

МЕТОДИКА ОЦІНКИ РЕСУРСУ УЩІЛЬНЮВАЧІВ І ГЕРМЕТИКІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

© 2011 р. Т. І. Матченко¹, Л. Б. Шаміс¹, П. Т. Матченко², Л. Ф. Первушова¹

¹ПАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект», Київ

²ЗАТ «Науково-технічний центр «Ресурс», Київ

Розроблено методику оцінки довговічності й залишкового ресурсу герметиків та ущільнювачів деформаційних швів будівельних конструкцій, що враховує вплив основних факторів на швидкість старіння.

Ключові слова: ресурс, ущільнювач, герметик, довговічність.

Вступ

Ресурс або довговічність будівельних конструкцій визначається здатністю всіх елементів виконувати свої функції в межах допустимих відхилень від проектних значень. У тих випадках, коли головною функцією конструкції є її щільність, волого- і газонепроникність, ресурс конструкції визначається ресурсом усіх елементів, включаючи й ущільнювачі.

Основний зміст

У деформаційних швах огорожувальних конструкцій повинні бути передбачені [1] компенсатори (ущільнювачі) з оцинкованої неіржавіючої або гумованої сталі, поліізобутилену або інших матеріалів та установка їх на хімічно стійкій мастиці зі щільним закріпленням. Конструкція деформаційних швів повинна виключати можливість проникнення крізь нього агресивного середовища. Герметизація стиків і швів огорожувальних конструкцій повинна бути передбачена шляхом заповнення зазорів герметиками. При хімічній агресивності ґрунтових або поверхневих вод підземна частина та її фундаменти повинні мати антикорозійний захист, який проектується у відповідності з вказівками [1] і виконується при перевищенні наступних норм агресивності "вода - середовище":

при лужній агресії – місткість бікарбонату більше 1,5 мг-екв/л при вільному омиванні бетону водою;

при загально кислотній агресії – водневий показник $pH < 5,5$;

при вуглекислій агресії – місткість вільної вуглекислоти більше 50 мг/л і $pH < 5,5$;

при магнезійній агресії – місткість іонів магнію більше 1000 мг/л;

при сульфатній агресії – місткість іонів сульфатів більше 300 мг/л при місткості іонів хлоридів більше 1000 мг/л;

при електрохімічній агресії – напруження блукаючих токів вище 3 В.

Зони впливу зовнішнього середовища можна визначити таким чином:

зона 1 – горизонтальні поверхні споруд, що знаходяться під впливом сонячного опромінення та атмосферних опадів;

зона 2 – горизонтальні поверхні споруд під козирком;

зона 3 – вертикальні зовнішні поверхні споруд, що знаходяться під впливом сонячного опромінення і атмосферних опадів;

зона 4 – вертикальні зовнішні поверхні споруд, що знаходяться в тіні під впливом атмосферних опадів;

зона 5 – поверхні, що знаходяться в приміщенні;

зона 6 – поверхні над землею в зоні дії капілярної вологи;

зона 7 – поверхні під землею в зоні промерзання;

зона 8 – поверхні під землею нижче зони промерзання але вище зони дії капілярної вологи підземних вод;

зона 9 – поверхні під землею в зоні дії капілярних вод;

- зона 10 – поверхні під землею в зоні коливання ґрунтових вод;
- зона 11 – поверхні під землею завжди нижче рівня ґрунтових вод;
- зона 12 – поверхні під високим гідростатичним тиском.

Для поверхонь, відкритих сонячному опроміненню, радіаційний баланс поверхні ущільнювача повинен перевищувати R , Вт/м², який визначається залежністю $R = f(Q_c)$, де Q_c – середньомісячна сумарна радіація, що визначається за кліматичним довідником, Вт/м². У першому наближенні

$$R_E = 0,61 \cdot Q_c - 20. \quad (1)$$

Радіаційна стійкість ущільнювача E_R за τ місяців експлуатації повинна перевищувати величину

$$E_R = R_E \cdot \tau, \text{ Вт} \cdot \text{міс}/\text{м}^2. \quad (2)$$

Морозостійкість ущільнювача M_p на поверхнях, відкритих для промерзання (зони 1 - 4, 6, 7) за період експлуатації τ років повинна перевищувати величину

$$M_p = n \cdot \tau, \quad (3)$$

де n – кількість замерзань до температури мінус 10 °С і нижче строком більше одного тижня за один рік для відповідної кліматичної зони.

У відповідності з [1] для ущільнювачів доцільно застосувати індекс, який характеризує його стійкість:

а – ущільнювачі, стійкі на відкритому повітрі; **ан** – те саме під навісом; **п** – те саме в приміщенні; **х, тр** – хімічно стійкі й тріщиностійкі; **х** – хімічно стійкі; **т** – термостійкі; **м** – маслостійкі; **в** – водостійкі; **хк** – кислотостійкі; **хщ** – лужностійкі; **б** – бензостійкі.

Відповідно до індексу стійкості ущільнювача, герметика або мастики необхідно визначити довговічність і швидкість деградації у відповідних та протилежних умовах експлуатації.

У тих випадках, коли до складу ущільнювача входять полімери або еластомери (каучук, латекс тощо), не захищені від сонячного опромінення або дії агресивного середовища, то їхній ресурс, як правило, значно менший за ресурс скла, бетону, сталі.

