

# APARATURA

## BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

### Metodyka badań skurczu betonu stosowana w praktyce inżynierskiej

KAJA KŁOS<sup>1</sup>, GRZEGORZ ADAMCZEWSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TPA SP. Z O.O., <sup>2</sup>POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ

**Słowa kluczowe:** technologia betonu, skurcz betonu, metody pomiaru skurczu betonu.

#### STRESZCZENIE:

Projektowanie składu mieszanki betonowej jest zagadnieniem skomplikowanym technicznie i wymaga uwzględnienia nie tylko bezpośrednich warunków eksploatacji betonu, ale także w szczególności zbadania charakterystyki reologicznej betonu w kontekście przewidywanych warunków betonowania oraz dojrzewania w rzeczywistych warunkach budowy. W artykule omówiono zjawisko skurczu betonu oraz czynniki wpływające na jego intensywność, przedstawiono także opis poszczególnych metod badawczych skurczu betonu najpowszechniej stosowanych w praktyce inżynierskiej.

#### Concrete shrinkage test methods used in engineering practice

**Keywords:** concrete technology, concrete shrinkage, concrete shrinkage measurement methods

#### ABSTRACT:

Designing a concrete mix composition is a technically complex issue and requires not only the immediate use conditions for the concrete to be considered, but also, in particular, the rheological properties of concrete to be examined within the context of the expected concreting and maturation conditions in a real construction environment. The article discusses the phenomenon of concrete shrinkage and the factors influencing its intensity. It also describes individual concrete shrinkage test methods most commonly used in engineering practice.

## 1. ZJAWISKO SKURCZU BETONU

Zapewnienie trwałości betonu jest zagadnieniem kluczowym z punktu widzenia zachowania wymaganych cech użytkowych konstrukcji oraz optymalizacji kosztów jej eksploatacji. W procesie projektowania oraz wykonywania konstrukcji z betonu częstym błędem jest pominięcie lub zbagatelizowanie problematyki związanej z technologią realizacji budowy – w szczególności dotyczy to zagadnień związanych z reologią betonu.

Skurcz betonu jest procesem reologicznym wyjątkowo niepożądanym i niemożliwym do wyeliminowania z uwagi na jego samoistny charakter. Powoduje naprężenia (często nierównomiernie rozłożone) bądź odkształcenia oraz może doprowadzić do utraty monolityczności konstrukcji, obniżenia jej trwałości i przyspieszonej degradacji. Wiąże się to z koniecznością przeprowadzenia kosztownych napraw i zabezpieczeń, a w skrajnych przypadkach nawet z wyburzeniem konstrukcji. Całkowita eliminacja zjawiska skurczu betonu nie jest możliwa, z technicznego punktu widzenia można jedynie zminimalizować jego skalę i opóźnić czas jego powstania [1].

Czynnikami wpływającymi na intensywność skurczu w betonie są: skład i właściwości mieszanki betonowej, reakcje przebiegające w zaczynie, różnice temperatury wskutek wydzielania ciepła hydratacji, kształt oraz rozmiar konstrukcji betonowej oraz w szczególności warunki dojrzewania betonu uwzględniające czynniki atmosferyczne oraz sposób pielęgnacji betonu [2].

Z uwagi na znaczenie zjawiska skurczu dla betonu na etapie projektowania podejmowane są działania mające na celu ograniczenie jego wpływu, w szczególności poprzez odpowiednie uwzględnienie:

- rodzaju i zawartości składników podstawowych mieszanki betonowej (rodzaj cementu i kruszywa, maksymalny wymiar ziaren kruszywa,  $D_{max}$ ),
- rodzaju i zawartości domieszek i dodatków,
- wartości wskaźnika woda/cement ( $w/c$ ),
- zawartości zaczynu w mieszance betonowej,
- klasy betonu,
- wymiarów i geometrii betonowanej konstrukcji/elementu,
- warunków dojrzewania i pielęgnacji betonu.

Określenie skurczu w betonie wymaga przeprowadzenia weryfikacji przebiegu tego zjawiska w czasie, przy wykorzystaniu badawczych metod laboratoryjnych oraz obliczeniowych lub specjali-

stycznych metod pomiarowych w warunkach rzeczywistych na budowie.

