

Teresa Możaryn*

SZACOWANIE TRWAŁOŚCI NAPRAWY WYKONYWANEJ SYSTEMEM PRZEZNACZONYM DO NAPRAW KONSTRUKCJI BETONOWYCH

Artykuł dotyczy szacowania trwałości naprawy obiektu betonowego. Przedstawiono podstawę metody szacowania, zasady wnioskowania, wyniki badań laboratoryjnych systemu zapraw naprawczych oraz wyniki szacowania trwałości naprawy.

1. Wprowadzenie

Utrzymanie właściwości użytkowych obiektu budowlanego lub jego części wymaga wykonywania w odpowiednim czasie konserwacji i niezbędnych napraw. Zakres i termin przeprowadzenia tych zabiegów powinien być zawarty w programie użytkowania, stanowiącym element projektu. Odpowiednie utrzymanie ma istotne znaczenie dla właściciela obiektu, gdyż zaniechanie, wykonanie w nieodpowiednim czasie lub wykonanie niewłaściwe konserwacji i napraw jest przyczyną spadku wartości obiektu budowlanego [1].

Podstawowe zagadnienia, które powinien uwzględniać program użytkowania, to:

- warunki środowiskowe oraz czynniki działające na poszczególne elementy obiektu budowlanego,
- ustalenie funkcji i wynikających z nich wymagań dotyczących poszczególnych elementów oraz dopuszczalne zmiany tych wymagań podczas użytkowania,
- wyznaczenie okresu użytkowania obiektu budowlanego lub jego elementów oraz cykli międzyremontowych,
- określenie poziomu utrzymania elementów obiektu budowlanego.

Oszacowanie trwałości elementów budowlanych jest podstawą do przygotowania programu utrzymania obiektu. Zagadnienia szacowania i prognozowania trwałości są związane z właściwościami użytkowymi wynikającymi z wymagań podstawowych oraz z wymagań użytkownika lub właściciela obiektu [2]. Istotę tych problemów ujęto w serii norm ISO 15686 *Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania* [3–6]. Przedstawione w nich zostały między innymi zasady postępowania przy ustalaniu okresu użytko-

* dr inż. – Zakład Trwałości i Ochrony Budowli ITB

wania wyrobów/elementów i obiektów budowlanych na podstawie badań przyspieszonych lub wykonywanych na takich samych lub podobnych obiektach/elementach użytkowanych. Procedura jest jednak długotrwała i kosztowna. Prowadzone są więc prace związane z modelowaniem procesów na potrzeby ustalenia przewidywanego okresu użytkowania z wykorzystaniem badań przyspieszonych [7,8].

Dysponujemy obecnie narzędziami do szacowania okresu użytkowania. Spośród nich można wskazać metodę współczynników [2] oraz metodę opartą na analizie rodzajów i skutków uszkodzeń FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) oraz jej rozszerzenie o ocenę stanów krytycznych FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) [7,8].

2. Metoda współczynników

Metoda współczynników jest narzędziem do określania szacowanego okresu użytkowania (ESLC). Podstawą szacowania jest referencyjny okres użytkowania (RSLC), odnoszący się do danego obiektu i zdefiniowanych warunków użytkowania. Szacowany okres użytkowania jest określany – poprzez modyfikację referencyjnego okresu użytkowania – przez serię współczynników odnoszących się do specyficznych warunków dotyczących rozpatrywanego obiektu. Sklasyfikowane współczynniki modyfikujące [3] dotyczą niemal wszystkich obszarów związanych z czasem życia obiektu/elementu: jakością (A), poziomem projektowania (B), poziomem wykonawstwa (C), środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym (D i E), warunkami użytkowania (F), poziomem utrzymania (G). Każda ze zmiennych z tych obszarów może wpływać na okres użytkowania. Uwzględnienie tych powiązań przedstawia wyrażenie

$$ESLC = RSLC \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \cdot G \quad (1)$$

gdzie A, B, C, D, E, F, G – współczynniki modyfikujące.

Wybór wartości współczynników jest oparty na posiadanej wiedzy i doświadczeniu oraz dokumentach odniesienia. Rzetelna analiza przeprowadzona podczas doboru wartości współczynników pozwala zaplanować – na etapie projektowania – działania umożliwiające zapobieżenie przedwczesnemu uszkodzeniu obiektu/elementu. Metoda współczynników jest szacowaniem okresu użytkowania, a nie jego prognozowaniem. Umożliwia natomiast stosunkowo szybkie uzyskanie informacji o trwałości nowych wyrobów.