Таким чином, для визначення ресурсу конструкцій, які повинні забезпечувати непроникність [1–3], необхідні методики попередньої оцінки довговічності ущільнювачів.

Критичні значення параметрів, що характеризують працездатність ущільнювачів на весь період експлуатації, наведено в табл. 1 для відкритих горизонтальних поверхонь, у табл. 2 – для вертикальних поверхонь на повітрі, у табл. 3 – для поверхонь конструкцій у ґрунті.

Таблиця 1

Характеристики для визначення ресурсу для зон 1, 2	Проектний ресурс, рік					
	0–5	5–25	25–50	50–75	75–100	100–150
	Механічні характеристики повинні перевищувати значення					
Водонепроникність при напорі, м	0,8	1	2	5	10	25
K_v – водостійкість, долі	0,5	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
K_a – водостійкість по адгезії, долі	0,6	0,8	0,8	0,8	0,9	0,95
Водопоглинання, % маси, не більше	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	2,0
Набухання об'єму, %, не більше	1,75	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5
Теплостійкість, +°С	+70	+70	+70	+70	+70	+70
Температура крихкості, -°С	-50	-50	-50	-50	-50	-50
Тріщиностійкість [a_{cr}]:						
у моноліті, мм	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
у збірних конструкціях	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0

Продовження табл. 1

Характеристики для визначення ресурсу для зон 1, 2	Проектний ресурс, рік					
	0–5	5–25	25–50	50–75	75–100	100–150
	Механічні характеристики повинні перевищувати значення					
Розтягненість $[\epsilon]$, %	100	150	150	200	200	250
Межа міцності R_p , МПа, при розтягненні	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Межа міцності R_t , МПа, при стисканні	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
R_E – стійкість до сонячного опромінення, Вт·міс/м ² (тільки для зони 1)	30	50	70	90	120	180
M_p – морозостійкість, цикл	50	250	500	750	1000	1500
Сульфатостійкість, мг/л	3000	4000	5000	6000	7000	8000
Кислотостійкість, рН	12	10	8	6	4	2
Лужностійкість, рН	2	4	6	8	10	12
Стійкість до агресивних газів за групами концентрації [1]	A	B	C	C	D	D

Таблиця 2

Характеристики для визначення ресурсу для зон 3, 4, 6	Проектний ресурс, рік					
	0–5	5–25	25–50	50–75	75–100	100–150
	Механічні характеристики повинні перевищувати значення					
Водонепроникність при напорі, м	5,0	7,5	10	15	20	25
K_b – водостійкість, долі	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
K_a – водостійкість по адгезії, долі	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
Водопоглинання, % маси, не більше	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0
Набухання об'єму, %, не більше	1,5	1,25	1,0	0,9	0,8	0,7
Теплостійкість, +°C	+60	+60	+60	+60	+60	+60
Температура крихкості, -°C	-40	-40	-40	-40	-40	-40
Тріщиностійкість $[a_{cre}]$: у моноліті, мм	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
у збірних конструкціях	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Розтягненість $[\epsilon]$, %	50	75	100	125	150	200
Межа міцності R_p , МПа, при розтягненні	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
Межа міцності R_t , МПа, при стисканні	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,5
R_E – стійкість до сонячного опромінення, Вт·міс/м ² (тільки для зон 3, 6)	30	50	70	90	120	180
M_p – морозостійкість, цикл	50	250	500	750	1000	1500
Сульфатостійкість, мг/л	3000	4000	5000	6000	7000	8000
Кислотостійкість, рН	12	10	8	6	4	2
Лужностійкість, рН	2	4	6	8	10	12
Стійкість до агресивних газів за групами концентрації [1]	A	B	C	C	D	D

Таблиця 3

Характеристики для визначення ресурсу для зон 7 – 11	Проектний ресурс, рік					
	0–5	5–25	25–50	50–75	75–100	100–150
	Механічні характеристики повинні перевищувати значення					
Водонепроникність при напорі, м	25	30	35	40	50	70
K_b – водостійкість, не менше	0,6	0,7	0,75	0,8	0,9	0,95
K_a – водостійкість по адгезії, не менше	0,7	0,75	0,8	0,9	0,95	0,97
Водопоглинання, % маси, не більше	6,0	5,0	4,0	3,0	2,5	2,0
Набухання, % об'єму	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

Продовження табл. 3

Характеристики для визначення ресурсу для зон 7 – 11	Проектний ресурс, рік					
	0–5	5–25	25–50	50–75	75–100	100–150
	Механічні характеристики повинні перевищувати значення					
Теплостійкість, +°C	+40	+40	+40	+40	+40	+40
Температура крихкості, -°C	-5	-5	-5	-5	-10	-15
Тріщиностійкість [a_{cre}]:						
у моноліті, мм	0,25	0,2	0,15	0,1	0,1	0,1
у збірних конструкціях	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4
Розтягненість [ε], %	35	40	45	50	60	70
Межа міцності R, МПа, при розтягненні	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,8
Межа міцності R, МПа, при стисканні	0,6	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5
M_p – морозостійкість, цикл (тільки для зони 7)	50	250	500	750	1000	1500
Сульфатостійкість, мг/л	10000	20000	40000	50000	60000	70000
Кислотостійкість, рН	12	10	8	6	4	2
Лужностійкість, рН	2	4	6	8	10	12
Стійкість до агресивних газів за групами концентрації [1]	A	B	C	C	D	D
Стійкість до амонійних солей, мг/л, у перерахунку на NH_4^+	100	500	800	1000	1500	
Стійкість до їдких лугів, мг/л, у перерахунку Na^+ і K^+	50000	60000	80000	100000	150000	

