

Dr inż. Małgorzata Lenart

Politechnika Krakowska

Dr inż. Maciej Gruszczyński

Politechnika Krakowska,

Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce

Wpływ dodatku polimerowego na przebieg odkształceń skurczowych drobnoziarnistych kompozytów cementowych

Effect of polymer additive on the course of shrinkage deformation of fine-grained cementitious composites

Streszczenie

W artykule zostaną przedstawione wyniki badania skurczu i innych wybranych właściwości kompozytów cementowych modyfikowanych dodatkiem polimerowym a pielęgnowanych na trzy sposoby: brak dodatkowej ochrony przed wysychaniem, pokrycie próbek preparatem pielęgnacyjnym oraz przykrycie próbek folią. Dodatek polimerowy, poprzez swoje działanie strukturalne, spowodował upłynnienie świeżych kompozytów o 25% w odniesieniu do kompozytu wzorcowego. Z kolei sam dodatek nie spowodował znaczących zmian wytrzymałości na ściskanie i zginanie, natomiast, co jest wiadome, znaczący wpływ na te parametry miał sposób pielęgnacji. Dodatek polimerowy, poprzez rozłożenie w strukturze blokujące odparowanie wody z kapilar, spowodował zmniejszenie skurczu o 30% a przy synergicznym wpływie dodatku i pielęgnacji próbek pod folią zmniejszenie skurczu całkowitego wyniosło 65%.

Abstract

The article will present the results of the study of shrinkage and other selected properties of cement composites modified with a polymer additive and cured in three ways: no additional protection against drying, covering the samples with a curing agent and covering the samples with foil. The polymer additive, through its structural effect, caused the fresh composites to liquefy by 25% in relation to the reference composite. In turn, the additive itself did not cause significant changes in

compressive and flexural strength, but, as is known, the method of curing had a significant effect on these parameters. The polymer additive, through its distribution in the structure blocking the evaporation of water from the capillaries, caused a reduction in shrinkage by 30%. And with the synergistic effect of the additive and curing the samples under the foil, the reduction in total shrinkage was 65%.

1. Wprowadzenie

Współcześnie najpowszechniej stosowanym materiałem budowlanym jest beton cementowy. Posiada on wiele zalet, m.in. elastyczność w formowaniu oraz bardzo dobrą wytrzymałość na ściskanie. Jednakże nie jest on pozbawiony wad do których należy zaliczyć m.in. bardzo niską wytrzymałość na rozciąganie, zginanie oraz niekorzystne zmiany objętościowe takie jak skurcz [1, 2]. Oczywiście wady te można ograniczać w różnoraki sposób np. poprzez zastosowanie zbrojenia rozproszonego (włókien), zastosowanie odpowiedniego składu kompozytu np. poprzez użycie dodatków polimerowych a przede wszystkim poprzez zastosowanie odpowiedniej pielęgnacji kompozytu wbudowanego w konstrukcję [3].

Celem niniejszych badań było porównanie wpływu modyfikacji kompozytu cementowego poprzez zastosowanie dodatku polimerowego (dozowanego na dwóch poziomach) oraz równoczesnego wpływu różnego typu pielęgnacji próbek badawczych na przebieg sumarycznego skurczu rejestrowanego w ciągu 90 dni.

2. Rodzaje zmian objętościowych kompozytów cementowych

Zmiany objętościowe betonu nieobciążonego możemy podzielić na autogeniczne, do których zaliczyć można: skurcz chemiczny (wynikający ze zmniejszenia objętości produktów reakcji hydratacji w stosunku do objętości substratów) oraz skurcz od samoosuszania (polegający na pobieraniu wody z porów kapilarnych przez hydratujące ziarna cementu) [4, 5]. Do zmian autogenicznych należy zaliczyć również pęcznienie autogeniczne spowodowane np. zbyt dużą zawartością siarczanów, wolnego CaO, MgO w cemencie czy też reakcją alkalia – krzemionka.

