплуатация нефтепровода приводит к заметному росту относительной доли дефектных труб и снижению сопротивления зарождению и распространению трещин. Поэтому задачи разработки методов прогнозирования надежности, безопасности и остаточного ресурса труб нефтепроводов по критериям сопротивления зарождению и развитию трещин с учетом эксплуатационной деградации свойств трубной стали становятся особенно актуальными. Среди основных трудностей, возникающих при решении подобных задач, отметим необходимость и сложность учета процессов упрочнения-разупрочнения протекающих в металле труб. Например, установлено [1], что многолетняя эксплуатация приводит к разупрочнению металла внутренней поверхности трубы: склонность его к образованию трещин существенно возрастает. С другой же стороны, коррозионно-эрозионное воздействие нефтепродуктов приводит к удалению поврежденного трещинами поверхностного слоя внутренней стенки трубы (проявляется своего рода эффект упрочнения).

Разработка же новых подходов к оценке работоспособности трубопроводов невозможна без всестороннего экспериментального изучения всего комплекса характеристик сопротивления разрушению материала труб с учетом определяющих факторов.

Ранее [2, 3] был предложен следующий алгоритм оценки живучести изделий с магистральной трещиной (рис. 1):

1 Применительно к исследуемому объекту выбирают схему испытаний на малоразмерных образцах с известной формулой расчета КИН K_{IM}^F (с учетом поправки на пластичность). Экспериментально исследуют трещиностойкость материала, из которого изготовлен объект, с учетом всех особенностей его эксплуатационного нагружения.

2 По результатам испытаний строят кинетическую диаграмму усталостного разрушения (рис. 1а) в координатах скорость повреждения $d\omega_F / dn$ – КИН K_I^F . По этой диаграмме определяют пороговое значение КИН K_{th} , а также два параметра (C_k , m_k) уравнения

$$\frac{d\omega_F}{dn} = C_k (\Delta K)^{m_k}, \quad (1)$$

которое описывает прямолинейный участок диаграммы усталостного разрушения. Поскольку параметры C_k и m_k взаимосвязаны, достаточно определить один из них, второй находят по соответствующей корреляционной формуле, сводка которых дана, например, в работе [4].

3 Результаты измерений поперечной составляющей пластической деформации ψ используют для построения диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной (диаграммы ЦУПРОТ) (рис. 1б). Особенность этой диаграммы состоит в том, что предельное значение КИН (циклическая вязкость разрушения) $K_{fc} = \text{const}$ для образцов различной толщины. Определяют с помощью этой диаграммы

предельные значения КИН и утяжки (K_{fc} и ψ_c).

4 Для изучаемого объекта устанавливают модель для вычисления КИН.

5 Полученные в пп. 1 – 4 данные используют для расчета живучести $N_{ж}$ объекта (рис. 1а) с учетом параметров программного блока (рис. 1б).

Рассмотрим применение описанного алгоритма для труб линейного участка нефтепровода.