Вимоги до гідроізоляції

На гідроізоляцію будівельних конструкцій підземних споруд від просочення і ґрунтових вод мають вплив різні агресивні фактори, до яких належать коливання температури й вологості середовища, дія біосфери (грибки, мікроорганізми та гризуни), хімічно агресивне середовище (в умовах агресивних ґрунтових вод), а також силові впливи від опору ґрунту і переміщення конструктивних елементів. Тому матеріали, що застосовуються для гідроізоляції, повинні мати такі властивості: водонепроникність і мінімальні водопоглинання, водонасичення та гідростатичність; пружність до деформацій, що виникають при нерівномірних осадках споруди, і твердість, необхідну для сприйняття місцевого тиску від включень каміння у ґрунті, а також гнучкість і технологічність; водо-, тепло- та біостійкість, а також стійкість до хімічних впливів; адгезію до поверхні, яка ізолюється.

Вимоги до матеріалів ущільнювачів залежать від кліматичних умов і типів споруд. Наприклад, у IV кліматичній зоні на автодорожніх мостах потрібна розтяжність герметика до 57 %, на лотках і акведуках у надводній частині – до 30 %, у підводній частині – до 22 %, а в підземних спорудах – не більше 7,5 %. У підводній і підземній частинах споруд від герметика вимагається висока водостійкість: водопоглинання не більше 3 %; набрякання 1 %; коефіцієнт водостійкості при тривалих навантаженнях у воді не нижче 0,8.

Конструкція ущільнювача деформаційного шва як у тонкостінних спорудах, так і в масивних визначається, у першу чергу, максимальною розрахунковою деформацією у шві. При незначних деформаціях (до 5 мм) у підземних спорудах шви ущільнюються, підсилюючи гідроізоляцію прокладкою металевих або пластмасових листів, при деформаціях до 50 мм ущільнення підсилюють уже листами-компенсаторами, а при значних деформаціях – асфальтовими шпонками й гумовими діафрагмами.

У тонкостінних конструкціях усі ущільнювачі в надземній і надводній зонах знаходяться під впливом змінної температури зовнішнього середовища, а тому матеріали таких ущільнювачів повинні бути морозостійкі: наприклад, у цих умовах слід застосовувати світло- та морозостійкі гуми або стабілізований поліетилен (з температурою крихкості -70 °C), у

тих зонах, де відсутнє промерзання, можна використовувати прокладки та діафрагми з пластифікованого полівінілхлориду, температура скління якого не нижче -23°C .

Шпонки, що знаходяться на поверхні, не можна заповнювати асфальтовими мастиками, які мають температуру крихкості вище -10°C , використовуючи для цього гумобітумні мастики з температурою крихкості -17°C або полімеробітумні мастики з температурою крихкості від -25 до -50°C .

Проектний строк служби ущільнювачів повинен бути не менше періоду капітальних ремонтів споруд, у випадку неможливості виконання ремонтних робіт строк служби ущільнювачів повинен бути не менше проектного ресурсу споруди.

Строки служби і капітальних ремонтів будівель і споруд [6] наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Структура	Строк служби, рік	Строк капітального ремонту, рік	
		Норма	У складних умовах
Будівлі			
Одноповерхові	40	25	16
Двоповерхові	83	30	25
Багатоповерхові	100	60	25
Промислових підприємств	59	30	25
ГЕС, АЕС	100	20	15
Промислові споруди			
Резервуари:			
залізобетонні	50	15	12
металеві	36	10	8
для хімічних продуктів	28	8	6
Відстійники	50	6	5
Ставки-охолоджувачі	40	12	6
Градирні:			
залізобетонні	30	4	3
металеві	10	4	3
Трубопроводи:			
залізобетонні	50	30	20
металеві	20	15	10
Мости:			
залізобетонні	100	40	35
металеві	100	10	8
Аеродроми:			
з бетонним покриттям	50	8	2
з асфальтобетонним покриттям	31	10	4

Довговічність полімерів можна прогнозувати за формулою [4]

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{(u_0 - \gamma \cdot \sigma)(1 - t/\theta)}{k \cdot T}, \quad (4)$$

де τ – розрахункова довговічність полімеру з урахуванням статичної втоми, рік; τ_0 – флуктуаційна характеристика; u_0 – енергія активізації руйнування; σ – розрахункове напруження; k – постійна Больцмана; T – абсолютна температура за шкалою Кельвіна.

У табл. 5 наведено розрахункові значення коефіцієнтів для деяких полімерів.

Значення будь-якого параметра ($T_{m\tau}$, $T_{g\tau}$, σ_{τ} , T_{τ} , E_p), що характеризує працездатність матеріалу ущільнювача після τ років експлуатації, можна моделювати залежністю

$$P_{\tau} = P_0(1 - \omega) = P_0 - v_0 \cdot \tau \cdot \prod_{i=1}^n K_i, \quad (5)$$

$$\omega = v_0 \cdot \tau, \quad (6)$$

де P_0, P_τ – значення параметра на початку експлуатації та після τ років; ω – параметр пошкодження ($0 \leq \omega < 1$); ν_0 – швидкість старіння, рік⁻¹; τ – час експлуатації; $\prod_{i=1}^n$ – знак добутку параметрів впливу на швидкість деградації; K_i – коефіцієнти впливу на швидкість деградації.

