

## ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА НАВАНТАЖЕНОСТІ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДИКАТОРІВ НАВАНТАЖЕННЯ

В.І.Артим

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42002  
e-mail: ndingt@nung.edu.ua

*Усовершенствован метод интегральной оценки нагруженности ответственных объектов нефтегазовой промышленности, базирующийся на закономерностях накопления усталостного повреждение индикаторов нагружения. Метод дает возможность получения многоступенчатой функции распределения циклического нагружения.*

*The loading integral estimation method is improved for important objects oil and gas industry. The method is founded on rules of fatigue damage upbuilding in load indicators. The method enables to obtain a many-staged cumulative distribution function of cyclic loading.*

Аналіз відомих експериментальних методів прогнозування ресурсу деталей засвідчив перспективність методу, що базується на використанні індикаторів втомного пошкодження, принцип дії яких ґрунтується на незворотній зміні в металах під дією циклічних деформацій.

Крім визначення залишкового ресурсу деталей з допомогою індикаторів можливо здійснювати якісне або кількісне визначення ступеня навантаженості окремих деталей машин або конструкцій в експлуатаційних або стендових умовах. Основними перевагами індикаторів є: малі розміри, простота конструкцій, технологічність виготовлення, високі метрологічні характеристики, відсутність необхідності постійного підключення складних вимірювальних і записуючих приладів. Принцип роботи таких індикаторів базується на зв'язку їх вихідних характеристик з величиною і режимом дії прикладеного навантаження, які намагаються пов'язати з накопиченням втомного пошкодження металу, на якому він встановлений.

На підставі аналізу теоретичних та експериментальних даних можна зробити висновок про те, що проблему оцінки залишкового ресурсу та індикації накопичення втомних пошкоджень найбільш доцільно вирішувати шляхом створення спеціального зразка-індикатора, що є локальною моделлю конструкції відносно її втомних характеристик [1-3].

Але такі індикатори для багатьох відповідальних об'єктів нафтогазової промисловості неможливо виготовити як через особливості їх конструкції, наприклад, талеві канати, геофізичні кабелі, трубопроводи тощо, так і з причини необхідності знання параметрів кривої втоми об'єкта та їх узгодження з параметрами індикатора. Тому пропонується удосконалений метод інтегральної оцінки навантаженості за допомогою індикаторів навантаження, який дає змогу позбутися даних обмежень.

Суть запропонованого методу полягає у використанні кінетичної теорії втоми до індикаторів з різним визначеним початковим пошкодженням, які підлягають дії випадкового

процесу навантажування з широким діапазоном амплітуд.

Початкове пошкодження індикаторів визначається з умов охоплення усього діапазону навантажень, який визначається попередньо з аналізу експлуатаційної навантаженості. Для простоти задаємося використанням трьох індикаторів. Відзначимо, що збільшення їх кількості не змінює суть розрахунків. При цьому індикатор з найменшим початковим пошкодженням (найвищою кінетичною границею витривалості) повинен сприймати тільки рідкісні екстремальні навантаження, наприклад, від прихоплень для геофізичного кабеля, а інші – експлуатаційний спектр навантажування.

Принцип визначення початкового пошкодження індикаторів зображено на рис. 1.

Важливо зазначити, що матеріал, з якого виготовляють індикатори, повинен мати чітко виражену фізичну границю витривалості, наприклад, середньовуглецева низьколегована сталь.

У випадку неможливості встановлення індикаторів безпосередньо на об'єкт оцінки навантаженості необхідно використовувати спеціальний відтарований пристрій, який передає зусилля від об'єкта на індикатори.