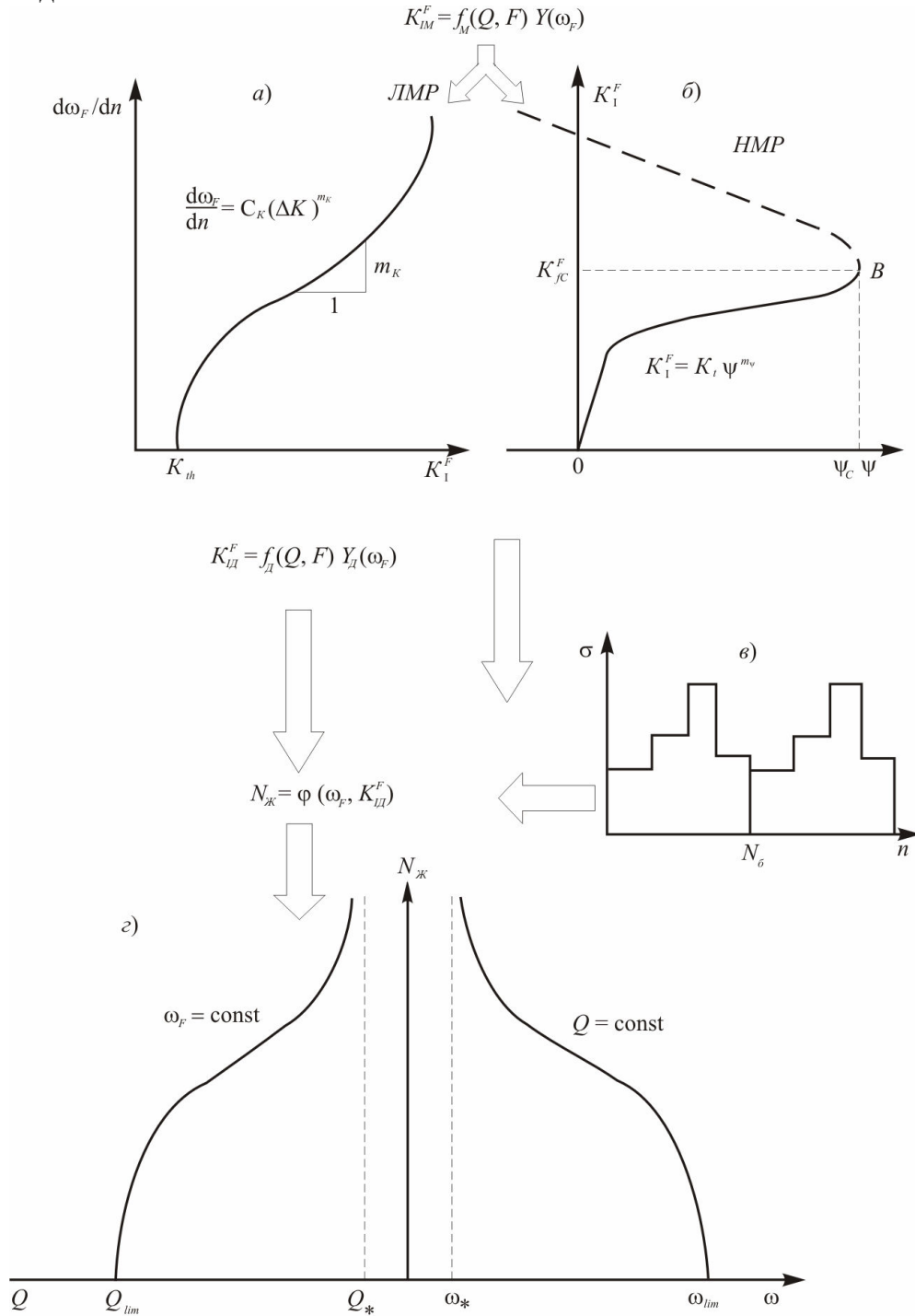


Рисунок 1. Алгоритм расчетно-экспериментальной оценки живучести объекта

Figure 1. The algorithm of calculation and experimental evaluation of the crack growth life of object

Для экспериментального оценивания характеристик циклической трещиностойкости материала труб линейной части нефтепровода проводили испытания компактных образцов на универсальной сервогидравлической машине Vi-01-102 при внецентренном растяжении в условиях комнатной температуры, с частотой 20 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$, синусоидальной форме цикла и при температуре 17 – 23°C. Для изучения анизотропии трещину в образцах ориентировали в двух направлениях: осевом и окружном. Вырезка образцов для испытаний осуществлялась из трубы линейного участка нефтепровода «Дружба» после длительной эксплуатации. Образцы вырезали с ориентацией надреза и усталостной трещины в осевом и окружном направлениях трубы, согласно схеме, приведенной на рис. 2.

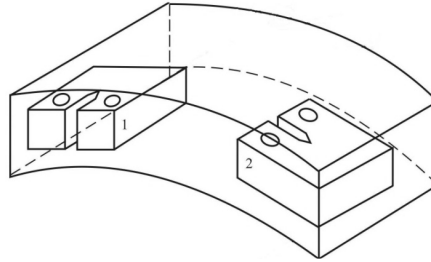


Рисунок 2. Схема вырезки компактных образцов: 1 – с ориентацией трещины в осевом направлении; 2 – с ориентацией трещины в окружном направлении трубы

Figure 2. Scheme of cutting of the compact specimens: 1 – with the crack growth in an axial direction; 2 – with the crack growth in a circumferential direction of the tube

Компактный образец с зафиксированным датчиком раскрытия вершины трещины устанавливали в захватах сервогидравлической испытательной машины. После чего производили предварительное выращивание начальной трещины от надреза согласно рекомендациям [5]. Схема испытаний приведена на рис. 3а.