Таблиця 5

Матеріал	u_0 , кДж/моль	$\lg \tau_0$	$\frac{10^3}{T_0 K}$	γ , кДж/(моль·МПа)
Поліетилен ПНП (розрив)	260	-12	1,5	$4,2 \cdot 10^3$
Те саме при деформуванні	1176	-3; -4	2,6	$6,3 \cdot 10^4$
Поліметилметанрилат	218	-12	1,5	$2,1 \cdot 10^3$
Те саме при деформуванні	630	-5	2,4	$8,4 \cdot 10^3$
Поліпропілен (розрив)	235	-12	1,3...1,5	$1,6 \cdot 10^3$
Те саме при деформуванні	1050	-2	2,4	$6,3 \cdot 10^4$
ПВХ-пластикат	500	-5	2,9	$4,2 \cdot 10^3$
Те саме при деформуванні	840	-13	2,5	$8,4 \cdot 10^3$
Полістирол (розрив)	235	-12	1,3	$6,3 \cdot 10^3$
Те саме при деформуванні	800	-1; -2	2,7	$1,6 \cdot 10^4$

Ресурс можна визначати за формулою

$$[\tau] = \tau_0 - \nu_0 \cdot \tau \cdot \prod_{i=1}^n K_i, \tag{7}$$

де τ_0 і ν_0 приймаємо за даними табл. 6 для мастичних і профільних герметиків і в табл. 7 для полімерних плівок.

Таблиця 6

Назва герметика	R, МПа	A, %	τ_0 , рік			ν_0 , рік ⁻¹		
			на повітрі	замерзання відтавання	під водою постійно	на повітрі	замерзання відтавання	під водою постійно
Поліізобутиловий УМС-50	<0,1	200...250	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Поліізобутиловий УМ-40	0,01	250...300	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Бутилкаучковий БГМ-1, БГМ-2	0,6...1,0	200...350	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Тіоколовий КБ-0,5 ГС-1, У-30М	1,0...4,5	150...200	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Гідром (тіокол + кам'яновугільна смола)	0,4	350	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Еластосил 11-06 (бутилкаучук)	0,3	80	15	7	100	0,3	0,5	0,2
УТ-38 (тіокол + кам'яновугільна смола)	0,25	250	30	15	100	0,3	0,5	0,2
МБ БГ (бітум + БК латекс)	0,15	135	15	7	50	0,3	0,5	0,2
Бітум + термоеластоласт ДСТ	0,1	120	15	7	50	0,3	0,5	0,2
Бітеп (бітум + СКЕПт-30)	0,5	200	15	7	50	0,3	0,5	0,2
Бутепрол-1 (бутилкаучук + СКЕП)	0,05...0,15	30...50	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Гумова стрічка	15...20	500...600	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Поліізобутилова стрічка УГС	0,3...0,5	200	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Герметик круглий	0,25	50	20	10	50	0,3	0,5	0,2
Пороізол марки П	1,5...2,0	150...300	20	10	50	0,3	0,5	0,2
Пороізол марки М	0,05...0,16	50...75	15	7	40	0,3	0,5	0,2

Таблиця 7

Назва	R, МПа	A, %	[-T], tg °C	Назем-	Під-	Назем-	Під-
				ні	земні	ні	земні
				τ_0 , рік		ν_0 , рік ⁻¹	
Поліетиленова рукавна	10...17	300...400	-70	70	135	0,5	0,2
Засилена ПНП із П-2006В	15...23	480...670	-70	70	135	0,5	0,2
Сицален, фертен	15...20	300...400	-40	40	120	0,5	0,2
Хуноні-темі, токален, ХИ-зекс	8,5...15	300...400	-50	50	125	0,5	0,3
Стафлен, траполен, еполен	10...18	300...500	-50	50	125	0,5	0,3
Ніколон, кельтан	6,0...12	80...500	-40	40	120	0,5	0,4
Вестален, дельта	7,0...15	120...600	-40	40	120	0,5	0,4
Полівінілхлоридні	11	140	-25	13	12	0,5	0,5
Упаковочна В-118							
Еластична	10...15	130...750	-50	15	25	0,5	0,3
Ізоляційна ДВИ-45	10	180...220	-40	14	20	0,5	0,4
Пластизол, липка (для труб)	10	150	-20	13	15	0,5	0,5
Ізофол А, В, АВ, ВВ, ВС	15	250	-30	13	15	0,5	0,5
Бекофол, вукофлекс, екопласт	10...15	200...250	-17	12	10	0,5	0,5
Тиратрон, федлацета	3...16	20...220	-25	13	12	0,5	0,5
Вілкопласт, ірецпласт	10...15	100...150	-20	13	10	0,5	0,5

Значення коефіцієнтів впливу факторів середовища на швидкість старіння полімерів: K_1 – коефіцієнт, що враховує вплив сонячного опромінення (табл. 8).

Таблиця 8

Режим сонячного освітлення	Постійно на сонці	На сонці під склом	Періодичне освітлення	Періодичне освітлення під склом	Постійно в тіні
K_1	5	4	3	2	1

K_2 – коефіцієнт впливу температури середовища (табл. 9).

