

dr inż. Mariusz Dąbrowski, prof. dr hab. inż. Michał A. Glinicki, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk  
mgr inż. Arkadiusz Igrnerowicz, mgr inż. Michał Oleksik, mgr inż. Patryk Kucharski, Atlas sp. z o.o.

# Wpływ dodatków mineralnych w cemencie na stabilność napowietrzenia w betonie nawierzchniowym

Artykuł przedstawia badania wpływu stosowania cementów z dodatkami mineralnymi CEM II/A-V 42,5 R, CEM II/B-S 42,5 N i CEM III/A 42,5 N na dystrybucję porów w mieszance betonowej przeznaczonej na górną warstwę nawierzchni betonowej zaprojektowanej na agresję środowiska XF4. Przeanalizowano zmiany charakterystyki porów w betonie od wykonania do wbudowania. Próbkę pobrano bezpośrednio po wykonaniu mieszanki, po godzinie bezruchu i po wysokoenergetycznym mieszaniu po godzinie bezruchu. Określono charakterystykę porów, właściwości mieszanki betonowej oraz właściwości mechaniczne stwardniałego betonu. Przeanalizowano tendencje zmian całkowitej zawartości powietrza oraz zawartości mikroporów w betonie, wynikające z zastosowania cementu z dodatkami mineralnymi. Uzyskane wyniki świadczą o kompatybilności układu domieszek napowietrzającej i uplastyczniającej z użytymi rodzajami cementu.

Z każdym dniem rośnie liczba kilometrów wybudowanych nawierzchni betonowych w Polsce. Zgodnie z podanymi przez GDDKiA informacjami na początku 2021 roku mogliśmy już korzystać z 780,5 km dróg wykonanych z betonu, a w realizacji były kolejne 402,3 km [1]. Niewątpliwie nawierzchnie te w porównaniu do dróg asfaltowych mają wiele zalet, a z najważniejszych należy wymienić: większą trwałość w projektowanym czasie, niższe koszty utrzymania, dużą jasność, dużą sztywność, zwłaszcza w wysokich temperaturach, i wiele innych. Jednakże aby drogi betonowe pełniły swoją funkcję w czasie, muszą spełniać wymagania funkcjonalne określone przez równość, właściwości przeciwpoślizgowe i nośność, na które znacząco wpływają technologia wykonania nawierzchni i trwałość betonu. Na trwałość betonu wpływa wiele czynników materiałowych i technologicznych, m.in.: dobór odpowiednich surowców, prawidłowy rozkład porów w stwardniałym betonie oraz prawidłowy przebieg robót wraz z właściwą pielęgnacją nawierzchni. Dodatkowym oczekiwaniem, wynikającym wprost z koncepcji zrównoważonego rozwoju, a które nabrało w ostatnim czasie większej wagi, jest zredukowany ślad węglowy betonu stosowanego do wykonania nawierzchni.

Eksploatacja betonu nawierzchniowego w warunkach silnego nasycenia wodą ze środkami odładzającymi wymusza stosowanie domieszek napowietrzających w celu za-

## The influence of mineral additives in cement on the stability of air entrainment in pavement concrete

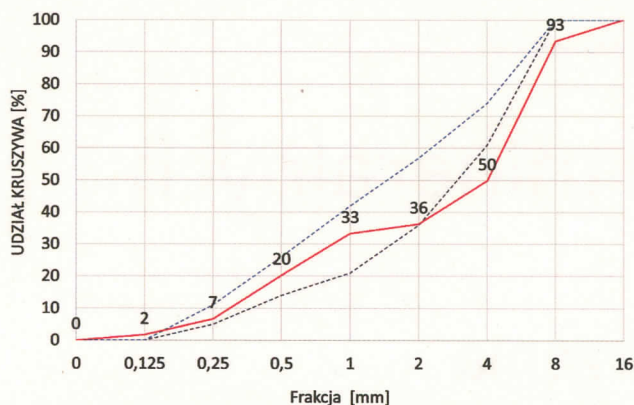
The article presents a study on the influence of the use of cements with mineral additives CEM II/A-V 42,5 R, CEM II/B-S 42,5 N i CEM III/A 42,5 N on the distribution of pores in a concrete mix intended for the top layer of a concrete pavement designed for the exposure class XF4. The changes in the pore characteristics in concrete from its production to its placement are analysed.