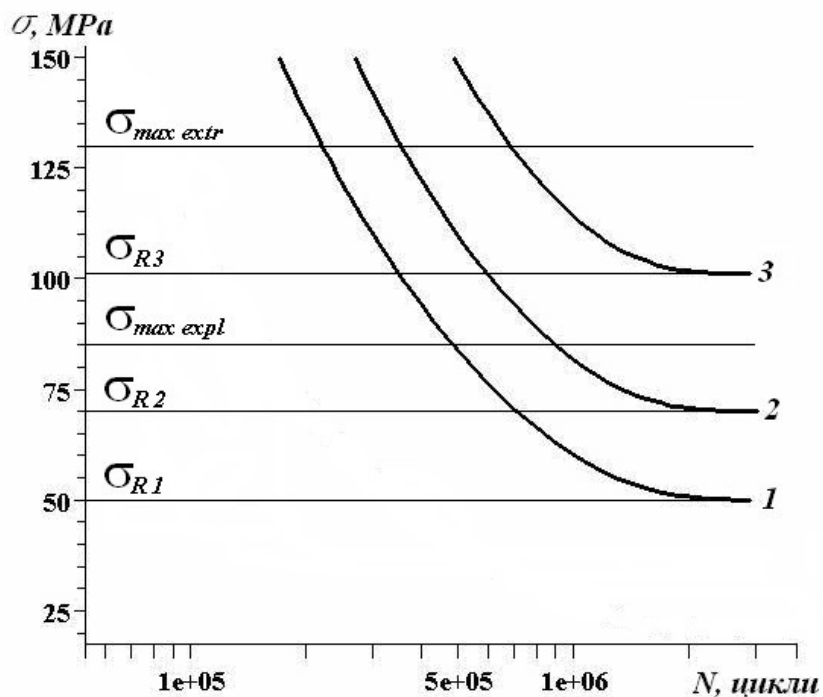
Після встановлення пристрою реєструють моменти руйнування індикаторів. Розрахунок полягає у визначенні еквівалентної кількості циклів напружень визначеного рівня за одиницю вимірювання довговічності  $n_{ekvi}$ . Наприклад, для геофізичного кабеля доцільно вибрати кількість метрів проходки каротажного пристрою  $K_i$  при СПО.

Схема, яка пояснює розрахунок навантаженості, зображена на рис. 2.

Розрахунок проводимо в такій послідовності.

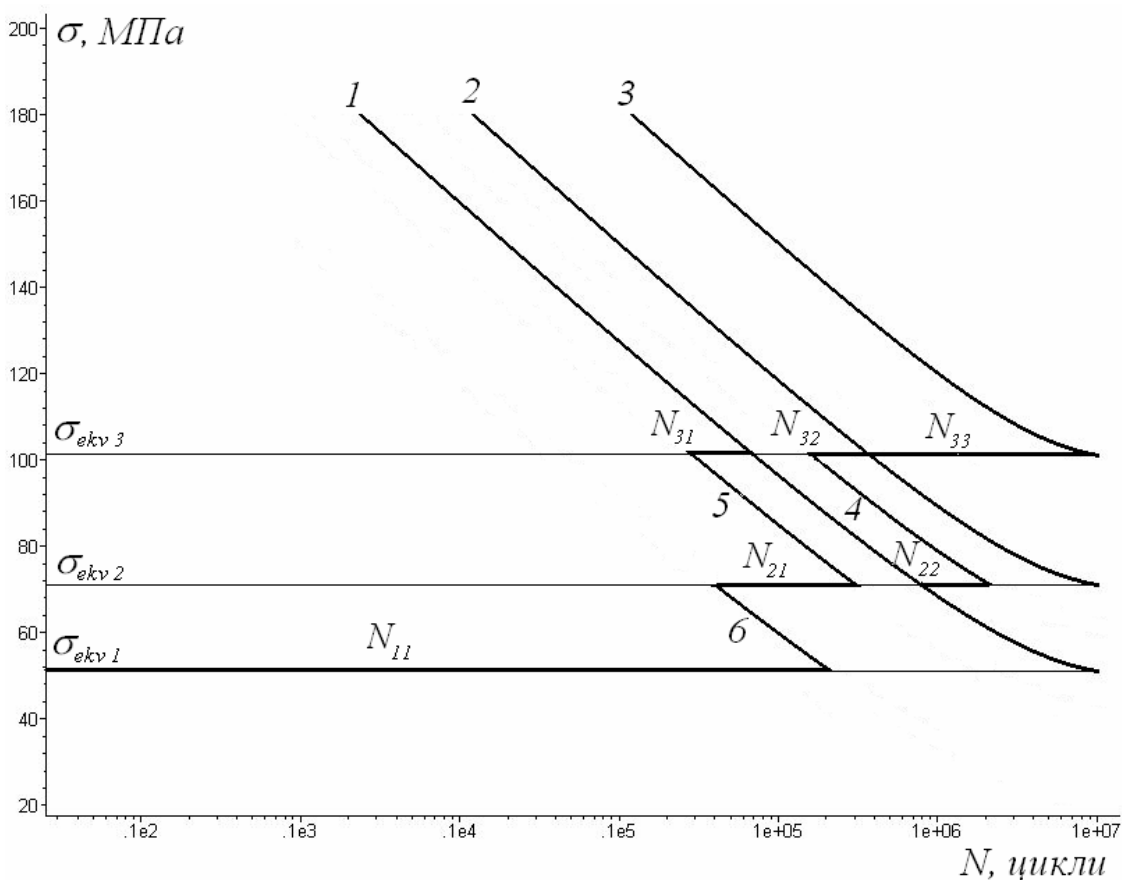
Визначаємо еквівалентну кількість циклів напружень найбільш високого рівня за 1 м СПО кабелю за рівнянням

