

УДК 539.375: 620.178.7: 620.172.2: 624.07

Я.Іваницький<sup>1</sup>, В.Бойко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка

<sup>2</sup>Національної академії наук України, Львів

## ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ШАХТНИХ КОПРІВ

В статті викладено основи методології діагностування, розрахунку і прогнозування залишкової міцності та ресурсу металоконструкцій (МК) шахтних копрів із втомними тріщинами і тріщиноподібними дефектами на стадії експлуатації.

Наведені дані розповсюджуються на матеріали МК шахтних копрів із розташуванням втомних тріщин і тріщиноподібних дефектів в основному матеріалі і в області зварних швів: зона сплавлення, зона термічного впливу і метал шва. Ці дані можуть бути використані: при обґрунтуванні вибору матеріалу і технології виготовлення МК шахтних копрів на стадії проектування із врахуванням статичної, циклічної, динамічної, низькотемпературної тріщиностійкості; при виготовленні МК і їх контролі із визначенням загальної і локальної навантаженості в зонах концентрації напружень і дефектів; при призначенні атестаційних методів випробувань для нових конструкційних матеріалів; при обстеженні МК копрів, які відпрацювали нормативний термін експлуатації з метою визначення їх залишкового ресурсу та подальшої експлуатації.

### Вступ

В багатьох галузях промисловості оцінку працездатності елементів конструкцій проводять на основі моніторингу про технічний стан. На цій основі конструкції поділяються на безпечно пошкоджені і такі, що допускають повільне підростання

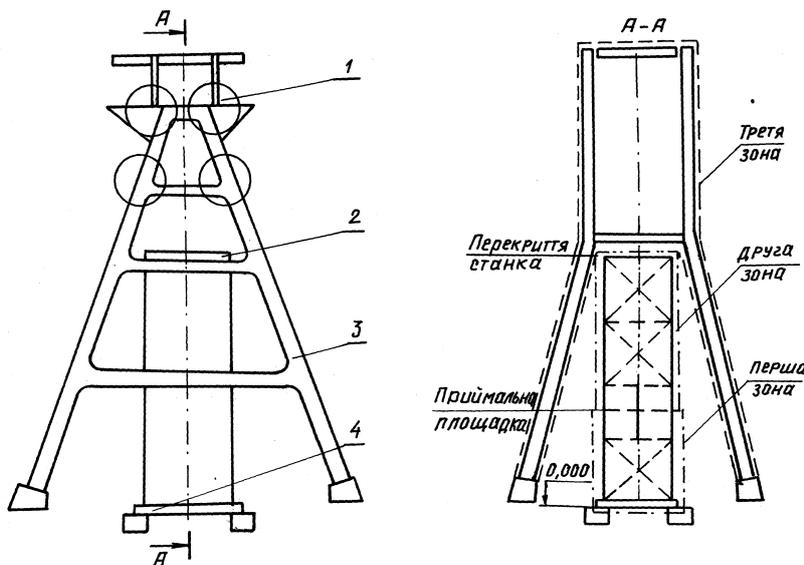


Рис. 1. Схема копра шатрової системи рамного: 1 – головка копра; 2 – станок; 3 – косинка; 4 – підкопрова баба

тріщини. З метою забезпечення надійної роботи і для визначення залишкового ресурсу використовують методи механіки руйнування [1]. Методологія оцінки працездатності інженерних конструкцій з позицій механіки руйнування базується на визначенні міцності і довговічності пружно-пластичних з тріщиноподібними дефектами, встановленні характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалів та знаходженні періоду докритичного росту тріщини. У роботі [2] такі під-

ходи використано для оцінки залишкової довговічності опорних валків прокатних станів та залізничних рейок. Визначення залишкової довговічності труб магістральних нафтопроводів з врахуванням реальних умов експлуатації проведено в [3].

Метою роботи є розробка методики визначення залишкового ресурсу металоконструкцій шахтних копрів для забезпечення терміну надійної експлуатації.

