

УДК 539.382.4

## ПРО ПРИЧИНИ РУЙНУВАННЯ АРМАТУРНИХ КАНАТІВ ЗАХИСНИХ ОБОЛОНОК ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС

В. М. ТОРОП<sup>1</sup>, М. Д. РАБКІНА<sup>1</sup>, О. О. ШТОФЕЛЬ<sup>1</sup>, В. В. УСОВ<sup>2</sup>,  
Н. М. ШКАТУЛЯК<sup>2</sup>, О. С. САВЧУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

<sup>2</sup> Південноукраїнський національний педагогічний університет ім. К. Д. Ушинського, Одеса

Встановлено імовірні причини передчасних руйнувань типових арматурних канатів захисних оболонок АЕС з урахуванням механічних параметрів дротів, характеру пошкодження їх поверхонь, фрактальних розмірностей зламів. Виявлено, що за нижчої пластичності металу дроту і меншої його пошкодженості реалізується крихке руйнування, якому відповідає більша фрактальна розмірність.

**Ключові слова:** арматурні канати, злами, фрактографія, механічні випробування, фрактальна розмірність, пошкодженість.

Через збільшення загальної кількості енергоблоків атомних електростанцій (АЕС), а також зростання вимог до безпеки їх експлуатації для охорони довкілля в Україні та за її межами зазвичай здійснюють комплекс заходів, щоб підвищити надійність систем локалізації небезпечних наслідків аварій. Особливу увагу тут приділяють захисним оболонкам над реакторами АЕС [1], які виготовляють із попередньо напруженого залізобетону. Циліндричну і купольну частини оболонки заздалегідь напружують арматурними канатами (АК) з арматурного дроту класу В-II.

Значна частина енергоблоків АЕС України експлуатується понад 30 років. Тому частішали розриви дротів АК [2]. Опубліковані результати досліджень оболонок АЕС стосуються, в основному, довговічності їх залізобетонних конструкцій, зміни в часі властивостей бетону під впливом стресових для екології чинників і старіння конструкційних матеріалів. Проаналізовано властивості матеріалів, визначені під час ремонтних робіт, та методи оцінювання роботоздатності залізобетонних конструкцій АЕС і перевірки їх стану, а також розвинуто методологію оцінювання експлуатаційної надійності за результатами діагностування їх технічного стану [3–5]. Проте експертиза руйнувань АК поки що залишається поза увагою дослідників. Причини їх руйнування пов'язують з технологією виготовлення (структура та механічні властивості сталі, геометрія перерізу дроту, характер його скручування тощо) і з впливом експлуатаційних чинників (високі, а часто і знакозмінні напруження; нерівномірність навантаження в місцях огинання канатом блока або барабана; зношування зовнішніх дротів АК внаслідок контактування з поверхнею жолоба блока і барабана та внутрішніх – через їх тертя між собою; використання мастильних матеріалів; наявність абразивного пилу і хімічно-активних середовищ тощо).

Щоб встановити вплив перелічених чинників на характер руйнування сталевих АК, перспективно залучити фрактографічні дослідження та використати можливості фрактального аналізу поверхонь зламів [6]. На сьогодні відома фрактальна природа поверхні крихкого руйнування зразків, випробуваних ударом [7]. Зокрема, для сталі кисневих балонів виявлено кореляційний зв'язок між механіч-

Контактна особа: В. В. УСОВ, e-mail: valentinusov67@gmail.com

ними характеристиками (ударна в'язкість, границя плинності і руйнівний тиск) та фрактальними розмірностями (ФР) меж зерен і знайдені відповідні рівняння регресії [8]. Зафіксовано також, що чим більша ФР зламів під час випробувань на малоциклового втому, то менша довговічність металу зварних з'єднань трубопроводів [9].

Як відомо, фрактографічні (металографічні) дослідження найближчі до прямих методів визначення ФР статистично-повторюваних профілів чи поверхонь об'єктів [10–14]. Найпоширеніші з них: метод островів зрізу, Фур'є-аналіз профілів та метод вертикальних перерізів [6]. Визначають ФР за алгоритмом Річардсона як тангенс кута нахилу  $\ln(L) = f(\ln(\ell))$ , де  $L$  і  $\ell$  – довжина профілю і крок вимірювання [11].

