

Wpływ domieszek na ślad węglowy betonu

Streszczenie

Domieszki mogą odegrać znaczącą rolę w obniżaniu śladu węglowego betonu. W artykule przedstawiono wpływ domieszek na emisyjność betonu, uwzględniając kilka aspektów zagadnienia: emisyjność samych domieszek, możliwości optymalizacji składu mieszanki betonowej dzięki domieszkom, a także modyfikację właściwości betonu, skutkującą ograniczeniem śladu węglowego.

Słowa kluczowe:

beton, domieszki, ślad węglowy

Abstract

Admixtures can play a significant role in decreasing the concrete's carbon footprint. The paper presents the effect of admixtures on the concrete's CO₂ emission, with regard to several aspects of the problem: CO₂ emission of admixtures themselves, possibilities of optimizing the concrete's composition by the admixtures and the modification of concrete's performance towards the reduction of the carbon footprint.

Keywords:

admixtures, carbon footprint, concrete

Zgodnie z definicją podaną w Normie Europejskiej PN-EN 934-2 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie” domieszka to materiał dodawany podczas wykonywania mieszanki betonowej w ilości nieprzekraczającej 5% masy cementu w betonie, w celu poprawy właściwości mieszanki betonowej i/lub stwardniałego betonu. Ze względu na ogromny potencjał modyfikacji betonu, domiesz-

ki stanowią obecnie jego nieodłączny składnik, umożliwiając dostosowanie tego tworzywa do zmieniających się i wciąż rosnących wymagań współczesnego budownictwa (tabl. 1).

Rocznie w Europie zużywa się ponad 1,5 miliona ton domieszek do betonu [1]. Pod względem ilościowym zdecydowanie dominującą pozycję na rynku zajmują środki wpływające na konsystencję mieszanki betonowej, to znaczy plastyfikatory i superplastyfikatory – 80% (rys. 1).

Zgodnie z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu, w ciągu najbliższych 10 lat w Europie powinno nastąpić zmniejszenie emisji dwutlenku węgla równoważne 55% ilości CO₂ wyemitowanego w roku 1990, a celem na rok 2050 jest osiągnięcie pełnej neutralności klimatycznej. Podstawowym wyzwaniem współczesnej inżynierii materiałów budowlanych staje się więc redukcja śladu węglowego stosowanych tworzyw, spośród których najistotniejszy jest niewątpliwie beton.

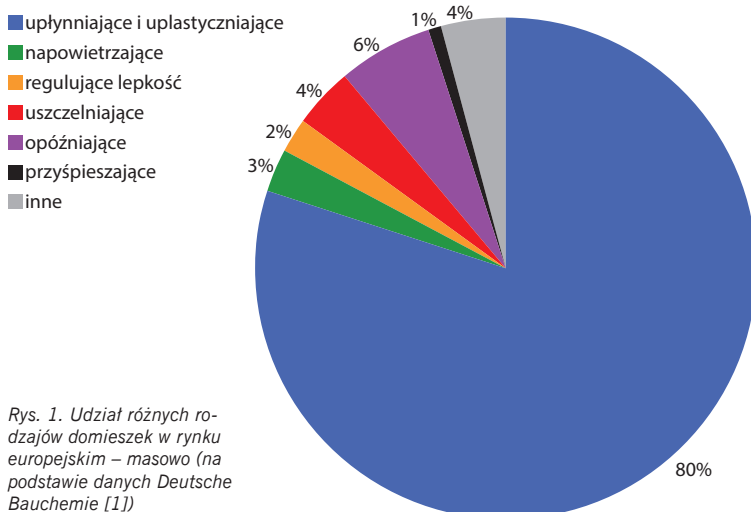
Domieszki, jako integralny składnik betonu, mogą odegrać znaczącą rolę w obniżaniu jego śladu węglowego. Przy rozpatrywaniu wpływu domieszek na emisyjność betonu konieczne jest uwzględnienie kilku aspektów tego zagadnienia. Należy wziąć pod uwagę zarówno emisyjność samych domieszek jako produktów przemysłowych, jak i możliwości optymalizacji składu mieszanki betonowej dzięki wprowadzeniu domieszek, a także wpływ tych modyfikatorów na właściwości betonu, skutkujący zmianami śladu węglowego.