### Keywords:

additives, cement, stability, pavement, concrete

Summary

pewnienia trwałości w środowisku cyklicznego zamrażania i rozmrażania. W przypadku płyty nawierzchniowej układanej metodą ślizgową, zwłaszcza dwuwarstwowej z eksponowanym kruszywem, technologia ogranicza urabialność mieszanki [2] i w konsekwencji wymaga wilgotnej konsystencji (V1-V2, S1), co utrudnia utrzymanie właściwego poziomu napowietrzenia przed wbudowaniem w granicach 4,5-6,5%. Niejednokrotnie prowadzi to do zmiany finalnej mikrostruktury porów w stwardniałym betonie [3]. Efekty są widoczne w postaci znacznie mniejszej całkowitej zawartości powietrza (A) w porównaniu do pomiarów wykonanych metodą ciśnieniową oraz zmian w proporcji porów mniejszych od 300 μm do całkowitej zawartości ▶



Rys. 1. Krzywa uziarnienia betonu przeznaczonego na nawierzchnię (linie przerywane – krzywe graniczne [12])

	5 min po mieszanii składników	Po 60 min bezruchu	Po 60 min bezruchu i dodatkowym mieszaniu
Oznaczenie	5	60	60M
Zawartość powietrza	+	-	+
Konsystencja – opad stożka	+	-	+
Gęstość	+	-	+
Pobranie próbek – charakterystyka porów	+	+	+
Pozostałe próbki	+	-	+

Tab. 1. Harmonogram badań mieszanek betonowych (+ wykonano, - brak)

► powietrza ( $A_{300}/A$ ) [4]. Możliwa jest też sytuacja odwrotna, gdy w warunkach podwyższonej temperatury (powyżej 30°C) oraz zbyt krótkiej homogenizacji składników i/lub przedozowania domieszki napowietrzającej następuje wtórne napowietrzenie podczas wbudowywania betonu przez maszynę układającą nawierzchnię [5].

Głównym założeniem programu badawczego było określenie zmian cech fizycznych pęcherzyków powietrza w napowietrzonych mieszankach betonowych w przedziale czasowym wynoszącym 1 h. Po wyznaczonym czasie nastąpiło ponowne mieszanie składników z dużą intensywnością, wykonanie badań i pobieranie próbek zgodnie z harmonogramem przedstawionym w tab. 1.

Zaprojektowano i wykonano mieszanki betonowej na górną warstwę nawierzchni dwuwarstwowej (GWN) z czterema cementami: referencyjnym – CEM I 42,5 R oraz cementami z dodatkami mineralnymi CEM II/A-V, CEM II/B-S i CEM III/A. Wybrane cementy wykonano na bazie tego samego klinkieru portlandzkiego, dlatego kwestia kompatybilności z domieszkami napowietrzającymi nie wynikała ze zmian ilościowych składu fazowego klinkieru, a jedynie zmian ilościowych, rozmielenia i rodzaju stosowanego dodatku mineralnego. Stosowane cementy stanowiły produkty handlowe o deklarowanych właściwościach przedstawionych w tab. 2.

Recepturę betonu opracowano na podstawie rozwiązań materiałowych wykonawców i zastosowano w przypadku betonu referencyjnego z cementem CEM I. Zaprojektowano beton klasy C35/45 o uziarnieniu kruszywa grubego do 8 mm (rys. 1), klasie konsystencji S1 i projektowanej zawartości powietrza 5-7%. W betonie zastosowano piasek kwarcowy i grys amfibolitowy w dwóch frakcjach 2-5 i 5-8 mm. Skumulowana krzywa uziarnienia charakteryzowała się 7-proc. udziałem nadziarna.

Do przygotowania mieszanki betonowej wykorzystano mieszalnik Zyklos ZK 50 HE firmy PEMAT o pojemności 50 l. Składniki dodawano w następującej kolejności: kruszywo grube, kruszywo drobne oraz połowa wody zarobowej. Wymieszane kruszywo namaczano przez 5 minut w zamkniętym mieszalniku. Następnie dodano cement i pozostałą wodę zarobową. Przemieszano 15 sekund, po czym dolano domieszki w kolejności: napowietrzacz, plastyfikator. Całkowity czas homogenizacji mieszanki wyniósł 2 minuty. Po tym czasie pobrano próbki do badań (oznaczenie: 5). Pozostałą część mieszanki pozostawiono w bezruchu do 60 minut od zarobienia cementu z wodą, po którym pobrano kolejną serię próbek (oznaczenie: 60). Następnie mieszankę dodatkowo wymieszano przez 2 minuty i pobrano ostatnią serię próbek (oznaczenie: 60M).