Застосування фрактального аналізу до опису руйнування залишається дискусійним. Водночас встановлено зв'язок ФР і структури зони передруйнування з комплексом інваріантних механічних характеристик [6]. Виявлено, що ФР рельєфу зламу сталі X18H10T, випробуваної на малоциклового втому, зростає зі збільшенням кількості циклів до руйнування [15]. Знайдено аналітичні залежності, що пов'язують ФР зі стандартними характеристиками сталей 30XH4M і 28X3CHMBFA, випробуваних на розтяг [16]. Виявлено, що ФР пластичних матеріалів зменшується зі збільшенням їх ударної в'язкості, тоді як для крихких тенденція зміни цих характеристик протилежна [17, 18].

Проте за результатами випробувань на ударну в'язкість зразків Менаже та Шарпі зі сталей 16Г2АФ, 40Х2Н2МА, 38ХН3МФА і 15Х2МФА не вдалося знайти зв'язок між ФР і механізмом їх руйнування, що ставить під сумнів правомірність використання ФР за реалізації в'язкого механізму руйнування [19, 20]. Відомо також незмінність ФР зламів ударних зразків [21–23].

Нижче встановлено основні причини дочасних відмов високоміцних АК з урахуванням якості дротів, характеру пошкоджень на їх поверхнях і особливостей зламів та виявлено кореляційні зв'язки між ФР експлуатаційних зламів та механічними властивостями і пошкодженістю металу дротів.

**Матеріал і методи випробувань.** Досліджували фрагменти зруйнованих канатних дротів після різних термінів експлуатації. Фрагменти діаметром  $\sim 5$  mm з АК1 (термін експлуатації 15 років) та АК2 (термін експлуатації п'ять років) завдовжки 500...550 mm вирізали з трьох різних ділянок: зверху і знизу від зламів АК та з їх неушкоджених ділянок, які умовно назвали середніми частинами. Вибір цих ділянок обумовлений тим, що технологія виготовлення, монтажу та умови експлуатації могли суттєво впливати на технічний стан дротів АК, що знаходились у зоні обриву, порівняно з неушкодженими їх ділянками.

Хімічний склад металу фрагментів визначали на рентген-флуоресцентному спектрометрі СЕР-01 "Elvax Light" і аналізаторі вуглецю ГОУ-1. Короткочасні випробування на розтяг виконали за кімнатної температури на установці Instron 8802 згідно з ГОСТ 1497-84. Швидкість деформування  $0,0015 \text{ s}^{-1}$ . Механічні характеристики визначали за стандартними методиками (ДСТУ 7305:2013).

Фрактограми експлуатаційних зламів дротів АК та зламів зразків з дротів після випробувань на розтяг за кімнатної температури вивчали на стереоскопічному оптичному мікроскопі МБС-10 зі спеціальною насадкою. Експлуатаційні злами очищали від продуктів корозії в ультразвуковому диспергаторі УЗДН, використовуючи 2%-ий спиртовий розчин щавлевої кислоти з додаванням інгібітора, і промивали їх петролейним ефіром. Проте через значну їх забрудненість не вдалося повністю усунути продукти корозії з їх поверхні.

Для металографічних досліджень використали поперечні перерізи аналізованих фрагментів дротів. Для виявлення структури сталі мікрошліфи травили в 4%-му розчині азотної кислоти. Фрактальну розмірність  $D$  зламів визначали методом комірок (box method) [6, 12]. Для встановлення ФР на зображення профілю

обраного фрагмента зламу накладали елементарні квадратні сітки зі сторонами  $\ell_i$ . Підраховували кількість квадратів  $N(\ell_i)$ , які перетинає профільна крива. Змінюючи розмір вікна сітки  $\ell_i$  (2×2; 1,5×1,5; 1×1; 0,5×0,5; 0,25×0,25 cm), визначали кількість квадратів  $N(\ell_2), N(\ell_3), \dots, N(\ell_n)$ . За кількістю перетнутих квадратів  $N(\ell_i)$  і розміром вікна сітки  $\ell_i$  розраховували параметр  $D$ :

$$N(\ell) \propto \ell^{-D} \quad (1)$$

На практиці значення  $D$  визначали за тангенсом кута нахилу графічної залежності  $\lg N(\ell_i) = f(\lg \ell_i)$  [6, 11, 12].

Пошкодженість дротів оцінювали, використовуючи симетричний тензор пошкодженості другого порядку  $\omega$ . За одновісного розтягу лише один компонент цього тензора не дорівнює нулю [24–26]:

$$\omega = 1 - \sqrt{E/E_0} \quad (2)$$

де  $E_0$  і  $E$  – початкове значення модуля пружності неушкодженого матеріалу і поточне, визначені за результатами випробувань одновісним розтягом. Аналізували пошкодженість, спричинену напруженнями, що дорівнюють відповідним границям плинності  $\sigma_{0,2}$  і міцності  $\sigma_B$ .