3. Metoda FMEA i FMECA

Do określania trwałości wdrażane są również doświadczenia związane z rozwiązywaniem i eliminowaniem problemów w procesie projektowania, z uwzględnieniem zachowania wyrobów podczas użytkowania [7,8]. Podejście do szacowania trwałości rozpoczyna się od połączenia analizy ryzyka z przetwarzaniem danych doświadczalnych, które wzajemnie się uzupełniają. Analiza ryzyka wywodzi się z FMEA – metodyki wykrywania uszkodzeń i analizy skutków, której celem jest rozpoznanie potencjalnych wad procesu/wyrobu, a następnie minimalizacja lub eliminacja przyczyn powstawania tych wad. Analiza ryzyka obejmuje zbiór współzależnych jakościowych i ilościowych wyników badań,

prowadzący do zobrazowania wyników końcowych. Analiza jakościowa wywodzi się z metodyki FMEA, a określenia ilościowe zawierają w sobie ilościowe wyrażenie kinetyki degradacji wyrobów i ich składników. Analizie można poddawać wyrób, obiekt lub jego części, a także proces technologiczny. W wyniku można uzyskać wiedzę o silnych i słabych stronach wyrobu/procesu i na etapie projektowania minimalizować je lub eliminować.

Analiza FMEA/FMECA może obejmować:

- funkcje, które wyrób powinien spełniać,
- wbudowanie wyrobu w obiekt,
- niezawodność podczas użytkowania,
- problemy związane z użytkowaniem,
- problemy związane z utrzymaniem.

Ze względu na znaczną ilość obszarów analizy przyczynowo-skutkowej, czynników będących przyczynami wad, różnorodność skutków wad, wygodnie jest podzielić badany wyrób, obiekt czy proces na moduły, a następnie te moduły łączyć. Takie postępowanie stwarza mniej możliwości popełnienia błędu, zwłaszcza że nie wszystkie elementy wyrobu czy obiektu będą ulegać zmianom według tego samego scenariusza. Stąd istnieje potrzeba gromadzenia danych, najlepiej uzyskiwanych w warunkach umożliwiających porównania wyników z różnych ośrodków. Dobrym źródłem informacji mogą być wyniki międzylaboratoryjnych badań porównawczych prowadzone w ramach działalności laboratoriów akredytowanych oraz wyniki z laboratoriów wykonujących badania wyrobów i procesów w celu uzyskania certyfikatów lub znaków jakości. Laboratoria te prowadzą badania zarówno wyrobów stosowanych, jak i nowych, zgodnie z normami lub zwalidowanymi procedurami.

Poziom ryzyka (krytyczność wady) [9] wyraża się wzorem:

$$P = R \cdot Z \cdot W \quad (2)$$

gdzie: P – poziom ryzyka,
 R – prawdopodobieństwo wystąpienia wady,
 Z – znaczenie wady,
 W – poziom wykrywalności wady (tabl. 1).

Krytyczność wady przyjmuje się jako niską, jeżeli $1 < P < 125$.

Tablica 1. Wskazówki do przyjmowania liczb R , Z , W [9]

Table 1. Directions for factors R , Z , W acceptance [9]

Skala R	Opis R	Wartość R
Nieprawdopodobne	wystąpienie wady jest nieprawdopodobne	1
Bardzo rzadko	wystąpienie wady jest mało prawdopodobne	2
Rzadko	wada może wystąpić kilka razy w okresie użytkowania	3
Przeciętnie	wada zdarza się sporadycznie – co jakiś czas	4
Często	wada powtarza się często	5

Skala Z	Opis Z	Wartość Z
Małe	nie występuje potencjalna możliwość awarii lub obrażeń	1
Istotne	możliwe wystąpienie wady bez znacznych uszkodzeń lub poważnych obrażeń	2
Znaczące	wada może być przyczyną znaczących zniszczeń i/lub poważnych obrażeń	3
Duże	wada może być przyczyną poważnych zniszczeń i/lub potencjalnych obrażeń	4
Katastroficzne	wada może być przyczyną całkowitego zniszczenia i/lub śmiertelnych obrażeń	5
Skala wykrycia W	Opis W	Wartość W
Bardzo łatwo	bardzo małe prawdopodobieństwo niewykrycia wady; wada jest ewidentna	1
Łatwo	małe prawdopodobieństwo niewykrycia wady	2
Przeciętnie	średnie prawdopodobieństwo niewykrycia wady	3
Trudno	wysokie prawdopodobieństwo niewykrycia wady	4
Niemożliwe	wysokie prawdopodobieństwo niewykrycia wady; punkt jest niekontrolowany; wada jest niewidoczna	5