## 2. WYBRANE METODY BADAWCZE SKURCZU BETONU

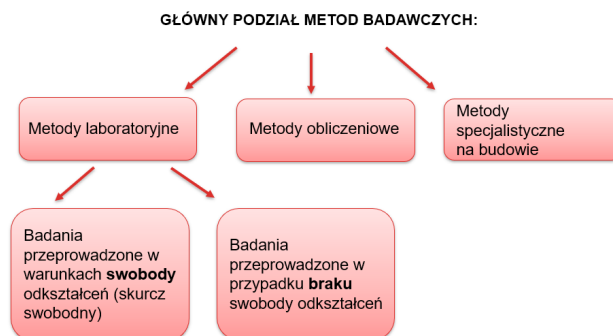
W ostatnich kilkudziesięciu latach opracowano szereg metod badawczych skurczu betonu, za pomocą których można określić intensywność oraz zakres wartości tego zjawiska w poszczególnych betonach. Niestety w aktualnie obowiązującej i wykorzystywanej przez technologów oraz projektantów normie PN-EN 206 [3] brakuje informacji na temat skurczu oraz metod badawczych z tym związanych, co w praktyce skutkuje brakiem standaryzacji.

Główne metody badawcze dotyczące skurczu betonu można podzielić na metody laboratoryjne, obliczeniowe oraz metody specjalistyczne wykorzystywane na budowach (Rys. 1).

W przypadku metod laboratoryjnych, w artykule opisano badanie skurczu betonu metodą Amslera wg PN-84/B-06714/23 [4] oraz nowe podejście do metody wg PN-EN 12390-16 [5], gdzie obie metody ukazują skurcz swobodny. Metoda Ring Test [6, 7] pozwala na sprawdzenie skurczu betonu w przypadku braku swobody odkształceń i tym samym imituje więzy wewnętrzne i zewnętrzne występujące w konstrukcjach budowlanych.

W projektach inżynierskich lub specyfikacjach technicznych wartość skurczu betonu jest obliczana według PN-EN 1992-1-1:2008 [8] (metoda obliczeniowa), co pozwala na prognozowanie wielkości odkształceń skurczowych projektowanych konstrukcji.

Metody specjalistyczne na budowie, stosowane w celu określenia skurczu betonu, obejmują zastosowanie czujników mechanicznych, elektronicznych, laserowych bądź wizyjnych. Dobrym przykładem są czujniki strunowe oraz światłowodowe, które coraz częściej wykorzystywane są na budowach.



Rysunek 1 Główny podział metod badawczych skurczu betonu

Przytoczone powyżej metody laboratoryjne znajdują się w szerokiej ofercie badań Laboratorium Badawczego TPA w Pruszkowie.

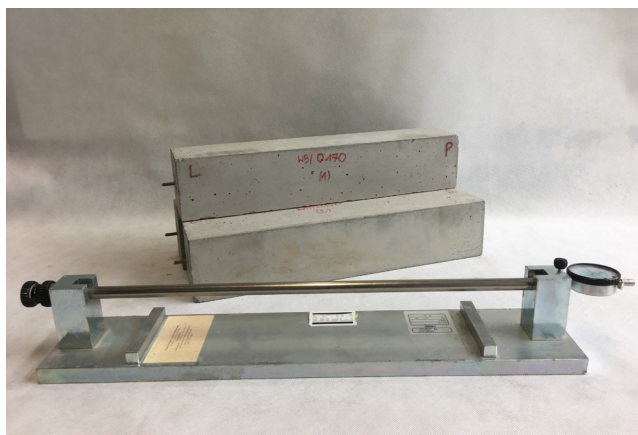
W dalszej części artykułu przedstawiono charakterystykę wybranych laboratoryjnych metod badawczych znajdujących najbardziej powszechne zastosowanie w budowlanej praktyce inżynierskiej.

## 2.1 Badanie skurczu betonu metodą Amslera [4]

Badanie polega na określeniu zmiany długości próbki, oznaczonej aparatem Amslera, w stosunku do jej długości początkowej. Badanie przeprowadza się na 3 próbkach betonowych o wymiarach 10x10x50 cm (Rys. 2), wykonanych przy użyciu kruszyw o uziarnieniu nie większym niż 16 mm, zgodnie z normą PN-84/B-06714/23 [4]. Pierwszy pomiar należy wykonać bezpośrednio po rozformowaniu próbki, następnie pomiar przeprowadza się po 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150, 210, 270 i 360 dniach.

Aparatura stosowana do badania:

- aparat Amslera wraz ze śrubą mikrometryczną o dokładności pomiaru do 0,01 mm,
- wzorzec pomiarowy.