$$n_{ekv,3} = \frac{N_{33}}{K_3 - K_2}, \quad (1)$$



$\sigma_{\max \text{ extr}}$  – максимальне екстремальне напруження;  $\sigma_{\max \text{ expl}}$  – максимальне експлуатаційне напруження;  $\sigma_{Ri}$  – відповідні границі витривалості індикаторів

Рисунок 1 — Схема визначення кінетичних границь витривалості індикаторів



4, 5, 6 – допоміжні кінетичні криві

Рисунок 2 — Схема розрахунку навантаженості

де  $N_{33}$  (див. рис. 2) розраховуємо за рівняннями кінетичних кривих втоми

$$N_{33} = \frac{N_0 \sigma_{R3}}{\sigma_{ekv3}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv3} - \sigma_{R3}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} - \frac{N_0 \sigma_{R2}}{\sigma_{ekv3}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv3} - \sigma_{R2}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} \quad (2)$$

Для визначення еквівалентної кількості циклів другого рівня необхідно розв'язати систему двох рівнянь

$$\begin{cases} n_{ekv3} = \frac{N_{32}}{K_2 - K_1} \\ n_{ekv2} = \frac{N_{22}}{K_2 - K_1} \end{cases}, \quad (3)$$

де:

$$N_{32} = \frac{N_0 \sigma_{R2}}{\sigma_{ekv3}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv3} - \sigma_{R2}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} - \frac{N_0 \sigma_{R4}}{\sigma_{ekv3}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv3} - \sigma_{R4}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} ; \quad (4)$$

$$N_{22} = \frac{N_0 \sigma_{R4}}{\sigma_{ekv2}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv2} - \sigma_{R4}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} - \frac{N_0 \sigma_{R1}}{\sigma_{ekv2}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv2} - \sigma_{R1}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} .$$

Для визначення еквівалентної кількості циклів третього рівня відповідно необхідно розв'язати систему вже трьох рівнянь

$$\begin{cases} n_{ekv3} = \frac{N_{31}}{K_1} \\ n_{ekv2} = \frac{N_{21}}{K_1} \\ n_{ekv1} = \frac{N_{11}}{K_1} \end{cases}, \quad (5)$$

де

$$N_{31} = \frac{N_0 \sigma_{R1}}{\sigma_{ekv3}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv3} - \sigma_{R1}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} - \frac{N_0 \sigma_{R5}}{\sigma_{ekv3}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv3} - \sigma_{R5}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} ;$$

$$N_{21} = \frac{N_0 \sigma_{R5}}{\sigma_{ekv2}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv2} - \sigma_{R5}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} - \frac{N_0 \sigma_{R6}}{\sigma_{ekv2}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv2} - \sigma_{R6}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} ; \quad (6)$$

$$N_{11} = \frac{N_0 \sigma_{R6}}{\sigma_{ekv1}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{ekv1} - \sigma_{R6}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} .$$

Аналогічні системи рівнянь отримуємо і при більшій кількості визначених рівнів напружень.