Елементи МК із типовим розташуванням втомних тріщин класифікують за типовими силовими схемами [4], котрі застосовують в копрах шатрової системи рамних, напівшатрової системи решітчастих, змішаної системи рамно-оболонкових, станкової системи решітчастих. Типове розташування втомних тріщин визначають на основі статистичних даних, експлуатації. За ступенем дії втомних та корозійних факторів МК копрів необхідно розділити на три основні зони (рис. 1): конструкція

станка від рівня входу ствола до рівня розвантаження підймальних пристроїв - перша; решта конструкцій станка - друга; решта елементів копра – третя.

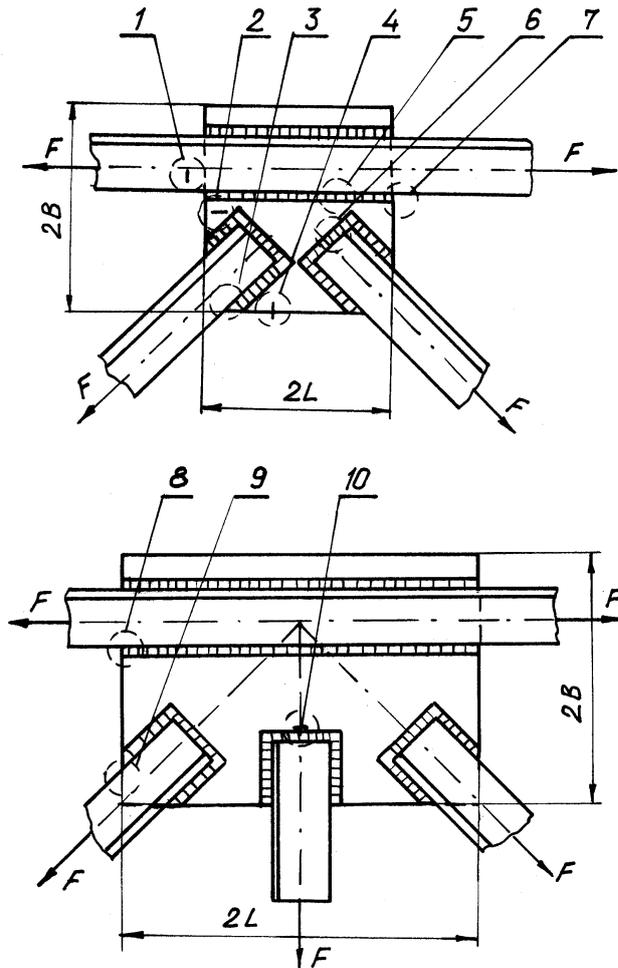


Рис. 2. Типові схеми навантаження МК шахтних копрів, Розташування тріщин в рамках: 1, 3, 8 – краєві тріщини в стержнях; 2, 4, 7, 9 – краєві тріщини в косинках; 5, 6, 10 – центральні тріщини в косинках

Навантаження в елементах конструкції визначають розрахунковим методом або шляхом тензометрування в залежності від вантажу в кліті і режиму експлуатації. Типові силові схеми МК шахтних копрів із тріщинами наведені на рис. 2.

При відомих полях напружень в конструкціях, які отримані із розрахунків числовими або експериментальними методами, коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) визначають шляхом прийнятих методів обробки цих полів. При відсутності даних про поля напружень допускається застосування інтерполяційних методів визначення КІН [5]. Із сімейства типових схем МК вибирають типові розрахункові силові схеми скінченних розмірів, котрі моделюють умови навантаження, розташування, розмір і форму втомної тріщини, при цьому навантаженість елементів може бути зведена до дії поздовжніх сил і згинаючих моментів в зонах знаходження тріщини.

Розрахунки проводять у величинах КІН. В тих випадках, коли потрібна уточнена оцінка залишкової міцності і ресурсу, використовують критерій розкриття тріщини(КРТ).

Параметри КРТ визначають розрахунком за відомими КІН.

Значення КІН визначають методом граничної інтерполяції. Формули для визначення КІН і КРТ за розрахунковими силовими схемами і границі їх застосування в розвиток К-тарувальних кривих дозволяють варіації розмірів розглянутих елементів в більш широких границях у порівнянні із лабораторними зразками.

