

mgr inż. Wojciech Szymkuć<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0002-8058-9825

dr inż. Janusz Dębiński<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-1339-8698

dr inż. Justyna Grzymiśławska<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-8129-3997

dr inż. Michał Malendowski<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-2698-8358

# Właściwości betonu w temperaturach pożarowych w świetle nowelizacji Eurokodów

## *Properties of concrete at elevated temperatures in light of the Eurocode revision*

DOI: 10.15199/33.2023.07.05

**Streszczenie.** Celem artykułu jest uporządkowanie zagadnień dotyczących właściwości betonu w podwyższonych temperaturach w ujęciu Eurokodu EN 1992-1-2 oraz jego nowelizacji prEN 1992-1-2. Zmiany w kontekście właściwości materiałowych dotyczą przede wszystkim: betonów wysokich wytrzymałości; problemów związanych z fazą studzenia pożaru; przewodności cieplnej; wprowadzenia zapisów dotyczących betonów lekkich, betonów zbrojonych włóknami stalowymi oraz betonów na kruszywach z recyklingu.

**Słowa kluczowe:** odporność ogniowa; pożar; beton; właściwości betonu; Eurokody.

**Abstract.** The authors aim to sort out the issues concerning the properties of concrete at elevated temperatures in terms of Eurocode EN 1992-1-2 and its revision prEN 1992-1-2. The changes in the context of material properties mainly concern: high strength concretes; problems related to the cooling phase of fire; thermal conductivity; the introduction of provisions for lightweight concrete, concrete reinforced with steel fibres, and concretes on recycled aggregates.

**Keywords:** fire resistance; fire; concrete; concrete properties; Eurocode.

W artykule skupiono się na właściwościach betonu opisanych w normie EN 1992-1-2:2004 [1], zwanej dalej „EN” oraz prEN 1992-1-2:2021 [2], zwaną dalej „prEN”. Mnogość sformułowań dotyczących parametrów materiałowych betonu w podwyższonej temperaturze może być myląca, ze względu na brak uzasadnienia w obecnie obowiązującej normie. W celu zrozumienia pewnych założeń należy sięgnąć do dokumentów źródłowych, towarzyszących procesowi opracowywania Eurokodów [3]. Artykuł ma na celu uporządkowanie zagadnień związanych z normowym podejściem do wpływu temperatur pożarowych na beton. Naszym celem jest ułatwienie czytelnikom odpowiedzi na pytania:

a) z czego wynikają rozbieżności niektórych parametrów materiałowych w Eurokodzie?

b) jakie zmiany wprowadzono w prEN 1992-1-2:2021?

Grupą, która zajmowała się nowelizacją Eurokodów, jest Komitet Techniczny CEN/TC 250 „Structural Codes”, pracujący na podstawie mandatu przygoto-

wanego przez Komisję Europejską w 2012 r. Przez kilka następnych lat trwały intensywne prace. Jesienią 2021 r., w Polsce oraz w pozostałych krajach CEN, odbyły się publiczne konsultacje, tzw. ankieta (Enquiry) prEN 1992-1-1 oraz prEN 1992-1-2. Uwagi z ankiet przekazano do grup roboczych, które rozpatrywały ich zasadność. Do normy prEN [2] zgłoszono ok. 300 uwag (nie wiele w porównaniu z innymi normami). Przed nami jest wciąż etap zatwierdzenia, tzw. głosowanie formalne (Formal Vote). W przypadku omawianej normy odbędzie się ono do końca 2023 r. Zgodnie z wewnętrznymi procedurami CEN-CENELEC [4], na etapie głosowania formalnego nie wprowadza się już uwag merytorycznych.

Chcąc zobrazować historię rozwoju norm dotyczących projektowania konstrukcji żelbetonowych, na rysunku 1 zestawiono nowelizacje polskich norm PN-B oraz Eurokodów. Ewolucja polskich norm przed wprowadzeniem Eurokodów została opisana m.in. w [5, 6]. W tym miejscu warto podkreślić dawne podejście do projektowania elementów z betonu zbrojonego ze względu na warunki pożarowe. Od PN-B-195 z 1945 r. do PN-B-03260 z 1956 r. wymagane otulenie zbrojenia wynosiło 2,5 cm lub 4 cm. W normie PN-B-03264 zapisy te

zniknęły, co miało związek z załącznikiem 1 do warunków technicznych z 1961 r. W kolejnych edycjach PN-B pojawiło się odniesienie do „oddzielnych przepisów”, które przetrwało aż do wersji PN-B-03264 z 2002 r. Dopiero w normach PN-EN wprowadzono metody tabelaryczne i procedury obliczeniowe, w których brano pod uwagę takie czynniki, jak wyężenie elementów konstrukcji oraz właściwości materiałowe stali i betonu w podwyższonej temperaturze.