Wyjściowa receptura betonu zakładała 420 kg/m<sup>3</sup> cementu i zawartość powietrza w mieszance 5,5%. Receptury przedstawione w tab. 3 zostały przeliczone do jednostki objętości po określeniu rzeczywistej zawartości powietrza

	CEM I 42,5 R	CEM II/A-V 42,5 R	CEM II/B-S 42,5 N	CEM III/A 42,5 N
<b>Wytrzymałość i właściwości fizyczne</b>				
Wytrzymałość na ściskanie 28 dni [MPa]	56,6	57,1	56,2	52,3
Początek wiązania [min]	185	192	212	246
Powierzchnia właściwa (Blaine'a) [cm <sup>2</sup> /g]	4238	4528	4692	4484
<b>Skład chemiczny</b>				
Strata prażenia [%]	2,63	-	-	0,81
Części nierozpuszczalne [%]	0,81	-	-	0,43
SO <sub>3</sub> [%]	3,27	3,26	2,91	2,63
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> [%]	0,74	-	0,57	0,53

Tab. 2. Właściwości cementów

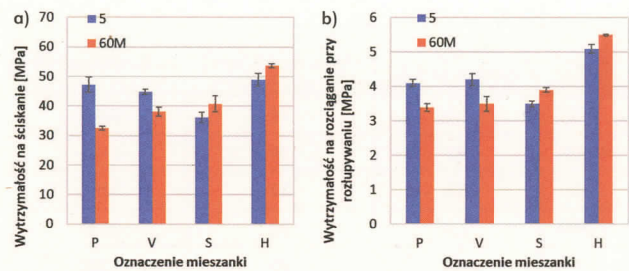
mierzonej metodą ciśnieniową bezpośrednio po wykonaniu mieszanki.

Charakterystykę mieszanki betonowej wykonano, określając konsystencję mieszanki metodą opadu stożka [6], zawartość powietrza metodą ciśnieniową [7] oraz gęstość [8].

Badania stwardniałego betonu po 28 dniach dojrzewania obejmowały: wytrzymałość na ściskanie [9], wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [10] oraz charakterystykę porów [11], w tym całkowitą zawartość powietrza ( $A$ ), powierzchnię właściwą porów ( $\alpha$ ), wskaźnik rozmieszczenia porów ( $L$ ) i zawartość mikroporów ( $A_{300}$ ).

Właściwości mieszanki betonowej we wskazanych okresach po wymieszaniu składników przedstawia tab. 4. Widoczny jest wzrost zawartości powietrza po ponownym wysokoenergetycznym mieszanii składników o 11%, 15% i 21%, odpowiednio w przypadku mieszanek betonowych P, V i S. Jedynie mieszanka H z cementem hutniczym odznaczała się 15-proc. zmniejszeniem zawartości powietrza w badaniu ciśnieniowym. W mieszankach betonowych charakteryzujących się wzrostem zawartości powietrza po ponownym mieszanii obserwowano większy opad stożka. Gęstość mieszanek P i V odzwierciedla zaobserwowane zmiany mierzonej ilości powietrza między wyróżnionymi terminami pobrań. W mieszankach z cementami żużłowymi zmiana gęstości była pomijalna.

Właściwości mechaniczne betonu po 28 dniach dojrzewania pobranego po 5 minutach i 60 minutach wraz z dodatkowym mieszanii przedstawia rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu oznaczonego P, V i H pobranych po pierwszym mieszanii zawiera się w granicach 45-49 MPa. Znacząco odbiega beton z cementem CEM II/B-S 42,5 N (oznaczony S), którego wytrzymałość na ściskanie jest ponad 20% mniejsza (36 MPa) i nie spełnia wymagań projektowanej klasy wytrzymałości C35/45. Zbliżona tendencja jest widoczna w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, jednakże wszystkie betony spełniają minimalne wymagania stawiane w WWiORB [12]. Stwierdzono o 25% większą wytrzymałość na rozciąganie



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie (a) i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (b) betonu dojrzewającego 28 dni pobranego po 5 minutach oraz po 60 minutach z dodatkowym mieszanii

przy rozłupywaniu w betonie z największą ilością dodatku żużla w cemencie (oznaczenie H), co stanowi odmienną obserwację niż powszechnie prezentowana w literaturze [13, 14]. Widoczne jest wyraźne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu po dodatkowym mieszanii w przypadku betonu P i V, wynoszące 45% i 20%, odpowiednio w przypadku wytrzymałości na ściskanie i rozłupywanie betonu P oraz po 20% w przypadku betonu V. Dodatkowo nie osiągnięto projektowanej klasy wytrzymałości betonu. W przypadku betonu z cementami zawierającymi żużel wielkopieczowy obserwuje się około 8-12-proc. zwiększenie mierzonych wytrzymałości.

