

mgr inż. Krzysztof Granaty<sup>1)</sup>prof. dr hab. inż. Michał Bołtryk<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0003-2468-8324

dr inż. Katarzyna Kalinowska-Wichrowska<sup>2)\*</sup>

ORCID: 0000-0003-1760-3943

mgr inż. Paweł Szeligowski

# Wpływ zróżnicowanego składu kompozytu geopolimerowego na adhezję z kompozytem asfaltowym

*The influence of varied composition of the geopolymer composite on the adhesion with asphalt composite*

DOI: 10.15199/33.2023.05.02

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono badania wpływu zróżnicowanego składu kompozytu geopolimerowego na adhezję z kompozytem asfaltowym. Zmiennymi w planie eksperymentu były zawartość zaprawy geopolimerowej, stężenie molowe NaOH oraz grubość warstwy ochronnej kompozytu geopolimerowego. Przyjęto stałe warunki dojrzewania. Otrzymane wyniki wskazują na bardzo dobre właściwości kompozytu zespolonego niezależnie od badanych czynników.

**Słowa kluczowe:** kompozyty geopolimerowe i asfaltowe; przyczepność międzywarstwowa; cienkie warstwy ochronne.

**Abstract.** The article presents the research on the influence of the variable composition of the geopolymer composite on the adhesion with the asphalt composite. The variables in the experiment plan were the content of the geopolymer mortar, the molar concentration of NaOH and the thickness of the protective layer made of the geopolymer composite. Constant maturation conditions were assumed. The obtained results indicate very good properties of the composite regardless of the tested variable.

**Keywords:** geopolymer and asphalt composites; interlayer adhesion; thin protective layers.

Warstwy konstrukcyjne nawierzchni, tj. warstwa ścieralna, wiążąca i podbudowa, są zazwyczaj wykonywane z mieszanek mineralno-asfaltowych. Nawierzchnie asfaltowe pomimo swoich zalet, jak podatność w czasie chwilowego ich przeciążenia, dobra przyczepność kół pojazdów, czy też możliwość szybkiego remontu i zajęcia tylko jednego pasa ruchu do wzmocnienia, mają bardzo dużo istotnych wad, np. wrażliwość na wysoką i niską temperaturę, ciemna barwa wymagająca zużycia dużej ilości energii do oświetlenia, większy koszt budowy niż nawierzchni betonowych, czy też bardzo duży koszt eksploatacji i naprawy. **Najbardziej newralgiczną warstwą w konstrukcji nawierzchni asfaltowej jest warstwa ścieralna**, będąca w bezpośrednim kontakcie z kołami pojazdów. Ponadto warstwa ścieralna na bazie spoiwa asfaltowego jest narażona na agresję środowiska oraz na zmianę temperatury, w wy-

niku czego powstają koleinowanie, a także mechaniczne uszkodzenia, szczególnie w okresie zimowo-wiosennym [1]. Pomimo stosowania na konstrukcję warstwy ścieralnej poza betonem asfaltowym (AC) takich materiałów, jak mastyks grysowy (SMA), asfalt lany (MA), beton asfaltowy do cienkich warstw ścieralnych (BBTM) czy asfalt porowaty (PA), żywotność warstwy ścieralnej w tak surowych warunkach klimatycznych [2], jak w Polsce, jest nieznaczna [3].

Proponowany w artykule beton geopolimerowy do wykonywania cienkiej warstwy ochronno-ścieralnej charakteryzuje się, w porównaniu z tradycyjnymi betonami cementowymi czy asfaltowymi, znacznie lepszymi właściwościami, takimi jak wytrzymałość na ściskanie i zginanie (wytrzymałość na ściskanie od ok. 30 do ok. 100 MPa, stosunek wytrzymałości na ściskanie do wytrzymałości na zginanie ok. 10 : 4,5), kwasoodporność, odporność na chlorki i siarczany oraz na działanie czynników atmosferycznych, odporność na niską i wysoką temperaturę (od -40 do ok. + 900°C), mrozoodporność, stopień adhezji z innymi materiałami, stabilność wymiarów (brak skurczu lub niewielki

skurcz przy wiązaniu) [4]. Ważną zaletą geopolimerów jest to, że ich podstawowym spoiwem mogą być uboczne produkty spalania, np. popiół lotny czy żużel wielkopiecowy [5].