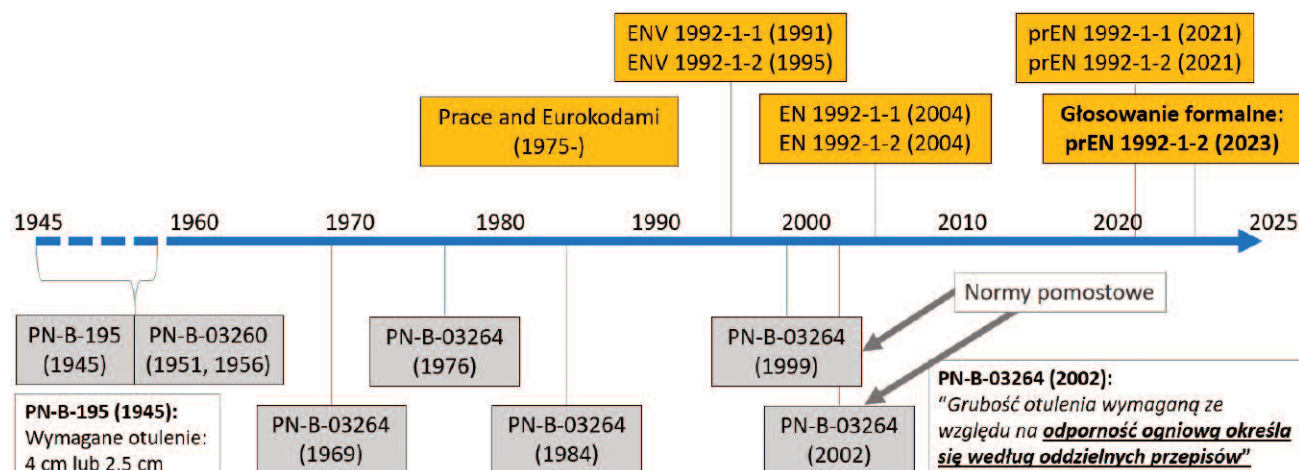
W dalszej części artykułu przedstawiono normowe podejście do wpływu temperatur pożarowych na wytrzymałość betonu na ściskanie, moduł Younga, zależność naprężenie-odkształcenie ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) i przewodność cieplną. Artykuł wzbogacają informacje dotyczące tematów dotychczas nieobecnych w normie, takich jak wytrzymałość betonu po ostudzeniu oraz właściwości betonów lekkich (LWC), betonów na kruszywie z recyklingu i betonów zbrojonych włóknami.

### Właściwości materiałowe

**Wytrzymałość betonu na ściskanie.** W EN [1] wyróżniono kilka rodzajów betonów, stosując ich gęstość jako podstawowe kryterium podziału na betony lekkie oraz betony zwykłe (od 2000 do 2600 kg/m<sup>3</sup>). W przypadku betonów zwykłych dalszy podział następuje ze

<sup>1)</sup> Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: wojciech.szymkuc@put.poznan.pl



Rys. 1. Historia nowelizacji Polskich Norm PN-B dotyczących projektowania konstrukcji żelbetowych (PN-B-195, PN-B-03260, PN-B-03264) oraz Eurokodów EN 1992-1-1 i EN 1992-1-2

Fig. 1. History of revisions of the Polish PN-B standards for the design of reinforced concrete structures (PN-B-195, PN-B-03260, PN-B-03264) and Eurocodes EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2

względem na kruszywo (krzemianowe lub wapienne). Taki podział został utrzymany w prEN [2]. Ponadto w EN [1] wyróżniono betony wysokiej wytrzymałości (high strength concrete – HSC – C55/67 do C90/105). W prEN [2] nie pojawia się już nazwa „beton wysokiej wytrzymałości”, lecz betony podzielono na te o  $f_{ck} < 70$  MPa oraz  $f_{ck} \geq 70$  MPa. Wartości związane z wytrzymałością na ściskanie w podwyższonej temperaturze zestawiono w tabeli.