**Результати та їх обговорення.** За хімічним складом (табл. 1) метал дротів АК в основному відповідає сталі 85, що узгоджується з вимогами ТУ У 00191046.014-95. У металі каната АК1 додатково виявили не передбачений стандартом нікель, який може лише поліпшувати пластичність, міцність і антикорозійні властивості сталі (в основному через подрібнення зерна). А в металі каната АК2 зафіксували занижений вміст марганцю, що може впливати на формування структурних і фазових складників та схильність металу до крихкого руйнування.

**Таблиця 1. Вміст елементів у металі досліджених дротів, mass%**

Проба	Місце розташування*	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Cu
АК1	Верх	0,80	0,32	0,54	0,68	0,020	0,01	0,129	0,080
	Низ	0,80	0,23	0,47	0,68	0,020	0,01	0,123	0,093
	Середина	0,80	0,33	0,70	0,70	0,017	0,01	0,126	0,138
АК2	Верх	0,88	0,30	0,44	–	0,015	0,01	0,104	0,034
	Низ	0,84	0,23	0,40	–	0,015	0,01	0,106	0,031
	Середина	0,89	0,29	0,41	–	0,014	0,01	0,109	0,047
Сталь 85	ГОСТ 14959-79	0,82...0,90	0,17...0,37	0,5...0,8	–	–	–	≤0,25	–

\* Місце розташування проб відносно експлуатаційних зламів дротів АК.

Аналіз шліфів засвідчив, що кількість включень (в основному оксиди і силікати) не перевищує бала № 1 згідно зі Держстандартом 1778-70 за шкалами “Оксиди точкові” і “Силікати деформування”. Загалом мікроструктура металу дротів обох АК виявилася сумішшю сорбіту та трооститу.

Згідно з п. 2.2 ТУ У 00191046.014-95 діаметр дроту повинен становити 5,0 + 0,08 mm, а овальність перерізу не повинна перевищувати граничне його відхилення (тобто 0,08 mm). Діаметр дротів замірювали в усіх аналізованих частинах зразків і виявили, що середнє значення діаметра дротів в канаті АК2 відповідало регламентним вимогам, а в АК1 дорівнювало менше 5 mm і відхилення становило ~3%.

Механічні характеристики міцності та пластичності металу зі середньої (неушкодженої) частини дротів АК відповідають ТУ У 00191046.014-95 (табл. 2).

**Таблиця 2. Середні значення характеристик металу досліджених дротів**

Канат	Місце вирізання*	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$D$	$\omega$	$\delta$	$\psi$
		МПа				%	
АК1	Верх	1664,4	1469,0	1,11	0,13	1,1	10,8
	Низ	1741,6	1530,4	1,08	0,39	2,3	15,7
	Середина	1806,0	1586,2	–	0,59	5,2	37,2
АК2	Верх	1785,0	1544,4	1,07	0,53	4,2	34,2
	Низ	1695,1	1370,2	1,10	0,49	3,2	13,1
	Середина	1754,3	1456,9	–	0,84	6,3	46,8
ТУ У 00191046.014-95		Не менше					
		1670,0	**	–	–	4,0	–

\* Місце вирізання зразків для досліджень зламу канатів; \*\* значення отримано розрахунком, оскільки у ТУ У 00191046.014-95 вказано лише клас міцності 1400 та зусилля, що відповідає умовній границі плинності  $P_{0,2} = 27500$  N для дроту діаметром 5 mm.

Границя міцності металу з верхньої і нижньої частин дротів АК1 також відповідала цим вимогам. Проте виявили значну нестабільність металу за пластичністю. Зокрема, у верхній частині дротів параметр  $\delta$  зменшився на понад 78%,  $\psi$  – на понад 70%, а у нижній частині вони змінилися більш, ніж на 55% проти середньої неушкодженої ділянки, що є неприпустимим відхиленням від вимог ТУ У 00191046.014-95. Така нестабільність за пластичністю проявилася, коли дроти-зразки руйнувалися від поверхневих дефектів, які виникали в околі місця розриву каната під час експлуатації.

Різні за інтенсивністю корозійні ушкодження зафіксували на бічній поверхні дротів з різних частин експлуатованого АК1. Найбільше їх було на дротах з верхньої частини (рис. 1a), менше – з нижньої (рис. 1b), а на дротах зі середньої (неушкодженої) частини сліди корозійних уражень практично відсутні (рис. 1c).