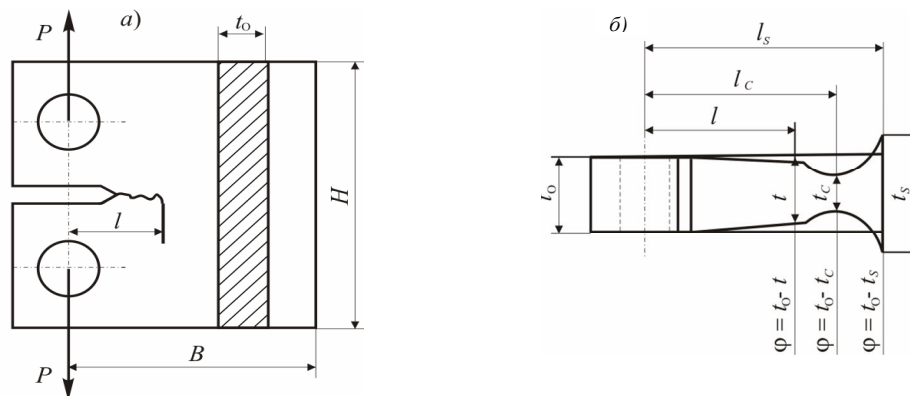


Рисунок 3. Схема испытания компактного образца (а) и измерения утяжки (б)

Figure 3. Scheme of the test of the compact specimen and measurement of the reduction width

После испытаний для измерения упругопластических свойств исследуемой стали производили измерение утяжки φ (рис. 3б) опасного сечения образца, а величину КИН с учётом поправки на пластичность определяли по формуле [2, 3]

$$K_{I \max}^F = \frac{P_{\max}}{t_0 \sqrt{B}} \omega_F^{1/2} Y(\omega_F); \quad (2)$$

$$Y(\omega_F) = 29,6 - 185,5(\omega_F) + 655,7(\omega_F)^2 - 1017(\omega_F)^3 + 638,9(\omega_F)^4; \quad (3)$$

$$\omega_F = F_l / F_0, \tag{4}$$

где P_{max} – максимальная нагрузка цикла; l – измеренная длина трещины; t_0, B – размеры опасного сечения образца (рис. 2а); $Y(\omega_F)$ – поправочная функция, которая учитывает геометрию образца, схему его нагружения и интегрально величину пластической деформации в опасном сечении; F_0 – номинальная (до деформации) площадь опасного сечения образца; F_l – площадь, поврежденная трещиной длиной l и определенная с учетом пластической деформации сечения; ω_F – поврежденность.

Аналитическое выражение для скорости накопления повреждений на стадии развития магистральной трещины можно записать в виде степенной зависимости от уровня интенсивности напряжений ΔK с учётом поврежденности ω_F , после интегрирования которой следует формула для оценки живучести [2, 3]

$$v = \frac{d(1-\omega_F)}{dN} = -C_K \left(\frac{\Delta K_I}{1-\omega_F} \right)^{m_K}; \tag{5}$$

$$N_{ж} = \frac{(1-\omega_F)^{m_K+1}}{C_K(m_K+1)\Delta K_I^{m_K}}, \tag{6}$$

где ΔK_I – разность максимального и порогового значений КИН, т.е. $\Delta K_I = K_{lmax} - K_{th}$; C_K и m_K – постоянные материала, определяемые по кинетической диаграмме усталостного разрушения (см. рис. 1а).

Результаты испытаний образцов типа 1 и типа 2 с ориентацией трещины в осевом и окружном направлениях соответственно приведены на рис. 4 – 6.