Tabelę podzielono na 3 części. Kolumny (2)–(6) dotyczą EN [1], gdzie wyróżnia się betony na kruszywie krzemianowym (K), wapiennym (W) oraz trzy klasy HSC. Kolumny (7), (8), (9) dotyczą prEN [2]. Wartości dla kruszyw krzemianowych i wapiennych nie zmieniły się – por. kol. (2) i (7) oraz (3) i (8). Istotną zmianą, będącą znacznym uproszczeniem, jest redukcja dotychczasowych trzech klas betonów HSC (kolumny 4 – 6) do jednej grupy o  $f_{ck} \geq 70$  MPa (kol. 9). Warto zauważyć, że w przeciwieństwie do EN, prEN nie uwzględnia redukcji wytrzymałości na ściskanie dla  $f_{ck} \geq 70$  MPa w temperaturze 100 °C, co przedstawiono na rysunku 2. Dwie ostatnie kolumny dotyczą odkształceń. Odkształcenie odpowiadające wytrzymałości w wysokiej temperaturze ( $\epsilon_{ci,\theta}$ ) oraz odkształcenie określające zasięg opadającej części krzywej naprężenie-odkształcenie ( $\epsilon_{cu1,\theta}$ ) nie zostały zmienione. Warto podkreślić, że w prEN te wartości są jasno określone zarówno w przypadku betonów o wytrzymałości do 70 MPa, jak i większej.

Wartości głównych parametrów zależności naprężenie-odkształcenie betonów wg EN [1] oraz prEN [2]. Szarym kolorem oznaczono wartości, które nie są podane wprost w [1] Values for the main parameters of the stress-strain relationships of concrete acc. to EN [1] and prEN [2]. Gray color indicates values that are not explicitly given in [1]

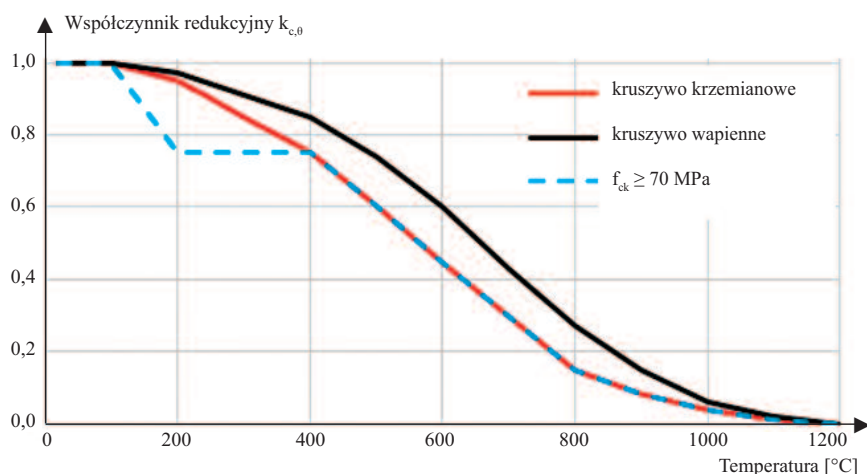
Temperatura	EN 1992-1-2:2004 [1]						prEN 1992-1-2:2021 [2]			[1], [2]	
	NSC		HSC			$f_{ck} < 70$ MPa		$f_{ck} \geq 70$ MPa	odkształcenie		
	kruszywo		klasa 1 C55/67 C60/75	klasa 2 C70/85 C80/95	klasa 3 C90/105	kruszywo					
	K	W				K	W				
$\theta$ [°C]	$k_{c,\theta}$									$\epsilon_{ci,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
20	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0025	0,0200	
50	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0033	0,0213	
100	1	1	0,90	0,75	0,75	1	1	1	0,0040	0,0225	
200	0,95	0,97	0,90	0,75	0,70	0,95	0,97	0,75	0,0055	0,0250	
250	0,90	0,94	0,90	0,75	0,675	0,90	0,94	0,75	0,0063	0,0263	
300	0,85	0,91	0,85	0,75	0,65	0,85	0,91	0,75	0,0070	0,0275	
400	0,75	0,85	0,75	0,75	0,45	0,75	0,85	0,75	0,0100	0,0300	
500	0,60	0,74	0,60	0,60	0,30	0,60	0,74	0,60	0,0150	0,0325	
600	0,45	0,60	0,45	0,45	0,25	0,45	0,60	0,45	0,0250	0,0350	
700	0,30	0,43	0,30	0,30	0,20	0,30	0,43	0,30	0,0250	0,0375	
800	0,15	0,27	0,15	0,15	0,15	0,15	0,27	0,15	0,0250	0,0400	
900	0,08	0,15	0,08	0,1125	0,08	0,08	0,15	0,08	0,0250	0,0425	
1000	0,04	0,06	0,04	0,075	0,04	0,04	0,06	0,04	0,0250	0,0450	
1100	0,01	0,02	0,01	0,0375	0,01	0,01	0,02	0,01	0,0250	0,0475	
1200	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–	

\* K – kruszywo krzemianowe; W – kruszywo wapienne, w którym udział wagowy kruszywa wapiennego wynosi co najmniej 80%;  $k_{c,\theta}$  – współczynnik redukcyjny wytrzymałości charakterystycznej betonu na ściskanie w temperaturze  $\theta$ ;  $\epsilon_{ci,\theta}$  – odkształcenie odpowiadające wytrzymałości w wysokiej temperaturze;  $\epsilon_{cu1,\theta}$  – odkształcenie określające zasięg opadającej części krzywej.