W dotychczasowych badaniach analizowano naprężenia ścinające w materiałach jednorodnych, tj. w betonach cementowych oraz geopolimerowych [6, 7]. Rzadziej określano wartość siły ścinającej pomiędzy dwoma różnymi materiałami [8]. Po raz pierwszy przeprowadzono badania przyczepności betonu geopolimerowego do asfaltobetonu. W dotychczasowych badaniach oceny wytrzymałości na ścinanie stosowano różne metody i urządzenia [9, 10]. Badano materiały kompozytowe zbrojone i niezbrojone [7]. W przypadku betonów cementowych powstało wiele zależności teoretycznych i empirycznych opisujących wartości naprężeń ścinających w zależności od wytrzymałości na ściskanie materiału, szorstkości łączonych materiałów, gęstości pozornej, występowania zbrojenia, rodzaju konstrukcji [7].

W artykule przedstawiono wyniki badania adhezji cienkich warstw geopolimerowych do asfaltobetonu. Głównym

<sup>1)</sup> RAK-BUD Raczkowski Sp.K.

<sup>2)</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

\* Adres do korespondencji: k.kalinowska@pb.edu.pl

parametrem decydującym o trwałości połączenia geopolimer-asfaltobeton jest wytrzymałość na ścinanie pomiędzy dwoma materiałami.

### Materiały do badań

Badania polegały na analizie przyczepności międzywarstwowej kompozytu geopolimerowego i asfaltowego. Przygotowano trzyczynnikowy plan badań, o trzech poziomach zmienności, gdzie:  $X_1$  – stężenie molowe NaOH w aktywatorze;  $X_2$  – grubość warstwy betonu geopolimerowego;  $X_3$  – procentowy udział zaprawy w kompozycji geopolimerowym. Plan badań wraz z wartościami kodowanymi oraz rzeczywistymi przedstawiono w tabeli 1.

Beton geopolimerowy zaprojektowano wg powszechnej wiedzy dotyczącej projektowania wałowanych betonów cementowych, w tym wg wytycznych amerykańskich [11]. Użytkany w ten sposób skład zmodyfikowano przez zmianę procentową zawartości zaprawy w objętości mieszanki, nie zmieniając przy tym ilości zaczynu, który modyfikowano wodorotlenkiem sodu o zmiennym stężeniu. Do wykonania warstwy ścieral-

Tabela 1. Plan eksperymentu

Table 1. The experiment plan

Seria nr	Wartości kodowane			Wartości rzeczywiste		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$ – stężenie molowe NaOH w aktywatorze [mol/dm <sup>3</sup> ]	$X_2$ – grubość warstwy betonu geopolimerowego [mm]	$X_3$ – udział zaprawy w kompozycji geopolimerowym [%]
1	-1	-1	-1	8	15	45
2	+1	-1	-1	12	15	45
3	-1	+1	-1	8	45	45
4	+1	+1	-1	12	45	45
5	-1	-1	+1	8	15	65
6	+1	-1	+1	12	15	65
7	-1	+1	+1	8	45	65
8	+1	+1	+1	12	45	65
9	-1	0	0	8	30	55
10	+1	0	0	12	30	55
11	0	-1	0	10	15	55
12	0	+1	0	10	45	55
13	0	0	-1	10	30	45
14	0	0	+1	10	30	65

nej z geopolimeru wykorzystano piasek naturalny o uziarnieniu 0 – 2 mm, kruszywo bazaltowe 2 – 5 mm oraz kruszywo melafirowe 11 – 16 mm. Założono stężenie roztworu NaOH: 8, 10 i 12 moli/dm<sup>3</sup> oraz szkło wodne sodowe Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Współczynnik Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH wynosił 2,5. Do badań przygotowano 3 rodzaje mieszanki kruszywowej o zmiennym punkcie piaskowym. Frakcja kruszywa o uziarnieniu 0 – 2 wraz z zaczynem geopolimerowym dawała procentową zawartość zaprawy w objętości mieszanki kolejno 45, 55, 65%. Wyjściowy skład betonu geopolimerowego przedstawiono w tabeli 2.