### Визначення залишкового ресурсу матеріалу

Інтерполяційні методи розв'язку задач теорії тріщин, розроблені у ФМІ НАН України [2,5], дозволяють визначити напружений стан елемента тріщиною із достатньою для практичних цілей точністю.

Елементи МК шахтних копрів є кінцеві за довжиною і шириною тіла. При наявності в них тріщин задача визначення КІН зводиться до вирішення двопараметричної задачі.

В загальному випадку для КІН можна записати

$$K_I = P\sqrt{\pi l}\Phi(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \quad (1)$$

де

$$\Phi(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \Phi(\varepsilon_1, 0) + \Phi(0, \varepsilon_2) - 1,$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - безрозмірні параметри, котрі характеризують геометричні розміри тіла з тріщиною;  $P$  - інтенсивність прикладних зусиль;  $l$  - довжина тріщини. При цьому виконується умова  $\Phi(0,0)=1$ .

У випадку однопараметричного тіла ( $\varepsilon_1 \rightarrow 0$  або  $\varepsilon_2 \rightarrow 0$ ) величину КІН визначають із співвідношень

$$K_I = \sigma_{nom} \alpha, \quad (2)$$

$$\sigma_{nom} = \left[ \sqrt{\sigma_{nom}^{(1)}} - \sqrt{\sigma_{nom}^{(1)}|_{\varepsilon=0}} + \sqrt{\sigma_{nom}^{(0)}} \right]^2, \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha_0 \alpha_1 / \sqrt{\alpha_0^2 + \alpha_1^2}. \quad (4)$$

Тут  $\varepsilon$  - відносна довжина тріщини;  $\sigma_{nom}^{(0)}, \sigma_{nom}^{(1)}$  - номінальні напруження в перешийку для малої і великої тріщини;  $\alpha_0, \alpha_1$  - геометричні характеристики тіла при наявності малої і великої тріщини.

При прямуванні довжини тріщини до граничних значень отримують тіло з малою і великою тріщиною. Для кожного з них граничних випадків визначають величини:

$$K_I^{(0)} = \sigma_{nom}^{(0)} \alpha_0 - \text{для тіла з малою тріщиною};$$

$$K_I^{(1)} = \sigma_{nom}^{(1)} \alpha_1 - \text{для тіла з великою тріщиною}.$$

Визначення граничних випадків задачі  $K_I^{(i)} (i=0,1)$  і процес розрахунку  $K_I$  зводиться до простих алгебраїчних операцій.

Для розрахунку залишкового ресурсу необхідно попередньо побудувати кінетичні діаграми втомного руйнування для основного металу, зони сплавлення і зони термічного впливу, згідно з [6], в координатах  $lgV - lg\Delta K$ , де  $\Delta K$  - розмах КІН при циклічному навантаженні і заданій асиметрії циклу;  $V$  - швидкість росту тріщини. Далі будують граничну кінетичну діаграму втомного руйнування (КДВР) основного металу зварного - з'єднаних як таку, що огинає зліва вищевказані діаграми.

Для отриманих результатів в запас міцності розрахунок проводять за верхньою граничною огинаючою кінетичних діаграм втомного руйнування, яка обмежується значенням  $\Delta K'_{fc}$ , де спостерігається різке прискорення росту тріщини і швидке доламування. Значення  $\Delta K'_{fc}$  порівнюють із результатами розрахунку матеріалу МК відповідної товщини на статичну тріщиностійкість  $K_C$  і динамічну тріщиностійкість  $K_C^\delta$ .

Характеристична функція втомного руйнування вибирається за формулою

$$V^{-1} - \Phi_1(\lambda) = A \left[ \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda} \right)^m - 1 \right], \quad (5)$$

де, в рамках  $K_I$ -підходу,  $\lambda_0 = 1 - K_{th}' / K'_{fc}$ ;  $\lambda = 1 - K_{Imax}' / K'_{fc}$ ;

в рамках  $\delta$ -підходу,  $\lambda_0 = 1 - \sqrt{\delta_{th}' / \delta'_{fc}}$ ,  $\lambda = 1 - \sqrt{\delta_{max}' / \delta'_{fc}}$ .