W nowej normie podział na betony zwykle i HSC zastąpiono podziałem z uwagi na  $f_{ck} < 70$  MPa oraz  $f_{ck} \geq 70$  MPa, trzy dotychczasowe klasy HSC ujedynolono do jednej, a ponadto nie uwzględnia się redukcji wytrzymałości HSC w temperaturze 100 °C.

### Zależność naprężenie-odkształcenie i moduł sprężystości

Zależność naprężenie-odkształcenie ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) w jednoosiowym stanie naprężenia w podwyższonej temperaturze wyraża wzór (1), zaproponowany przez Popovicsa



**Rys. 2. Współczynnik redukcyjny wytrzymałości betonu na ściskanie wg prEN 1992-1-2 [2]**  
*Fig. 2. Reduction factor for compressive strength of concrete according to prEN 1992-1-2 [2]*

i wprowadzony do normy na podstawie rekomendacji komitetu RILEM PHT 44.

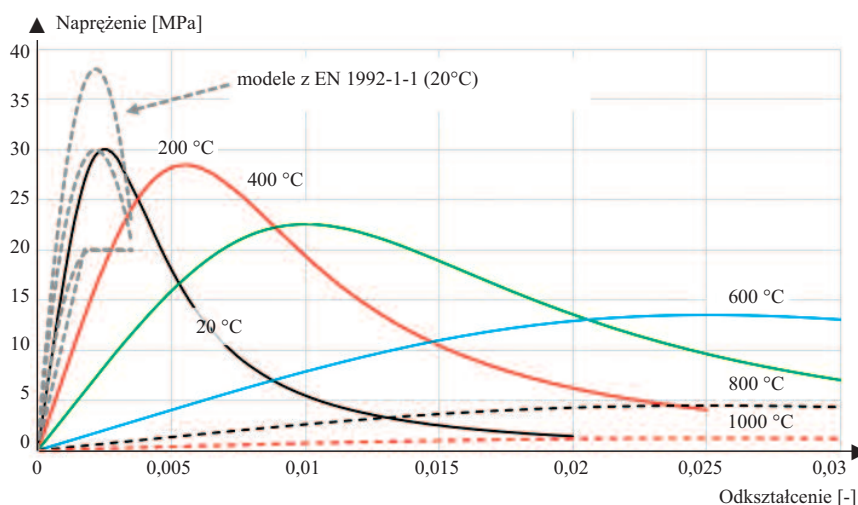
$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} \cdot \frac{3 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}}\right)}{2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}}\right)^3} \quad (1)$$

Zależność naprężenie-odkształcenie w nowej normie pozostała bez zmian. Krzywe naprężenie-odkształcenie w przypadku betonu o  $f_{ck} = 30$  MPa, wynikające z zastosowania wzoru (1) oraz wartości z tabeli, przedstawiono na rysunku 3. W celu lepszej orientacji pokazano też modele znane z EN 1992-1-1.

Warte podkreślenia są rozbieżności dotyczące modułu sprężystości betonu, wynikające nie tyle z błędów, co różnych prób upraszczania skomplikowanych zjawisk. Niestety uproszczenia bez wyjaśnienia prowadziły w przeszłości do licznych błędów. Normy do projektowania w warunkach normalnych, takie jak EN 1992-1-1, zawierają zależności empiryczne, które można wykorzystać do oszacowania modułu Younga, np.:

$$E_{cm} = 22 \cdot (0,1 \cdot f_{cm})^{0,3} \quad (2)$$

Wartości określone na podstawie wzoru (2) dotyczą betonów z kruszywami kwarcytowymi i w zależności od kruszywa mogą być modyfikowane mnożnikami wynoszącymi 1,2, 0,9 oraz 0,7, odpowiednio w przypadku kruszyw bazaltowych, wapiennych i piaskowych. Podobne zależności można znaleźć m.in. w fib Model Code 2010. Zarówno EN [1], jak i prEN [2] nie zawierają takich mnożników. Zamiast tego można wykorzystać zależność naprężenie-odkształ-



**Rys. 3. Modele zależności naprężenie-odkształcenie w podwyższonej temperaturze [2]. Szarym kolorem oznaczono modele znane z EN 1992-1-1 (nieliniowy, parabola-prostokąt i biliniowy)**