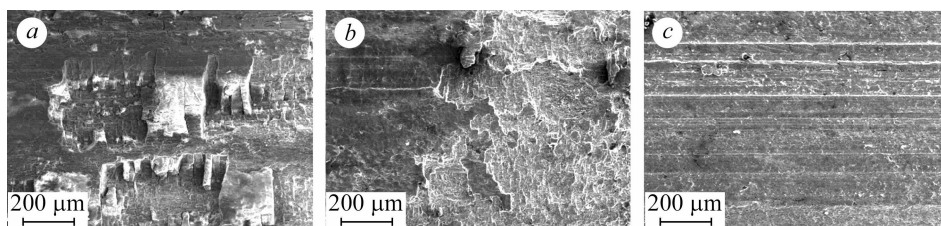


Рис. 1. Пошкодження на зовнішній поверхні відібраних дротів з верхньої (a), нижньої (b) і середньої (c) частин каната АК1 (відносно місця його експлуатаційного руйнування).

Fig. 1. Damages of the outer surface of selected samples: the upper (a), lower (b) and middle part (c) of AK1 rope (relative to the rupture place).

Для дротів АК2 виявили протилежну тенденцію зміни характеристик пластичності: зменшення  $\delta$  і  $\psi$  спостерігали переважно для металу нижньої частини (відносно місця розриву) дротів (табл. 2). Величина  $\sigma_{0,2}$  також не відповідає вимогам ТУ У 00191046.014-95. Найбільше ушкоджень було на дротах нижньої частини АК2.з його нижньої частини, де виникли чисельні поперечні тріщини.

Припустили, що їх могла зумовити фретинг-корозія, яку вважають однією з причин руйнування дротів високонапружених канатів [27, 28] (рис. 2).

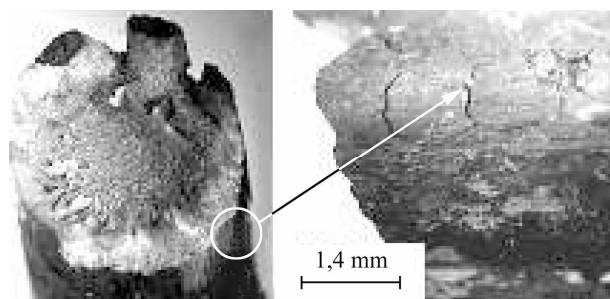


Рис. 2. Макрозлам та тріщини на зовнішній поверхні нижньої частини зруйнованого каната АК2.

Fig. 2. Macrofracture and cracks on the outer surface of the lower part of the ruined AK2 rope.

Таким чином, на бічних поверхнях досліджених фрагментів дротів зафіксували численні корозійні пошкоди, які могли стати зародками фретинг-корозійних тріщин. Ймовірність їх розвитку під час експлуатації АК останнім часом особливо зросла через значні терміни напрацювання конструкцій і високі експлуатаційні напруження. Внаслідок контактування на поверхнях суміжних дротів формуються сліди викришування у вигляді вищербин приблизно однакової глибини. Як правило, тріщини зароджуються від декількох таких осередків, а в часі експлуатації зливаються в магістральну тріщину, поширюючись на весь поперечний переріз дроту (рис. 3).

Злами верхніх частин дротів АК1 в основному вкриті численними і глибокими корозійними виразками (рис. 3a, c, d), а місцями на зламі фіксували суцільну, але розтріскану окисну плівку (рис. 3d). На зламах обірваних дротів з нижньої частини АК виявили більші за розмірами виразки, ніж з верхньої (рис. 3b). Попри очищення, злами дротів з верхньої і нижньої частин АК1 залишилися вкритими продуктами корозії, які завуальовували їх деталі, але все ж дали можливість аналізувати макроособливості руйнування. Зокрема, по всій поверхні зламу верхньої частини спостерігали численні заглиблення з продуктами окиснення в їх глибині.

Злам дроту з верхньої частини каната АК2 (рис. 3e, f) відрізнявся від зламу з нижньої (рис. 3g, h). У першому випадку руйнування дроту розпочиналося, найімовірніше, з центральної частини його круглого перерізу (рис. 3e), а у другому – від його зовнішньої поверхні (рис. 3g). На мікрорівні у верхній частині зруйнованого дроту зафіксували класичне для зміцнених сталей в'язке руйнування з дуже дрібними ямками відриву та вторинне розтріскування вздовж меж трооститних складників (рис. 3f). Злам дроту з нижньої частини рельєфніший і дещо подібний до зламів з верхньої частини АК1. На ньому проглядаються численні і глибокі корозійні виразки, хоч і недостатньо чітко окреслені через суцільну плівку на поверхні (рис. 3h).