Ślad węglowy domieszek do betonu

Domieszki do betonu są w zdecydowanej większości produktami zaawansowanej syntezy chemicznej i zawierają złożone związki organiczne. W związku z tym, ślad węglowy wynikający z ich procesu produkcyjnego jest raczej wysoki, jakkolwiek dostępne dane dotyczące emisyjności są bardzo rozbieżne. Według niektórych oszacowań ślad węglowy domieszki określa się średnio na około 200 do 220 kg CO₂/t [2]. Inne wyliczenia są znacznie wyższe, na przykład według Europejskiej Federacji Producentów Domieszek (EFCA) ślad ten wynosi nawet do 1800 kg CO₂/t [3], a według innych badań 1165 kg CO₂/t [4]. Raport opublikowany przez Chalmers University [5] określa emisyjność polikarboksylianowych domieszek upłynniających jako 690 kg CO₂/t, środków napowietrzających jako 860 kg CO₂/t, a domieszek przyspieszających wiązanie i twardnienie beton jako 1200 kg CO₂/t. Pomimo wyżej przedstawionych, względnie wysokich wartości, udział domieszek w śladzie węglowym betonu jest ponadczterdziestokrotnie mniejszy niż cementu (rys. 2). Wynika to z faktu, że są one wprowadzane do mieszanki betonowej w bardzo małych ilościach, z definicji do 5% masy cementu, a zwykle poniżej 1% lub nawet 0,5%. Z tego względu bezpośredni wkład domieszek do

Tabl. 1. Efekty stosowania domieszek do betonu

Rodzaj domieszki	Efekty zastosowania
Upłynniająca i uplastyczniająca	Poprawa urabialności mieszanki betonowej
Napowietrzająca	Poprawa mrozoodporności betonu
Przyspieszająca wiązanie/twardnienie	Szybsze narastanie wytrzymałości betonu
Opóźniająca wiązanie	Wydłużenie czasu urabialności mieszanki
Regulująca lepkość	Możliwość betonowania pod wodą, samozagęszczalność
Uszczelniająca	Poprawa szczelności betonu
Przeciw mrozowa	Możliwość betonowania w warunkach zimowych



Rys. 1. Udział różnych rodzajów domieszek w rynku europejskim – masowo (na podstawie danych Deutsche Bauchemie [1])

śladu węglowego betonu jest uznawany za mało istotny [6].

Proekologiczna optymalizacja składu betonu modyfikowanego domieszkami

Niewielki udział wnoszony przez domieszki bezpośrednio do śladu węglowego betonu nie oznacza, że nie mają one wpływu na kształtowanie emisyjności tego tworzywa. Racjonalne stosowanie różnych domieszek umożliwiła modyfikację składu betonu, korzystną z punktu widzenia emisyjności. Korzystny wpływ plastyfikatorów i superplastyfikatorów, najczęściej stosowanych domieszek do betonu, na środowisko wynika z podstawowej funkcji tych modyfikatorów, to jest poprawy konsystencji mieszanki betonowej (rys. 3). Stąd wynika możliwość zmniejszenia współczynnika woda/cement w mieszance betonowej, a więc mniejsze zużycie wody zarobowej (nawet o 40%), lub lepsza urabialność mieszanki, a zatem możliwość wykorzystania większych ilości dodatków mineralnych i składników pochodzących z recyklingu, a także mniejsze zużycie energii na dozowanie i mieszanie komponentów betonu.