*Fig. 3. Models of stress-strain relationship at elevated temperatures [2]. The gray colour indicates models known from EN 1992-1-1 (non-linear, parabola-rectangle and bi-linear)*

cenie, wyrażoną wzorem (1) i na tej podstawie wyznaczyć styczny i sieczny moduł Younga – wzory (4), (5).

$$E_{c,\theta, \text{styczny}} = \frac{6 \cdot f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}}\right)^3}{\left[2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}}\right)^3\right]^2} \quad (3)$$

W związku z tym, że odkształcenie  $\varepsilon_{c,\theta}$  przy module stycznym wynosi 0, równanie (3) przyjmuje postać:

$$E_{c,\theta, \text{styczny}} = \frac{1,5 \cdot f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \quad (4)$$

$$E_{c,\theta, \text{sieczny}} = \frac{0,4 \cdot f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c,\theta}(0,4 \cdot f_{c,\theta})} \approx \frac{0,4 \cdot f_{c,\theta}}{0,2693 \cdot \varepsilon_{c1,\theta}} \quad (5)$$

Pewne wątpliwości budzi fakt, że w rozdziale 6.4.2.1(4) oraz w załączni-

ku C normy [1] podano uproszczoną zależność, wyrażoną wzorem:

$$E_c = k_{c,\theta}^2 \cdot E_c \quad (6)$$

Źródłem zależności (6) jest praca prof. K. Hertza [3], autora metody strefowej, który bazował na wartościach  $k_{c,\theta}$  innych niż podane w Eurokodzie. Ponadto stosował sieczny moduł Younga, wyrażony jako  $f_c/\varepsilon_{c1}$  lub  $k_{c,\theta} \cdot f_c/\varepsilon_{c1,\theta}$ , odpowiednio w przypadku modułu w 20 °C i w podwyższonej temperaturze. Sformułowanie podobne do (6) występuje też w Eurokodzie 1994-1-2. Praktyczną informacją jest to, że wartości modułu Younga, określone na podstawie uproszczonej zależności (6), są zawyżone. Po-

nadto, wzór (6) jest zalecany w metodzie B.3 bazującej na oszacowaniu krzywizny, a metoda ta była użyta w obliczeniach, których wyniki stały się źródłem tabel do projektowania słupów w załączniku C. Załącznik ten gruntownie zmieniono w ostatniej poprawce do [1] wydanej w 2019 r.: A1:2019-07. W prEN po raz kolejny zmieniono metodę tabelaryczną w załączniku C.

Problemy i rozbieżności przy określaniu modułu Younga wynikają z nieliniowego charakteru zależności (1), prób tworzenia uproszczonych modeli, takich jak (7), oraz skomplikowanej natury odkształcenia betonu w podwyższonej temperaturze:

$$\varepsilon = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_{tr} \quad (7)$$

gdzie poszczególne składowe całkowite odkształcenia ( $\epsilon$ ) są spowodowane: rozszerzalnością termiczną ( $\epsilon_{th}$ ), początkowym obciążeniem ( $\epsilon_{\sigma}$ ) i pełzaniem ( $\epsilon_{creep}$ ), natomiast  $\epsilon_{tr}$  to odkształcenie będące efektem pełzania termicznego betonu, tzw. Transient (Thermal) Strain lub Transient (Thermal) Creep (odkształcenie wywołane niestacjonarnym stanem termicznym). Zjawisko opisano m.in. w [7 – 9].

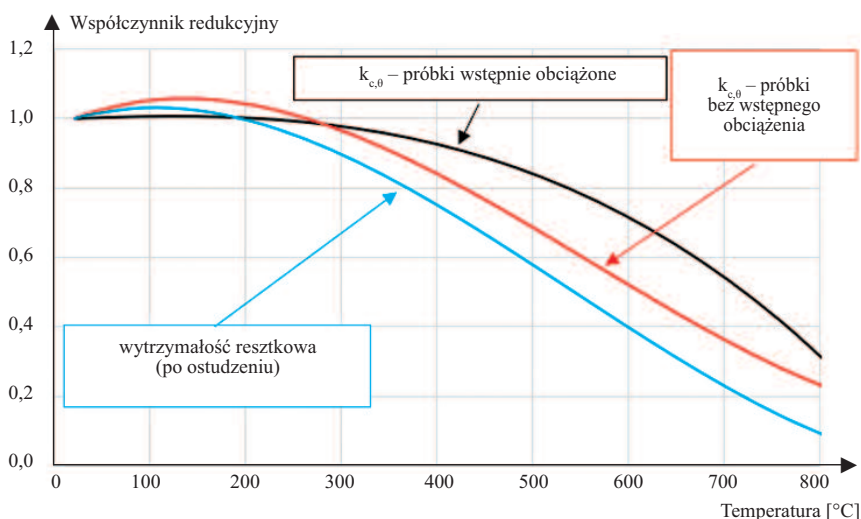
Zależność naprężenie-odkształcenie (1) nie uległa zmianie w prEN [2], ale usunięto mylące wytyczne dotyczące  $E$ , gdzie wykorzystywano współczynnik redukcyjny  $k_{c,0}^2$ . Ze względu na to, że wraz z temperaturą zmienia się  $\epsilon_{c1,0}$  (tabela, kolumna 10), uproszczenia podobne do tych znanych jako model parabola-prostokąt czy wykres biliniowy z EN 1992-1-2, nie są możliwe.