Фрактальний аналіз виявив (табл. 2), що ФР зламу дроту верхньої частини каната АК1 становить  $D_{upp}^{AK1} = 1,11 \pm 0,01$ , а нижньої  $D_{low}^{AK1} = 1,08 \pm 0,01$ , тоді як для зламів АК2 зафіксували зворотну тенденцію: ФР зламу верхньої частини становила  $D_{upp}^{AK2} = 1,07 \pm 0,01$ , а нижньої  $D_{low}^{AK2} = 1,10 \pm 0,01$ .

Порівняння механічних характеристик досліджених дротів обох канатів зі знайденим за співвідношенням (1) показником пошкодженості  $\omega$  виявило, що його значення найменше для металу з найнижчою пластичністю (табл. 2), який зазвичай руйнується за крихким механізмом. Якщо інтерпретувати пошкодженість як співвідношення площі зламу, що припадає на мікропори та мікротріщини, до номінальної площі перерізу зразка, то пошкодженість під час крихкого руйнування пов'язують з дефектами, які виникли без макроскопічних пластичних дефор-

мацій. За в'язкого руйнування її зазвичай пов'язують з більшими дефектами у вигляді порожнин, що зародилися через пластичне деформування [29, 30].

Проаналізувавши закономірності зміни ФР зламів дротів з різних частин канатів  $D$  щодо показника їх пошкодженості  $\omega$ , дійшли висновку, що більшому значенню  $D$  відповідає менше значення  $\omega$  (табл. 2). Причому пластичність та пошкодженість ( $\omega = 0,13$ ) металу з верхньої частини АК1 найнижчі, а визначена для нього ФР найвища ( $D_{upp.}^{AK1} = 1,11 \pm 0,01$ ). Тенденція зміни цих характеристик для дротів каната АК2 протилежна. Найменші пластичність і пошкодженість ( $\omega = 0,49$ ) та найвище значення ФР ( $D_{low.}^{AK2} = 1,10 \pm 0,01$ ) властиві металу з нижньої його частини (табл. 2).

