

ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ АРМАТУРНИХ КАНАТІВ ЗАХИСНИХ ОБОЛОНОК АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Л.М. Лобанов¹, В.М. Тороп¹, М.Д. Рабкіна¹, В.А. Костін¹, О.О. Штофель²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 57

Збільшення кількості розривів армоканатів після короткого функціонування може бути пов'язане з умовами їх виготовлення та умовами експлуатації. Мета – встановити основні причини передчасних руйнувань високоміцної арматури на основі елементного та структурно-фазового складу сталі, механічних властивостей дротів, а також – характеру пошкоджених поверхонь та характеристик руйнування. Бібліогр. 18, табл. 6, рис. 8.

Ключові слова: армоканат, атомна електростанція, фрактальний підхід, металографічні дослідження, фактографічні дослідження, механіка руйнування, фретінг-корозія

Арматурний канат (армоканат) – це, як правило, багатодротова високоміцна арматура, виготовлена з високовуглецевої сталі, що дозволяє створювати стискаючі напруження в захисних оболонках атомних електростанцій (АЕС) при їх натягу. Випадки розривів дротів при нетривалому функціонуванні армоканатів, що застосовуються на всіх, без винятку, захисних оболонках АЕС ВВЕР-1000 серії В-320 (рис. 1), можуть бути пов'язані як з результатом виробництва (структура і механічні властивості сталі, геометрія перерізу дроту, характер його скручування тощо), так і з умовами експлуатації (знакозмінні і часто високі напруження; нерівномірне навантаження дротів в пучку армоканатів, зокрема, в місцях вигину каната на блоках або барабані; зношування дротів каната внаслідок їх взаємного тертя в місцях торкання і додаткове зношування зовнішніх дротів каната, що стикаються з поверхнею жолоба блоку і барабана; застосування мастильних матеріалів; наявність абразивного пилю і хімічно-активних середовищ тощо) [1–3].

Численні експериментальні дані показують, що зменшення довговічності канату в першу чергу пов'язане зі зменшенням діаметра блоку (чим менше діаметр робочого блоку, тим інтенсивніше зростає число обривів дротів), а також зі збільшенням напружень [4, 5]. Проте однією з причин руйнування арматурних елементів без докладання будь-яких додаткових навантажень в процесі експлуатації енергоблоків є поява мікротріщин в процесі намотування або монтажу арматурного каната і потім їх розвиток при значних напруженнях, що діють в досить тривалий період [6].

Мета роботи – встановити основні причини передчасних відмов високоміцної арматури, виходя-

чи з якості дротів, а також з характеру пошкоджених поверхонь дротів і особливостей зламу.

Матеріали і методи випробувань. Дослідження проводилося на фрагментах зруйнованих дротів, що вийшли з ладу, після різних термінів експлуатації. Уламки довжиною 300...500 мм і діаметром близько 5 мм були отримані з трьох різних ділянок: з нижньої і верхньої ділянок по відношенню до місця руйнування канату, а також неушкодженої ділянки, умовно названої середньою частиною. Слід зазначити, що на зовнішній поверхні всіх досліджених зразків фрагментів є ознаки різного ступеня корозійних пошкоджень. При тому ці ознаки можуть бути в більшій чи меншій мірі виражені як у верхній, так і в нижній частині дротів.

Визначення хімічного складу металу фрагментів виконано на рентгенівському флуоресцентно-



Рис. 1. Закріплення канату

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Тороп В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8807-9811>, Рабкіна М.Д. – <https://orcid.org/0000-0003-3498-0716>, Костін В.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>, Штофель О.О. – <https://orcid.org/0000-0003-0965-6340>

© Л.М. Лобанов, В.М. Тороп, М.Д. Рабкіна, В.А. Костін, О.О. Штофель, 2021

му спектрометрі СЕР-01 «ElvaxLight» і аналізаторі вуглецю ГОУ-1.

Зразки для металографічних досліджень (мікрошліфи) були виготовлені в поперечному перерізі представлених фрагментів дроту (діаметром близько 5 мм) за стандартною методикою. Для виявлення структури мікрошліфи піддавали хімічному травленню в 4%-му розчині азотної кислоти. Металографічний аналіз здійснювали на мікроскопі НЕОРНОТ-32. Фотографії мікрошліфів до і після травлення отримані за допомогою цифрової фотокамери OLYMPUS. Мікротвердість за Віккерсом ($HV_{0,1}$) вимірювали на твердомірі М-400 фірми LECO.

До оцінки структури у зв'язку з експлуатаційними властивостями конструкційних сталей застосовано фрактальний підхід, суть якого полягає в обробці масштабуванням фрактальної структури і описів розподілу будь-якої структурної характеристики при даному масштабуванні. Геометричним носієм при масштабуванні є сітка з квадратними осередками різного розміру [6–9].

Короточасні випробування на розтяг зразків, вирізаних з отриманих фрагментів (не менш, ніж на 5-ти зразках з партії) проводили при кімнатній температурі на установці Instron 8802 (рис. 2, а) відповідно до [10]. Швидкість деформування становила 10,0 мм/хв.

Фрактографічні дослідження експлуатаційних зламів і зламів після випробувань на розтяг (рис. 2, б) проводили на стереоскопічному оптичному мікроскопі МБС-10 зі спеціальною насадкою та на растровому електронному мікроскопі JSM-840. Перед фрактографічними дослідженнями експлуатаційних зламів їх очищали від експлуатаційних забруднень, в тому числі від мастил та продуктів корозії, в ультразвуковому диспергаторі

рі УЗДН з використанням 2%-го спиртового розчину щавлевої кислоти з інгібітором і наступним промиванням у петролейному ефірі. Однак з огляду на сильну забрудненість пошкодженого каната повністю очистити поверхню зламів від артефактів не завжди вдавалось.

Результати і їх обговорення. Як можна бачити (табл. 1), досліджуваний метал дротів (згідно з табл. 2) належить до вуглецевих сталей: ст. 70 (АК Ц), ст. 80 (АК 1Ц, АК 25Ц, АК 49Ц) і ст. 85 (АК 64Ц). Слід зазначити, що для всіх відібраних проб розсіювання за хімічним складом в залежності від місця вибірки знаходиться в межах допустимих значень.