Rysunek 2 Aparat Amslera wraz z próbkami do badania

Procedura badawcza wg [4] obejmuje:

- wypełnienie formy mieszanką betonową i zagęszczenie na stole wibracyjnym,
- umieszczenie form z belkami w komorze wilgotnościowej, zapewniającej temperaturę  $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$  oraz wilgotność powyżej 90%,
- oznakowanie w sposób trwały badanych próbek, aby za każdym razem końcówka pomiarowa była przyłożona z tej samej strony śruby mikrometrycznej aparatu Amslera,
- w okresie prowadzenia pomiarów próbki, przechowywanie jej w stałych warunkach: tempera-

tura  $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , wilgotność względna powietrza  $65 \div 75 \%$ ,

- bezpośrednio przed pomiarem, sprawdzenie czy końcówki pomiarowe na badanej próbce są czyste, po czym wykonanie odczytu na wzorcu pomiarowym (Rys. 3),
- umieszczenie próbki w aparacie Amslera, dociśnięcie bolca aparatu do kulek stalowych stanowiących końcówki pomiarowe belki i odczytanie wyniku pomiaru na podziałce śruby mikrometrycznej z dokładnością 0,01 mm (Rys. 4) w ustalonym terminie badania.

Zmianę długości próbek po  $n$  dniach oblicza się ze wzoru (1):

$$\varepsilon_n = \frac{(l_n - l_1) \cdot 1000}{500}, \quad (1)$$

gdzie:

$\varepsilon_n$  – zmiana długości próbki [mm/m],

$l_n$  – wynik pomiaru próbki po upływie  $n$  czasu w [mm], skorygowany o różnicę odczytu na wzorcu w czasie  $n$  w stosunku do odczytu na wzorcu w czasie pierwszego pomiaru,

$l_1$  – wynik pierwszego pomiaru po rozformowaniu próbki [mm].



Rysunek 3 Ustawienie aparatury do badania



Rysunek 4 Określenie zmiany długości próbki

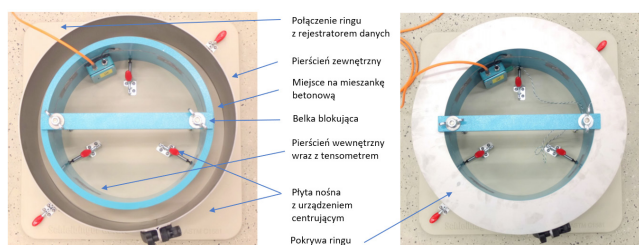


## 2.2 Badanie skurczu betonu metodą Ring Test [6, 7]

Badanie polega na określeniu maksymalnych naprężeń rozciągających dla badanej próbki oraz oszacowaniu potencjału wystąpienia spękania. Ta metoda badawcza pozwala na względne porównanie między sobą zastosowanych materiałów oraz ich proporcji, z uwagi na skurcz betonu. Badanie przeprowadza się na próbkach pierścieniowych o grubości 38 mm, wykonanych przy użyciu kruszyw o uziarnieniu nie większym niż 13 mm.

Procedura badawcza wg [6, 7] obejmuje:

- wypełnienie formy mieszanką betową i podłączenie do rejestratora danych (Rys. 5), dodatkowo zamontowanie czujnika temperatury (typ K) w celu monitorowania temperatury w mieszance betonowej,



Rysunek 5 Zastosowana aparatura do badania metodą Ring Test [7]

- w okresie prowadzenia pomiarów, przechowywanie próbek w stałych warunkach: temperatura  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , wilgotność  $50 \pm 4\%$  (Rys. 6),

- rejestrowanie odkształceń i temperatury w sposób ciągły od momentu podłączenia ringów do rejestratora w sekwencji 30 sekundowej.

Program Schleibinger [7] pozwala na stały podgląd badanych próbek zarówno w postaci danych liczbowych, jak i wykresów. Badanie trwa 28 dni, chyba że próbka ulegnie pęknięciu, wtedy badanie zostaje przerwane i odpowiednio udokumentowane.



Rysunek 6 Próbkę przechowywane w komorze klimatycznej w czasie badania

W normie [6] dostępna jest klasyfikacja, według której można oszacować potencjał wystąpienia spękania (Tab. 1) jako wysoki, umiarkowanie wysoki, umiarkowanie niski i niski. Uzależniony jest on od wartości średniej wskaźnika naprężeń ( $S$ ) oraz od czasu, w którym dana próbka pęknie ( $t_{cr}$ ), bądź od momentu zakończenia badania ( $t_r$ ).