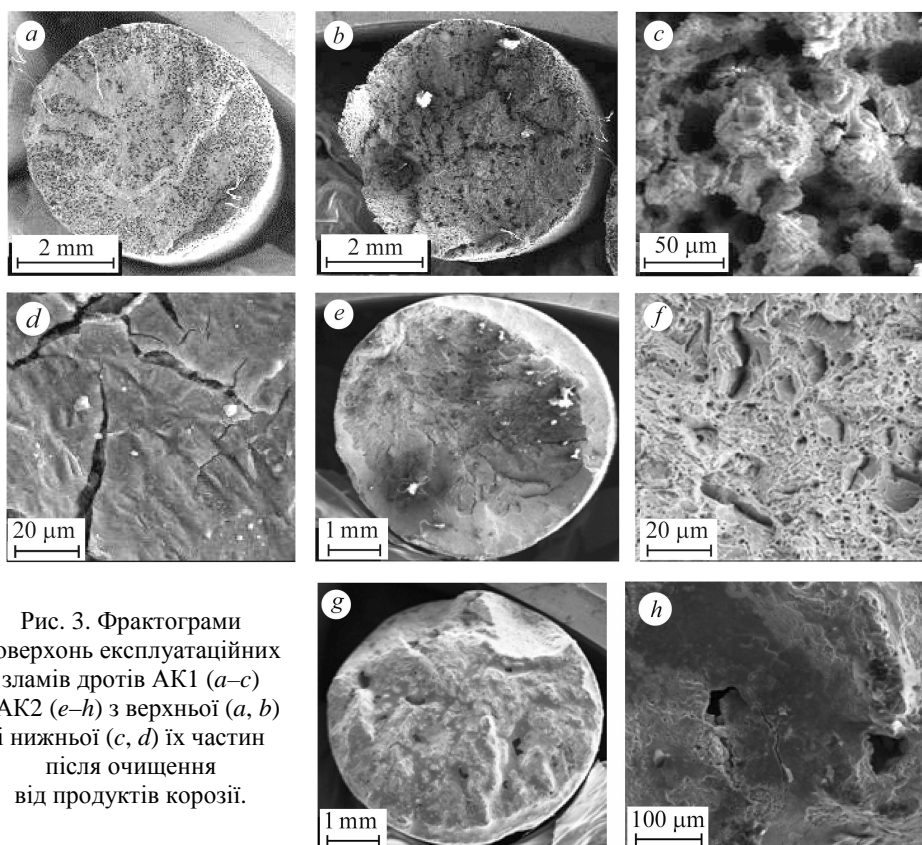


Рис. 3. Фрактограми поверхонь експлуатаційних зламів дротів АК1 (а-с) і АК2 (е-г) з верхньої (а, б) і нижньої (с, д) їх частин після очищення від продуктів корозії.

Fig. 3. Fractographs of the surface of the AK1 (a-c) and AK2 (e-h) wires after destruction during exploitation of their top (a, b) and bottom (c, d) parts (relatively to the rupture place) after cleaning from corrosion products.

Таким чином, у досліджених зламах дротів АК, експлуатованих у захисних оболонках атомного реактора, виявили певний зв'язок між особливостями руйнування, зумовленими пошкодженістю, і значеннями ФР. Зокрема, крихітшому руйнуванню відповідає вище значення ФР за меншого показника пошкодженості матеріалу. Іншими словами, що вищі характеристики пластичності, визначені на зразках експлуатованого матеріалу АК, то нижчі значення ФР описують рельєф їх зламів (табл. 2).

Для уточнення можливих причин руйнування дротів АК досліджували злами зразків-дротів з різних ділянок (верхньої, нижньої і середньої), випробуваних активним розтягом. Їх характер свідчить про те, що руйнування усіх дротів кана-

та АК1 розпочиналося в центрі їх поперечного перерізу з утворенням класичного для в'язкого руйнування гладких циліндричних зразків зламу типу чашка-конус (рис. 4a–c).

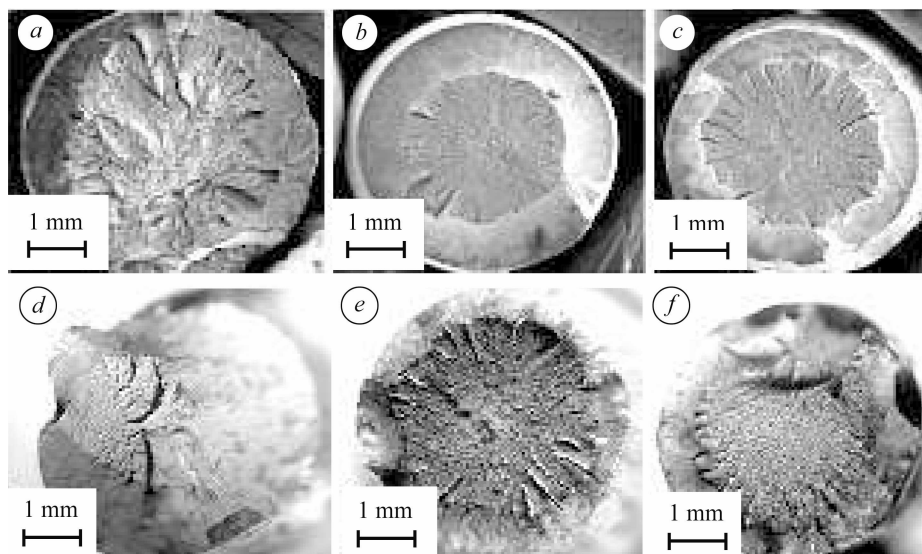


Рис. 4. Макрофрактограми зламів зразків-дротів, вирізаних з верхньої (a, d), середньої (b, e) та нижньої (c, f) частин дротів АК1 (a–c) і АК2 (d–e), випробуваних розтягом за кімнатної температури.

Fig. 4. Macrofractographs of the specimens fracture of the AK1 (a–c) and AK2 part wires (d–e) after tensile tests at room temperature the top part (a, d), the middle (b, e), the bottom (c, f).

Конусна частина зламу зразка зі середньої частини каната АК1 (зразок з поза зони його експлуатаційного руйнування) виявилась найширшою (рис. 4b). Центральна частина, де зароджувалося руйнування за в'язким ямковим механізмом, чітко окреслена і сумірна з конусною. Радіальні гребені на периферії центральної частини відокремлюють її від конусної нестабільного поширення руйнування. Для нижньої (рис. 4c) і, особливо, верхньої (рис. 4a) щодо місця розриву каната АК1 частин характерне зменшення ширини конусних зон зламів та зростання ширини зони з радіальними гребенями.