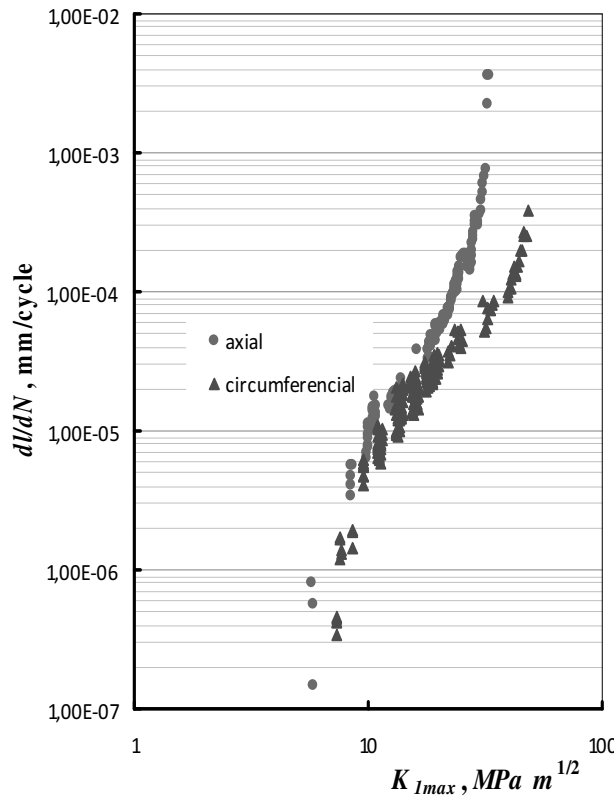


Рисунок 4. Экспериментальные кинетические диаграммы усталостного разрушения компактных образцов типа 1 и 2

Figure 4. The experimental fatigue fracture diagrams for the specimens 1 and 2 types (with crack attitude in axial and circumferential directions accordingly)

Полученные данные используются для расчёта живучести компактных образцов $N_{ж}$ по формуле (6). На рисунке 5 показана зависимость живучести от повреждённости ω_F компактных образцов типа 1 и 2. Из диаграммы следует, что при одинаковой повреждённости образцы с ориентацией трещины в окружном направлении более стойкие к разрушению, чем образцы с ориентацией трещины в осевом направлении. При $\omega_F=0,7$ $N_{жТИП1}=0,23 \cdot 10^6$ циклов, а $N_{жТИП2}=0,6 \cdot 10^6$ циклов, что больше более чем в 2 раза.

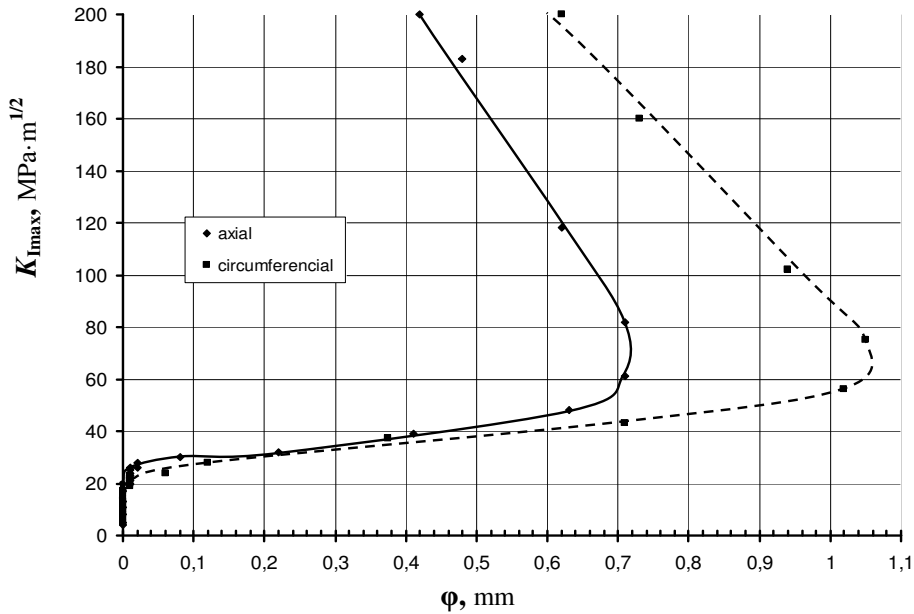


Рисунок 5. Экспериментальные диаграммы циклического упругопластического разрушения компактных образцов типа 1 и 2 (с ориентацией трещины в осевом и окружном направлениях соответственно)

Figure 5. Representative experimental cyclic elasto-plastic fracture diagram for the specimens of type 1 and 2 (with crack attitude in axial and circumferencial directions of a tube accordingly)