За граничною огинаючою КДВР методом найменших квадратів визначають характеристики  $A, m, K_{th}', K'_{fc}$ .

Визначають порогові  $l_0$  і критичні  $l_c$  розміри тріщини для типових силових схем при заданому рівні напружень:

$$\text{в рамках } K_I \text{-підходу } K_I(P, l_0) = K_{th}'; K_I(P, l_c) = K'_{fc};$$

$$\text{в рамках } \delta \text{-підходу } \delta_I(P, l_0) = \delta_{th}'; K_I(P, l_c) = \delta'_{fc}.$$

Залишковий ресурс (кількість циклів навантаження) визначають методом числової реалізації інтегралу [6]

$$N = \int_{l_0}^{l_c} \Phi_1(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

При цьому визначають  $N = N(l)$ . Результати розрахунків для елементів МК кінцевих розмірів ( $2B$ ,  $2L$  - довжина і ширина елемента конструкції) представляють у вигляді діаграм живучості (рис. 3), де

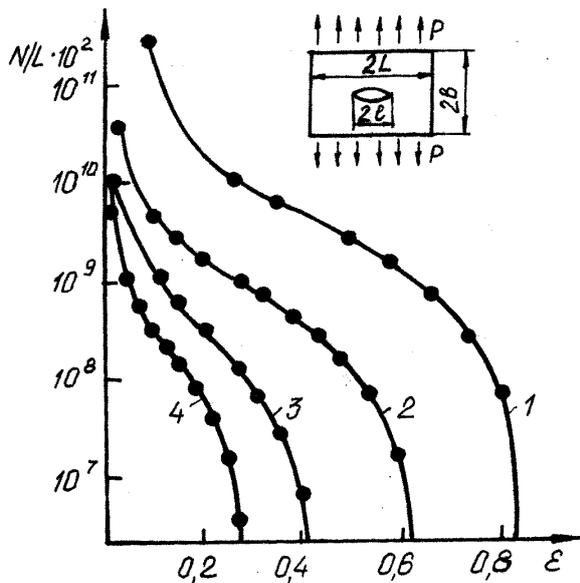


Рис. 3. Діаграми живучості: 1 -  $0,2\sigma_T$ , 2 -  $0,4\sigma_T$ , 3 -  $0,6\sigma_T$ , 4 -  $0,8\sigma_T$

$\varepsilon = l/L$  - відносний розмір тріщини,  $N$  - кількість циклів навантаження. Розрахункові діаграми будують для чотирьох рівнів навантаження ( $0,2$ ;  $0,4$ ;  $0,6$ ;  $0,8$ )  $\sigma_T$ , в рамках  $K_1$ -підходу і  $\delta$ -підходу. За діаграмами визначають критичні і допустимі значення відносної довжини внутрішніх тріщин для кожного рівня напружень в МК. При відомих відносних значеннях тріщини  $\varepsilon$ , кінцевих розмірах елемента конструкції  $B$  і  $L$  і відомих рівнях напружень в конструкції, визначають залишковий ресурс конструкції в кількості циклів навантаження, годинах роботи копра чи тисяч тон піднятого вантажу.

Визначення залишкового ресурсу МК проводять за інженерною методикою.

Рівень напружень в області тріщини визначають методом тензометрування або розрахунковим методом. Діаграми живучості розраховують для типових силових схем із врахуванням коефіцієнта запасу, який визначається як відношення розрахункових рівнів напружень  $\sigma_p$  і  $\sigma_{0,2}$  матеріалу МК:  $n = \sigma_p / \sigma_{0,2}$ . Розрахункові рівні напружень при побудові діаграм живучості, встановлюють у відповідності із коефіцієнтами запасу  $n = 5; 2,5; 1,7; 1,25$  де  $\sigma_p = (0,2; 0,4; 0,6; 0,8)\sigma_{0,2}$ , відповідно.

Із врахуванням геометричних параметрів елемента з тріщинами, характеру навантаження, розташування, форми і розміру тріщини вибирають типову розрахункову силову схему, яка моделює реальну конструкцію з тріщиною.