W badaniach zastosowano popiół lotny (FA), uzyskany ze spalania węgla kamiennego w Elektrociepłowni Ostrołęka, o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 3. Popiół lotny zawiera 4,37% niespalonego węgla, co pozwala zakwa-

Tabela 2. Bazowy skład betonu geopolimerowego (55% zaprawy)

Table 2. Basic recipe of geopolymer concrete (55% of mortar)

Rodzaj składnika	Ilość w 1 m <sup>3</sup> [kg]
Piasek 0/2	725
Bazalt 2/5	327
Bazalt 5/8	368
Melafir 8 – 11	397
Popiół	400
Aktywator 12M	200

Tabela 3. Charakterystyka chemiczna popiołu lotnego

Table 3. Chemical characterisation of fly ash

Wyszczególnienie	Zawartość [% masy]
SiO <sub>2</sub>	54,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,30
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,06
TiO <sub>2</sub>	1,07
CaO	2,14
MgO	1,80
SO <sub>3</sub>	0,37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,55
Na <sub>2</sub> O	0,84
K <sub>2</sub> O	2,80
BaO	0,15
SrO	0,07
Strata prażenia	4,37

lifikować go do kategorii A wg normy PN-EN 450-1 (LOI ≤ 5%) [12]. Gęstość właściwa popiołu wynosi 2,23 g/cm<sup>3</sup>, gęstość nasypowa 1,15 g/cm<sup>3</sup>, a powierzchnia właściwa wg Blaine'a 3700 cm<sup>2</sup>/g.

Do badań zaprojektowano beton asfaltowy AC16W35/55 odpowiadający wymaganiom GDDKiA [13] dotyczącym warstw wiążących w kategorii ruchu KR3 – KR5. Wykorzystano do tego program komputerowy MASA. W mieszance mineralno-asfaltowej zastosowano kruszywo żwirowe kruszone, wypełniacz w postaci mączki wapiennej oraz asfalt drogowy 35/50, który stosuje się do warstw podbudowy i warstwy wiążącej dróg o kategorii ruchu KR3 – KR7. Skład betonu asfaltowego przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Skład betonu asfaltowego

Table 4. Recipe of asphalt concrete

Składniki betonu asfaltowego	Udział [%]
Mączka wapienna	4,77
0 – 2 piasek polodowcowy	17,17
2 – 5 żwir kruszony polodowcowy	24,8
5 – 11 żwir kruszony polodowcowy	20,03
11 – 16 żwir kruszony polodowcowy	28,62
Asfalt 35/50	4,6

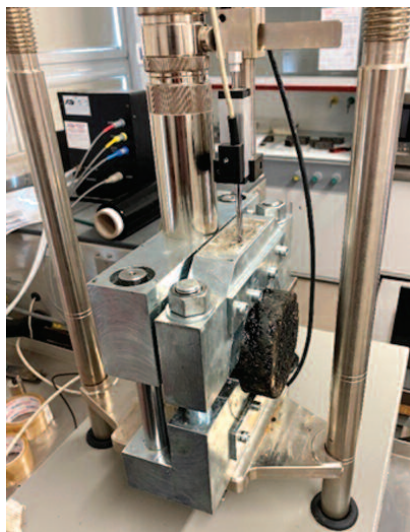
### Badania

#### Przyczepność międzywarstwowa.

Wykonano 14 serii próbek walcowych o średnicy 100 mm i grubości warstwy ścieralnej 15, 30 i 45 cm. Warstwa z betonu asfaltowego miała stałą grubość 70 mm. Receptura każdego zaczynu różniła się stężeniem molowym wodorotlenku sodu w aktywatorze (8, 10 i 12 moli/dm<sup>3</sup>) i procentowym udziałem zaprawy w betonie geopolimerowym (45, 55 i 65%). Zaczyn na próbki walcowe do badania w aparacie Leutnera przygotowano w mieszadle laboratoryjnym, a następnie zagęszczano w prasie żyratorowej wg PN-EN 12697-31 [14]. Cylinder nagrany do 140°C smarowano cienką warstwą gliceryny i umieszczano w nim dwa krążki metalowe jeden na spodzie, drugi na wierzchu próbki w celu ułatwienia rozformowania. Obie warstwy zostały zagęszczone w pięćdziesięciu cyklach z jednakową siłą. Przy użyciu siłownika wypychano z cylindra gotowe próbki walcowe i umieszczano w suszarce laboratoryjnej

nagrzanej do 90°C, w szczelnie zamykanych workach strunowych z tworzywa sztucznego. Następnie suszarkę wyłączano, pozostawiając do samoistnego ostudzenia, symulując w ten sposób dojrzewanie nawierzchni drogowej w warunkach wykonawstwa.