Звертає на себе увагу підвищений вміст нікелю в металі дротів АК 49Ц в порівнянні зі стандартними значеннями. Однак, як відомо, у комбінації із хромом і молібденом нікель ще більше підвищує здатність сталей до втомної міцності і термічного зміцнення, а також сприяє підвищенню в'язкості, розчиняючись в фериті. Крім того, нікель повинен забезпечити стійкість проти корозії.

Мікроструктура. На полірованій поверхні мікрошліфів поперечного перерізу досліджуваних дротів в цілому спостерігаються світло-сірі круглі вклучення – сульфіди, забрудненість якими не перевищує бал № 2 за [12]. Також зустрічаються поодинокі оксиди і оксисульфіди. В деяких випадках виявлено поодинокі вклучення силікатів. Їх наявність навіть в самій забрудненій частині не перевищує бал №1 відповідно до [12].

Аналіз розподілу мікротвердості в поперечних перерізах дротів показав, що як в ушкоджених, так і в неушкоджених фрагментах приповерхневі шари мають підвищену твердість в порівнянні з центральною частиною (табл. 3).

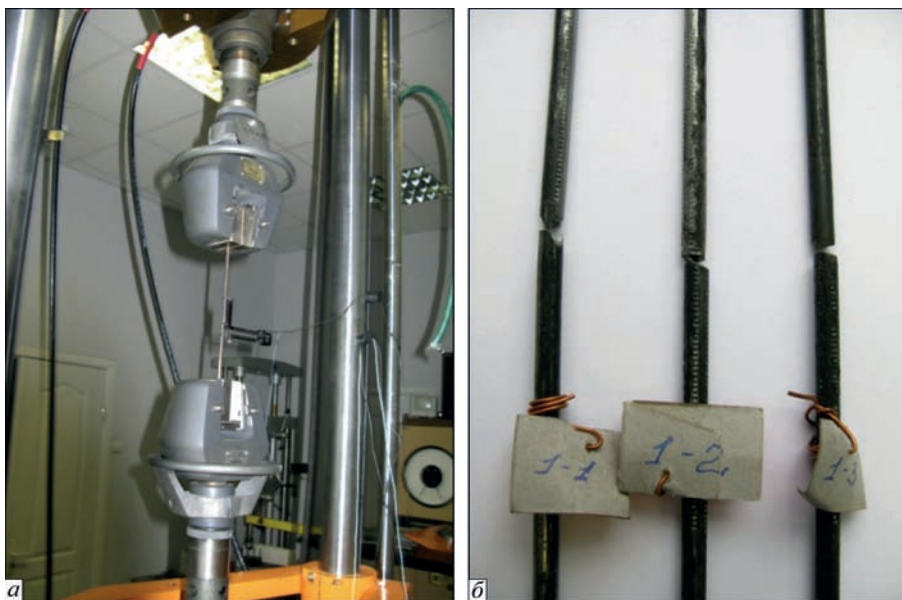


Рис. 2. Установка Instron 8802 для механічних випробувань на розтяг (а) і зразки після випробувань (б)

Таблиця 1. Хімічний склад метала ушкоджених і неушкоджених частин дротів

Проба	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
АК Ц (АК5) ст.70								
Верх	0,680	0,370	0,620	0,240	0,120	0,024	0,015	-
Низ	0,720	0,400	0,800	0,150	<0,100	0,029	0,031	-
Середина	0,780	0,370	0,670	0,300	0,160	0,040	0,020	-
АК 1Ц (АК6) ст. 80								
Низ	0,800	0,196	0,564	0,149	-	0,005	0,010	0,124
Верх	0,830	0,178	0,580	0,115	0,080	0,008	0,015	0,189
Середина	0,800	0,197	0,546	0,059	-	0,003	0,016	0,043
АК 25Ц (АК1) ст. 80								
Верх	0,800	0,310	0,566	0,114	-	0,01	0,015	0,177
Низ	0,805	0,260	0,569	0,144	0,045	0,01	0,014	0,133
Середина	0,800	0,230	0,450	0,153	-	0,01	0,015	0,184
АК 49Ц (АК2) ст. 80								
Верх	0,800	0,323	0,540	0,129	0,680	0,01	0,020	0,080
Низ	0,800	0,234	0,470	0,123	0,680	0,01	0,020	0,093
Середина	0,800	0,326	0,570	0,126	0,700	0,01	0,017	0,138
АК 64Ц (АК3) ст.85								
Верх	0,880	0,303	0,440	0,104	-	0,01	0,015	0,034
Низ	0,840	0,234	0,396	0,106	-	0,01	0,015	0,031
Середина	0,895	0,285	0,412	0,109	-	0,01	0,014	0,047

Таблиця 2. Хімічний склад сталі [11]

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
Ст.70	0,67...0,75	0,17...0,37	0,5...0,8	≤0,25	≤0,25	≤0,035	≤0,035	≤0,2
Ст.80	0,77...0,85	0,17...0,37	0,5...0,8	≤0,25	≤0,25	≤0,035	≤0,035	≤0,2
Ст.85	0,82...0,90	0,17...0,37	0,5...0,8	≤0,25	≤0,25	≤0,035	≤0,035	≤0,2

Що стосується верхньої і нижньої частин дротів відносно розриву, то в цілому вони мають підвищену твердість у порівнянні з неушкодженою (середньою) частиною, що може також свідчити про деяке зміцнення при наклепі, яке призводить в результаті експлуатації до приповерхневого руйнування.

Таким чином, неоднорідність розподілу твердості в дротах може бути наслідком декількох чинників. Це – хімічний склад, початкова термообробка при виготовленні, можливий локальний розігрів в результаті деформацій розтягу чи вигину, саме розтягнення як вид механічного впливу і нерівномірна релаксація напружень в дротах армоканатів.

Слід зазначити, що властивості вуглецевої сталі, зокрема твердість, залежать не тільки від хімічного складу сплаву (перш за все вуглецю), але також і від технології отримання елементів конструкції (зокрема структура) і наступних умов експлуатації. Так, мікроструктура ст. 70 (АК Ц) в основному представлена дрібнодисперсним тонкопластинчастим сорбітом з рідкими вкрапленнями так званих «розеток троостіту» (рис. 3).