У відповідності з типовою розрахунковою схемою вибирають діаграми живучості і в залежності від довжини тріщини геометричних параметрів елемента МК, рівня напружень визначають залишковий ресурс конструкції з тріщиною.

Розшифрування діаграми живучості здійснюють в наступній послідовності.

За результатами розрахунків (6) будують залежність залишкового ресурсу  $N$  для заданих рівнів напружень  $\sigma_p$ , коефіцієнтів запасу  $n$  і варіації довжини тріщини від  $l_0$  до  $l_c$  (рис. 3). Отримані значення залишкового ресурсу від  $N(l_0)$  до  $N(l_c)$  необхідно розбити на 8 - 10 частин і встановити число циклів навантаження між двома сусідніми профілактичними оглядами  $N_{\text{проф}}$ .

Довжину тріщини  $l_0$  на діаграмі живучості приймають за початок підрахунку, яка відповідає роздільній здатності засобів дефектоскопічного контролю або пороговому значенню  $\Delta K_{th}$  розглядуваної КДВР.

Ресурс між профілактичними оглядами  $N_{\text{проф}}$  встановлюють із врахуванням  $l_0$  і критичного розміру тріщини  $l_c$ .  $N_{\text{проф}} = [N(l_0) - N(l_c)](8 \div 10)^{-1}$ . В процесі розвитку тріщини  $N_{\text{проф}}$  забезпечує не менше 8÷10 планових профілактичних оглядів до досягнення  $l_c$ , чим забезпечується надійність роботи конструкції із врахуванням можливого пропуску дефекту при контролі.

При виявленні в конструкції тріщини довжиною  $l$  за типовий ресурс конструкції, при критичній довжині тріщини  $l_c$  і напруженому стані  $0,8\sigma_{0,2}$  (крива 4) буде  $[N(l_0) - N(l_c)]$ . При необхідності можна перейти на занижені параметри навантаженості копра.

Ресурс роботи конструкції вираховують в числі циклів навантаження  $N$ , в машино-годинах роботи  $M = N/N_M$ , в тисячах тон піднятого вантажу у  $Q = N/N_b$ , де  $N_M$  - кількість циклів навантаження конструкції за час роботи копра;  $N_b$  - кількість циклів навантаження конструкції за період підняття одної і тисячі тон вантажу.

### Методи технічного діагностування

Проведення цих робіт вимагає попереднього загального і локального технічного діагностування. Метод загального технічного діагностування передбачає знаходження і вимірювання концентраторів напружень, дефектів типу тріщин. В процесі експлуатації здійснюється контроль стану металоконструкцій шахтних копрів шляхом реєстрації генеруючих пружних хвиль в конструкції шахтного копра, що виникають при пружно-пластичному деформуванні металоконструкції навантажувальними тестами на основі сигналів акустичної емісії.

Основними параметрами, що характеризують, акустичну емісію, є наступні:

- а) число імпульсів  $N_\Sigma$  - число зареєстрованих імпульсів дискретної акустичної емісії за інтервал часу спостереження;
- б) сумарний рахунок  $N$  - число зареєстрованих перевищень імпульсами акустичної емісії встановленого рівня дискримінації за інтервал часу спостереження;
- в) активність  $N_\Sigma$  - відношення числа імпульсів акустичної емісії до інтервалу часу спостереження;
- г) швидкість обрахунку  $N$  - відношення загальної кількості сигналів акустичної емісії до часу спостереження;
- д) енергія  $E$  - енергія, що випромінюється джерелом акустичної емісії і переноситься пружними хвилями, які виникають в матеріалі;
- е) енергія сигналу  $E_C$  - енергія акустичної емісії, що випромінюється в місці випромінювання або спостереження;
- ж) образ джерела акустичної емісії - група параметрів сигналів акустичної емісії, отриманих в результаті визначеного виду досліджень матеріалу на конкретній апаратурі акустичної емісії і при заданих умовах досліджень, що дозволяє оцінити властивість матеріалу випромінювати акустичні імпульси.