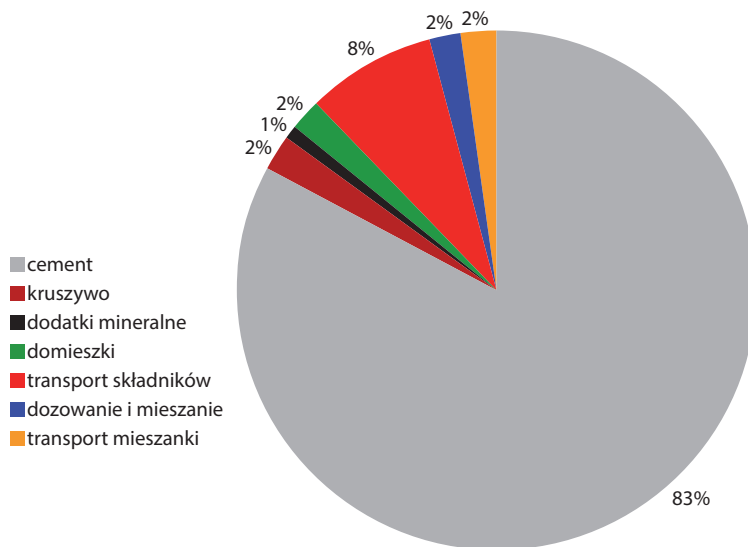
Zmniejszenie współczynnika w/c pozwala także na wykonywanie elementów o cieńszych przekrojach, a to z kolei prowadzi do mniejszego zużycia betonu i stali zbrojeniowej w konstrukcji.

Podobne działanie wykazują w ograniczonym stopniu domieszki napowietrzające, które tworząc sieć równomiernie rozłożonych pęcherzyków powietrza zmniejszają tarcie wewnętrzne w mieszance betonowej, również redukując niezbędną ilość wody zarobowej (o ok. 5%). Domieszki przyspieszające kompensują wolniejszy przyrost wytrzymałości betonu w przypadku stosowania niektórych dodatków mineralnych lub cementów niskoklinkierowych. Na korzystne modyfikacje składu mieszanki samozagęszczalnych (w kierunku mniejszego zużycia spoiwa) pozwala użycie domieszek regulujących lepkość. Generalnie, domieszki stanowią składnik betonu, którego synergia z innymi komponentami pozwala na dostosowanie receptury mieszanki do rosnących wymagań ekologicznych (tabl. 2).

Kompatybilność domieszek z cementami niskoemisyjnymi

Produkcja klinkieru cementowego jest źródłem znacznej emisji CO₂. Większość, ok. 65%, to emisja pochodząca z rozkładu wapienia. Toteż szczególnie efektywnym sposobem ograniczenia śladu węglowego cementu, a w konsekwencji betonu, jest zwiększenie udziału składników nieklinkierowych w cemencie. Oznacza to wzrost stosowania cementów innych niż CEM I w składzie betonu. Istotną rolę odegrało tu opublikowanie Normy Europejskiej PN-EN 197-5 „Cement – Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI”, pozwalającej na produkcję cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/C-M i cementów wieloskładnikowych CEM VI.

Zapewnienie właściwego współdziałania domieszek ze spoiwem cementowym jest jednym z głównych problemów związanych ze stosowaniem tych modyfikatorów. Zagadnienie to jest dość dobrze, choć wciąż niewystarczająco, rozpoznane w odnie-

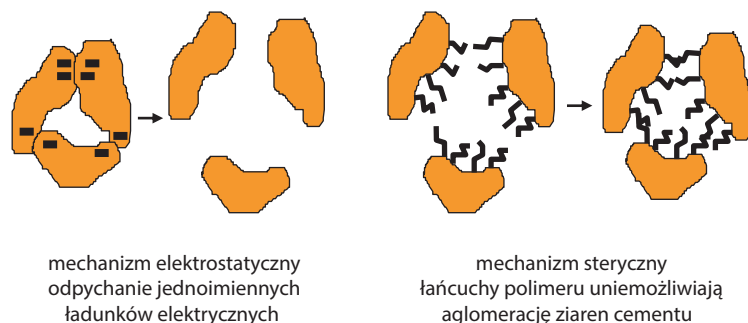


Rys. 2. Oszacowanie wkładu poszczególnych elementów w ślad węglowy betonu klasy C25/30 o typowej recepturze (według [5])

sieniu do cementu portlandzkiego CEM I. Jednakże udział CEM I w polskim rynku, według danych Stowarzyszenia Producentów Cementu, nie przekracza obecnie 40%. Rosnące zastosowanie cementów o większej zawartości składników nieklinkierowych znacząco rozszerza obszar dociekań dotyczących kompatybilności domieszek z cementami.