Таблиця 3. Дані дюрOMETричного аналізу металу дротів

Місце заміру частини		Мікротвердість ($HV_{0,1}$), кгс/мм ²
дроту	шліфа	
АК Ц ст. 70		
Верх	Центр	421...433
	Край	421...442
Низ	Центр	423...442
	Край	437...442
Середина	Центр	425...433
	Край	421...433
АК 25Ц ст. 80		
Верх	Центр	397...421
	Край	405...417
Низ	Центр	380...409
	Край	376...417
Середина	Центр	376...413
	Край	409...437
АК 64Ц ст. 85		
Верх	Центр	417...421
	Край	409...417
Низ	Центр	405...409
	Край	405...429
Середина	Центр	351...376
	Край	357...421

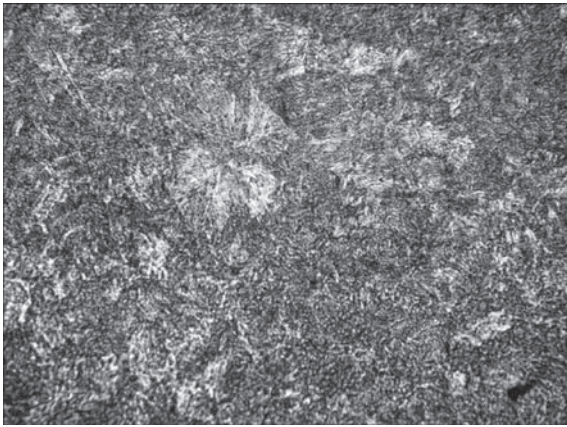


Рис. 3. «Розетка троостіту» в нижній частині дроту АК Ц, ×1000

У той же час мікроструктуру ст. 80 (АК 1Ц, АК Ц25, АК 49) і ст. 85 (АК Ц64) представлено сорбіто-троостітною сумішшю (рис. 4). Твердість сорбіту за Віккерсом зазвичай не перевищує величини близько 300 кгс/мм², троостіту – близько 400 кгс/мм². В результаті виготовлення дроту на останніх етапах під час волочіння відбувається деформація як пластин фериту, так і цементиту. В процесі навантаження перед руйнуванням внаслідок зменшення областей вільного переміщення дислокацій підвищується твердість і, відповідно, міцність такої деформованої структури (верхня і нижня проби).

Таким чином, аналіз хімічного складу дротів показав, що в цілому згідно до [11] всі вони відповідають вуглецевій сталі марок ст. 70, 80 і 85 із змінною, залежно від марки, структурою від дрібнодисперсного сорбіту з «розетками троостіту» до сорбіт-троостітної суміші.

Крім хімічного складу і структури на величину міцності і опір руйнуванню армоканатів впливає нерівномірне навантаження дротів в пучку, про що свідчить різке падіння показників пластичності (відносного подовження і відносного поперечного звуження), а також значний розкид цих характеристик при випробуваннях дротів, відібраних з ушкоджених частин (табл. 5). При цьо-

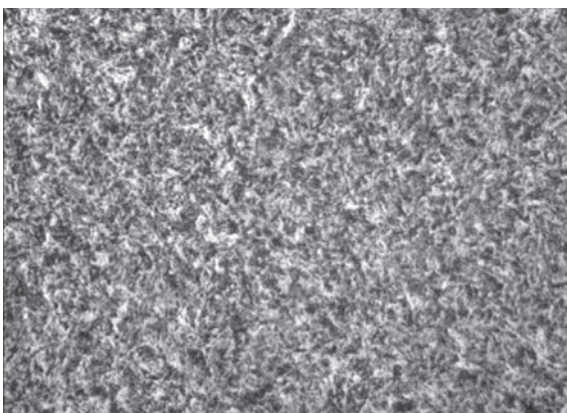


Рис. 4. Сорбіто-троостітна суміш в верхній частині дроту АК Ц25Ц, ×500

му слід зауважити, що товщини усіх розглянутих дротів, крім дротів АК 64Ц, не відповідають стандартному значенню, відрізняючись від нього близько на 1,5 % (табл. 4).

Цей фактор разом з хімічним складом і технологією одержання дроту також може впливати не тільки на показники міцності, а й на опір руйнуванню готового каната. Крім низьких показників пластичності, особливо відносного звуження та тенденції до окрихчення, також показують близькі значення межі міцності (тимчасового опору) і межі текучості на кривій деформування. Значний розкид характеристик пластичності також може побічно свідчити про можливість лавиноподібного руйнування дротів канату при його попередньому навантаженні.

Складається ситуація, коли після досягнення найменшого значення межі текучості для декількох з 456 дротів в канаті зусилля почне розподілятися нерівномірно і навантаження різко зросте на ті дроти, в яких характеристики пластичності низькі, і вони почнуть крихко руйнуватися при вичерпанні пластичного деформування, тим самим передаючи зусилля, що залишилося, на інші, більш пластичні дроти. У зв'язку з цим, доречно, доцільно виконати перевіірочні розрахунки на міцність, які враховують нерівномірний розподіл навантажень на армоканати і дроти в них.

Цікаво відзначити, що дроти різних класів можуть мати практично однакові механічні вла-

Таблиця 4. Геометричні характеристики дротів

Проба	Діаметр, мм	Загальна довжина L, мм	Довжина робочої частини l ₀ , мм	Площа F, мм ²
АК Ц				
Верх	4,93	292,0	190,0	19,08
Низ	4,93	255,0	166,0	19,08
Середина	4,93	298,0	199,5	19,08
АК 1Ц				
Верх	4,93	200,0	100,0	19,08
Низ	4,93	200,0	100,0	19,08
40 м від коуша	4,93	200,0	100,0	19,08
170 м від коуша	4,94	200,0	100,0	19,16
АК 25Ц				
Верх	4,93	211,0	111,0	19,08
Низ	4,84	209,0	109,0	18,40
Середина	4,93	211,0	111,0	19,08
АК 49Ц				
Верх	4,93	210,0	110,0	19,08
Низ	4,93	210,0	110,0	19,08
Середина	4,93	209,5	110,0	19,08
АК64Ц				
Верх	5,01	210,0	111,0	19,70
Низ	5,02	209,0	109,0	19,79
Середина	5,03	209,0	109,0	19,87

стивості (табл. 5). У той же час дрiт зi ст. 80 (АК 25Ц), що займає промiжне значення за змiстом вуглецю, має найвищий тимчасовий опiр i межу плинності в порiвнянні з iншими розглянутими варіантами. Це також корелює зi значеннями твердості (табл. 3), що зайвий раз свiдчить про вплив умов виготовлення та експлуатації.