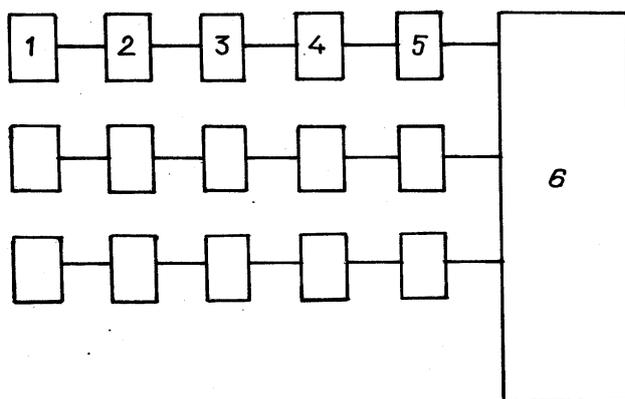


Рис. 4. Блок-схема багатоканальної апаратури для контролю методом акустичної емісії:  
 1 – датчик(перетворювач); 2 – підсилювач попередній; 3 – фільтр; 4 – підсилювач основний; 5 – блок обробки сигналів; 6 – блок визначення місця джерела сигналів АЕ

Реєстрацію сигналів акустичної емісії проводять багатоканальною апаратурою за блок-схемою, зображеною на рис. 4.

Навантажуючі тести діагностування повинні відповідати наступним вимогам:

- Довготривалість тесту діагностування визначається коефіцієнтом запасу міцності металоконструкції, рівним концентрації в області дефекту або концентратора, коефіцієнту випромінювання сигналів АЕ, роздільною здатністю акустичної апаратури і знаходиться в діапазоні від 0,5 до 6 хв.
- При діагностуванні стабільно визначають дефекти і концентратори напружень при досягненні рівня концентрації  $\sigma_{0,2}$  і більше. Границю течіння матеріалу визначають із залежності активності емісії від прикладеного напруження (рис. 5).

- Метод визначення місця знаходження дефекту з допомогою АЕ може бути неперервним або періодичним. Неперервні спостереження за станом металокопрукції шахтних копрів дозволяють виявити дефекти в міру їх розвитку на цій основі оцінити міру небезпеки. Вимірювальна система дозволяє виявити збільшення довжини тріщини на 1 - 10 мкм в складних умовах при наявності шумів.
- Контроль за виникненням дефекту в металокопрукції шахтного копрі проводять в найбільш навантаженій першій зоні, згідно з рис. 1. При довготривалому спостереженні з допомогою методу АЕ визначають найбільш небезпечний дефект для цієї зони, який може привести до руйнування всієї копрукції.

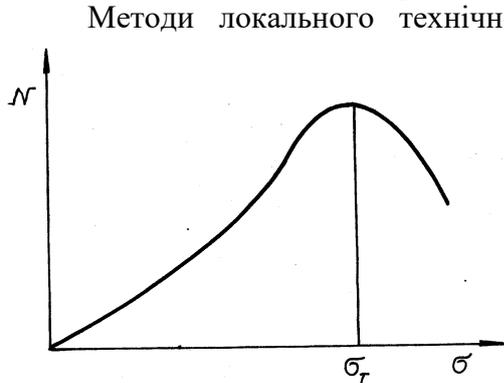


Рис. 5. Залежність активності  $N$  сигналів емісії від прикладених напружень

Методи локального технічного діагностування металокопрукції шахтних копрів призначені для уточнення вимірювань геометричних параметрів виявлених дефектів або обстеження локальних областей металокопрукцій із перенапруженими зонами чи пошкодженнями із застосуванням ультразвукових, радіаційних, магнітних, електромагнітних, капілярних методів неруйнівного контролю.

Найбільш поширеними дефектами в металокопрукції є: тріщини втомні, дефекти суцільності металу металургійного

походження - розшарування, волосовини, флокени; невидимі дефекти в зварному шві - непровари, включення, внутрішні тріщини; корозійний знос внутрішніх поверхонь закритих металокопрукцій трубчастого і коробчастого типу.