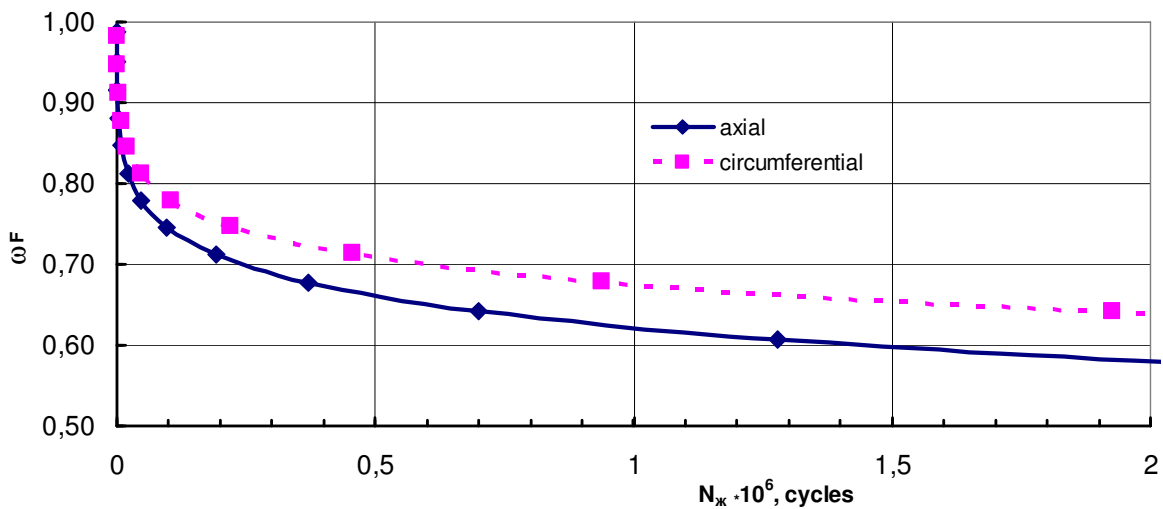


Рисунок 6. Зависимость живучести от повреждённости компактных образцов типа 1 и 2

Figure 6. Dependence of the crack growth life on the damage for compact specimens of 1 and 2 types

Однако для вычисления живучести реальной трубы необходимо формулы (2) – (6) пересчитать с учётом физических размеров трубы. Приняв, что наиболее опасной является продольная трещина полуэллиптической формы, придем к выражениям для вычисления поврежденности и КИН [2]

$$\omega_F = \left(\frac{a}{h}\right)^2; \tag{7}$$

$$K_{I \max} = \frac{P_{\max} (D - 2h)}{2\sqrt{h}} \omega_F^{1/4} Y(\omega_F); \tag{8}$$

$$Y(\omega_F) = 1,99 - 0,41(\omega_F)^{1/2} + 18,7\omega_F - 38,48(\omega_F)^{3/2} + 53,85(\omega_F)^2, \tag{9}$$

где P_{\max} – рабочее давление в трубе; a – глубина трещины; h – толщина стенки трубы; D – диаметр трубы.

Практическую реализацию рассмотренного алгоритма расчета (см. рис. 1) проиллюстрируем на примере оценивание живучести трубы линейной части нефтепровода «Дружба». Экспериментально установленные характеристики циклической трещиностойкости трубной стали после длительной (более 30 лет) эксплуатации: при абсолютной температуре $T = 293$ К пороговое и критическое значения КИН составляют $K_{th} = 4,91$ МПа $\sqrt{м}$, $K_{fc} = 54,75$ МПа $\sqrt{м}$; значения параметров уравнения (6) равны $C_k = 4,0 \cdot 10^{-10}$; $m_k = 1,556$.

На рис. 7 представлены построенные на основе (7) – (9) кинетические кривые накопления повреждений (зависимости поврежденности от уровня КИН) в трубе диаметром 820 мм, толщиной стенки 11,5 мм с полуэллиптической продольной трещиной при различных уровнях давления в трубе ($p = \text{const}$): 1, 2 и 3 МПа.