Таким чином, отримуємо еквівалентні кількості циклів напружень визначеного рівня, тобто ступінчасту дискретну функцію розподілу циклічних напружень.

Для вирішення проблеми оцінки навантаженості необхідно мати кінетичні діаграми втоми індикаторів, тобто криві втоми при різних ступенях їх пошкодження.

Провівши серію втомних випробувань індикаторів при різному ступені пошкодження (в нашому випадку, з різною довжиною вирощеної тріщини), отримаємо кінетичні криві втоми з імовірнісними характеристиками.

Суть даної методики полягає в такому.

На індикаторах вирощують за допомогою розробленої установки тріщини різної довжини і прикріплюють їх з допомогою точкового зварювання до навантажувальної пластини.

Загальний вигляд навантажувальної пластини з привареним індикатором зображено на рис. 3.

Пластини з привареними індикаторами з вирощеними тріщинами групують за довжиною початкової тріщини. Потім проводять серію втомних випробувань на розробленому дослідному стенді з індикаторами кожної групи до повного руйнування індикаторів (рис. 4).

Як бачимо з рис. 4, руйнування індикаторів відбувалося при відсутності пошкодження навантажувальної пластини.

Побудовані кінетичні криві втоми індикаторів зображено на рис. 5.

Перспективність такого підходу до оцінки навантаженості підтверджується результатами роботи [4], в якій реальний багатоступеневий процес навантажування зводиться до еквівалентного йому двоступеневого.

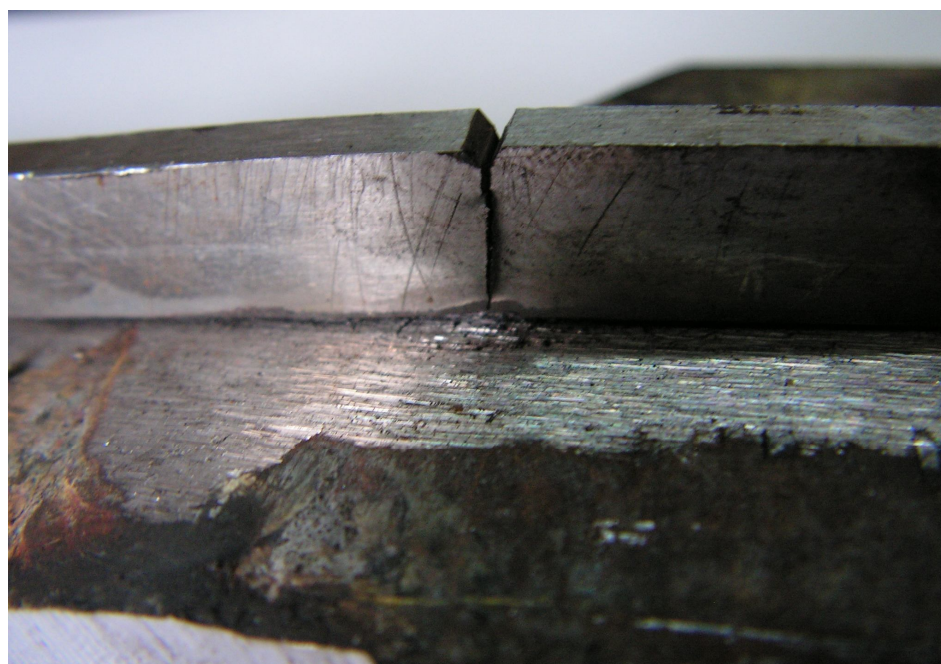
Суттєвою перевагою розробленого методу є можливість отримання багатоступеневої функції розподілу навантажування. Для цього можна використати як більшу кількість індикаторів з різним ступенем початкового пошкодження, так і проміжні результати зростання тріщини менш пошкоджених індикаторів.