Najważniejsze parametry badania charakterystyki porów zamieszczono w tab. 5. Uzyskane wyniki świadczą o kompatybilności układu domieszek i użytych cementów, co potwierdzają stosunek  $A_{300}/A$  powyżej 50%, powierzchnia właściwa porów powyżej  $30 \text{ mm}^{-1}$  i niewielki, do 0,55%, ubytek całkowitej zawartości powietrza ( $A$ ) zaraz po mieszanii i po 60 minutach bezruchu betonu.

Zmiana dystrybucji porów po wysokoenergetycznym mieszanii była zależna od rodzaju użytego cementu. W przypadku użycia cementu portlandzkiego w betonie (mieszanka P) po dodatkowym dostarczeniu energii nastąpiło zwiększenie  $A$  o 1,57% w porównaniu do stanu przed mieszanii, a powstałe pęcherzyki stanowiły głównie pory powietrzne mniejsze od  $300 \mu\text{m}$ . Zwiększeniu ilości drobnych pęcherzyków powietrza w mieszance towarzyszyło zwiększenie o 21% powierzchni właściwej porów ( $\alpha$ ). Po-▷

Składnik	Pochodzenie	Oznaczenie betonu			
		P	V	S	H
CEM I 42,5 R	Ożarów	416	-	-	-
CEM II/A-V 42,5 R	Ożarów	-	415	-	-
CEM II/B-S 42,5 N	Ożarów	-	-	414	-
CEM III/A 42,5 N	Ożarów	-	-	-	417
Woda	-	150	149	149	150
Piasek 0-2 mm	Pawłów	598	593	590	595
Grys 2-5 mm	Ogorzelec	310	307	305	308
Grys 5-8 mm	Ogorzelec	910	903	898	907
Primo LM-131	ATLAS	3,12	2,90	3,10	3,13
Fortiair OS-300	ATLAS	2,23	2,69	5,38	5,01

Tab. 3. Receptury betonu GWN

	Zawartość powietrza [%]	Opad stożka [mm]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
P-5	6,5	10	2280
P-60M	7,2	20	2170
V-5	6,8	20	2280
V-60M	7,8	30	2200
S-5	7,0	20	2200
S-60M	8,5	40	2210
H-5	6,1	10	2280
H-60M	5,2	10	2300

Tab. 4. Właściwości mieszanki betonowej

	A [%]	$\alpha$ [mm <sup>-1</sup> ]	$\bar{L}$ [mm]	A <sub>300</sub> [%]	A <sub>300</sub> /A [%]
P-5	7,06	37,21	0,11	3,79	54
P-60	6,86	35,15	0,12	3,46	50
P-60M	8,43	42,64	0,08	5,02	60
V-5	6,99	57,68	0,07	5,74	82
V-60	6,7	50,37	0,09	4,73	71
V-60M	7,72	44,25	0,09	5,21	67
S-5	8,17	42,14	0,09	5,34	65
S-60	7,62	38,43	0,10	4,18	55
S-60M	8,54	53,1	0,07	5,81	68
H-5	5,18	49,5	0,10	2,78	54
H-60	5,37	47,9	0,10	2,91	54
H-60M	4,68	56,18	0,09	3,28	70