Аналіз зламів зразків-дротів з різних частин каната АК2, зруйнованих розтягом у лабораторних умовах, не виявив відмінності між ними. Лише зразки зі середньої (неушкодженої) частини (рис. 4e) руйнувалися, як і зразки з каната АК1, від центра їх поперечного перерізу з утворенням т.зв. волокнистої зони повільного поширення руйнування, яка поступово переходила в зону нестабільного руйнування з радіально орієнтованими гребенями і завершилася його конусною частиною за механізмом в'язкого зсуву. У зразках з верхньої (рис. 4d) і нижньої (рис. 4f) частин каната руйнування зароджувалося випадково (і в центрі перерізу зразків-дротів, і від будь-яких поверхневих дефектів). Зокрема, на зламі дроту з нижньої частини каната АК2 воно почалося від бокової поверхні (рис. 4f) – від дефектів, що виникли на поверхні дроту під час експлуатації. Але всередині перерізу дроту виявили також невелику за площею волокнисту зону, чітко окреслену широкою зоною радіально орієнтованих гребенів, що властиво зародженню руйнування в центральній частині гладких зразків на розтяг.

#### ВИСНОВКИ

Численні сліди корозійних ушкоджень на зовнішній поверхні досліджених фрагментів арматурних канатів могли слугували осередками зародження фре-

тинг-корозійних тріщин. Встановлено, що однією з причин руйнування АК є виникнення у поверхневих шарах дротів тріщин за сумісного впливу корозійних процесів та значних експлуатаційних напружень під час тривалої експлуатації. За результатами фрактографічного і фрактального аналізів зламів експлуатованих канатних дротів встановили зв'язок між характером руйнування і пошкодженістю металу: крихкішому зламу дроту за випроб розтягом у повітрі відповідно більша фрактальна розмірність та менше значення показника об'ємної пошкодженості матеріалу.

*РЕЗЮМЕ.* Установлены вероятные причины преждевременных отказов типичных арматурных канатов защитных оболочек АЭС с учетом качества металла проволоки, характера повреждения их поверхностей и фрактальных размерностей излома. Выявлено, что более хрупкому разрушению соответствует большая фрактальная размерность изломов при меньших повреждениях и пластичности материала.

*SUMMARY.* Main causes of premature failures of typical reinforcing ropes of the protective envelopes of nuclear power plants are established, based on the quality of the wires, the nature of their damaged surfaces, fractal features of fracture. It was found that a more brittle fracture corresponds to a larger fractal dimension at the less damage and plasticity of the material.

1. Рапина К. А. Конструкции защитных железобетонных оболочек ядерных установок // Будівельні конструкції. – 2013. – Вип. 78(1). – С. 84–91.
2. Бамбура А. Н., Сазонова И. Р., Богдан В. М. К расчету железобетонных преднапряженных защитных оболочек атомных станций // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2016. – Вып. 91. – С. 25–31.
3. Система обеспечения надежности строительных конструкций АЭС и ТЭС Украины / Н. В. Савицкий, В. Б. Швец, В. Л. Седин, Ю. А. Киричек, Е. А. Бауск, А. Н. Станкевич, А. В. Шавлаков, И. Е. Гевцы, Г. Г. Фаренюк, А. Н. Бамбура // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2012. – Вып. 65. – С. 531–540.
4. Report on Aging of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures. – URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6424/>
5. Bonded or Unbonded Technologies for Nuclear Reactor Prestressed Concrete Containments. – URL: <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2015/csni-r2015-5.pdf>
6. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксагоев. – М.: Наука, 1994. – 384 с.
7. Усов В. В., Шкатуляк Н. М. Фрактальна природа крихких зламів металлу // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – **41**, № 1. – С. 58–62.  
(Usov V. V., and Shkatulyak N. M. Fractal nature of the brittle fracture surfaces of metal // Materials Science. – 2005. – **41**, № 1. – P. 62 – 66.)
8. Фрактальна розмірність меж зерен і механічні властивості металу кисневих балонів / В. В. Усов, М. Д. Рабкіна, Н. М. Шкатуляк, Т. С. Чернева // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 4. – С. 117–124.  
(Fractal dimension of grain boundaries and mechanical properties of the metal of oxygen cylinders / V. V. Usov, M. D. Rabkina, N. M. Shkatulyak, T. S. Cherneva // Materials Science. – 2015. – **50**, № 4. – P. 612–620.)
9. Texture, microstructure, and fractal features of the low cycle fatigue failure of the metal in pipeline welded joints / V. V. Usov, E. E. Gopkalo, N. M. Shkatulyak, A. P. Gopkalo, T. S. Cherneva // Russian Metallurgy (Metally). – 2015. – № 9. – P. 759–770.
10. Brian Kiinkenbergh. A review of methods used to determine the fractal dimension of linear features // Mathematical Geology. – 1994. – **26**, № 1. – P. 23–46.
11. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
12. Zhou H. W. and Xie H. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock // Surf. Review and Let. – 2003. – **10**, № 5. – P. 751–762.
13. Lucas M. A. Foundations of Measurement Fractal. Theory for the Fracture Mechanics // Appl. Fract. Mech. / Ed. A. Belov. – URL: <http://www.intechopen.com/books/applied-fracture-mechanics>



