

Badania związane z podłożem nawierzchni drogowej

Prof. dr hab. inż. Leszek Rafalski, dr inż. Michał Ćwiąkała, mgr inż. Beata Gajewska, dr inż. Cezary Kraszewski
Instytut Badawczy Dróg i Mostów

Podłoże nawierzchni drogowej jest różnie definiowane. W warunkach krajowych jest określane najczęściej jako górna warstwa nasypu lub wykopu o miąższości $1 \div 2$ m znajdująca się pod nawierzchnią drogową. Podłoże nawierzchni drogowej wykonuje się z gruntów ziarnistych o różnej granulacji. Na XV

Konferencji Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej w Bydgoszczy w 2009 roku przedstawiono referat pt. „Podłoże nawierzchni drogowej” [6] opublikowany później w [7], w którym omówiono problemy dotyczące podłoża nawierzchni drogowej, a w szczególności: oddziaływanie obciążenia eksplo-

atacyjnego na podłoże, klasyfikacje gruntów podłoża oraz jego mrozoodporność. Stwierdzono, że obciążenia eksploatacyjne od pojazdów i oddziaływanie klimatyczne powodują konieczność szczególnego zaprojektowania i przygotowania podłoża nawierzchni drogowej.

W ostatnich latach wykonano w Polsce szereg prac badawczych związanych z podłożem nawierzchni drogowej. Pierwsza część prac dotyczyła zastosowania do podłoża nawierzchni materiałów odpadowych, np. [4, 8]. Wyniki tych badań wykorzystano w opracowaniu krajowych wytycznych dotyczących materiałów niezwiązanych.

Drugą częścią były prace badawcze odnoszące się do problematyki wysadzinowości podłoża nawierzchni. Do oceny wysadzinowości gruntów stosowane są metody bezpośrednie i pośrednie. Metody bezpośrednie polegają na badaniu wielkości wysadzin zamrażanej próbki gruntu podłoża drogowego. Jednakże badania polegające na pomiarze bezpośrednim wysadzin są dość trudne i pracochłonne, a także wymagają specjalistycznej aparatury. Z tych powodów w praktyce inżynierskiej częściej stosowane są metody pośrednie polegające na oznaczeniu pewnej cechy materiału, na podstawie której określana jest jego wysadzinowość.

Wykonane w ostatnich latach prace badawcze objęły zagadnienia wpływu środków odladzających na kapilarność gruntów oraz prognozowania wysadzinowości kruszyw stosowanych do podłoża nawierzchni drogowej na podstawie ich właściwości fizycznych. W zakresie prognozowania wysadzinowości zbadano możliwość przewidywania wysadzin kruszyw na podstawie uziarnienia, granic Atterberga i wskaźnika plastyczności, wskaźnika piaskowego oraz sorpcji błękitu metylenowego. W niniejszym artykule przedstawiono syntetycznie niektóre wyniki badań obejmujących problematykę wysadzinowości podłoża. Wyniki tych badań pozwoliły na zdefiniowanie tych właściwości gruntów podłoża drogowego, które mogą być wykorzystane do prognozowania ich wysadzinowości.

WPLYW ŚRODKÓW ODLADZAJĄCYCH NA KAPILARNOŚĆ GRUNTÓW

W zimowym utrzymaniu dróg stosuje się różne związki chemiczne, które mają wpływ na kapilarność czynną gruntów. W celu określenia zmian wysokości wzniosu kapilarnego zbadano zmiany kapilarności czynnej trzech gruntów z udziałem wody destylowanej i roztworów wodnych dziesięciu związków chemicznych stosowanych w zimowym utrzymaniu dróg [1]. Do badań wytypowano następujące grunty:

- Grunt 1: piasek gliniasty o zawartości cząstek pyłowych i ilowych $f_{\pi} + f_i > 15\%$ oraz bardzo małym wskaźniku różnoziarnistości ($U < 3$);
- Grunt 2: pospółka gliniasta o zawartości cząstek pyłowych i ilowych $f_{\pi} + f_i < 15\%$ oraz dużym wskaźniku różnoziarnistości ($U > 5$);
- Grunt 3: pospółka nie zawierająca cząstek pyłowych i ilowych, charakteryzująca się dużym wskaźnikiem różnoziarnistości ($U > 5$).