Próbkę na początku umieszczano w bloku aparatu Leutnera (fotografia 1) tak, aby granica styku obu warstw pokrywała się z osią tnącą szczęki aparatu. Po dokręceniu śrub mocujących próbkę rozpoczynano badanie. Proces ścinania następował z prędkością przesuwu tłoka  $50 \pm 3$  mm/min aż do osiągnięcia maksymalnej siły, a więc momentu ścięcia próbki [15].



**Fot. 1.** Próbkę kompozytu w aparacie Leutnera

*Photo 1. Sample of composite in Leutner Testing Head*

Plan badania wytrzymałości na ściskanie sporządzano przez modyfikację planu badań z tabeli 1, która polegała na usunięciu zmiennej „grubości warstwy betonu geopolimerowego”. Sporządzony w mieszalniku beton geopolimerowy zagęszczano w formach stalowych o boku 100 mm, wcześniej rozgrzanych do 90°C, w maszynie wibracyjnej w dwóch fazach. Pierwsza faza obejmowała zagęszczanie mieszanki wibratorem dolnym przez 30 s, natomiast druga – przez 90 s górną prasą. Na końcu wszystkie formy umieszczono w suszarce laboratoryjnej nagrzanej do 90°C i pozostawiono do wystudzenia. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 2 dniach dojrzewania wg PN-EN 12390-3 [16].

**Badanie skurczu betonu** geopolimerowego przeprowadzono metodą Amslera wg PN-84/B-06714/23 [17], na próbkach o wymiarach 100 x 100 x 500 mm, po 24 h oraz 3, 7, 14, 28 i 90 dniach dojrzewania. Próbkę zagęszczono młotem wibracyjnym wg normy PN-EN 13286-51 [18]. Następnie formy z betonem geopolimerowym umieszczano w suszarce laboratoryjnej nagrzanej do 90°C i wygrzewano przez 24 h.

**Mikroskopia skaningowa SEM.** Do tego badania wykonano jedną próbkę sześcienną składającą się z warstwy betonu asfaltowego grubości 5 cm i warstwy betonu geopolimerowego grubości 5 cm, którą po dwóch dniach dojrzewania rozluźniono młotkiem i wybrano odłamek o regularnym kształcie zawierający oba materiały. Próbkę suszono przez 24 h w temperaturze 90°C i napyłono węglem przed ostatecznym umieszczeniem w aparacie.

Na fotografiach 2 – 6 można zauważyć pustki powstałe w wyniku niedostatecznego zagęszczenia, których zniwelowanie pozwoliłoby na uzyskanie jeszcze lepszych właściwości zastosowanego geopolimeru. Na powierzchni przekrojów zaobserwowano wykwit węglanowy.

## Analiza wyników badań

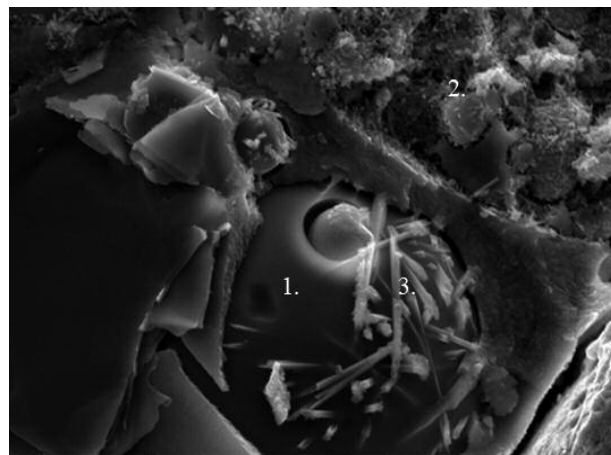
**Badanie przyczepności międzywarstwowej.** Z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika, że tylko stężenie molowe NaOH (x) w aktywatorze oraz procentowy udział zaprawy (y) miały istotny wpływ na naprężenie ścinające, przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