Що стосується верхньої i нижньої частин дротів (табл. 5), слiд зазначити, що показники мiцності знаходяться в допустимих межах вимог [13, 14]. Однак в характеристиках пластичності має місце значна нестабільність, особливо коли руйнування відбувається по дефекту, що може бути наслідком накопичення при експлуатації пошкоджень в металі поблизу місця розриву. Отримані результати добре узгоджуються з даними фрактального аналізу (табл. 5), який буде розглянуто нижче. Щодо армоканату АК Ц, найменшим запасом пластичності характеризується метал верхньої частини (табл. 5), що також узгоджується з даними пошкоженості ω . В армоканаті АК 1Ц між різними частинами дротів спостерігається більш-менш стабільна картина, що віддзеркалюється на результатах ω . Проте в деяких зразках з верхньої частини розрив почався з тріщини, що розвивалася на зовнішній поверхні дроту. В результаті відносно подовження цього зразка дорівнює нулю, а відносно звуження 2,4 %. Тимчасовий опір i межа плинності дротів армоканату АК 25Ц відповідають стандартним вимогам,

а в разі середньої, незруйнованої частини навіть перевищують ці значення (табл. 5), що може бути обумовлено наявністю хрому (табл. 1), як за рахунок легування твердого розчину, так i за рахунок утворення додаткових фаз. Щодо нижньої частини дроту, високі значення характеристик мiцності супроводжуються різким зниженням характеристик пластичності ($\delta = 1,4\%$ та $\varphi = 2,3\%$), що може вказувати на схильність металу до крихкого руйнування. Механічні характеристики дротів армоканату АК 49Ц незруйнованої частини (табл. 5) відповідають їх виготовленню згідно з [14]. Характеристики мiцності верхньої i нижньої частин АК 49Ц також практично не відрізняються від стандартних значень. Проте характеристики пластичності значно нижчі, особливо в верхній частині дроту, де в деяких зразках розрив починався з дефекту. Як видно з отриманих результатів механічних випробувань, тимчасовий опір дротів армоканату АК 64Ц (середня, незруйнована частина) відповідає їх виготовленню згідно з [14]. Необхідно також підкреслити, що в разі нижньої частини розрив супроводжуються зниженням характеристик пластичності ($\delta = 3,2\%$ та $\varphi = 13,1\%$), що також відображається на значеннях ω .

Фрактальні чинники i пошкоженість. Для опису металу дротів АК методом фрактального аналізу використовували знімки мікроструктури металу та неметалевих включень. Це в певній мірі

Таблиця 5. Механічні властивості i фрактальні характеристики металу дротів

Проба	Тимчасовий Опір σ_b , МПа	Межа текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження φ , %	Фрактальна розмірність		Пошкоженість ω
					структури $D_{ст}$	включень $D_{вк}$	
АК Ц ст. 70							
Верх	1720,8	1684,2	1,0	8,0	-	1,005	0,07
Низ	1704,0	1483,5	2,1	12,7	1,973	0,961	0,36
Середина	1767,7	1583,1	5,0	37,7	-	0,922	0,58
АК 1Ц ст.80							
Верх *	1758,8	1540,0	4,2	40,6	1,921	0,927	0,54
Низ	1699,6	1543,7	3,5	25,2	1,951	0,932	0,51
Середина	1762,1	1543,7	4,6	46,6	1,926	0,925	0,56
АК 25Ц ст. 80							
Верх	1771,3	1639,0	4,0	29,3	1,746	0,897	0,53
Низ	1812,4	1670,9	1,4	2,3	1,828	1,036	0,20
Середина	1818,6	1634,8	5,0	37,6	1,790	1,127	0,57
АК 49Ц ст. 80							
Верх *	1664,4	1469,0	1,1	10,8	1,957	0,998	0,13
Низ	1741,6	1530,4	2,2	15,7	1,932	0,951	0,38
Середина	1806,0	1586,2	5,2	37,2	1,901	0,920	0,58
АК 64Ц ст. 85							
Верх	1785,0	1544,4	4,2	34,2	1,913	0,927	0,54
Низ	1695,1	1370,2	3,2	13,1	1,948	0,936	0,49
Середина	1754,3	1456,9	6,3	46,8	1,923	0,909	0,63

дає можливість описати зв'язки механічних характеристик із фрактальною розмірністю D і пошкодженістю ω (табл. 5).

Фрактальну розмірність двовимірних зображень визначали методом осередків (box method) [8]. Для встановлення фрактальної розмірності меж зерен на обрану криву накладали елементарні сітки, які склалися з квадратів зі сторонами розміром l_i . При цьому підраховували кількість квадратів $N(l_i)$, які перетинає крива. Далі змінювали масштаб сітки, а отже, і сторін квадрата $l_2 > l_3 > \dots > l_n$. Масштаб сітки такий: (4×4) ; (2×2) ; (1×1) ; $(0,5 \times 0,5)$; $(0,25 \times 0,25)$ см. Щоразу обчислювали кількість квадратів $N(l_2)$, $N(l_3)$, ..., $N(l_n)$, які перетинає крива, і результати вносили в таблицю. Виявили, що кількість квадратів $N(l_i)$ залежить від розміру їх сторони l_i :

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

де D – фрактальна розмірність [9].

У подвійних логарифмічних координатах будували графіки $\lg N(l_i) - f(\lg l_i)$. Тангенс кута нахилу графіка до осі $\lg l_i$ дорівнював фрактальній розмірності D [6–9]. Похибка визначення не перевищує 5 %.

Пошкодженість матеріалу ω визначалась через зміну макромеханічного параметра жорсткості матеріалу, а саме через зміну модуля пружності згідно з (2). При аналізі пошкодження дротів був використаний симетричний тензор пошкодження другого порядку ω [15]:

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

де E_0 і E – модуль пружності неушкодженого матеріалу і поточний модуль, який визначається з випробувань на одновісний розтяг, відповідно.

Як впливає із аналізу табл. 5, найменші показники пластичності (δ і φ) відповідають найменшим значенням пошкодження ω .