Z kolei do zmian objętościowych spowodowanych przez czynniki zewnętrzne należy zaliczyć: skurcz od wysychania ewentualnie pęcznienie kompozytu w środowisku wodnym wynikające z absorpcji wody, skurcz spowodowany ekstremalnym spadkiem temperatury jak również ekspansja spowodowana skrajnym wzrostem temperatury [6]. Do zmian objętościowych spowodowanych przez czynniki zewnętrzne należy również zaliczyć zmiany wynikające z reakcji chemicznych pomiędzy agresywnym środowiskiem zewnętrznym a związkami chemicznymi zawartymi w kompozycie cementowych np. skurcz od karbonatyzacji czy też pęcznienie spowodowane korozją siarczanową [7, 8]. Wpływ agresywnego środowiska zewnętrznego na kompozyt cementowy jest uwzględniony w klasach ekspozycji wymienionych w normie EN 206 „Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność”.

Wśród zmian objętościowych mających istotne znaczenie praktyczne należy wymienić również skurcz plastyczny, który zachodzi w betonie ułożonym na miejscu betonowania a będącym w stanie plastycznym. Skurcz ten częściowo związany jest ze zmianami autogenicznymi a częściowo z czynnikami zewnętrznymi jak odparowywanie wody z powierzchni świeżo ułożonego betonu i/lub zasysania wody przez chłonne podłoże [9].

3. Czynniki wpływające na odkształcenia skurczowe

Jak już wcześniej wspomniano wielkość odkształceń skurczowych zależy zarówno od składu materiałowego kompozytu jak również od środowiska zewnętrznego, w którym eksploatowany jest dany kompozyt cementowy. Wśród czynników materiałowych należy wymienić: wielkość współczynnika w/c (im wyższy tym większy skurcz), ilość i wielkość kruszywa zawartego w kompozycie (im więcej kruszywa – zarówno ilościowo jak i wielkościowo w kompozycie – tym mniejszy skurcz) ilości i rodzaju cementu (im więcej cementu i im bardziej jest on miałki tym większy skurcz), rodzaju i ilości domieszek i/lub dodatków zastosowanych w kompozycie (np. domieszki przeciwskurczowe, dodatki polimerowe, włókna) [10].

Jak zostało udowodnione dodatki polimerowe powodują korzystne zmiany w strukturze modyfikowanego kompozytu. Zastosowanie dodatków polimerowych powoduje:

- powstanie ciągłej błony przenikającej matrycę cementową,
- zmiany wielkości i typu kryształów w spoiwie cementowym,
- zmniejszenie porowatości kompozytu na skutek ograniczenia ilości wody zarobowej.

Dodatkowo obecność polimeru powoduje istotny wpływ na poprawę budowy warstwy kontaktowej zaczynu cementowego z kruszywem. W kompozytach polimerowo – cementowych przestrzeń między ziarnami cementu jest wypełniona ukierunkowanymi cząsteczkami polimeru, co zwiększa powierzchnię kontaktu matrycy z kruszywem i w efekcie powoduje zagęszczenie strefy międzyfazowej.

Wytworzona błona polimerowa oprócz kruszywa otacza także ziarna cementu. Spowalnia tym samym proces jego hydratacji. Właściwość ta powoduje opóźnienie rozwoju wytrzymałości kompozytu na ściskanie, ale z drugiej strony pozwala na obniżenie wartości skurczu. Innym korzystnym efektem wprowadzenia do kompozytu cementowego dodatku polimeru jest jego zdolność do mostkowania mikrorys, co jest korzystne ze względu na redukcję skurczu i poprawę trwałości

Skurcz całkowity zależy również od zewnętrznych warunków atmosferycznych tj. wilgotności względnej, temperatury otoczenia, prędkości wiatru oraz związanej z tym prowadzonej pielęgnacji betonu. Zależy on również od wieku betonu, ponieważ znacząco maleje on wraz z upływem czasu [7]. Skurcz zależy również od wymiaru elementu betonowego, im moduł powierzchniowy elementu (iloraz powierzchni elementu betonowego narażonego na oddziaływania zewnętrzne do jego objętości) jest większy tym skurcz też jest większy [11].