$$\tau = -1,212 + 0,431 \cdot x + 0,0328 \cdot y$$

$$R^2 = 0,58$$

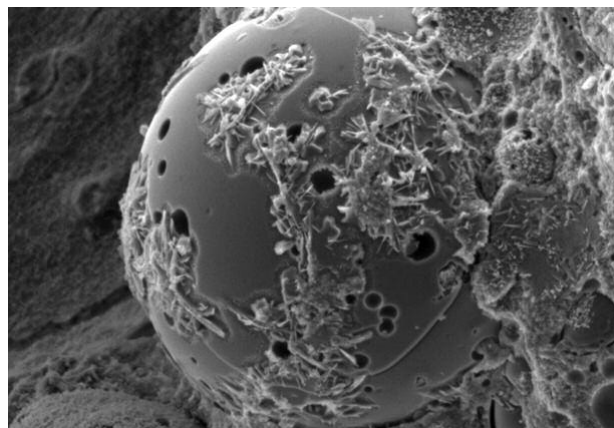
Korelacje pomiędzy naprężeniem ścinającym a stężeniem molowym w aktywatorze i udziałem zaprawy w geopolimerze przedstawiono na rysunku 1.

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że wzrost naprężenia ścinającego jest wprost proporcjonalny do stężenia NaOH oraz udziału zaprawy w betonie geopolimerowym (rysunek 1). Wzrost siły ścinającej wraz ze wzrostem stężenia NaOH w aktywatorze jest zgodny z oczekiwaniami, ponieważ dostępna literatura [9] informuje o takiej zależności w przypadku wytrzymałości na ściskanie geopolimerów. Przeprowadzone badania wykazały także, że przyczepność międzywarstwowa zależy w dużej mierze od zawartości zaprawy w betonie geopolimerowym. Większa zawartość frakcji kruszywa 0 – 2 mm wpływa



**Fot. 2.** Część cząsteczki popiołu lotnego (1) otoczona żelem geopolimerowym (2) z widocznymi na powierzchni wykwitami węglanowymi (3)

*Photo 2. Fly ash sphere (1) surrounded by geopolymer gel (2) with carbonate efflorescence visible on the surface (3)*



**Fot. 3.** Wykwity węglanowe na cząsteczce popiołu lotnego

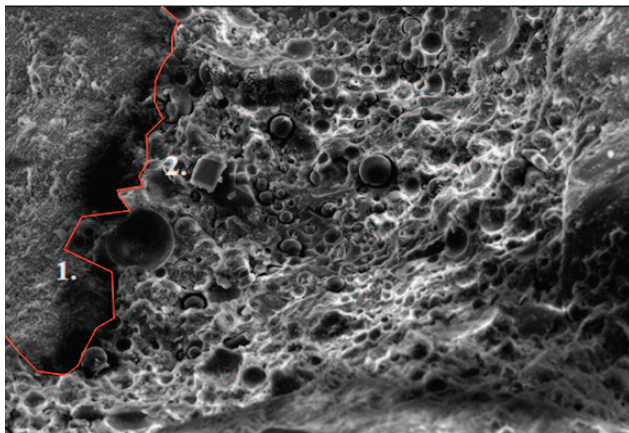
*Photo 3. Carbonate efflorescence on the fly ash sphere*



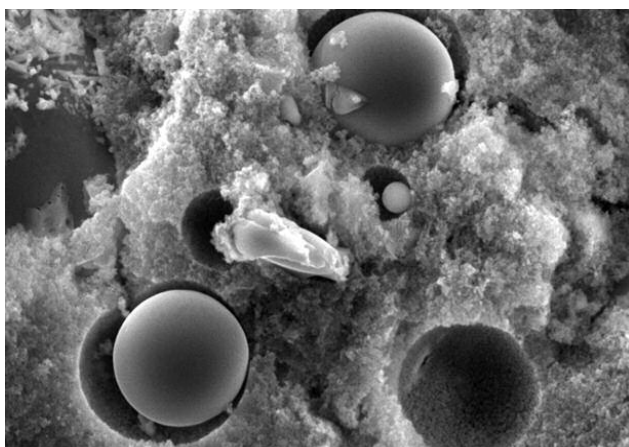
korzystnie na połączenie obu warstw materiałów. Największe wartości uzyskano w przypadku 12-molowego stężenia NaOH oraz 65-proc. udziału zaprawy. W wyniku zwiększenia stężenia