4. Badania do oszacowania trwałości naprawy obiektu żelbetowego

System zapraw przeznaczonych do naprawiania obiektów betonowych powinien charakteryzować się takimi właściwościami technologicznymi i użytkowymi, aby wykonana nim naprawa była skuteczna i trwała. Trwałość naprawy można określać jako czas, przez który naprawa będzie spełniała – w określonych warunkach użytkowania – zdefiniowane wymagania wobec naprawianego obiektu. System naprawczy powinien zapewniać dobrą współpracę zarówno z obiektem naprawianym, jak i zapraw w systemie. Zgodnie z zasadą kompatybilności [10] właściwości elementów układu należy tak dobrać pod względem chemicznym i fizycznym, aby było zapewnione nieprzekraczanie dopuszczalnych naprężeń i/lub odkształceń w żadnej części układu, w przewidywanym czasie i warunkach użytkowania.

Przy opracowaniu tablic do analizy przyczyn wadliwości i krytyczności wad do oszacowania trwałości naprawy (tabl. 2) wykonywanej systemem zapraw brano pod uwagę:

- funkcje, które system powinien spełniać,
- wbudowanie systemu w obiekt,
- niezawodność podczas użytkowania,
- utrzymanie naprawionego obiektu.

Tablica 2. Zestawienie wybranych związków przyczynowo-skutkowych dotyczących powstawania wad i uszkodzeń naprawy obiektu betonowego

Table 2. Specification of selected consecutive-casual connections for the defects and failures of concrete structure repair

Funkcje, które system powinien spełniać			
Kompatybilność z naprawianym podłożem betonowym	kompatybilność zapraw w systemie	kompatybilność cieplna naprawy	skuteczność naprawy
Wbudowanie systemu w obiekt			
1. Zdiagnozowanie obiektu przed wbudowaniem systemu 2. Powszechnie stosowane wymagania odnośnie do przygotowania podłoża	właściwości technologiczne umożliwiające łatwe przygotowanie w warunkach budowy	właściwości technologiczne umożliwiające wbudowanie w miejsce naprawiane kolejnych warstw zapraw w systemie	właściwości technologiczne umożliwiające pielęgnację nakładanych warstw oraz wykonanej naprawy, bez nadmiernych nakładów finansowych
Niezawodność podczas użytkowania			
Właściwy skład wyrobów do uzyskania zapraw o wymaganych w zastosowaniu parametrach	odporność na działanie warunków atmosferycznych i wybranych środowisk ciekłych	odporność chemiczna na oddziaływanie środowisk w warunkach użytkowania	stabilność właściwości fizycznych i chemicznych systemu w warunkach użytkowania
Utrzymanie naprawianego obiektu			
Działania zapobiegawcze, np. wykonanie zabezpieczenia powierzchniowego	planowanie przeglądów i wykonywanie zaleconych działań pokontrolnych	diagnozowanie stabilności właściwości wykonanej naprawy	wykonywanie konserwacji planowych, natomiast większych napraw bezpośrednio po stwierdzeniu takiej konieczności

Zgodnie z obowiązującymi zasadami prawnymi wyroby i systemy przeznaczone do wykonywania napraw obiektów budowlanych wprowadzane są do obrotu i stosowania w budownictwie po pozytywnej ocenie zgodności z wymaganiami technicznymi. W celu szacowania trwałości naprawy wykonywanej systemem zapraw przeprowadzono badania zgodnie z normą zharmonizowaną [11] oraz dodatkowo metodami wynikającymi z wymagań krajowych.

Badany system naprawczy, przeznaczony do ręcznego wykonywania napraw obiektów żelbetowych użytkowanych w warunkach atmosferycznych, składał się z czterech zapraw cementowych modyfikowanych polimerami (PCC): zaprawy przeznaczonej do ochrony zbrojenia i wykonywania warstwy szczepnej (zaprawa I), dwóch zapraw przeznaczonych do napraw konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych (zaprawy II i III) oraz zaprawy wyrównawczej (zaprawa IV).