Skład chemiczny i fazowy cementu wpływa na skuteczność działania domieszek. Do składników cementu, odgrywających szczególnie istotną rolę

Rys. 3. Podstawowe mechanizmy upłynniające mieszanki betonowej przez domieszki

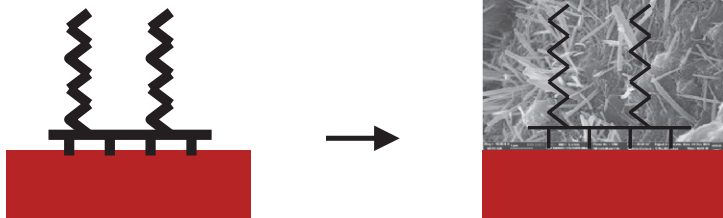


ze względu na efektywność działania domieszek upłynniających, zalicza się glinian triwapnia C₃A i alkalia.

Powierzchnia glinianu jest naładowana dodatnio, dlatego przede wszystkim na niej adsorbują się

Tabl. 2. Przykładowe oszacowanie wpływu domieszek na ślad węglowy betonu (wg [7])

Domieszka	Efekt technologiczny	Zmniejszenie śladu węglowego betonu
Upłynniająca	Możliwość zmniejszenia zawartości klinkieru w spoiwie (stosowanie cementów niskoklinkierowych) i wody zarobowej w mieszance betonowej. Możliwość zwiększenia zawartości dodatków mineralnych i składników z recyklingu (kompensowanie negatywnego wpływu na urabialność mieszanki).	do 30%
Przyspieszająca	Możliwość zwiększenia zawartości dodatków mineralnych (kompensowanie negatywnego wpływu na wczesną wytrzymałość betonu). Zmniejszenie zużycia paliwa przy obróbce cieplnej w zakładach prefabrykacji.	do 10%
Regulująca lepkość	Możliwość zmniejszenia zawartości cementu w mieszankach samozagęszczalnych i przeznaczonych do betonowania pod wodą	do 25%



Rys. 4. Dezaktywacja domieszki przez wbudowanie w powstające produkty hydratacji cementu

cząsteczki polimerów o działaniu upłynniającym. Zostają one następnie wbudowane w strukturę powstającego etryngitu, przez co maleje dostępność polimeru w układzie i zmniejsza się skuteczność upłynnienia mieszanki betonowej (rys. 4). Z tego punktu widzenia zmniejszenie ilości klinkieru w cemencie i zastąpienie go dodatkami mineralnymi jest więc korzystne z punktu widzenia skuteczności superplastyfikatora.

Z kolei alkalia, zwiększając siłę jonową roztworu stanowiącego fazę ciekłą zaczynu cementowego, powodują zmniejszenie rozciągłości łańcuchów bocznych w cząsteczce polikarboksylanu. Osłabia to efekt steryczny i zmniejsza skuteczność upłynnienia mieszanki betonowej [8]. Alkaliczność cementów z dodatkami innymi niż żużel wielkopiecowy jest zazwyczaj większa niż cementu portlandzkiego CEM I, dlatego mogą one wykazywać gorszą kompatybilność z domieszkami upłynniającymi.

Nieklinkierowe składniki cementów mogą konkurować z cementem o adsorpcję domieszki, co skutkuje szybką utratą ciekłości przez upłynnioną mieszankę betonową. Szczególne powinowactwo domieszki wykazują do mączki wapiennej, popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i żużla wielkopiecowego. Niekorzystnym skutkiem konkurencyjnej adsorpcji domieszki PCE na ziarnach dodatków mineralnych można zapobiegać przez właściwy dobór polimeru o zoptymalizowanej strukturze cząsteczkowej. Korzystne jest stosowanie domieszek zawierających polikarboksylany maleinowe, o dużym powinowactwie do cementu [9].