Tabela 1 Klasyfikacja potencjału wystąpienia spękania [6]

Czas netto do pęknięcia $t_{cr}$ [dni]	Średni wskaźnik naprężenia $S$ [psi/dzień]	Średni wskaźnik naprężenia $S$ [MPa/dzień]	Potencjał wystąpienia spękań
$0 < t_{cr} \leq 7$	$S \geq 50$	$S \geq 0,34$	Wysoki
$7 < t_{cr} \leq 14$	$25 \leq S < 50$	$0,17 \leq S < 0,34$	Umiarkowanie wysoki
$14 < t_{cr} \leq 28$	$15 \leq S < 25$	$0,10 \leq S < 0,17$	Umiarkowanie niski
$t_{cr} > 28$	$S < 15$	$S < 0,10$	Niski

Tempo przyrastania naprężeń  $q$  dla danej próbki oblicza się ze wzoru (2):

$$q = \frac{G \cdot |\alpha_{avq}|}{2 \cdot \sqrt{t_r}}, \quad (2)$$

gdzie:

$q$  – tempo przyrastania naprężeń w próbce [MPa/dzień],

$G$  – 72,2 [GPa],

$|\alpha_n|$  – wartość absolutna ze średniego współczynnika odkształcenia w próbce [(m/m) / dzień<sup>1/2</sup>],

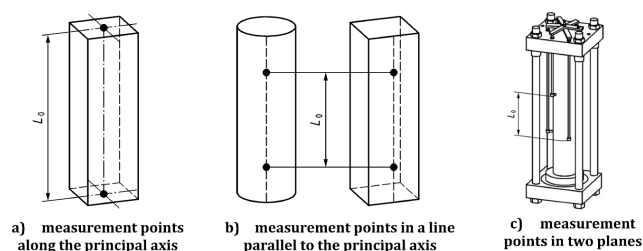
$t_r$  – czas, w którym dana próbka pęknie bądź czas w momencie zakończenia badania dla próbki [dni],

$S$  – średni wskaźnik naprężenia dla trzech próbek:  $(q_1 + q_2 + q_3) / 3$  [MPa/dzień].

## 2.3 Oznaczenie skurczu betonu wg PN-EN 12390-16 [5]

W roku bieżącym pojawiła się nowa norma europejska PN-EN 12390-16 [5]. Cała procedura badawcza opisana w tej normie pozwala na obliczenie wartości skurczu całkowitego, dodatkowo przewidziana jest też osobna metodyka badania dotycząca skurczu autogenicznego i skurczu od wysychania (załącznik A). Do badania przewidziane są przynajmniej dwie próbki o kształcie cylindrycznym lub prostopadłościennym, ograniczone stosunkiem długości próbki  $L$  do wymiaru  $d$ , określonego jako średnica lub długość boku próbek w przedziale  $2 \leq L/d \leq 7$ , wykonanych przy użyciu

kruszyw o uziarnieniu nie większym niż 32 mm. W okresie prowadzenia pomiarów próbki powinny być przechowywane w komorze klimatycznej w warunkach: temperatura  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , wilgotność  $50 \div 70 \pm 5\%$ . Punkty pomiarowe mogą być umieszczone w różnych miejscach badanej próbki: określone wzdłuż głównej osi próbki, wzdłuż linii prostej leżącej na bocznej powierzchni próbki lub równoległe do głównej osi oraz punkty pomiarowe w dwóch płaszczyznach (Rys. 7).



Rysunek 7 Poszczególne punkty pomiarowe [5]

Poszczególne dni odczytu zmiany długości próbek powinny zależeć od ustalonego zakresu badania oraz od rodzaju badanego betonu (nie jest powiedziane, kiedy dokładnie należy zakończyć badanie). Na ogół obserwację skurczu prowadzi się po 1, 7, 14, 28 i 56 dniach dojrzewania betonu. Skurcz całkowity próbki, wyrażony jako  $10^{-6}$ , oblicza się ze wzoru (3):

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = (l(t_0) - l_{cs}(t)) / L_0, \quad (3)$$

gdzie:

$L_0$  – odległość między punktami pomiarowymi [mm],

$l(t_0)$  – wynik pierwszego pomiaru po rozformowaniu próbki [mm],

$l_{cs}(t)$  – wynik pomiaru próbki po upływie  $t$  czasu [mm],

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  – skurcz całkowity po upływie  $t$  czasu.