### Beton po pożarze

W EN [1] widniał zapis: *modele materiałowe w tym Eurokodzie mają zastosowanie dla prędkości nagrzewania o wartości od 2 K/min do 50 K/min. Dla prędkości nagrzewania niemieszczących się w powyższym zakresie wiarygodność właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych należy określić oddzielnie.* Sprawiał on, że przytoczone w tabeli zależności dotyczące betonu można było stosować jedynie w przypadku prędkości nagrzewania występującej przy oddziaływaniach zbliżonych do krzywej standardowej temperatura-czas. Zapis ten wykluczał stosowanie modeli materiałowych w przypadku pożarów z fazą studzenia, a więc także analiz dotyczących nośności popożarowej.

W prEN usunięto zapis o prędkości nagrzewania między 2 a 50 K/min. Wiadomo, że przy nagrzewaniu i późniejszym ochłodzeniu do temperatury 20°C beton nie odzyskuje pierwotnej wytrzymałości na ściskanie, co jest poparte licznymi badaniami [10, 11]. W prEN pojawił się zapis skopiowany z EN 1994-1-2, wg którego resztkową wytrzymałość betonu na ściskanie można przyjmować jako o 10% mniejszą niż w maksymalnej temperaturze, do której beton był nagrzany. W Polsce wpływem temperatury pożarowej na cechy mechaniczne betonu zajmowali się m.in. auto-

rzy [10, 12, 13]. Relacje pomiędzy wytrzymałością betonu w wysokiej temperaturze oraz po ostudzeniu zobrazowano na rysunku 4. Należy podkreślić, że zwykle wytrzymałość na ściskanie po ostudzeniu jest mniejsza niż w wysokiej temperaturze.



Rys. 4. Wytrzymałość betonu na ściskanie na podstawie bazy danych [14]. Zależności dotyczące betonu wstępnie obciążonego lub nieobciążonego (badania w wysokiej temperaturze) oraz betonu badanego po ostudzeniu (wytrzymałość resztkowa)

Fig. 4. Compressive strength of concrete based on the database [14]. Relationships for preloaded or unloaded concrete (high-temperature tests) and for concrete tested after cooling (residual strength)

### Przewodność cieplna

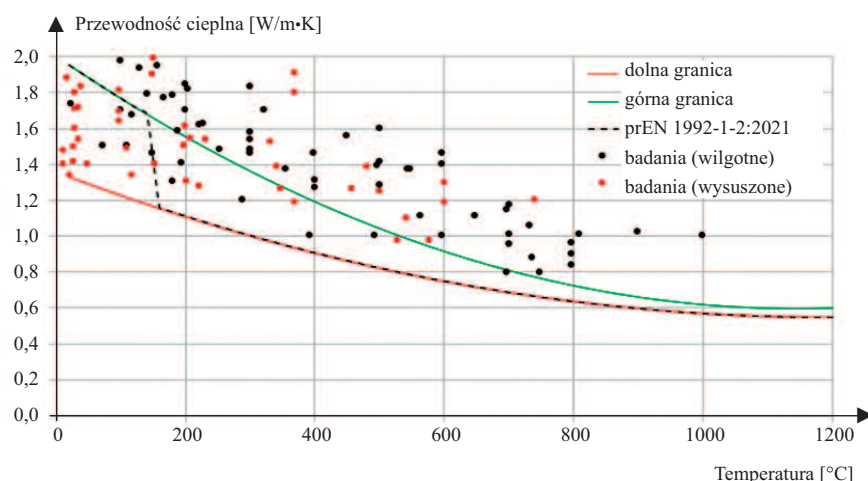
Zmiana normowego ujęcia właściwości materiałowych dotyczy również przewodności cieplnej betonu. Przewodność cieplna betonu w temperaturze 20 °C jest rezultatem przewodności wszystkich składników stwardniałego betonu, tj. kruszywa (zwykle między 2,5 a 4 W/m·K), zaczynu cementowego (ok. 0,8 W/m·K), wody 0,6 W/m·K) oraz powietrza (0,026 W/m·K). Ze względu na różnorodność mieszanek betonowych nie sposób przypisać jednej przewodności cieplnej wszystkim betonom. Z tego powodu, norma EN wyróżniała dwie granice: dolną i górną (rysunek 5), np. w Niemczech i Luksemburgu zalecano granicę górną, w Finlandii, Szwecji i Wielkiej Brytanii granicę dolną, a kraje takie jak Polska, Cypr czy Dania pozostawiały wybór projektantom. Francja była jednym z nielicznych krajów, gdzie w załączniku krajowym rekomendowano wartości pośrednie. W nowej wersji Eurokodu zaadaptowano wartości francuskie, przedstawione na rysunku 5.