Що не менш важливо, результати оцінки можна після відповідного статистичного оброблення подати і у вигляді неперервного розподілу за визначеним законом. Наприклад, у роботі [5] використано розподіл Вейбула для оцінки навантаженості бурильної колони. Такий підхід дає змогу оцінити навантаженість із статистичної точки зору, що покращує точність імовірнісної оцінки довговічності, а також дає можливість створювати базу даних з навантаженості відповідальних об'єктів нафтогазової промисловості при визначених режимах експлуатації.

Наступні дослідження будуть спрямовані на практичну апробацію методу в експлуатаційних умовах.



**Рисунок 3 — Загальний вигляд навантажувальної пластини з привареним індикатором**



**Рисунок 4 — Індикатор після проведення експерименту**

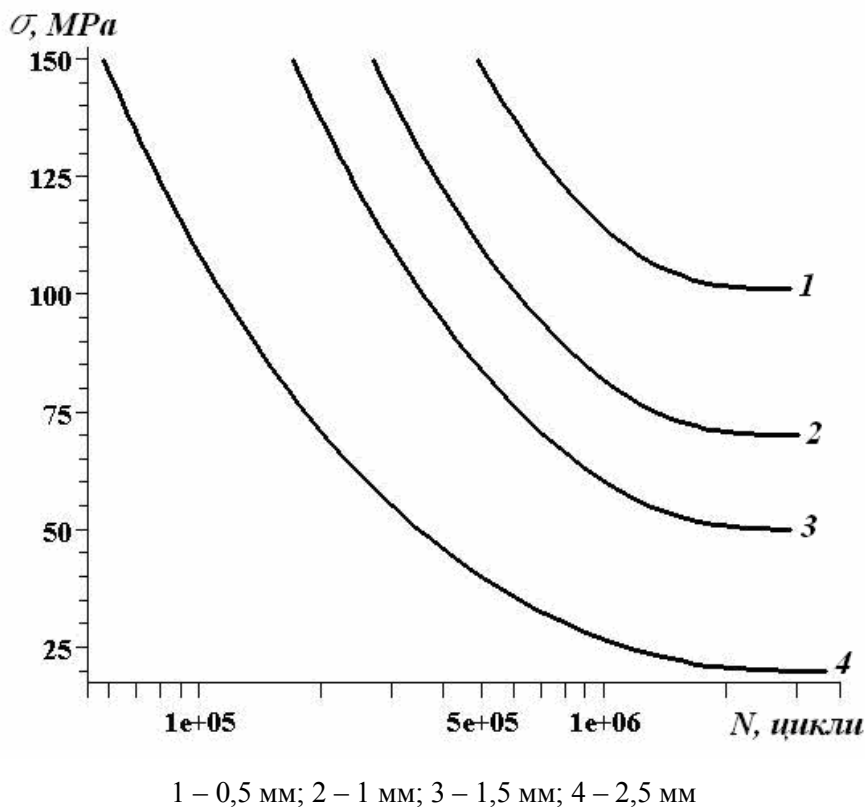


Рисунок 5 — Кінетичні криві втоми індикаторів з довжиною тріщини

### Література

1 Слепечец Е.Н. Определение усталостной наработки конструкции самолета с помощью индикаторов накопления усталостных повреждений: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1986.

2 Трощенко В.Т., Бойко В.И. Датчик усталостного повреждения и обоснование его использования. Сообщение 1, 2 // Проблемы прочности. – 1985. – № 1. – С. 2-14.

3 Почтенный Е.К., Ивасив В.М. Способ ограничения случайных разрушений с помощью индикаторов усталости // Известия академии наук БССР. – Минск, 1981.

4 Шумило О.М. Забезпечення довговічності деталей машин за режимом навантаження на стадії проектування: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2007. – 20 с.

5 Івасів В.М. Методи та засоби управління бурильною колоною для забезпечення її надійності: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Івано-Франківськ, 1999. – 31 с.