Таблиця 9

Межі коливання температури T	$T < T_g$	$T < T_g < T_g + 10^\circ\text{C}$	$T_g + 10^\circ\text{C} < T < T_g + 50^\circ\text{C}$	$T_g + 50^\circ\text{C} < T < T_m$	$T \geq T_m$
K_2	∞	$1 + \frac{T}{T - T_g}$	1	$1 + \frac{T}{T_m - T}$	∞

K_3 – коефіцієнт впливу рівня напружень (табл. 10) або деформацій.

Таблиця 10

Відношення σ/R або ε/A	0	0,01...0,99	1
K_3	1	$1 + \frac{\varepsilon}{A - \varepsilon}$ або $1 + \frac{\sigma}{R - \sigma}$	∞

K_4 – коефіцієнт впливу рівня агресивності середовища по відношенню до полімеру (табл. 11).

Таблиця 11

Ступінь агресивності середовища	Неагресивне	Слабо-агресивне	Середньо-агресивне	Сильно-агресивне
K_4	1	1,5	5	17

Термічне старіння ущільнювачів

Залежності від температури середовища існує п'ять станів, при яких можуть існувати полімери: кристалічний, аморфний (склоподібний) нижче температури T_g ; кристалічний та аморфний (каучукоподібний) між температурами T_g і T_m ; рідкий стан вище температури T_m .

Кристалічні домени (з яких складається полімер) нижче температури плавлення T_m і щільні аморфні вище температури склоутворення T_g визначають значення модуля пружності та міцність і накопичення енергії при високих рівнях напружень. Втрата енергії (дисипація) обумовлені більш рухливими аморфними станами, що існують в області приблизно від $T_g + 10$ °С до $T_g + 50$ °С.

Процес накопичення незворотних деформацій, релаксації напружень і дисипації більшою мірою відбувається в інтервалі між $T_g + 50$ °С і T_m . При температурах вище T_m пружно працюють тільки волокна композитів.

Таким чином, одним із механізмів старіння полімерів є зміна в часі T_g і T_m . А критеріями старіння є

$$T_{m\tau} \geq [T_m], \quad T_{g\tau} \geq [T_g]. \quad (8)$$

Водостійкість є найважливішою властивістю гідроізоляційних покриттів і ущільнювачів, за якою визначається довговічність. Випробування свідчать, що при насиченні гідроізоляційного матеріалу водою вище 5 %, він втрачає до 15 % початкової міцності (коефіцієнт водостійкості $k_b = 0,85$) і стає електропровідним (електроопір менше 10^7 Ом·см), а далі настає його каскадне руйнування.

Друга визначаюча властивість довговічності ущільнювачів – це тріщиностійкість при миттєвих коливаннях температури або при виникненні тріщин у конструкціях, або при розширенні чи звуженні деформаційного шва.

Тріщиностійкість полімерів залежить від накопичених незворотних деформацій, які визначаються для пружнов'язкопластичних матеріалів залежністю

$$\epsilon_t = \frac{\sigma_t}{E_y} + \frac{\sigma_t}{E_e(1 - e^{-t/\tau})} + \frac{(\sigma_t - \sigma_0)^\beta}{\eta_0} \cdot t \cdot e^{-t/\tau}, \quad (9)$$

де ϵ_t – відносна деформація від напруження σ ; E_y – модуль пружності матеріалу; E_e – модуль пластичності; τ – час релаксації напружень з часом дії t ; σ_0 – межа текучості або межа довготривалої міцності; β – міра аномальності в'язкості для аномально в'язких матеріалів; η_0 – найбільша структурна в'язкість незруйнованої структури.

Усі перелічені структурно-реологічні характеристики матеріалі можуть бути визначені експериментально при постійних напруженнях і температурі ($\sigma = const$; $t^0 = const$) з кривих повзучості за залежностями

$$E_y = \frac{\sigma}{\epsilon_y}; \quad E_e = \frac{\sigma}{\epsilon_e}; \quad \eta_0 = \frac{\sigma}{d\epsilon_T/dt}; \quad \eta_e = \frac{\sigma}{d\epsilon_e/dt}; \quad \tau = \frac{\eta_e}{E_e}; \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\lg(d\epsilon'_T/dt) - \lg(d\epsilon''_T/dt)}{\lg \sigma'' - \lg \sigma'} = const. \quad (11)$$

Для ідеально в'язких рідин $\beta = 1$, а для бітумів $\beta > 1$, для жорстких асфальтів $\beta \gg 1$.

Релаксація напружень ущільнювача

Ущільнювачі, як правило, працюють в умовах довготривалої деформації, для якої характерна релаксація напружень.

Якщо на початку експлуатації ущільнювач має деформацію ϵ_0 , що відповідає напруженням σ_0 , то після τ років експлуатації напруження визначається залежністю [5]

$$\sigma_1 = \left[1 + \left(\frac{m_g}{m_e} - 1 \right) \cdot e^{(-t/\tau) \cdot M} \right] \cdot m_e \cdot \epsilon_0 \quad \text{при } t > 0, \quad (12)$$

$$M = M_0 \cdot (T/273 \text{ } ^\circ\text{K}), \quad (13)$$

де τ – час в роках, при якому $\sigma = \sigma_\tau$; t – час у роках; σ – напруження; ϵ – деформації; m_g – модуль деформації ущільнювача на початку експлуатації; m_e – модуль деформації ущільнювача на час релаксації напружень до рівня σ_τ ; M_0 – модуль релаксації матеріалу при 20 °С.