Wyniki badań i metody przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3. Wyniki oznaczeń właściwości systemu zapraw naprawczych
Table 3. Test results of parameters for repair mortars system

Oznaczana właściwość Metoda badania	Zaprawa I	Zaprawa II	Zaprawa III	Zaprawa 4	
Widmo IR PN-EN 1767:2002	występują domieszki polimerowe				
Konsystencja: rozpliw, cm PN-EN 1015-3:2000	28	16,2	14,4	17,3	
penetromer, mm PN-EN 1015-4:2000	68	18	13	28	
Czas zachowania właściwości roboczych, min	390	240	45	240	
Zawartość jonów chlorkowych, % PN-EN 1015-17:2002	0,02	0,02	0,02	0,02	
Właściwości ochronne względem zbrojenia PN-EN 86/B-01810	stan pasywny zbrojenia w zaprawie		nie oznaczano		
Wytrzymałość na ściskanie, MPa PN-EN 12190:2005	nie oznaczano	56	50	21	
Wytrzymałość na zginanie, MPa PN-85/B-04500	nie oznaczano	10	9	4	
Nasiąkliwość, % PN-85/B-04500	nie oznaczano	3,4	1,8	9,2	
Odporność na absorpcję kapilarną, kg/m ² h ^{0,5} PN-EN 13057:2004	nie oznaczano	0,29	0,20	0,16	
Przyczepność do podłoża betonowego, MPa PN-EN 1542:2000	3,0÷4,1	(z warstwą sczepną)		1,8÷2,0 zerwania kohezyjne w zaprawie	
		2,6÷3,2	2,9÷3,1		
	zerwania kohezyjne w podłożu				
Moduł sprężystości przy ściskaniu, MPa PN-EN 13412:2006	nie oznaczano	18 800	16 900	nie oznaczano	
Mrozoodporność (50 cykli) PN-85/B-04500 – ocena wizualna: wystąpienie pęknięć, – średnia zmiana masy próbek, %, – średnia zmiana wytrzymałości próbek na ściskanie, %	nie oznaczano	odporna			
		brak pęknięć			
		1,4	0,8	2,3	
		2	11	– 4	
Odporność na karbonatyzację PN-EN 13295:2005 – średnia głębokość karbonatyzacji, mm, – kształt frontu karbonatyzacji	nie oznaczano	odporna			
		4,5	3,3	nie oznaczano	
		zaprawa odniesienia 8,3			
		A			

Oznaczana właściwość Metoda badania	Zaprawa I	Zaprawa II	Zaprawa III	Zaprawa IV
Kompatybilność cieplna PN-EN 13687-1:2002 – przyczepność do podłoża betonowego, MPa, – ocena wizualna	nie oznaczano	(zaprawa z warstwą szczepną)		
		2,0÷3,1	1,9÷3,0	1,7÷2,3
		zerwania kohezyjne w podłożu		
		brak rys, spękań i odspojeń		stwierdzono 3 rysy o szerokości do 0,05 mm, brak odspojeń
Odporność chemiczna: roztwory kwaśne o pH > 4,5; roztwory: SO ₄ ⁻² ≤ 3000 mg/l Metoda drobnobeleckowa	nie oznaczano	odporna		
Przepuszczalność pary wodnej s _d , m PN-EN 1015-19:2000	nie oznaczano			0,09
Współczynnik dyfuzji jonów Cl ⁻ , m ² /s Procedura ITB	nie oznaczano			1,71× 10 ⁻¹¹

Przeprowadzone badania potwierdziły, że zaprawy naprawcze modyfikowane polimerami miały odpowiednie właściwości technologiczne do wykonywania napraw oraz – po stwardnieniu – charakteryzowały się korzystnymi właściwościami użytkowymi. Ze względu na posiadane właściwości ochronne zapraw w systemie względem zbrojenia: odpowiednie parametry mechaniczne, wysoką przyczepność do podłoża betonowego oraz do warstw w systemie (kompatybilność systemu), kompatybilność cieplną, odporność na karbonatyzację, niską nasiąkliwość, odporność na absorpcję kapilarną, odporność chemiczną na działanie wodnych roztworów kwaśnych o pH 4,5 oraz wodnych roztworów zawierających jony siarczanowe o stężeniu do 3000 mg/l i korzystne parametry barierowe badany system naprawczy spełnił wymagania normy zharmonizowanej [11] oraz wymagań krajowych [12].

5. Oszacowanie trwałości naprawy obiektu żelbetowego

Wyniki badań systemu naprawczego wykorzystano do oszacowania trwałości naprawy wykonanej tym systemem. Przyjęto następujące założenia:

- obiekt przeznaczony do wykonania naprawy zostaje oceniony pod względem konstrukcyjnym,
 - określa się warunki użytkowania obiektu oraz agresywność środowiska,
 - powstaje projekt naprawy (naprawa konstrukcyjna) lub opis techniczny naprawy (naprawa niekonstrukcyjna) z uwzględnieniem zastosowania odpowiedniej ochrony powierzchniowej, jeśli to wynika z oddziaływania i agresywności środowiska w warunkach użytkowania,

- wykonawca ma doświadczenie i odpowiednie kwalifikacje do wykonywania napraw obiektów betonowych i żelbetowych,
- wyroby i system stosuje się zgodnie z kartami technicznymi wyrobów,
- podczas realizacji naprawy dokonywane są wymagane odbiory międzyoperacyjne i odbiory końcowe,
- naprawiony obiekt podlega okresowym przeglądom i konserwacji zgodnie z opracowanym programem utrzymania.