#### 2.4 Skurcz betonu wg Eurokodu 2 [8, 1]

W projektach inżynierskich lub specyfikacjach technicznych wartość skurczu betonu jest obliczana według PN-EN 1992-1-1:2008 [8]. Pozwala to na prognozowanie wielkości odkształceń skurczowych projektowanych konstrukcji, a w przypadku oznaczania rzeczywistych odkształceń projektowanego betonu na belkach Amslera – daje możliwość porównania wartości zmierzonych i obliczonych [1].

W obliczeniach wg Eurokodu 2 [8] wpływ na wartość skurczu ma m.in.: wytrzymałość betonu na

ściskanie, rodzaj cementu (S, N lub R) oraz wilgotność względna otoczenia. W metodzie analitycznej nie bierze się pod uwagę rodzaju i maksymalnego uziarnienia zastosowanego kruszywa, domieszki, współczynnika w/c oraz ilości cementu.

Całkowity skurcz betonu ( $\varepsilon_{cs}$ ) składa się z dwóch składników, odkształcenia skurczowego spowodowanego wysychaniem i autogenicznego odkształcenia skurczowego. Zostało to opisane wzorem (4) [8]:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}, \quad (4)$$

gdzie:

$\varepsilon_{cs}$  – całkowite odkształcenie skurczowe,

$\varepsilon_{cd}$  – odkształcenie skurczowe spowodowane wysychaniem,

$\varepsilon_{ca}$  – odkształcenie skurczu autogenicznego.

Odkształcenie skurczowe spowodowane wysychaniem w zależności od czasu oblicza się według wzoru 5 [8]:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}, \quad (5)$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{t - t_s + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}}, \quad (6)$$

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot V_c}{A_{out}}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot (220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right) \cdot \beta_{RH} \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right], \quad (9)$$

gdzie:

$t$  – wiek betonu [w dniach],

$t_s$  – okres pielęgnacji betonu [w dniach],

$h_0$  – miarodajny wymiar przekroju [mm],

$A_c$  – pole przekroju betonu [mm<sup>2</sup>],

$V_c$  – objętość bryły betonu [mm<sup>3</sup>],

$A_{out}$  – zewnętrzna powierzchnia betonu, podlegająca wysychaniu [mm<sup>2</sup>],

$u$  – obwód części przekroju wystawionej na wysychanie [mm],

$k_h$  – współczynnik zależny od miarodajnego wymiaru  $h_0$  według normy [8],

$\alpha_{ds1}$  – współczynnik zależny od rodzaju cementu,

$\alpha_{ds2}$  – współczynnik zależny od rodzaju cementu,

$f_{cm}$  – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie [MPa],

$f_{cm0} = 10$  [MPa],

$RH$  – wilgotność względna otoczenia [%],

$RH_0 = 100$  [%].

Odształcenie skurczu autogenicznego określa wzór 10 [8]:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty), \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}, \quad (11)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5}), \quad (12)$$

gdzie:

$f_{ck}$  – charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie [MPa],

$t$  – wiek betonu [w dniach].

### 3. PODSUMOWANIE

Kształtowanie trwałości betonu jest zagadnieniem trudnym technicznie i odpowiedzialnym z uwagi na konieczność spełnienia przez beton

wymagań eksploatacyjnych w okresie użytkowania. Podejście takie wymaga uwzględnienia wpływu różnych czynników na jak najwcześniejszym etapie projektowania i wykonywania konstrukcji i elementów z betonu. Na podstawie doświadczeń Laboratorium Badawczego TPA w Pruszkowie, w artykule przedstawiono charakterystykę wybranych, najbardziej przydatnych i powszechnie stosowanych laboratoryjnych metod badania skurczu betonu. Badania te znajdują zastosowanie w praktyce inżynierskiej jako przydatne narzędzie kształtowania właściwości betonu w celu zapewnienia trwałości i bezpieczeństwa na użytkowym etapie życia obiektu.

### LITERATURA

- [1] Kłos K., Kluczowe właściwości betonu płyty dennej w technologii „białej wanny”, Praca dyplomowa magisterska, Warszawa 2017.
- [2] Kłos K., Jackiewicz-Rek W., Konopska-Piechurska M., Łukowski P., Skurcz betonu stosowanego w technologii „białej wanny”, Monografie Technologii Betonu, X Konferencja Dni Betonu, Wisła 2018.
- [3] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton: wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [4] PN-84/B-06714/23 Oznaczanie zmian objętościowych metodą Amslera.
- [5] PN- EN 12390-16:2020-03 Badania betonu. Część 16: Oznaczanie skurczu betonu.
- [6] ASTM C1581-04 Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage.
- [7] Schleibinger ASTM C1581 Shrinkage-Ring, 2017.
- [8] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.