Значення модулю деформації полімеру можна визначити за формулою

$$m_e/m_g = 1 \pm V_T (\lg \tau_p - \lg \tau_0), \quad (14)$$

де V_T – швидкість зміни модуля деформації матеріалу в часі, рік⁻¹; τ_p – розрахунковий час, рік; τ_0 – деякий початковий проміжок інкубаційного періоду старіння, коли властивості матеріалу майже не змінюються; знак «+» або «-» у рівнянні залежать від умов експлуатації в атмосфері (+) або під водою (-).

У свою чергу напруження в ущільнювачі можуть змінюватися залежно від температури навколишнього середовища. Якщо T_0 і V_0 початкова температура і об'єм ущільнювача, то одночасно адіабатичне напруження дорівнює

$$\sigma_2 = \frac{T \cdot V_0}{T_0 \cdot V} \cdot G_0 \left(2 - \frac{1}{\lambda^2} \right), \quad (15)$$

де V – об'єм при T у відсутності напружень; G_0 – модуль зсуву при T_0 ; λ – ступінь розтягнення (стиску) (L/L_0) полімеру. У той час як деформація ϵ дорівнює $(L/L_0)/L_0$.

У свою чергу для будь-якого полімеру зберігається залежність

$$\frac{T}{T_0} = \exp \left(\frac{V_0 \cdot W_0}{C_\lambda \cdot T_0} \right), \quad (16)$$

де C_λ – теплоємність полімеру для даної ступені розтягнення (λ); W_0 – функція енергії деформації, яку сприймав би полімер, доведений до тієї самої деформації адіабатично; T – температура зовнішнього середовища.

Тоді напруження в ущільнювачі дорівнюють сумі значень

$$\sigma_\tau = \sigma_1 + \sigma_2. \quad (17)$$

Одним із критеріїв втрати працездатності ущільнювача є релаксація напружень до рівня, нижче якого ущільнювач експлуатувати не можна. Значення технічних станів ущільнювачів за відношенням σ_τ/σ_0 наведено в табл. 12.

У першому наближенні для інженерних розрахунків значення m_g можна знайти за відношенням

$$m_g = R/A, \quad (18)$$

де R – межа міцності матеріалу при розриві зразка; A – відносне подовження при розриві зразка.

Таблиця 12

Технічний стан	σ_τ / σ_0	m_g / m_e
Добрий	1...0,9	1...1,1
Задовільний	0,9...0,5	1,1...2,0
Незадовільний	0,5...0,1	2,0...10,0
Непридатний до експлуатації	0,1...0,0	10,0...∞

Для нормальних умов експлуатації ущільнювача $\epsilon_0 = 7...12$ % (0,07...0,12 у долях). Для деяких еластомерів, з яких виготовляються ущільнювачі, значення R і A наведено в табл. 13.

Температурні напруження σ_t і міцнісні характеристики ущільнювачів (герметиків) можна визначити за формулами

$$\sigma_t = R_z \frac{E_y \cdot b^2}{\pi^2 \cdot \delta (f \cdot E_y + A_b \cdot \delta)}, \quad (19)$$

$$\frac{E_y}{R_z} \leq \left(\frac{l^2}{\delta^2 \cdot \pi^2 \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta t^o} - 1 \right) \cdot \frac{\delta}{f}, \quad (20)$$

де E_y – модуль пружності армоеластика; b – половина ширини ущільнювача; R_z – межа міцності при розтягу; f – половина висоти вигину ущільнювача; $\Delta\alpha = \alpha_n - \alpha_0$ – різниця коефіцієнта лінійного термічного розширення покриття й основи; Δt^o – амплітуда коливання температури; A_b – адгезія до основи (клебе-маси). Ці формули справедливі, якщо герметик наклеєний на основу; δ – товщина листа ущільнювача.

Таблиця 13

Назва еластомеру	Межа міцності R, МПа		Подовження при розриві A, %	
	чистий	із сажею	чистий	із сажею
Каучук із гевеї	20,6	27,47	800	600
Високомолекулярний цис-поліізопрен	20,6	27,47	800	600
Високомолекулярний цис-полібутадієн	5,49	20,6	800	550
Стиролбутадієновий каучук	1,72	20,6	500	500
Акрилонітрилбутадієновий каучук	4,81	27,47	600	500
Хлоропреновий каучук	24,03	24,03	800	600
Бутилкаучук	17,17	20,60	800	700
Етиленпропиленовий каучук	3,43	20,60	400	500
Поліалкіленосульфідний каучук	6,867	–	500	–
Поліакриловий каучук	2,06	17,16	600	300
Поліуретановий каучук	41,20	–	700	–
Полісилоксановий каучук	6,87	–	400	–
Фторкаучук Viton	24,0	–	400	–
Поліфторсиліконовий каучук	6,86	–	200	–

Максимальні напруження в петлевому ущільнювачі

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\left(\frac{E_y \cdot \Delta\delta}{2} \beta \right)^2 + 3 \left(\frac{G \cdot \Delta z}{\beta} \right)^2} = \sqrt{\frac{E^2 y \cdot \Delta x^2 \cdot \delta^2 \cdot \beta^4 + 12G^2 \cdot \Delta z^2}{4\beta^2}}, \quad (21)$$

де G – модуль зсуву матеріалу ущільнювача; $G = \rho \cdot \cos\phi + b + \pi \cdot r$ – половина довжини листа ущільнювача у шві; Δx , Δy – розходження сусідніх секцій споруди в шві по осі x та осі y відповідно.