Przy okazji warto wyjaśnić rozbieżność między wartościami zmierzonymi (kropki) a modelami (linie) na rysunku 5. Rozbieżność wynika z tego, że wielkości w Eurokodzie to tzw. wartości efektywne, tzn. nie są w pełni zgodne z pomiarami, ale ich stosowanie po-

zwala uzyskać zadowalający poziom zgodności między obliczeniami a wskazaniami termopar umieszczonych w elementach betonowych. Takie podejście może być nazywane inżynierskim, gdyż rozwiązanie problemu przepływu ciepła wymaga uwzględnienia czynników, które zwykle nie są znane [15]. Ponadto, dotychczasowa wersja normy wskazywała na możliwą zwiększoną przewodność cieplną betonów HSC. W nowej normie zapis ten usunięto.

### Pozostałe zmiany i dyskusja

Poza doprecyzowaniem i ujednoczeniem dotychczasowych zapisów, w prEN pojawiły się nieliczne zapisy dotyczące: (1) betonów lekkich (LWC – dotychczas w EN 1994-1-2), (2) betonów zbrojonych włóknami stalowymi (SFRC – załącznik A) oraz (3) betonów z kruszywem z recyklingu (RAC – załącznik B, przy czym udział takiego kruszywa to maksymalnie 20%, gdyż w przeciwnym wypadku wymagane są dodatkowe badania). Eurokod prEN uzupełniono o informacje dotyczące be-



**Rys. 5. Przewodność cieplna betonu w ujęciu obecnej i nowej normy oraz wyników badań (zebranych przez [21]) na próbkach wilgotnych i wysuszonych w 105 °C**

Fig. 5. Thermal conductivity of concrete in the current and new standard and the results of tests (collected by [21]) on wet and dried samples at 105 °C

tonów lekkich, które przez EN [1] były pominięte. Wprawdzie przykładowy zestaw wartości  $f_{c,0}$ , dotyczący betonów lekkich zawarto w EN 1994-1-2 (konstrukcje zespolone), ale jednocześnie wprost określono, że wartości odkształceń odpowiadających  $f_{c,0}$  powinny być uzyskiwane na podstawie badań. W wersji prEN uwzględniono wprawdzie betony lekkie, ale podano właściwości termiczne i rozszerzalność cieplną, natomiast parametry mechaniczne (zarówno wartości  $f_{c,0}$ , jak i odpowiadające im odkształcenia) powinny być ustalane na podstawie badań.

Ujęcie nowych materiałów w prEN można ocenić pozytywnie, gdyż pozwala to na optymalne gospodarowanie zasobami i rozważanie fazy studzenia [16]. Niemniej, intensywnie badane w ostatnich latach betony i zaprawy geopolimerowe [17] nie są wspomniane w nowej normie.

Modyfikacje właściwości materiałowych to niejedyne zmiany w nowelizacji Eurokodów. Wśród pozostałych elementów, które podlegały nowelizacji, można wymienić m.in. zmianę metod tabelarycznych (szczególnie istotne w kontekście ścian i słupów), szczególnie informacje dotyczące odporności ogniowej stropów płaskich, usunięcie z normy metody izotermi 500 °C i przebudowę metody strefowej. Ponadto, znowelizowana norma zawiera rekomendacje dotyczące uwzględniania mimośrodów od nierównomiernego nagrzewania (np. z jednej strony słupa), co dotychczas było jej istotnym brakiem [18].

Nowości dotyczą również odpryskiwania betonu, co zostało poruszone w innych opracowaniach [19, 20]. Nowa norma ma prostszy układ, a treści są lepiej opisane niż w [1].