Раніше було встановлено залежність характеру руйнування від показника ω і фрактальної розмірності структури D_{cr} , не беручи до уваги окремих вплив неметалевих включень [6].

Зі збільшенням деформації збільшується частка дислокацій, пор, мікротріщин, які в міру розвитку деформації об'єднуються, ростуть і призводять до збільшення пошкодженості [16, 17]. Пошкодженість з мікроскопічної точки зору – це сума всіх дефектів кристалічної будови. І в кінці настає момент, коли сума пошкоджень перевищує деяке критичне значення, що і призводить до руйнування. Якщо інтерпретувати пошкодженість як відношення площі перетину, зайнятої мікропорами і мікротріщинами, до номінальної площі перетину зразка, то пошкодженість при крихкому руйнуванні відповідає дефектам, створеним без макроскопічних пластичних деформацій. Саме

при крихкому руйнуванні (в порівнянні з в'язким) меншому значенню ω відповідає більша величина фрактальної розмірності і менша пластичність.

Таким чином, в досліджених експлуатаційних зламах канатів, задіяних в захисних оболонках реакторної установки ВВР-1000, виявлено певний зв'язок між особливостями руйнування, пов'язаними з пошкодженням, і показниками фрактальної розмірностей, а саме: більш крихкому руйнуванню відповідає вище значення фрактальної розмірності з меншим показником пошкодженості матеріалу. При цьому виявлено лінійну залежність відносного подовження від пошкодженості. Отримано експериментальні результати щодо взаємно однозначної відповідності між якісними характеристиками досліджуваного металу і фрактальною розмірністю його мікроструктури та включень. Так, для оцінки експлуатаційних пошкоджень в армоканатах АЕС було застосовано підхід мультифрактальної параметризації, головною перевагою якого було підтвердження існування взаємно однозначної відповідності між фрактальною розмірністю мікроструктури металу та його кількісними характеристиками.

Виявлено залежність фрактальної розмірності і середніх значень механічних властивостей (границі міцності σ_g і плинності $\sigma_{0,2}$), а також зв'язок між характером руйнування досліджених дротів залежно від пошкодженості металу і фрактальною розмірністю: крихкіший злам характеризується нижчим значенням фрактальної розмірності. Отже, досліджено, що фрактальна розмірність змінюється в залежності від неметалевих включень. Можна припустити, що концентрація включень саме і провокує місце руйнування.

Фрактографічні дослідження. Для подальших досліджень були відібрані злами, взяті безпосередньо з місця руйнування (рис. 5), а також зразків, зруйнованих в результаті випробувань на розтяг (рис. 6–8).

В цілому картину поверхонь експлуатаційних руйнувань дротів доцільно розглянути з точки зору хімічно-активних середовищ у загальному процесі розвитку корозійної тріщини зі слідами втоми (рис. 5). Розрізняють інкубаційний період (до появи зародкової тріщини) і періоди розвитку тріщини і крихкого руйнування при перевищенні локальної міцності матеріалу. Інкубаційний період визначається створенням умов для різкої локалізації корозійного процесу на дефектах поверхні напруженого металу. Він, як правило, скорочується зі зростанням діючих напружень, температури, концентрації активних компонентів середовища. При цьому виявляється, що швидкість розвитку тріщини залежить від того, в якому середовищі була отримана початкова тріщина. У тому випадку, коли

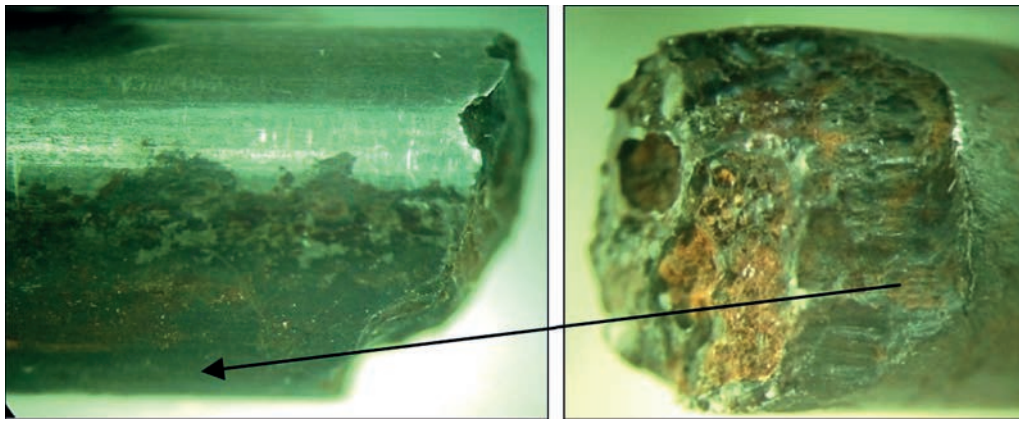


Рис. 5. Поверхня зламів дротів експлуатаційного руйнування з нижньої частини АК ЦЦ

при подальшому розвитку внаслідок змін умов навантаження змінюється характер руйнування (міжзеренний на внутрішньозеренний або навпаки), швидкість росту тріщини змінюється.

Таким чином, поверхня експлуатаційного руйнування являє собою магістральну тріщину, що утворилось з декількох джерел, які зливаються на поверхні, охоплюючи весь поперечний переріз дроту, чи то численні дрібні ямкові поглиблення, чи то ямкові поглиблення, що чергуються з фасетками відколу, які покриті плівкою розтрісканих не розчинених продуктів корозії.

Загальну картину поверхні руйнування дротів після випробувань на розтяг в цілому можна представити у вигляді наступних типових зон, які добре узгоджується з уявленнями, що зазначено в роботі [18]: 1 – волокниста зона (зона стабільного росту тріщини), що утворюється за механізмом злиття мікропор. В основному ця зона доводиться на центр руйнування і представляє переважно в'язкий ямковий злам (рис. 6, а); 2 – радіальна зона (зона нестабільного росту тріщини), що складається з характерних радіально розташованих в напрямку руйнування «рубців»; 3 – зона, що примикає до зовнішнього периметру поперечного перерізу дроту (зона зрізу), розташовується приблизно під кутом 45° по відношенню до загальної поверхні руйнування, тоді як поверхні волокнистої і радіальної зон зазвичай перпендикулярні осі розтягнення. Так, в частині дроту АК Ц, що перебувала поза зоною експлуатаційного руйнування (рис. 6, а), спостерігаються приблизно рівнознач-

ні наступні три зони: центральна зона зародження тріщини з в'язким ямковим зламом; зона, де має місце нестабільне зростання тріщини з вторинними тріщинами і радіальними «хребтами»; зона з в'язким завершенням руйнування.