14. *Milman V. Y., Stelmashenko N. A., and Blumenfeld R.* Fracture surfaces: a critical review of fractal studies and a novel morphological analysis of scanning tunneling microscopy measurements // *Progress in Mat. Sci.* – 1994. – **38**. – P. 425–474.
15. *Кузнецов П. В., Петракова И. В., Шрайбер Ю.* Фрактальная размерность как характеристика усталости поликристаллов металлов // *Физическая мезомеханика*. – 2004. – **7**, спецвып. № 1. – С. 389–392.
16. *Савенков Г. Г., Барахтин Б. К.* Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик материала на растяжение // *Прикл. механика и техн. физика*. – 2011. – **52**, № 6. – С. 177–184.
17. *Carney L. R. and Mecholsky J. J.* Relationship between fracture toughness and fracture surface fractal dimension in AISI 4340 steel // *Mat. Sci. and Appl.* – 2013. – **4**, № 4. – P. 258–267.
18. *Арсенкин А. М.* Оценка неоднородности вязкости конструкционных сталей по измерению строения изломов средствами различной размерности: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 2009.
19. *Кудря А. В., Соколовская Э. А., Арсенкин А. М.* Эффективность применения средств наблюдения различной размерности для анализа морфологии улучшаемых сталей // *Деформация и разрушение материалов*. – 2010. – № 1. – С. 38–44.
20. *Wienciek K., Czarski and A., and Skowronek T.* Fractal characterization of fractured surfaces of a steel containing dispersed Fe<sub>3</sub>C carbide phase // *Mat. Characterization*. – 2001. – **46**, № 2–3. – P. 235–238.
21. *Bouchaud E., Lapasset G., and Planes J.* Fractal dimension of fractured surfaces: a universal value? // *Europhysics Letters*. – 1990. – **13**, № 1. – P. 73–79.
22. *Bouchaud E., Lapasset G., and Planes J.* Statistics of branched fracture surfaces // *Physical Review B*. – 1993. – **48**, № 5. – P. 2917–2928.
23. *Bouchaud E.* Scaling properties of cracks // *J. Physics: Condensed Matter*. – 1997. – **9**, № 21. – P. 4319–4344.
24. *Hansen N. R. and Schreyer H. L.* A thermo dynamically consistent framework for theories of elastoplasticity coupled with damage // *Int. J. Solids Struct.* – 1994. – **31**, № 3. – P. 359–389.
25. *Rashid K., Al-Rub Abu, and Voyiadjis G. Z.* On the coupling of anisotropic damage and plasticity models for ductile materials // *Int. J. Solids and Struct.* – 2003. – **40**, № 11. – P. 2611–2643.
26. *Bobyry M., Khalimon O., and Bondarets O.* Phenomenological damage models of anisotropic structural materials // *J. Mech. Eng. NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”*. – 2013. – № 67. – P. 5–13.
27. *Фреттинг-коррозия*. – URL: <http://www.okorrozii.com/fretting-korrozia.html>
28. *Уотерхауз Р. Б.* Фреттинг-коррозия / Пер. с англ. Е. Хейн, А. Ильин. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
29. *Lemaitre J. and Dufailly J.* Damage measurements // *Eng. Fract. Mech.* – 1987. – **28**, № 516. – P. 643–661.
30. *Practical applicability and limitations of the elastic modulus degradation technique for damage measurements in ductile metals / N. Bonora, A. Ruggiero, D. Gentile, and S. De Meo* // *Strain*. – 2011. – **47**. – P. 241–254.

*Одержано 02.06.2017*