4. Metody oznaczania skurczu kompozytów cementowych

Oznaczanie wielkości skurczu jest od dawna w obszarze zainteresowań badaczy. W związku z tym istnieje wiele metod badawczych skurczu, wśród których można przykładowo wymienić:

- Ring Test stosowany w metodzie zgodnej z ASTM C1581 oraz AASHTO T 334-08 (2020),
- Pomiar miernikiem odległości (measurement gauge) stwardniałych próbek stosowane m.in. w: normie EN 12390-16, w metodzie Amslera (PN-84/B-06714/23), w metodzie Graff-Kaufmana (PN-84/B-06714/24), ASTM C157 i wielu innych,

- Pomiar rynnami skurczowymi – metoda stosowana pierwotnie w normie OENORM B 3329, można w niej mierzyć zmiany objętościowe począwszy od ułożenia materiału w rynnie aż do późniejszego skurczu od wysychania,
- Bending drain test stosowany do pomiaru stabilności wymiarowej materiałów na podkłady podłogowe na bazie m.in. cementu, zgodnie z EN 13892-9. W metodzie tej można również określić wpływ zmiany temperatury na stabilność wymiarową (wpływ ogrzewania podłogowego).
- Pomiar wczesnych zmian skurczowych metodą stożka skurczowego lub metodą Thin-Layer-Measurement System zastosowanych w przyrządach produkowanych przez firmę Schleibinger,
- Pomiar skurczu chemicznego metodami opisanymi np. w [12].

Podsumowując można zauważyć, że jest wiele czynników wpływających na skurcz kompozytów cementowych, co więcej różne metody badawcze, mające swoje wady i zalety, określają różny rodzaj skurczu w zależności od zastosowanych procedur pomiarowych. W związku z tym do badań własnych zastosowano system skurczowych rynien pomiarowych ponieważ w największym stopniu mierzą one całkowity skurcz występujący w badanym kompozycie cementowym oraz wyniki badań są rejestrowane automatycznie, bez udziału człowieka z założoną wcześniej częstotliwością, a także wyniki te rejestrowane są bezpośrednio w milimetrach na metr długości próbki.

5. Badania własne

Celem badań własnych było określenie wpływu dodatku polimerowego dozowanego na dwóch poziomach na przebieg odkształceń skurczowych w przeciągu 90 dni prowadzenia badania. Skurcz oznaczano w rynnach skurczowych według własnej procedury badawczej, bazującej na oryginalnej wymienionej w punkcie 4. Dodatkowo badano wpływ rodzaju pielęgnacji na przebieg wspomnianych odkształceń skurczowych. Zastosowano trzy warianty pielęgnacji próbek: A – brak dodatkowej ochrony przed wysychaniem, co jest równoważne z brakiem pielęgnacji, B – pielęgnacja preparatem pielęgnacyjnym natryskiwanym na próbki, C – ochrona standardową folią przed wysychaniem próbek.

5.1. Zastosowane materiały i przebieg badań

Do badań zastosowano cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 32,5R spełniający wymagania normy PN-EN 197-1. Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego w cemencie wynosiła 21-35% zgodnie z deklaracją producenta. Wytypowano ten cement do badań ponieważ z jednej strony charakteryzuje się on dobrymi parametrami technologicznymi, jest łatwo dostępny a przede wszystkim cement ten ma niższy ślad węglowy niż cement portlandzki czysto klinkierowy, stąd jest pro-ekologiczny, bardziej „przyjazny” środowisku.

Do badań jako kruszywo drobne zastosowano piasek kwarcowy otoczakowy o uziarnieniu przedstawionym w tablicy 1.

Tablica 1. Uziarnienie piasku zastosowanego do badań.

Frakcja	0-0,125	0,125-0,25	0,25-0,5	0,5-1,0	1,0-2,0	2,0-4,0
Zawartość [%]	2	16	44	22	11	5

Jako dodatek polimerowy zastosowano karboksylowany lateks stearynowo-butadienowy w postaci emulsji polimerowo – wodnej. Dodatek był w postaci białej, nieprzezroczystej cieczy o gęstości ok. 1,03 kg/dm³. Dodatek dodawano do wody zarobowej stosując prostą podmianę tj. zastępując odpowiednią ilość wody przez emulsję polimerową. Dodatek dozowano na dwóch poziomach stosując proporcje mieszania wody do emulsji polimerowej wynoszące 1:3 oraz 1:1.