Для нижньої (рис. 6, б) і особливо для верхньої частини (рис. 6, в) щодо розриву дроту характерне зміщення осередку руйнування на поверхневий дефект. Поверхню руйнування займає в основному крихка складова зона з великими радіальними «хребтами». Численні вторинні тріщини в крихкій матриці (рис 7, а) і сам характер її руйнування свідчить про наявність крихких фаз, що відносяться найімовірніше до троостітної структури. Крім того, на поверхні зламу спостерігаються значні плівкові виділення, що швидше за все належать до з'єднань кальцію (рис. 7, б, табл. 6). Можливо, їх наявність пов'язана з умовами експлуатації і не є результатом виготовлення дроту, оскільки їх присутність виявлено тільки в нижній частині зразка. Також на поверхні зламу має місце дуже багато сірки (0,39...0,5 %), тоді як у дослідних сталей (табл. 2) її повинно бути $\leq 0,035$ %. Ймовірно виділення сірки по границях зерен сприяло їх окрихченню з подальшим руйнуванням.

У зв'язку з підвищенням ресурсу конструкцій і рівня напружень останнім часом зростає ймовірність появи фреттінг-корозії. Так, поверхня дроту, що пошкоджена контактним вищербленням, покрита виразками приблизно однакової глибини, які взаємно перекриваються (рис. 8). При цьому

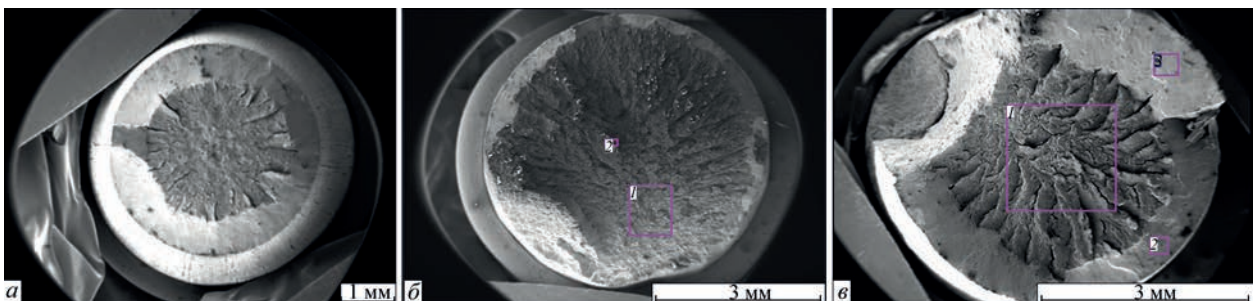


Рис. 6. Загальний вид поверхні руйнування в дротах АК Ц: а – середина, б – низ, в – верх

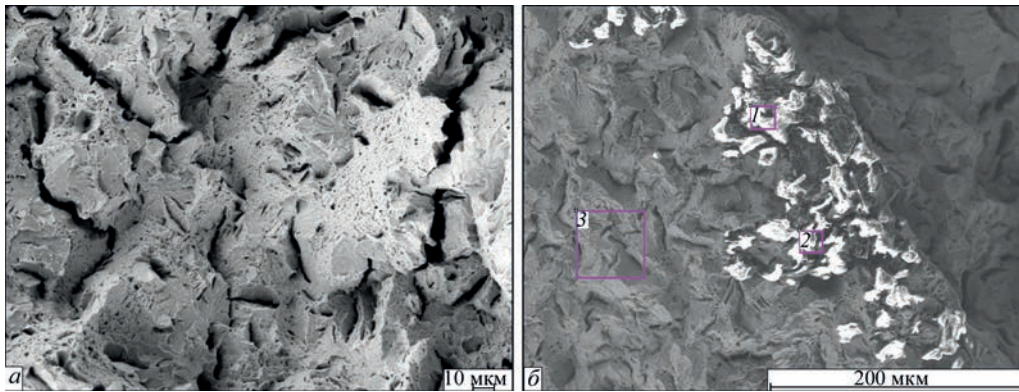


Рис. 7. Чисельні вторинні тріщини у крихкій матриці (а) і неметалеві плівкові включення (б) на нижній частині зламу АК Ц (див. рис.6, б)

Таблиця 6. Хімічний склад плівкових включень на поверхні зламу, атомні %

Спектр	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe
1	72,70	22,52	0,31	0,27	0,20	0,69	0,50	0,08	0,15	0,38	0,15	2,07
2	76,92	20,30	0,21	0,29	0,09	0,44	0,39	0,18	0,14	0,35	0,05	0,65
3	0,00	12,50	0,00	0,00	0,11	0,28	0,10	0,08	0,00	0,00	0,78	86,15

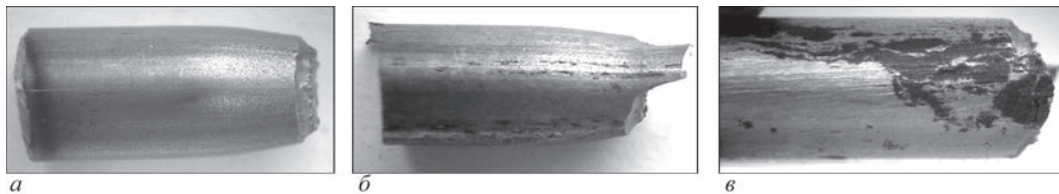


Рис. 8. Зовнішня поверхня дротів армоканату АК 49Ц після випробувань на короткочасне розтягування: а – на відстані 170 м від коушу; б – на відстані 40 м від коушу; в – з нижньої (щодо розриву) частини

руйнування має багатоосередковий характер, в області джерела спостерігаються рубці, які утворилися при злитті декількох тріщин. На поверхні зламу мають місце тріщини, паралельні магистральній. У початковій зоні зламу виявляються продукти фреттінгу.