molowego NaOH z 8 do 10 moli/dm<sup>3</sup> przy 45-proc. udziale zaprawy, wartość naprężenia ścinającego zwiększyła się o 50%, natomiast przy zwiększeniu stężenia NaOH z 10 do 12 moli/dm<sup>3</sup> o ok. 30%. W przypadku 55-proc. udziału zaprawy przyczepność międzywarstwowa zwiększa się o ok. 30% wraz ze zwiększaniem stężenia molowego NaOH w aktywatorze, a w przypadku 65-proc. udziału zaprawy średnio o 20%.

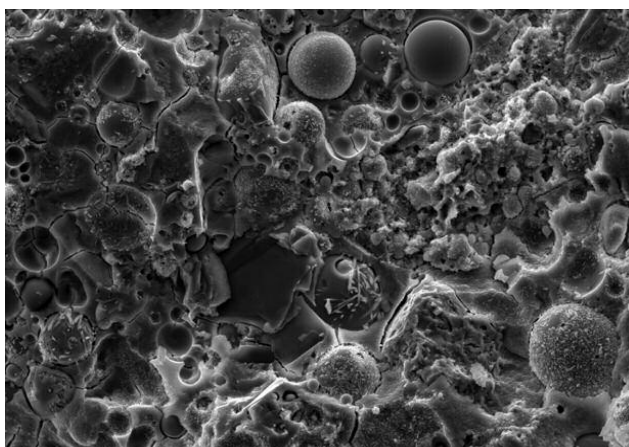
Otrzymane wyniki **wytrzymałości na ściskanie** po dwóch dniach dojrzewania wykazały dużą wytrzymałość wczesną betonu geopolimerowego (rysunek 2). Największe wartości otrzymano w przypadku 12-molowego stężenia NaOH w aktywatorze oraz 55-proc. udziału zaprawy w mieszance (najwyższy pojedynczy wynik wynosił ponad 45 MPa). Natomiast najmniejsze wartości wytrzymałości na ściskanie odnotowano w przypadku receptury o stężeniu NaOH 8 moli/dm<sup>3</sup> oraz 55-proc. zawartości zaprawy w betonie. Z rysunku 2 wynika, że najkorzystniejszy jest 55-proc. udział zaprawy, co jest zgodne z oczekiwaniami, ponieważ receptura ta została opraco-



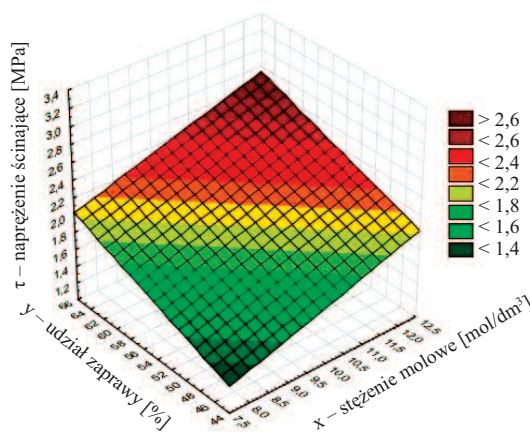
**Fot. 4. Granica warstwy kontaktowej pomiędzy betonem asfaltowym (1) a geopolimerowym (2)**  
Photo 4. Contact layer boundary between asphalt concrete (1) and geopolymer concrete (2)



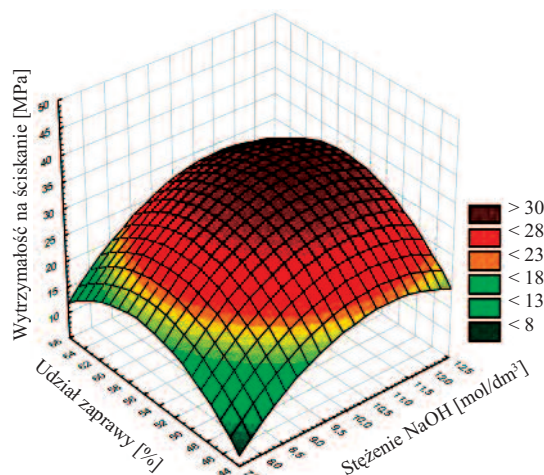
**Fot. 5. Cząsteczki popiołu lotnego otoczone żelem geopolimerowym**  
Photo 5. Fly ash spheres in geopolymer gel