Розрахунок листів і полос герметиків на виникнення тріщин у шві рекомендується визначати за величиною збільшення довжини a_T листа на його ширині 1 пог. м

$$a_T = 2k_u \cdot E_u \cdot \delta \cdot \varepsilon_u^2 / (R_M + q \cdot f_u), \text{ см}, \quad (22)$$

$$a_T \leq [a_T] \quad (23)$$

де $k_u = f(\delta \cdot R_u / R_M) = 0,67 \dots 1,4$, E_u – модуль деформації гідроізоляційного матеріалу, МПа; δ – товщина покриття, см; ε_u – відносне подовження гідроізоляційного матеріалу; R_u – розрахунковий опір матеріалу розтягненню, МПа; R_M – розрахунковий опір мастики на зсув, МПа; q – розрахункове навантаження на гідроізоляційний шар, МПа; f_u – коефіцієнти тертя тиску ґрунту або покриття на ізоляцію.

Таким чином, довговічність листових герметиків по критерію виникнення тріщин залежить від зміни в часі параметрів $R_M(\tau)$, $R_u(\tau)$, $f_u(\tau)$ за формулою (1).

Механічні характеристики для розрахунку тріщиностійкості плівок та листів гідроізоляції наведено в табл. 14.

Таблиця 14

Назва покриття	Модуль деформаци E_u , МПа	Розтяжність ϵ_u , %	Міцність R_u , МПа	Товщина δ , см	Міцність зсуву для мастици R_M , МПа	k_u	Критичне подовження $[\sigma_L]$, см
У приміщенні							
Обклеювальна гідроізоляція для ПВХ	60	20	12,0	0,2	0,52	1,4	2,0
Те саме із ПВХ-пластиката на мастиці БКС	20,5	10	21,5	0,2	0,52	1,4	0,2
Поліетиленовий лист на мастиці БКС	54	20	10,7	0,2	0,52	1,4	1,7
Із ізолу на бітумі БН 70/30:							
у 3 шари	28	10	2,4	1,8	0,40	2,0	3,5
у 4 шари	45	8	3,6	2,4	0,40	2,0	3,5
у 5 шарів	54	8	4,5	2,8	0,40	2,0	4,8
Тканини на мастиці БРМ:							
у 3 шари	32	8	3,1	2,0	0,48	2,0	2,5
у 4 шари	51	8	4,1	2,4	0,48	2,0	4,7
у 5 шарів	61	8	5,1	2,8	0,48	2,0	10,3
З урахуванням термостатичності при +10 °С (у ґрунті)							
Обклеювальна гідроізоляція з ізолу	15	20	5,0	2,4	1,2	2,0	3,3
Те саме при наклеюванні на полімерні бітуми	15	20	6,0	2,4	1,8	2,0	3,3
Еластобіт у 2 шари	1	40	0,15	1,0	0,11	1,0	11,0
Фарбувальна гідроізоляція із бітепів:							
бітум БН 70/30 + 10 % бутилкаучуку	140	14	0,13	0,2	0,13	0,5	1,9
бітум БН 70/30 + 10 % ДСТ-30	5,8	69	0,12	0,2	0,12	0,5	1,8
бітум БН 70/30 + 10 % СКЕПт-70	45,6	19	0,11	0,2	0,11	0,5	1,1
Те саме при армуванні склосіткою СС-1А	1200	15	5,6	0,4	0,13	0,5	3,8
Епоксидно-каучукова емаль ЕКК-100	1900	10	11,0	0,1	7,04	0,67	0,35
Те саме при армуванні склосіткою СС-1А	1560	10	12,6	0,25	7,04	0,5	0,54
Те саме при армуванні склотканиною СТС	1560	10	20,0	0,35	7,04	0,67	1,0
Штукатурна гідроізоляція із БАЕМ	30,4	25	5,5	1,0	0,88	2,0	3,2
Те саме при армуванні склосіткою	1200	6	8,7	1,5	0,88	2,0	7,05
З урахуванням термостатичності при -20 °С (узимку на поверхнях, відкритих впливу атмосфери)							
Обклеювальна гідроізоляція з ізолу	225	1	3,0	2,4	3,00	1,0	0,06
Те саме при наклеюванні на полімерні бітуми	223	3	4,0	2,4	2,00	0,67	1,6
Еластобіт, наплавляємий у 2 шари	68	34	4,0	1,0	2,00	0,67	1,6
Фарбувальна гідроізоляція із бітепів:							
бітум БН 70/30 + 10 % бутилкаучуку	4000	4	1,2	0,2	1,22	0,5	0,90
бітум БН 70/30 + 10 % ДСТ-30	360	14	1,8	0,2	1,82	0,5	0,70
бітум БН 70/30 + 10 % СКЕПт-70	440	14	1,38	0,2	1,40	0,5	1,10
Те саме при армуванні склосіткою	1600	3	8,7	0,4	1,40	1,0	0,83
Штукатурна гідроізоляція з БАЕМ	120	5	2,0	1,0	2,2	0,67	1,70
Те саме при армуванні склосіткою	1600	3	8,5	1,5	2,2	1,4	2,50

Витривалість ущільнювачів

Для полімерних матеріалів справедливою є залежність

$$\sum_i^n \left(\frac{t_i}{t_{Vi}} \right)^m \leq 1, \quad t_{повн} = \sum_i^n t_i \quad (24)$$

де t_i – час циклу, протягом якого зразок піддається деформуванню зі швидкістю V_i ; t_V – час до відмови з цією швидкістю; $t_{повн}$ – час до руйнування при множині циклів навантаження; n – кількість циклів навантаження.