У той час, як із зовнішнього боку дроту, що знаходиться далеко від розриву, спостерігається абсолютно гладка поверхня (рис. 8, а), у міру наближення до місця розриву зовнішня поверхня характеризується наявністю окремих подряпин (рис. 8, б). А поблизу руйнування чітко видно результат поверхневого контактного викришування (рис 8, в), яке утворюється на поверхні металевих деталей при багаторазовому додаванні контактних навантажень і відносному коливальному русі, що виявляється в слідах втоми (рис. 5 і 8, в). При цьому руйнування починається з поверхневих дефектів, які є результатом фреттінг-корозії. У свою чергу, утворення фреттінг-корозійних тріщин обумовлене виразковою та структурно-вибірчою корозією.

Так, в армоканаті АК 49Ц фреттінг-корозійні руйнування як у верхній, так і в нижній частині поверхні в основному мають в'язкий ямковий злам з численними «віспинами». Місцями ділянки поверхні зламу нагадують розтріскану плівку на поверхні фасеток. У той же час в нижній частині

дротів каната, крім посипаних більшими, порівняно з верхньою частиною, ямками, спостерігається також крихка складова, що нагадує, як і в попередньому випадку, розтріскану плівку на поверхні руйнування. У середній частині дротів, як і в випадку АК 1Ц, слідів фреттінг-корозійного пошкодження практично не виявлено.

Висновки

1. Аналіз хімічного складу розглянутих дротів свідчить про їх відповідність до наступних марок: ст. 70, ст. 80 і ст. 85 [11], з гетерогенною структурою – сорбіту та троостіту. Дріт із структурою сорбіту має надзвичайно високий запас пластичності і зміцнюється до дуже високих значень тимчасового опору і межі плинності. Зі збільшенням ступеня деформації при волочінні дроту зі структурою сорбіту відбувається деформація як пластинок фериту, так і цементиту. У той же час наявність троостіту в металі свідчить про істотне зменшення характеристик пластичності та схильність до крихкого руйнування.

2. Опір руйнуванню армоканатів, крім хімічного і структурно-фазового складу сталі, залежить від товщини дротів, і, перш за все, від умов експлуатації. Одна з причин руйнування арматурних канатів без докладання будь-яких додаткових навантажень при експлуатації енергоблоків обумов-

лена появою мікротріщин в процесі намотування або монтажу арматурного каната, і потім розвиток їх при значних напруженнях, що діють в довший протяжний період. Численні сліди корозії на зовнішній поверхні досліджуваних фрагментів свідчать про джерела зародження фреттінг-корозійних тріщин. Тріщини, що зародилися з декількох джерел, на поверхні зливаються в магістральну, охоплюючи весь поперечний переріз дроту.

3. Умови виготовлення, монтажу і експлуатації дротів армоканатів істотно впливають на їх ресурс, так як при цьому для окремих дротів попереднє навантаження і релаксація напружень можуть привести до їх пластичної течії, окрихнення або руйнування, що в свою чергу приводить до нерівномірного навантаження дротів в армоканаті.

4. Виявлено залежність фрактальної розмірності і середніх значень механічних властивостей, а також зв'язок між характером руйнування досліджених дротів залежно від пошкодженості металу і фрактальною розмірністю – крихкіший злам характеризується нижчим значенням фрактальної розмірності.

5. Характер руйнування дротів в процесі експлуатації і в результаті механічних лабораторних випробувань істотно відрізняється. Так, в процесі експлуатації руйнування, як правило, починається з дефектів зовнішньої поверхні, тоді як під час випробувань руйнування починається з центральної частини поперечного перерізу або з явних концентраторів на поверхні. При зіставленні цих зламів і поверхонь руйнування в процесі експлуатації стає очевидним, що руйнування внаслідок короткочасних випробувань має зовсім інший характер у порівнянні з руйнуванням, що виникло в результаті фреттінг-корозії під напруженням. Наявність фреттінг-корозійних пошкоджень на зовнішній поверхні дротів в поєднанні з низькими значеннями показників пластичності досліджених зразків з цих ділянок дозволяють припустити, що руйнування армоканатів відбувається внаслідок нерівномірного навантаження та обриву окремих дротів, що може привести до лавиноподібного руйнування армоканату.

Список літератури

1. (1989) *Инструкция по техническому обслуживанию системы преднапряжения защитных оболочек головной серии и модернизированной конструкции для АЭС с энергоблоками ВВЭР-1000 типов 302, 338 и 187*. Москва.
2. Рапина К.А. (2013) Конструкции защитных железобетонных оболочек ядерных установок. *Будівельні конструкції*, 78(1), 84–91.
3. Савицкий Н.В., Швец В.Б., Седин В.Л. и др. (2012) Система обеспечения надежности строительных конструкций АЭС и ТЭС Украины. *Строительство, материаловедение, машиностроение*, 65, 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-neo.org/nsd/docs/2015/cnsi-r2015-5.pdf>
6. Тороп В.М., Рабкина М.Д., Штофель О.О., Усов В.В., Шкатуляк Н.М., Савчук О.С. (2018) Про причини руйнування арматурних канатів захисних оболонок атомних енергоблоків АЕС. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 2, *Physicochemical Mechanics of Materials*, 54(2), 98–106.
7. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксагоев А.А. (1994) *Синергетика и фракталы в материаловедении*, Москва, Наука.
8. Усов В.В., Рабкина М.Д., Шкатуляк Н.М., Чернева Т.С. (2014) Фрактальна розмірність границь зерен і механічні властивості металу кисневих балонів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 4, 117–124.
9. Dubuc, V., Roques-Carnes, C., Tricot, C., Zucker S.W. (1989) Evaluating the fractal dimension of profiles. *Phys. Rev. A*, 39(2), 1500–1512.
10. (1984) ГОСТ 1497-84 *Металлы. Методы випробувань на розтягування* (ISO 6892-84, СТ СЭВ 471-88).
11. (1979) ГОСТ 14959-79 *Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия. С изменениями № 1, 2, 3, 4, 5, 6*.
12. (1970) ГОСТ 1778-70 *Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений* (ИСО 4967-79).
13. (1981) ГОСТ 7348-81 (СТ СЭВ 5728-86) *Дрит з вуглецевої сталі для армування заздалегідь напружених залізобетонних конструкцій. Технічні умови*.
14. (1995) ТУ У 00191046.014-95 *Проволока круглая диаметром 5,0 мм из углеродистой стали для армирования предварительно напряженных защитных оболочек АЭС*.
15. Hansen, N.R., H.L. Schreyer, A. (1994) Thermodynamically Consistent Framework for Theories of Elastoplasticity Coupled with Damage. *Int. J. Solids Struct.*, 31(3), 359–389.
16. Lemaitre, J., Dufailly, J. (1987) Damage measurements. *Engineering Fracture Mechanics*, 28(516), 643–661.
17. Bonora, N., Ruggiero, A., Gentile, D., De Meo, S. (2011) Practical Applicability and Limitations of the Elastic Modulus Degradation Technique for Damage Measurements in Ductile Metals. *Strain*, 47, 241–254.
18. (1982) *Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник*. Москва, Металлургия, 36–38.