W trakcie badań wykonano trzy rodzaje zapraw: M1 – wzorcową, M2 – zaprawę wykonaną na cieczy zarobowej zawierającej 30% emulsji polimerowej oraz M3 – zaprawę zawierającą 50% emulsji polimerowej w cieczy zarobowej. Wszystkie zaprawy miały stały stosunek cieczy zarobowej do cementu wynoszący 0,5, a ich skład stanowił modyfikację zaprawy normowej zgodnej z EN 196-1.

Bezpośrednio po wymieszaniu składników, poszczególne zaprawy zostały umieszczone w rynnach do pomiaru skurczu. Odczyty zmian objętościowych zapraw umiejscowionych w rynnach były rejestrowane i zapisywane automatycznie przez okres 90 dni.

W celu określenia wpływu pielęgnacji na wielkość mierzonych zmian objętościowych każdą z badanych zapraw umieszczono w trzech różnych rynnach pomiarowych, które zabezpieczono w różny sposób. Pierwszą pozostawiono odkrytą (brak dodatkowego zabezpieczenia przed wysychaniem), drugą pokryto preparatem pielęgnacyjnym a trzecią zabezpieczono folią.

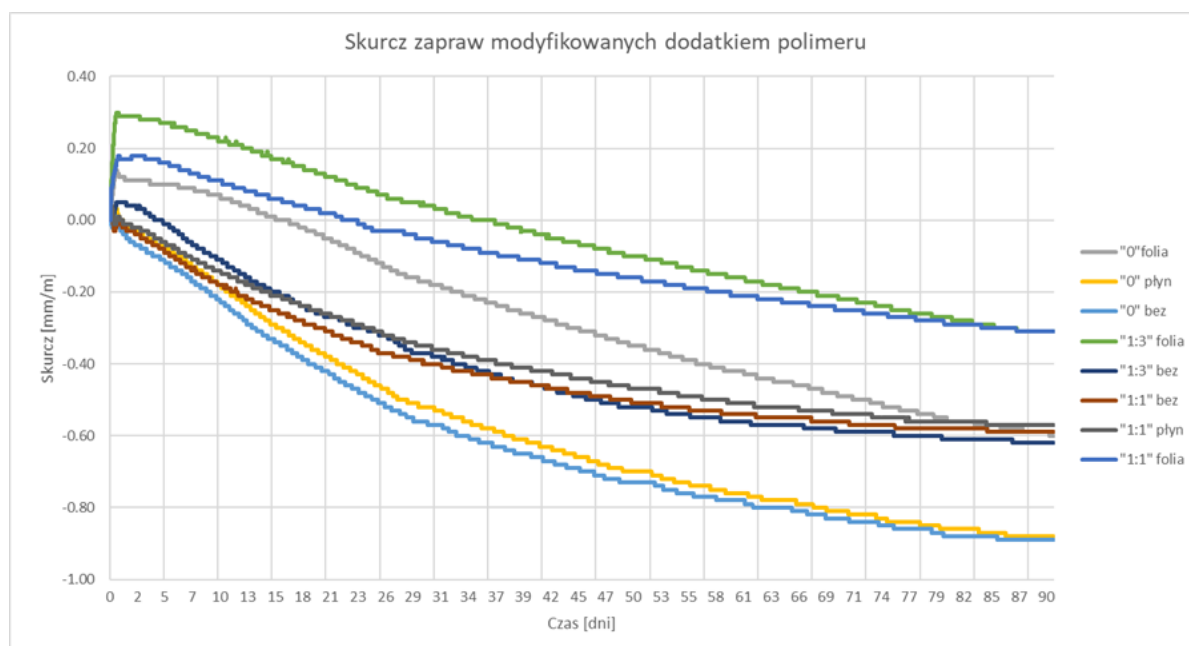
W trakcie badań monitorowano temperaturę i wilgotność otoczenia, temperatura praktycznie była niezmienna i wynosiła 20÷21oC a wilgotność względna otoczenia wahała się w granicach 50÷60% przez cały okres prowadzenia badania. Na rys. 1 przedstawiono widok stanowiska badawczego.