Problem kompatybilności dotyczy również innych rodzajów domieszek, zwłaszcza napowietrzających. Stosowanie nowych rodzajów cementów wymaga stałego doskonalenia procesu napowietrzenia mieszanki betonowej, ponieważ zmienność składników betonu znacząco wpływa na efekt działania domieszek napowietrzających. Jedną z możliwości jest wykorzystanie mikrosfer polimerowych

zamiast konwencjonalnych środków powierzchniowo czynnych. Skuteczne napowietrzenie mieszanki uzyskano w ten sposób dla cementów CEM II/C-M i CEM VI, eliminując niestabilność, która towarzyszyła użyciu tradycyjnej domieszki napowietrzającej [10].

Istotny wpływ na efektywność domieszki napowietrzającej może też mieć zawartość alkaliów w cemencie; cementy niskoalkaliczne wymagają większej ilości modyfikatora. Podobny jest skutek zwiększenia ilości popiołu lotnego krzemionkowego. Natomiast dobrą stabilność napowietrzenia uzyskano w przypadku niskoemisyjnych cementów z żużlem wielkopiecowym [11].

Wprowadzanie do składu betonu nowych składników, w tym cementów niskoemisyjnych, znacząco wpływa na efekt działania modyfikatorów. Ze względu na różnorodność i zmienność czynników materiałowych, które występują w cementach i dodatkach mineralnych różnych rodzajów, wszelkie przewidywania są jednak obarczone dużą niepewnością, stąd potrzeba prowadzenia prac eksperymentalnych weryfikujących wyniki rozważań teoretycznych.

Wpływ domieszek na trwałość betonu

Domieszki, zgodnie z normową definicją, modyfikują właściwości betonu. Z ekologicznego punktu widzenia szczególnie istotna jest możliwość poprawy cech związanych z trwałością (tabl. 3), do których zalicza się przede wszystkim wytrzymałość mechaniczną, mrozoodporność, szczelność i odporność na korozję chemiczną i biologiczną. Stosowanie prawidłowo dobranych domieszek jest elementem ochrony materiałowo-strukturalnej betonu.

Plastyfikatory i superplastyfikatory pozwalają na zmniejszenie ilości wody zarobkowej w mieszance betonowej. Zmniejszenie współczynnika woda/cement redukuje porowatość betonu, tym samym poprawiając wytrzymałość i szczelność. Uzyskanie dzięki zastosowaniu domieszki upłynniającej zwiększenie ciekłości mieszanki prowadzi do jej lepszego ujednorodnienia, a tym samym również do poprawy wytrzymałości. Większa wytrzymałość sprzyja zaś trwałości użytkowanego materiału.

Domieszki napowietrzające odgrywają najistotniejszą rolę w nadawaniu betonowi mrozoodporności. Jest to szczególnie istotne w klimacie umiarkowanym, gdzie materiał jest narażony na wielokrotne zamrażanie i rozmrażanie.

W przypadku niektórych domieszek podstawowym celem ich stosowania jest zabezpieczenie betonu przed korozją chemiczną lub biologiczną. Do tej grupy zalicza się inhibitory korozji stali zbrojeniowej lub samego betonu, na przykład sole litu powstrzymujące reakcję składników kruszyw z alkaliom. Korozja chemiczna betonu wiąże się zwykle (z wyjątkiem korozji wewnętrznej) z działaniem agresywnych czynników ze środowiska zewnętrznego. Domieszki zwiększające odporność na agresję chemiczną mają więc za zadanie zabezpieczać beton lub zaprawę przed wnikaniem takich substancji. Działanie tego rodzaju wykazują przede wszystkim domieszki uszczelniające. Utrudniają to przedostawanie się agresywnych substancji, zarówno gazowych (tlenki siarki i azotu, dwutlenek węgla), jak i ciekłych (wody miękkie, kwaśne deszcze, roztwory substancji odladzających zawierają-