**Fot. 6. Widoczna duża porowatość próbki – czarne półkoliste pustki**  
Photo 6. Visible a high porosity of sample-black lacks



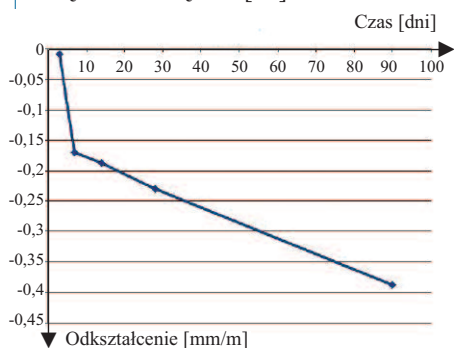
**Rys. 1. Naprężenie ścinające po dwóch dniach dojrzewania w zależności od stężenia NaOH w aktywatorze oraz zawartości zaprawy w mieszance geopolimerowej**  
Fig. 1. Correlation of shear stress between concentration of NaOH and participation of mortar after 2 days care



**Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie po dwóch dniach dojrzewania w zależności od stężenia NaOH w aktywatorze oraz zawartości zaprawy w mieszance geopolimerowej**  
Fig. 2. Correlation of compressive strength between concentration of NaOH and participation of mortar after 2 days care

wana wg amerykańskich wytycznych dotyczących betonu wałowanego. Duże wartości wytrzymałości na ściskanie otrzymane w przypadku receptur zawierających w aktywatorze 12-molowy NaOH potwierdzają dotychczasowe wyniki badań dostępne w literaturze [4].

Na rysunku 3 przedstawiono **średnie odkształcenie skurczowe betonu geopolimerowego** po 7, 14, 28 i 90 dniach. Otrzymane wartości, po 28 dniach dojrzewania, są zbliżone do wartości skurczu fibrobetonów, natomiast po 90 dniach – mniejsze nawet o ok. 15%. W przypadku betonu niezbrojonego wartości skurczu w późniejszym okresie są o 35% większe [19].



**Rys. 3. Średnie odkształcenie skurczowe w betonie geopolimerowym o składzie wyjściowym**

*Fig. 3. Average shrinkage deformations in geopolimer concrete of initial composition*

Na fotografiach 2 – 6 przedstawiono zdjęcia SEM kompozytu drogowego wykonanego za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Stwierdzono, że dwuwarstwowa próbka wykazuje dużą porowatość warstwy betonu geopolimerowego. Zaobserwowano dużą zawartość pojedynczych cząstek popiołów o wymiarze  $<5 \mu\text{m}$  oraz pustek po pęcherzykach powietrza, które powstały w procesie mieszania zaczynu i nie uwolniły się podczas zagęszczania. Można przypuszczać, że jasne struktury na powierzchni popiołu (fotografie 2, 3) to powstałe po odparowaniu wody (po procesie wygrzewania próbki) uwodnione związki pierwiastków znajdujących się w popiele lotnym, np.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{nH}_2\text{O}$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{nH}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Na fotografiach 4 – 6 zaobserwowano przereagowany popiół (szara barwa), a na fotografii 4 granicę pomiędzy warstwą z betonu asfaltowego (1.) i betonu