Analizę FMEA przeprowadzono, wykorzystując wyspecyfikowane związki przyczynowo-skutkowe (tabl. 2) i wyniki badań systemu naprawczego (tabl. 3), natomiast poziom ryzyka powstania wady/uszkodzenia (krytyczność wady) obliczono według wzoru (2). Wyniki analizy zamieszczono poniżej (tabl. 4). Jako podstawę określenia źródła uszkodzenia/nieprawidłowości przyjęto główne założenia trwałości naprawy [10].

Tablica 4. Wyniki oceny ryzyka powstania uszkodzenia/nieprawidłowości naprawy
Table 4. Results of risk estimation for arising the repair failure/irregularity

Źródło uszkodzenia	Możliwość wystąpienia	Intensywność	Możliwość wykrycia	Ocena
	(A)	(B)	(C)	(A x B x C)
Działanie naprawy w konstrukcji	3	2	3	18
Dobór rozwiązania materiałowo-technologicznego Kompatybilność	2	2	2	8
Oddziaływanie konstrukcji na naprawę	4	3	3	24
			Suma	50
			Średnia	17

Zgodnie z przyjętymi założeniami i uzyskanymi pozytywnymi wynikami szerokiego zakresu badań oszacowano naprawę obiektu betonowego ocenianym systemem naprawczym jako trwałą. Obliczony według przyjętych zasad [9] poziom ryzyka $P = 17$ oceniono jako niski.

6. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza FMEA wykazała, że badania systemu naprawczego wykonywane metodami zalecanymi w normie zharmonizowanej PN-EN 1504-3:2006, łącznie z badaniami specyficznych właściwości zapraw, mogą stanowić podstawę do szacowania trwałości naprawy. Analiza FMEA, wsparta wynikami badań laboratoryjnych, umożliwiła oszacowanie ryzyka wystąpienia uszkodzenia naprawy obiektu betonowego, wykonanej systemem zapraw naprawczych. Oszacowany poziom ryzyka pozwolił ocenić

naprawę jako trwałą. Uzyskany wynik oszacowania trwałości naprawy jest zgodny z obserwacjami uzyskiwanymi w ramach przeglądów obiektów, które naprawiano zgodnie z zasadami aktualnego stanu wiedzy, a utrzymanie naprawionych obiektów było realizowane prawidłowo.

Bibliografia

- [1] Ściślewski Z.: Utrzymanie konstrukcji żelbetowych. Prace naukowe ITB. Seria: Monografie. ITB, Warszawa 1997
- [2] Suchan M.: Harmonizacja przepisów dotyczących trwałości z normami europejskimi. ITB, Warszawa 2002
- [3] PN-ISO 15686-1:2005 Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania. Część 1: Zasady ogólne
- [4] PN-ISO 15686-2:2005 Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania. Część 2: Procedury związane z przewidywaniem okresu użytkowania
- [5] PN-ISO 15686-3:2005 Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania. Część 3: Audyty i przeglądy właściwości użytkowych
- [6] PN-ISO 15686-6:2006 Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania. Część 6: Procedury związane z uwzględnianiem wpływów środowiskowych
- [7] Hans J., Chevalier J.L.: Sustainable tools and methods for estimating building materials and components service life, 10 DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France 2005
- [8] Talon A., Boissier D., Chevalier J.L., Hans J.: Temporal quantification method of degradation scenarios based on FMEA, 10 DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France 2005
- [9] UEATc Technical Report. The Assessment of risk associated with Prototype Innovative Products, Final Draft, October 2007
- [10] Czarnecki L., Emmons P. H.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Polski Cement, Kraków 2002
- [11] PN-EN 1504-3:2006 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 3: Naprawy konstrukcyjne i niekonstrukcyjne
- [12] Zalecenia Udzielania Aprobata Technicznych ITB: ZUAT-15/VI.02/2004 Wyroby do napraw uszkodzonych konstrukcji z betonu. ITB, Warszawa 2002

DURABILITY ESTIMATION OF THE REPAIR MADE USING THE SYSTEM INTENDED FOR THE REPAIR OF CONCRETE STRUCTURES

Summary

The aim of this paper is the estimation of repair durability of concrete structures. The principle of the method, the rules of inference, the results of laboratory tests of repair mortars system and results of repair durability estimation were presented.

Praca wpłynęła do Redakcji 29 V 2008 r.