- Вибір методу контролю і визначення меж його застосування необхідно здійснювати з врахуванням характеру очікуваного дефекту, дефектоскопічній технологічності об'єкту контролю, роздільної здатності, продуктивності вимірювальних засобів. Використовують такі методи контролю:
- Радіаційним контролем виявляють внутрішні сховані дефекти: великі тріщини; непровари; пори, металічні і неметалічні включення. Метод нечутливий до чистоти поверхні контрольованих об'єктів.
  - Ультразвукові методи застосовують для знаходження внутрішніх дефектів в металокопрукціях зварних швів тріщини, непровари, включення, розшарування тощо. Зміну товщини закритих частин металокопрукцій внаслідок корозійного зносу проводять з допомогою ультразвукових товщиномірів.
  - Магнітні методи застосовують для виявлення поверхневих і приповерхневих дефектів: втомні тріщини в зварних швах і біляшовній зоні, термічні зварні тріщини, непровари стикових зварних з'єднань.

Вибір і оцінку ефективності методу контролю здійснюють з врахуванням роздільної здатності, продуктивності вияву дефектів. Порівняльна оцінка ефективності методів наведена в табл. 1.

Після визначення основних розрахункових, експериментальних і діагностичних параметрів стану несучих елементів копрових МК приймають наступні рішення:

- про допустимість подальшої експлуатації із визначенням критичного розміру тріщини  $l_c$ , залишкового ресурсу і призначенням  $N_{\text{проф}}$ ;
- про зниження експлуатаційного навантаження;
- про проведення ремонтно - відновлювальних робіт.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця ефективності методів дефектоскопії із врахуванням  
дефектоскопічної технологічності металоконструкцій

Спосіб дефектності	Мін. глибина тріщини, мм	Мін. розкр. берегів тріщ., мм	Продуктив ність, відносних одиницях	Ймовірність виявлення дефектів зварювання			
				поверхневої тріщини, %	неметалічні включення, %	рако- вини, %	непро- вари, %
Ультразвуковий	0,1	0,001	1-2	10	45	85	95
Радіаційний	2% від товщини виробу	0,1	0,1	2	100	100	65
Візуальний	–	0,1	20-50	20	–	–	–

Допустимою подальша експлуатація вважається тоді, коли виявлені тріщини мають розміри  $l \leq l_0$ . Якщо виявлені дефекти перевершують величину  $l_0$ , то подальша експлуатація із врахуванням  $N_{\text{проф}}$  може здійснюватися при запасах за розмірами дефектів:  $(n)_1 = l_0/l \geq 3$ .

### Висновки

1. На основі аналізу роботи шахтних копрів розроблено методику технічної діагностики, розрахунку залишкової міцності та ресурсу металоконструкцій.
2. Побудовано діаграми живучості металоконструкцій елементів шахтних копрів з тріщинами в залежності від рівня їх навантаження.
3. Встановлено умови подальшої експлуатації металоконструкцій шахтних копрів в залежності від дефектності і навантаженості.

*Bases of methodology of diagnostics, calculation and predictions remaining durability and resource of metalware of shaft headgear with fatigue cracks and cracking defects on the stage of exploitation are laid out in the article.*

*The resulted information spread on materials of the metalware shaft headgear with the location of fatigue cracks and cracking defects mainly materials and in the region of the welded stitches.*

### Література

1. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. – т.4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов/О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.
2. Андрейкив А.Е., Дарчук А.И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций. –К.: Наук. думка, 1992.-183 с.
3. Андрейкив О.Є., Іваницький Я.Л., Терлецька З.О., Кіт М.Б. Оцінка довговічності труби нафтогону з поверхневою тріщиною під двовісним навантаженням// Фіз.. – хім. механіка матеріалів. -2004.-№3. - С. 103-109.
4. РД 12.004-93 “Металлические конструкции шахтных копров. Общие требования к защите от коррозии”. – К.: Госуглепром, 1993. – 57 с.
5. Андрейкив О.Е. Пространственные задачи теории трещин. – Киев: Наук. думка, 1982. – 346 с.
6. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружения. Методические указания. М.: Изд-во стандартов, 1993. – 53 с.

Одержано 01.07.2004 р.