geopolimerowego (2.). Oceniając mikrotekturę połączenia dwóch warstw stwierdzono, że obie mieszanki tworzą szczelne, zązębiające się połączenie. Nie zaobserwowano żadnej nowej fazy, co sugeruje, że pomiędzy geopolimerem a asfaltem nie zachodzi żadna reakcja chemiczna z wytworzeniem się nowych związków, a duża przyczepność międzywarstwowa jest wynikiem sumy sił kohezji i adhezji.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wpływ różnych czynników na właściwości geopolimerowych kompozytów drogowych. Przyczepność międzywarstwowa zależy w widoczny sposób od wszystkich badanych czynników. Żaden wynik naprężenia ścinającego nie był mniejszy od 1,0 MPa, co odpowiada minimalnemu kryterium przyczepności warstw ścieralno-wiązujących w nawierzchniach drogowych wg GDDKiA [15]. 90% próbek spełniało wymagania dotyczące cienkich warstw ścieralno-wiązujących (minimalne kryterium przyczepności wynosi 1,3 MPa). Wytrzymałość na ściskanie betonu geopolimerowego zależy w wyraźny sposób od stężenia molowego NaOH w aktywatorze, gdzie siła potrzebna do zniszczenia próbki jest do niego wprost proporcjonalna. Otrzymane wyniki potwierdzają informacje, znajdujące się w dostępnej literaturze. Wpływ zawartości zaprawy w kompozycie geopolimerowym ma natomiast istotny wpływ na przyczepność międzywarstwową obu materiałów. Największe wartości naprężenia ścinającego uzyskano przy największym udziale frakcji kruszywa 0 – 2 w betonie geopolimerowym, a największą wytrzymałość na ściskanie wykazał beton geopolimerowy zawierający 12-molowy NaOH w aktywatorze oraz 55% zaprawy. Z badań skurczu wynika, że beton geopolimerowy wykazuje mniejsze odkształcenia niż fibrobeton.

## Literatura

- [1] Diagnostyka stanu nawierzchni i wybranych elementów korpusu drogi – wytyczne stosowania, Załącznik L1: Katalog uszkodzeń w systemie automatycznej oceny nawierzchni asfaltowych, GDDKiA, 2019.
- [2] Mohiud Dina I, Shafi Mir M, Adnan Farooq M. Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Proper-

ties of Asphalt Pavements in Cold Regions: A Review, *Transportation Research Procedia*. 2020; 48: 3634 – 3641.

[3] Wutke M. Przyczyny uszkodzeń warstw asfaltowych nawierzchni, lokalizacja osłabionych miejsc za pomocą systemu GPR, *Drogownictwo*. 2017; 12: 401 – 406.

[4] Miłkuła J. i in. Rozwiązania proekologiczne w zakresie produkcji. Nowoczesne materiały kompozytowe przyjazne środowisku. Politechnika Krakowska.

[5] Chuczun A, Rakowski B, Gosk E, Kalinowska-Wichrowska K. Podstawowe właściwości geopolimerów z dodatkiem odpadu ceramicznego. *Materiały Budowlane*. 2022. DOI: 10.15199/33.2022.08.14.

[6] Bołtryk M, Stankiewicz N. Thin Protective Layers Made out of Special Concretes. 2017.

[7] Sumanth Kumar B, Rama Seshu D. Cement Wapno Beton. 2021; 26 (1): 3 – 11.

[8] Bołtryk M, Granaty K, Stankiewicz N. Ecological aspects in the application of geopolimer composites on road surfaces. *Ekonomia i Środowisko*. 2019; 1: 193 – 202.

[9] Jaskuła P. Szczepność warstw asfaltowych w wielowarstwowych układach nawierzchni drogowych, *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*, Gdańsk 2018.

[10] Haiwei Z, Bawei S, Yongxiang L, Yanli L. Adhesive property and road performance of asphalt overlay with geotextile interlayer, *Hindawi*, Volume 2022.

[11] Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, the National Concrete Pavement Technology Center at Iowa State, University's Institute for Transportation, funding from Portland Cement Association, August 2010.

[12] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.

[13] WT-2 2014 – Część I. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne, GDDKiA, 2014.

[14] PN-EN 12697-31:2019-03 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 31: Przygotowanie próbek w prasie żyrotorowej.

[15] Instrukcja laboratoryjnego badania szczepności międzywarstwowej warstw asfaltowych wg metody Leutnera i wymagania techniczne szczepności, GDDKiA, Katedra Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej, Wersja z dnia 31.08.2014.

[16] PN-EN 12390-3 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[17] PN-B-06714-23:1984 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie zmian objętościowych metodą Amslera.

[18] PN-EN 13286-51 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 51: Metoda dla przemysłowego badania próbek związanych spoiwem hydraulicznym za pomocą zagęszczania młotem wibracyjnym.

[19] Raczkiwicz W. Skurcz betonu – cechy istotne ze względu na projektowanie konstrukcji z betonu, *Przeгляд Budowlany*. 2012; 2.

*Badania zrealizowano w ramach pracy zespołowej WZ/WB-III/5/2023 finansowanej ze środków MEiN.*

*Przyjęto do druku: 20.04.2023 r.*