## Podsumowanie

W najbliższych miesiącach możemy spodziewać się ostatecznej wersji znowelizowanej normy EN 1992-1-2: *Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe*. Nową normę można opisać jako istotny krok w kierunku ułatwienia pracy projektantów, wykonawców i odbierających ze względu na bardziej klarowne przedstawienie ograniczeń poszczególnych metod oraz redukcję zbędnych zapisów. Zmiany w kontekście właściwości materiałowych dotyczą przede wszystkim:

- betonów wysokich wytrzymałości;
- umożliwienia stosowania normy do problemów związanych z fazą studzenia pożaru;
- ujednoczenia zapisów dotyczących przewodności cieplnej;
- wprowadzenia zapisów dotyczących betonów lekkich, betonów zbrojonych włóknami stalowymi oraz betonów na kruszywach z recyklingu.

## Literatura

- [1] EN 1992-1-2:2004 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-2 – Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe. 2004.
- [2] prEN 1992-1-2:2021 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-2 – Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe. 2021.
- [3] Anderberg Y. et al. Background documents to EN 1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. 2004.

[4] CEN-CENELEC „Internal Regulations Part 2. Common Rules for Standardization Work.” 2022.

[5] Lewicki B. Polska droga do Eurokodów. Prace Instytutu Techniki Budowlanej. 2009; vol. 149, no. 1: 1 1–20.

[6] Starosolski W. Ewolucja zaleceń konstrukcyjnych w polskich normach projektowania konstrukcji żelbetonowych. Przegląd Budowlany. 2009; 1: 35 – 43.

[7] Mindeguia JC, Hager I, Pimienta P, Carré H, La Borderie C. Parametrical study of transient thermal strain of ordinary and high performance concrete. Cem Concr Res. 2013; DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.02.004.

[8] Chudzik P, Kowalski R, Abramowicz M. Strains of Concrete in RC Structures Subjected to Fire. Procedia Eng. 2017; DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.227.

[9] Seręga S. Numeryczna predykcja odporności ogniowej elementów strunobetonowych. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza. 2018, DOI: 10.12845/bitp.51.3.2018.3.

[10] Abramowicz M, Kowalski R. The influence of short time water cooling on the mechanical properties of concrete heated up to high temperature. Journal of Civil Engineering and Management. 2005, DOI: 10.1080/13923730.2005.9636336.

[11] Abrams M. Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F. ACI special publication. 1971, DOI: 10.14359/17331.

[12] Halicka A, Ogródnik P, Zegardlo B. Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. Constr Build Mater. 2013, DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2013.06.063.

[13] Bednarek Z, Krzywobłocka-Laurów R, Drzymała T. Wpływ wysokiej temperatury na strukturę, skład fazowy i wytrzymałość betonu. Zeszyty Naukowe SGSP. 2009; 38: 5 – 27.

[14] Knaack AM, Kurama YC, Kirkner DJ. Compressive Strength Relationships for Concrete under Elevated Temperatures. ACI Mater J. 2010; DOI: 10.14359/51663580.

[15] Gawin D, Pesavento F, Schrefler BA. What physical phenomena can be neglected when modelling concrete at high temperature? A comparative study. Part I: Physical phenomena and mathematical model. Int J Solids Struct. 2011, DOI: 10.1016/j.ijsolstr. 2011.03.004.

[16] Chybiński M, Polus Ł. Bending Resistance of Metal-Concrete Composite Beams in a Natural Fire. Civil and Environmental Engineering Reports. 2018, DOI: 10.2478/ceer-2018-0058.

[17] Hager I, Sitarz M, Mróz K. Fly-ash based geopolymer mortar for high-temperature application – Effect of slag addition. J Clean Prod., 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro. 2021.128168.

[18] Jaszczak B, Kuczma M, Szymkuć W. Comparison of the load-bearing capacity of reinforced concrete columns under fire conditions using the method A, zone method and isotherm 500 method. Fire Saf J. 2021, DOI: 10.1016/j.firesaf. 2021.103396.

[19] Szymkuć W, Malendowski M, Sikorska-Podyma K, Podyma J. Odpryskiwanie betonu w warunkach pożarowych. Przegląd Pożarniczy. 2021; 11: 42 – 45.

[20] Robert F, McNamee W, Borgogno W, Carrascón S, Ehrlich F, Reiners J. „Development of the spalling section in the new Eurocode prEN 1992-1-2,” in 7th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, 2022, pp. 9–14.

[21] Tao Z, Ghannam M. Heat transfer in concrete-filled carbon and stainless steel tubes exposed to fire. Fire Safety Journal. 2013; DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.07.004.

Przyjęto do druku: 19.06.2023 r.