Tabl. 3. Wpływ wybranych domieszek na trwałość betonu

Domieszki	Wpływ na trwałość
Upłynniające	Poprawa wytrzymałości i szczelności betonu przez zmniejszenie w/c
Napowietrzające	Poprawa mrozoodporności
Regulujące lepkość	Poprawa wytrzymałości i szczelności betonu przez zwiększenie spójności i zapobieganie segregacji mieszanki
Uszczelniające	Poprawa odporności chemicznej betonu przez zwiększenie szczelności
Inhibitory korozji stali	Poprawa trwałości żelbetu przez zapobieganie korozji zbrojenia
Przeciwskurczowe	Zapobieganie wczesnemu zarysowaniu betonu

ce chlorki itp.) w głąb betonu. Poprawę trwałości betonu uzyskuje się również dzięki domieszkom przeciwskurczowym, ograniczającym powstawanie rys w tworzywie.

Związek trwałości ze śladem węglowym betonu wynika przede wszystkim z faktu, że konstrukcje i elementy wykonane z betonu o większej trwałości rzadziej wymagają remontów. Oznacza to mniejsze zużycie materiałów naprawczych i ochronnych, a także samego betonu, i efektywnie zmniejsza emisyjność budownictwa betonowego.

Podsumowanie

Domieszki, mimo niewielkiego udziału w masie i objętości mieszanki betonowej, wpływają w znaczący sposób na właściwości betonu. Wobec konieczności ograniczenia emisji CO₂ szczególnie istotne jest [12]:

- zmniejszenie zużycia wysokoemisyjnego klinkieru – coraz szersze wykorzystywanie cementów niskoemisyjnych,
- zmniejszenie nakładu energetycznego na mieszanie i układanie betonu dzięki poprawie urabialności mieszanki,
- zwiększenie wytrzymałości i trwałości tworzywa konstrukcyjnego, co przekłada się na mniejsze zużycie betonu w naprawach obiektów budowlanych.

Stosowanie domieszek do betonu może przynieść takie efekty, wymaga jednak ich właściwego doboru, zapewniającego kompatybilność ze spoiwem cementowym.

Racjonalne wykorzystanie domieszek do redukcji emisji CO₂ jest możliwe i wskazane, wymaga jednak propagowania dostępnych rozwiązań i dostarczania odpowiedniej wiedzy wszystkim uczestnikom procesu budowlanego.

prof. dr hab. inż. Paweł Łukowski
Politechnika Warszawska,
Wydział Inżynierii Lądowej

Literatura

1. *Deutsche Bauchemie Jahres-Bericht 2022/2023* (<https://deutsche-bauchemie.com>)
2. Turner L., Collins F., *Carbon dioxide equivalent (CO_{2ec}) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete*, *Construction and Building Materials* 43/2013
3. *European Federation of Concrete Admixtures Associations Ltd. (EFCA), Environmental Product Declarations, Concrete admixtures, 2015*
4. Li X. i in., *Holistic LCA evaluation of the carbon footprint of refabricated concrete stairs*, *Journal of Cleaner Production* 329/2021
5. Irfan M., *Carbon footprint of ready mix concrete and the role of environmental classification systems*, *ESA Report No. 2011:16, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011*
6. Garbacz A, Urbańska P., *Ślad węglowy betonu*. W: „Beton – niskoemisyjny materiał budowlany”, *Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2021*
7. *Admixtures enable massive CO₂ reduction in concrete*, *BFT International* 06/2024
8. Uchikawa H., *Function of organic admixture supporting high performance concrete*, *Int. Conference on Role of Admixtures in High Performance Concrete, RILEM, 1999*
9. Marchon D. i in., *Molecular design of comb-shaped polycarboxylate dispersants for environmentally friendly concrete*, *Soft Matter* 45/2013
10. Tałaj M. i in., *Kształtowanie mrozoodporności betonów niskoemisyjnych wykonanych z nowych rodzajów cementów CEM III/C-M i CEM VI*, *Konferencja Dni Betonu, 2023*
11. Du L., Folliard K.J., *Mechanisms of air entrainment in concrete*, *Cement and Concrete Research*, 35/2005
12. Łukowski P., *Dobór domieszek upłynniających do cementów niskoklinkierowych*, *Materiały Budowlane* 11/2023