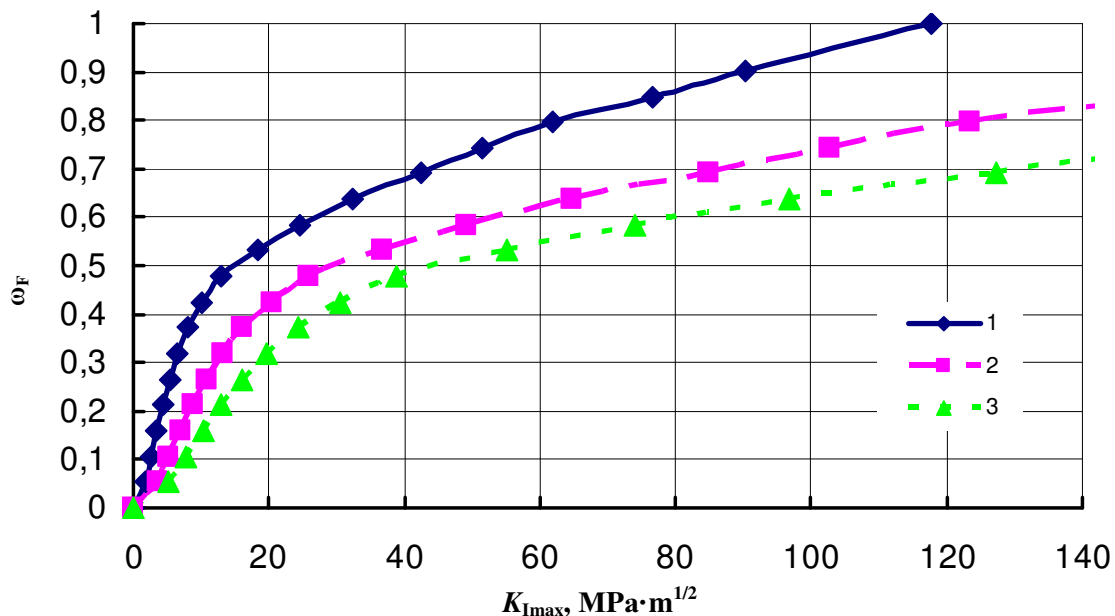


Рисунок 7. Кинетические кривые накопления повреждений в трубе с полуэллиптической продольной трещиной при давлении $p = 1$ МПа (1), 2 МПа (2) и 3 МПа (3)

Figure 7. Kinetic curves of damage accumulation in a tube with a longitudinal semi-elliptical crack at pressure $p = 1$ MPa (1), 2 MPa (2) and 3 MPa (3)

На рис. 8, 9 дан графический анализ (с помощью формул (6) – (9)) зависимости живучести и срока эксплуатации трубы линейной части нефтепровода с

полуэллиптической продольной трещиной от повреждённости также при различных уровнях давления в трубе ($p = \text{const}$): 1, 2 и 3 МПа.

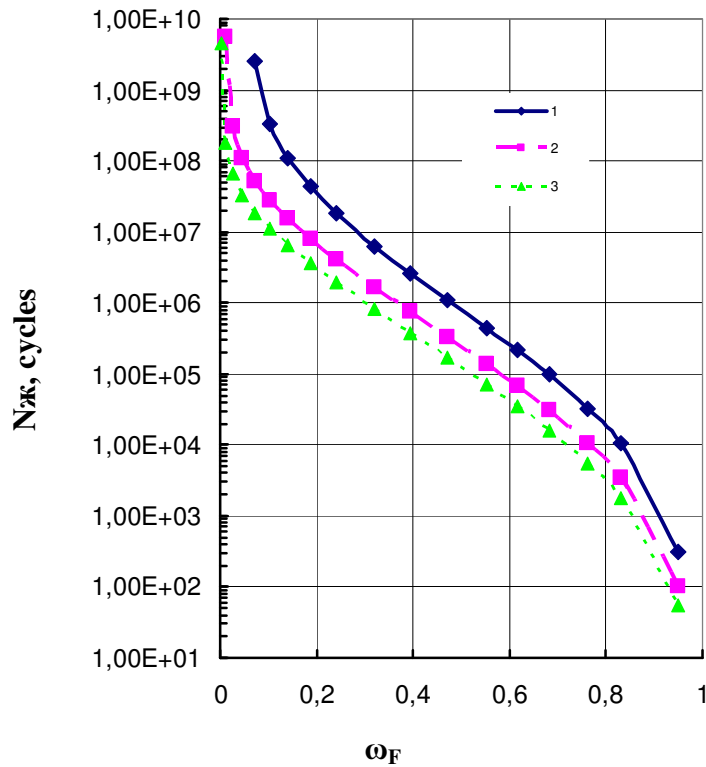


Рисунок 8. Зависимость живучести от повреждённости для трубы с полуэллиптической продольной трещиной при давлении $p = 1$ МПа (1), 2 МПа (2) и 3 МПа (3)

Figure 8. Dependence of the growth life on the damage for tube with a longitudinal semi-elliptical crack at pressure $p = 1$ MPa (1), 2 MPa (2) and 3 MPa (3)