References

1. (1989) *Instructions on maintenance of containment prestressing system of the main series and upgraded design for NPP with power units WWER-1000 of 302, 338 and 187 types*. Moscow [in Russian].
2. Rapina, K.A. (2013) Designs of reinforced concrete shields of reactor units. *Budivelni Konstruktsii*, 78(1), 84–91 [in Russian].
3. Savitsky, N.V., Shvets, V.B., Sedin, V.L. et al. (2012) System of ensuring the safety of building structures of Ukrainian NPP and TPP. *Stroitelstvo, Materialovedenie, Mashinostroyeniye*, 65, 531–540 [in Russian].
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-neo.org/nsd/docs/2015/cnsi-r2015-5.pdf>
6. Torop, V.M., Rabkina, M.D., Shtofel, O.O. et al. (2018) On the causes for fracture of reinforcement ropes of containment of NPP nuclear power units. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 54(2), 98–106 [in Ukrainian].
7. Ivanova, V.S., Balankin, A.S., Bunin, I.Zh., Oksagoev, A.A. (1994) *Synergy and fractals in materials science*. Moscow, Nauka [in Russian].
8. Usov, V.V., Rabkina, M.D., Shkatulyak, N.M., Cherneva, T.S. (2014) Fractal dimension of grain boundaries and mechanical properties of oxygen cylinder metal. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 4, 117–124 [in Ukrainian].

9. Dubuc, B., Roques-Carmes, C., Tricot, C., Zucker, S.W. (1989) Evaluating the fractal dimension of profiles. *Phys. Rev. A.*, **39**(2), 1500–1512.
10. (1984) GOST 1497-84: *Metals. Methods of tension test* (ISO 6892-84, CT SMEA 471-88) [in Ukrainian].
11. (1979) GOST 14959-79: *Spring carbon and alloy steel bars. Specifications. Modifications Nos. 1, 2, 3, 4, 5, 6* [in Russian].
12. (1970) GOST 1778-70: *Steel. Metallographic methods for the determination of nonmetallic inclusions* (ISO 4967-79) [in Russian].
13. (1981) GOST 7348-81: *Carbon steel wire for reinforcement of prestressed concrete constructions. Specifications.* (CT SMEA 5728-86) [in Ukrainian].
14. (1995) TU U 00191046.014-95: *5.0 mm diameter round wire from carbon steel for reinforcement of prestressed containment vessels of NPP* [in Russian].
15. Hansen, N.R., Schreyer, A. (1994) Thermodynamically consistent framework for theories of elastoplasticity coupled with damage. *Int. J. Solids Struct.*, **31**(3), 359–389.
16. Lemaitre, J., Dufailly, J. (1987) Damage measurements. *Engineering Fracture Mechanics*, **28**(516), 643–661.
17. Bonora, N., Ruggiero, A., Gentile, D., De Meo, S. (2011) Practical applicability and limitations of the elastic modulus degradation technique for damage measurements in ductile metals. *Strain*, **47**, 241–254.
18. (1982) *Fractography and atlas of fractograms: Refer. book.* Moscow, Metallurgiya, 36–38 [in Russian].

FEATURES OF THE DESTRUCTION OF REINFORCING ROPES IN NUCLEAR POWER PLANT CONTAINMENT

L.M. Lobanov¹, V.M. Torop¹, M.D. Rabkina¹, V.A. Kostin¹, O.O. Shtofel²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: kvas69@ukr.net

The increased number of ruptures in reinforcing ropes after short-time functioning may be associated with their manufacturing and operating conditions. The objective is to establish the main causes of premature breakage of high-strength reinforcement bars, based on the elemental and structural-phase composition of steel, mechanical properties of the wires, as well as the nature of the damaged surfaces and fracture characteristics. 18 Ref., 6 Tabl., 8 Fig.

Keywords: reinforcing rope, nuclear power plant, fractal approach, metallographic investigations, fractographic investigations, fracture mechanics, fretting-corrosion

Надійшла до редакції 26.04.2021

НОВА КНИГА

Недосека А.Я., Недосека С.А. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: Издательство «ИНДПРОМ», 2020. – 886 с, 406 рис., 35 табл. – Библиогр.: 18 назв.

Изложены основные проблемы, связанные с обеспечением безопасности эксплуатации конструкций и сооружений, возникающие при расчете их прочности, при испытаниях и в процессе эксплуатации. Большое внимание уделено теории, методам и средствам диагностики и оценки состояния материала конструкций, его остаточному ресурсу. Изложены основные вопросы теории прогнозирования и принятия решений при оценке состояния конструкций. Освещены современные методы расчета и измерения температурных полей, напряжений и деформаций, показаны способы борьбы с вредными последствиями сварочных напряжений и деформаций, рассмотрены основы классической и квантовой механики разрушения.

Предназначена для студентов, аспирантов и преподавателей машиностроительных специальностей вузов, для специалистов, проходящих переподготовку на курсах повышения квалификации по направлению «Техническая диагностика», а также для инженеров предприятий и организаций, занимающихся контролем и диагностикой конструкций.

- Глава 1. Температурное поле при сварке
- Глава 2. Сварочные напряжения и деформации
- Глава 3. Несущая способность сварных конструкций
- Глава 4. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных конструкций
- Глава 5. Акустическая эмиссия
- Глава 6. Дополнительные разделы
- Приложения

Замовлення на книгу прохання надсидати до редакції журналу.

Тел.: (044) 200-82-77, E-mail: journal@paton.kiev.ua