Tab. 5. Charakterystyka porów powietrznych w stwardniałym betonie

► dobre zachowanie widoczne jest w przypadku cementu portlandzkiego żuźlowego (mieszanka S). Powierzchnia właściwa porów w mieszance S zwiększyła się o 38%. Oznacza to, że po powtórnym mieszaniu formują się głównie pęcherzyki drobne, a pęcherzyki większe od 300  $\mu\text{m}$  ulegają anihilacji. Zwiększenie udziału powietrza w betonie po ponownym mieszaniu zaobserwowano również w przypadku betonu z cementem portlandzkim popiołowym (oznaczenie V). Jednakże w tym przypadku nastąpiło zmniejszenie o 12% powierzchni właściwej porów w wyniku tworzenia się porów o średnicach większych od 300  $\mu\text{m}$ . Jedynie w mieszance betonowej z cementem hutniczym (oznaczenie H) zaobserwowano zmniejszenie całkowitej zawartości powietrza po ponownym mieszaniu z 5,37% do 4,68% oraz jednoczesne niewielkie zwiększenie udziału A<sub>300</sub> z 2,91% do 3,28%. Zatem tworzy się mniej mikroporów A<sub>300</sub>, a anihilacja pęcherzyków większych od 300  $\mu\text{m}$  jest szybsza niż w przypadku mieszanki z mniejszą ilością żuźla wielkopieczowego (oznaczenie S). W takim przypadku obserwowany jest wzrost powierzchni właściwej porów o 17%. W pracy [15] stwierdzono mniejszą powierzchnię właściwą porów, gdy w mieszankach betonowych o konsystencji S3

stosowany był cement z żuźlem wielkopieczowym, a badanie wykonano na próbkach pobranych tuż po wykonaniu mieszanki. Nie bez znaczenia na uzyskany wskaźnik rozmieszczenia porów w badaniach [15] miała znacznie mniejsza zawartość powietrza (3,6% i 3,2% odpowiednio w betonie z CEM II/B-S i CEM III/A) niż w betonie z cementem CEM I (6,8%).

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że rodzaj i ilość dodatku mineralnego w użytym cemencie wpływają istotnie na charakterystykę porów powietrznych w betonie. Wysokoenergetyczne mieszanie, symulujące dodatkową energię dostarczoną mieszance betonowej podczas układania, ukazało tendencje do zmian całkowitej zawartości powietrza oraz udziału mikroporów - A<sub>300</sub> w całkowitej zawartości powietrza w betonie w konkretnych rozwiązaniach cementowych z dodatkami mineralnymi. Uwzględnienie tych tendencji w projektowaniu betonu pozwala na świadome korzystanie z cementów z dodatkami mineralnymi, przyczyniając się do korzyści ekologicznych i ekonomicznych bez negatywnego wpływu na trwałość nawierzchni betonowych pracujących w warunkach agresji mrozu i środków odładzających przez wiele lat. □

#### Piśmiennictwo

1. <https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/pl/a/40812/Nawierzchnia-betonowa-czy-bitumiczna-Wybrac-moze-wykonawca-GDDKiA-wymaga-jakosci>.
2. Glinicki M.A.: *Właściwości betonu nawierzchniowego z kruszywem odkrytym - wpływ rodzaju cementu i pielęgnacji*. „Drogownictwo”, LXXIV 4/2019, s. 99-104.
3. Dziedzic K., Dąbrowski M., Antolik A., Glinicki A.: *Charakterystyka napowietrzenia mieszanki betonowej metodą sekwencyjno-ciśnieniową*. „Roads and Bridges - Drogi i Mosty”, 19/2020, s. 107-118.
4. Gołaszewski J.: *Domieszki do betonu. Efekt działania, ocena i badania efektywności, stosowanie*. Gliwice 2016.
5. Glinicki M.A.: *Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych*. Warszawa 2019.
6. PN-EN 12350-2:2019 *Badanie mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka*.
7. PN-EN 12350-7:2019 *Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe*.
8. PN-EN 12390-6:2019 *Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość*.
9. PN-EN 12390-3:2019 *Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań*.
10. PN-EN 12390-6:2011 *Badania betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozluźnianiu próbek do badań*.
11. PN-EN 480-11:2008 *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie*.
12. GDDKiA: *Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych D-05.03.04 w2 Nawierzchnia z betonu cementowego*. Warszawa 2019.
13. Babu K.G., Kumar V.S.R.: *Efficiency of GGBS in concrete*. „Cement and Concrete Research”, 30/2000, s. 1031-1036.
14. Barnett S.J., Soutsos M.N., Millard S.G., Bungey J.H.: *Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies*. „Cement and Concrete Research”, 36/2006, s. 434-440.
15. Giergiczyński Z., Glinicki M.A., Sokółowski M., Zieliński M.: *Air void system and frost salt scaling of concrete containing slag blended cement*. „Construction and Building Materials”, 23/2009, s. 2451-2456.