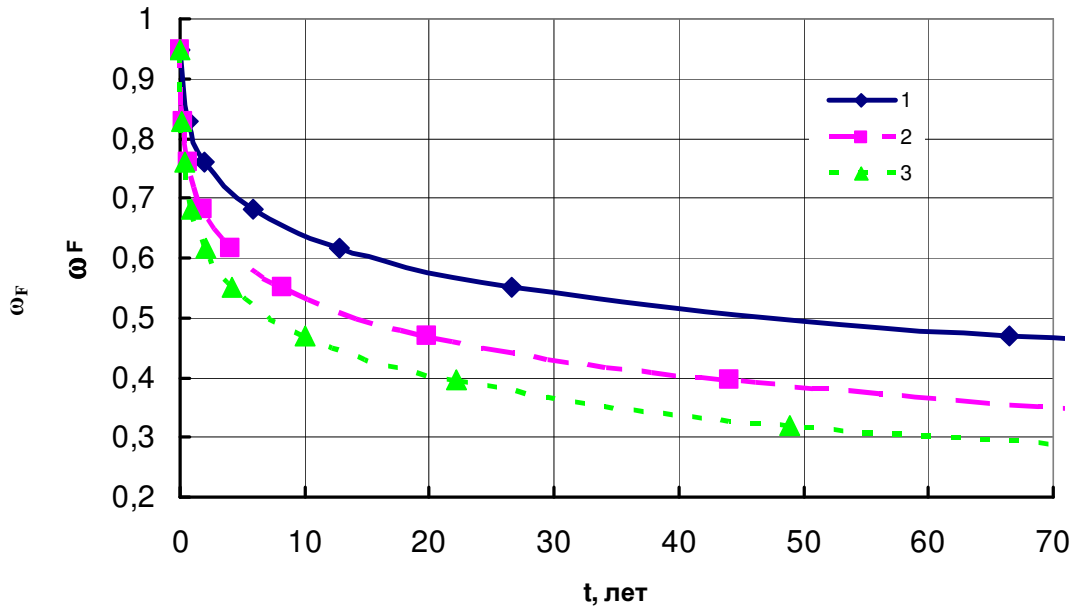


Рисунок 9. Зависимость срока эксплуатации от повреждённости для трубы с полуэллиптической продольной трещиной при давлении $p = 1$ МПа (1), 2 МПа (2) и 3 МПа (3)

Figure 9. Dependence of the service term on the damage for tube with a longitudinal semi-elliptical crack at pressure $p = 1$ MPa (1), 2 MPa (2) and 3 MPa (3)

Выводы. Для практического применения рекомендованы алгоритм и методика расчетно-экспериментальной оценки живучести объектов, эксплуатирующихся в условиях циклического упругопластического деформирования, которые основаны на использовании деформационного подхода – измерении утяжки образца, построении диаграммы циклического упругопластического разрушения.

Дан пример анализа живучести труб линейной части нефтепровода в условиях длительного воздействия повреждающих факторов.

Conclusions. The algorithm and procedure of computational experimental evaluation of crack growth life of objects operated under cyclic elastic-plastic deformation, which is based on the use of strain approach - measuring of specimen's width reduction, charting the cyclic elastic-plastic fracture diagram, for practical application are recommended.

The example of the analysis of the crack growth life for pipes of the linear part of the pipeline under prolonged exposure to damaging factors is given.

Список использованной литературы

1. Сосновский, Л.А. Влияние длительной эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали [Текст] / Л.А. Сосновский, В.В. Воробьев // Проблемы прочности. – 2000. – № 6. – С. 44 – 53.
2. Сосновский, Л.А. Живучесть линейной части нефтепровода [Текст] / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, А.М. Бордовский. – Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 2004. – 112 с
3. Сосновский, Л.А. Анализ диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной. Сообщение 1, 2 [Текст] / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович // Проблемы прочности. – 1995. – № 5 – 6. – С. 39 – 61
4. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: справочное пособие [Текст] / В.Т. Трощенко, А.Я. Красовский, В.В. Покровский, Л.А. Сосновский, В.А. Стрижало; под ред. В.Т. Трощенко. – В 2-х т. – Киев: Наук. думка, 1993. – Т. 1. – 288 с.; Т. 2. – 700 с.
5. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. РД 50-345-82 [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 43 с.
6. A.V. Bogdanovich and V.M. Veselukha. Cyclic crack resistance of the steel of oil mains after long periods of operation // Materials Science Volume 47, Number 1, 70 – 75, DOI: 10.1007/s11003-011-9369-6.

Получено 15.08.2013