Циклічна тріщиностійкість ущільнювачів визначається залежністю

$$n = \frac{B^2}{[2 \cdot W \cdot f(\lambda)]^2} \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2} \right), \quad (25)$$

де c_1 і c_2 – довжина початкового надрізу та після n циклів навантаження відповідно; B – константа зростання надрізу, яка дорівнює $B = T / \sqrt{dc/dn}$; T – питома енергія розриву; dc/dn – швидкість зростання надрізу; $f(\lambda)$ – повільно змінювана функція деформацій, приблизно дорівнює 2; W – енергія деформації на одиницю об'єму зразка за один цикл.

Повна робота на одиницю об'єму дорівнює

$$W = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon = \frac{\dot{\varepsilon} \cdot t^2 \cdot E_{пруж}}{2} + \dot{\varepsilon}^2 \int_{-\infty}^{+\infty} H_L \cdot \tau \cdot [t - \tau(1 - e^{-t/\tau})] d \ln \tau, \quad (26)$$

причому накопичена енергія є сумою незалежної і залежної від часу складової:

$$W_s = W_{пруж} + W(t) = \frac{\dot{\varepsilon} \cdot t^2 \cdot E_{пруж}}{2} + \frac{\dot{\varepsilon}^2}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} H_L \cdot \tau^2 \cdot (1 - e^{-t/\tau})^2 d \ln \tau. \quad (27)$$

Повна розсіяна енергія при циклічному навантаженні дорівнює

$$Wd = \left(\frac{\dot{\varepsilon}^2}{2} \right) \cdot \int_{t_1}^{t_b} H_L \cdot \tau / t \cdot d \cdot \ln \tau, \quad (28)$$

де H_L – релаксаційний спектр при розтягуванні; t – повний час, що плинув; τ – повний час релаксації до руйнування.

Значення кількості циклів до руйнування від розсіяної енергії Wd за цикл навантаження для натурального каучуку наведено в табл. 15

Таблиця 15

W , кг·см/см ³	2	5	10	20	50	100
N	10 ⁶	0,2·10 ⁶	0,8·10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ²

Повна енергія руйнування (E_p) полімеру за N циклів дорівнює

$$E_p = \sum_{i=1}^N \int_0^{V_0} W_{d_i} \cdot dV. \quad (29)$$

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии. Государственный комитет СССР по делам строительства. - М., 1986. – 46 с.
2. Баглай А.П., Карпузов Е.К., Омельченко А.А. Герметизация стыков сборных зданий и сооружений: Справочник. - К.: Будівельник, 1989. – 144 с.
3. Бойко В.В., Маплянян Р.Л. Гидроизоляция подземных сооружений полимерными материалами. – К.: Будівельник, 1989. – 144 с.
4. Попченко С.Н. Справочник по гидроизоляции сооружений. – Л.: Стройиздат, 1975.
5. Разрушение / Под ред. Г. Либовица. Т. 7. Разрушение неметаллов и композитных материалов. Ч. II. Органические материалы. - М.: Мир, 1976. –470 с.
6. Агаджанов В.И. Экономика повышения долговечности и коррозионной стойкости строительных конструкций. - М.:Стройиздат, 1976.
7. Сулейманов З.Г. Полимерные материалы в борьбе с коррозией. - Баку: Азгосиздат, 1975.
8. Хасин Б.Ф. Полимерные герметики в гидротехническом строительстве. - М.: Энергия, 1976.

9. *Шевелев Н.Ф.* Деформационные швы гидросооружений. - М.: Энергия, 1970.
10. *Покровский В.М.* Исследование долговечности, структурно-механических и защитных свойств битума, стабилизированного материалами органического и кремнийорганического происхождения. - Днепропетровск: ДИСИ, 1972.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕСУРСА УПЛОТНИТЕЛЕЙ И ГЕРМЕТИКОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Т. И. Матченко, Л. Б. Шамис, П. Т. Матченко, Л. Ф. Первушова

Разработана методика оценки долговечности и остаточного ресурса герметиков и уплотнителей деформационных швов строительных конструкций, которая учитывает влияние основных факторов на скорость старения.

Ключевые слова: ресурс, уплотнитель, герметик, долговечность.

ESTIMATION PROCEDURE OF THE RESOURCE CONDENSATIONS AND HERMETICS BUILDING CONSTRUCTIONS

T. I. Matchenko, L. B. Shamis, P. T. Matchenko, L. F. Pervushova

Longevity evaluation procedure of lasting and resource hermetic and condensation in deformation joint building constructions is worker out, which allows for influence of basic factors to degradations speed.

Keywords: resource, condensation, hermetic, lasting.

Надійшла до редакції 09.09.10