Rys. 1. Widok badanych próbek i stanowiska badawczego.

5.2. Wyniki i analiza uzyskanych wyników badań

Analizując wykresy przedstawione na rysunku 2 można zauważyć, że w każdej z badanych zapraw zaobserwowano zwiększenie wymiarów w początkowym okresie badań. Największe te zmiany zaobserwowano dla zapraw pielęgnowanych pod folią i wynosiły one: +0,12 mm/m dla zaprawy wzorcowej, +0,18 mm/m dla zaprawy z 50% zawartością polimeru oraz +0,30 mm/m dla zaprawy z 30% zawartością polimeru.



Rys. 2. Wykres zmian skurczowych badanych zapraw w okresie 90 dni.

Po 90 dniach badania można zauważyć, że uzyskane wyniki pogrupowały się w trzy obszary. Pierwszy z nich (największy skurcz najniższe wykresy w 90-tym dniu badania na rys. 2) obejmuje przebieg skurczu dla zapraw wzorcowych bez pielęgnacji (-0,89 mm/m) oraz zaprawy wzorcowej pokrytej preparatem pielęgnacyjnym (-0,88 mm/m). Jak można zauważyć wpływ pielęgnacji preparatem pielęgnacyjnym nie jest aż tak znaczący jak wpływ pielęgnacji pod folią. Niemniej jednak jego wpływ jest zauważalny i znaczący zwłaszcza w pierwszym okresie od ułożenia świeżych zapraw w rynnach.

Trzeci obszar (najwyższe wykresy w 90-tym dniu badania na rys.2) obejmuje przebieg skurczu obu zapraw modyfikowanych polimerem, zarówno tej z 30 % jak i 50% zawartością polimeru pielęgnowanych pod folią. Ich skurcz po 90 dniach badania wyniósł -0,31 mm/m. Analizując przebieg krzywej skurczowej zaprawy z 50% zawartością polimeru można zauważyć, że ma ona łagodniejszy przebieg, co będzie skutkowało najmniejszym skurczem w dłuższym okresie czasu (w którym nie prowadzono już pomiarów).

W drugim obszarze wyników (środkowe wykresy w 90-tym dniu badania przedstawione na rys. 2) znalazły się wszystkie pozostałe próbki modyfikowane polimerem a pielęgnowane preparatem lub nie zabezpieczone przed odparowywaniem. Ich skurcz wyniósł od -0,57 mm/m dla zaprawy modyfikowanej 50% zawartością polimeru i pielęgnowanej preparatem pielęgnacyjnym do -0,62 mm/m dla zaprawy z 30% zawartością polimeru i nie poddanej żadnej pielęgnacji.

W tym obszarze znalazła się również zaprawa wzorcowa pielęgnowana pod folią. Analizując przebieg zmian objętościowych dla tego przypadku warto zauważyć, że po zaformowaniu zaprawa ta nie wykazywała ujemnych zmian (skurczu) przez długi okres czasu tj. przez 15 dni, czyli zabezpieczenie folią przed odparowaniem wody spełniło oczekiwania. Niemniej jednak przebieg wykresu dla tej próbki ma dość gwałtowny spadek, co pozwala szacować, że w dłuższym okresie czasu (wykraczającym poza czas trwania badania) skurcz dla tego przypadku będzie znacząco wyższy niż dla próbek modyfikowanych polimerem.

6. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując można zauważyć synergiczny wpływ zarówno pielęgnacji kompozytu jak i jego modyfikacji polimerem na skurcz oznaczony po 90 dniach twardnienia. Najwyższym skurczem, zgodnie z oczekiwaniami, wykazały się zaprawy niemodyfikowane i nie pielęgnowane lub pielęgnowane poprzez pokrycie preparatem pielęgnacyjnym. Skurcz ten wyniósł -0,89 mm/m. Kolejnym poziomem skurczu wykazały się kompozyty modyfikowane polimerem na różnym poziomie, pielęgnowane preparatem oraz nie pielęgnowane. Ich skurcz wynosił od -0,57 mm/m do -0,62 mm/m, co stanowi od 64% do 70% skurczu zaprawy wzorcowej niemodyfikowanej i nie pielęgnowanej. Najmniejszym skurczem wykazały się zaprawy modyfikowane polimerami oraz pielęgnowane pod folią. Ich skurcz po 90 dniach wyniósł -0,31 mm/m, co stanowi ok. 35% skurczu zaprawy niemodyfikowanej i nie pielęgnowanej.

W związku z tym na podstawie zrealizowanego programu badawczego można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Dodatek karboksylowanego lateksu stearynowo-butadienowego powoduje zmniejszenie zmian skurczowych o ok. 30% w odniesieniu do zaprawy wzorcowej niemodyfikowanej, określonych po 90 dniach twardnienia.
2. Po 90 dniach twardnienia kompozytów nie zauważono dużych, znaczących zmian w poziomie oznaczonego skurczu dla zapraw modyfikowanych 30% i 50% zawartością karboksylowanego lateksu stearynowo-butadienowego.
3. Synergiczne oddziaływanie pielęgnacji pod folią oraz modyfikacji polimerem spowodowało zmniejszenia zmian skurczowych określonych po 90 dniach twardnienia aż o 65% w odniesieniu do zaprawy wzorcowej niepielęgnowanej.

7. Literatura

- [1] Dadd L., Visintin P., Bennett B., Xie T., 2025. Characterisation of shrinkage, carbonation and chloride penetration in multi-generation recycled aggregate concrete at equivalent compressive strengths, *Constr. Build. Mater.* 474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141111>.
- [2] Lenart M., Gruszczyński M., 2019. The research of mortars shrinkage made with reclaimed aggregate, *Procedia Struct. Integr.* 23, 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.072>.
- [3] Pichler C., Schmid M., Traxl R., Lackner R., 2017. Influence of curing temperature dependent microstructure on early-age concrete strength development, *Cem. Concr. Res.* 102, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.022>.

- [4] Zhang N., Yang Q., Li D., Yu Y., Jiang X., Xu J., 2025. Autogenous and drying shrinkage properties of precast recycled aggregate concrete, *Case Stud. Constr. Mater.* 22, e04355. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04355>.
- [5] Shen D., Jiang J., Shen J., Yao P., Jiang G., 2016. Influence of curing temperature on autogenous shrinkage and cracking resistance of high-performance concrete at an early age, *Constr. Build. Mater.* 103, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.039>.
- [6] Li Q., Xia H., Yuan G., Shu Q., 2022. Experimental study on the free expansion deformation of concrete during the cooling process after being heated to high temperature, *Constr. Build. Mater.* 337, 127617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127617>.
- [7] Neville A.M., 2012. *Properties of concrete* (5th edition), Pearson.
- [8] Song Y., Damiani R.M., Lange D.A., 2024. Continuous monitoring of the moisture, shrinkage, and carbonation effects on foam concrete performance, *Constr. Build. Mater.* 411, 134185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134185>.
- [9] Nasir M., Alimi W.O., Adeoluwa Oladapo E., Imran M., Kazmi Z.A., 2023. Behavior of drying and plastic shrinkage of Portland cement concrete prepared and cured under harsh field, *Dev. Built Environ.* 16, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100252>.
- [10] Wang J., Zhao C., Li Q., Song G., Hu Y., 2025. The synergistic effect of recycled steel fibers and rubber aggregates from waste tires on the basic properties, drying shrinkage, and pore structures of cement concrete, *Constr. Build. Mater.* 470, 140574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140574>.
- [11] Lenart M., 2015. Assessment of mortar shrinkage in aspect of organic and inorganic modifiers use, *Procedia Eng.*, 108, 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.152>.
- [12] Holt E.E., 2001. Early age autogenous shrinkage of concrete, *VTT Publ.* 2–184.