Badania miały na celu określenie modelu zmian wysokości wzniosu kapilarnego h oraz prędkości wzniosu kapilarnego v

w czasie t . Stwierdzono, że do opisanego zależności wysokości wzniosu kapilarnego h od czasu t może być wykorzystana zależność $h(t) = h_1 + v_1 \times \ln(t)$, w której h_1 oznacza wysokość wzniosu kapilarnego w pierwszej sekundzie, v_1 – prędkość wzniosu kapilarnego, t – czas. W wyniku dalszych badań ustalono, że roztwory związków chemicznych o stężeniu 5% spowodowały obniżenie kapilarności czynnej badanych gruntów w porównaniu do kapilarności zbadanej przy użyciu wody destylowanej. Wzrost stężenia związków chemicznych do 10% w wodnych roztworach spowodował dalsze obniżenie kapilarności czynnej badanych gruntów w porównaniu do kapilarności uzyskiwanej przy 5% stężeniu tych związków. Przykładowe wyniki badań przedstawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Procentowe zmniejszenie kapilarności czynnej gruntów 1, 2 i 3 z roztworami związków chemicznych o stężeniu 5% w porównaniu do kapilarności zbadanej przy użyciu wody destylowanej [1]

Związek chemiczny	Grunt 1 [%]	Grunt 2 [%]	Grunt 3 [%]
CaCl ₂	39	40	55
NaCl+CaCl ₂	34	35	44
sól drogowa	31	27	43
H ₂ NCONH ₂	26	25	29
NaCl	24	18	23
(CH ₃ COO) ₂ Ca	20	15	17
CH ₃ COOK	12	14	15
NaCl+MgCl ₂	11	13	13
(CH ₃ COO) ₂ Mg	8	12	7
MgCl ₂	7	6	3

Z przeprowadzonych badań wynikało, że podatność gruntu na wznios kapilarny może być określona na podstawie współczynnika kapilarności w_k . Współczynnik ten zależy od rodzaju i stężenia związku chemicznego kapilującego w gruncie oraz od rodzaju gruntu. Wpływ tych czynników można uwzględnić, stosując wzór: $h(t) = w_k \times h_1 + w_k \times v_1 \times \ln(t)$.

WPLYW UZIARNIENIA KRUSZYW NA ICH WYSADZINOWOŚĆ

Właściwości wysadzinowe gruntów lub kruszyw zależą między innymi od zawartości cząstek drobnych w tych materiałach. W Polsce przyjęto, że dopuszczalna zawartość cząstek drobnych, to jest $< 0,063$ mm, w niezwiązanych kruszywach stosowanych w warstwach narażonych na oddziaływanie mrozu, wynosi nie więcej niż $9 \div 15\%$, w zależności od ich zastosowania [9].

Wpływ uziarnienia na wysadzinowość zbadano na kruszywach, które w praktyce były przeznaczone do wykonywania konstrukcji drogowych. Pod względem petrograficznym badane kruszywa reprezentowały różne rodzaje skał: magmowe, osadowe i przeobrażone. Łącznie zbadano 14 kruszyw oznaczonych następującymi symbolami: granitowe (G), piaskowcowe (S), bazaltowe (B), dolomitowe (D1 ÷ D8) i wapienne (L1 ÷ L3). Zawartości drobnych cząstek w tych kruszywach przedstawiono w tabl. 2.

Tabl. 2. Zawartość drobnych cząstek w badanych kruszywach, w % [2]

Kruszywo Wymiar ziarna	G	S	B	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	L1	L2	L3
< 0,125 mm	5,2	9,2	5,5	3,4	13,0	11,5	4,3	8,3	11,2	8,1	10,6	7,4	12,7	5,9
< 0,075 mm	3,6	7,0	4,8	2,9	11,8	10,0	3,9	7,0	9,8	7,4	9,6	5,9	11,3	4,7
< 0,02 mm	1,9	4,7	3,9	2,3	9,7	7,4	3,1	5,4	7,6	6,1	8,1	4,6	9,2	3,2
< 0,002 mm	0,2	0,5	0,3	0,5	2,2	1,6	0,5	0,9	1,5	1,5	1,7	0,9	1,9	0,7

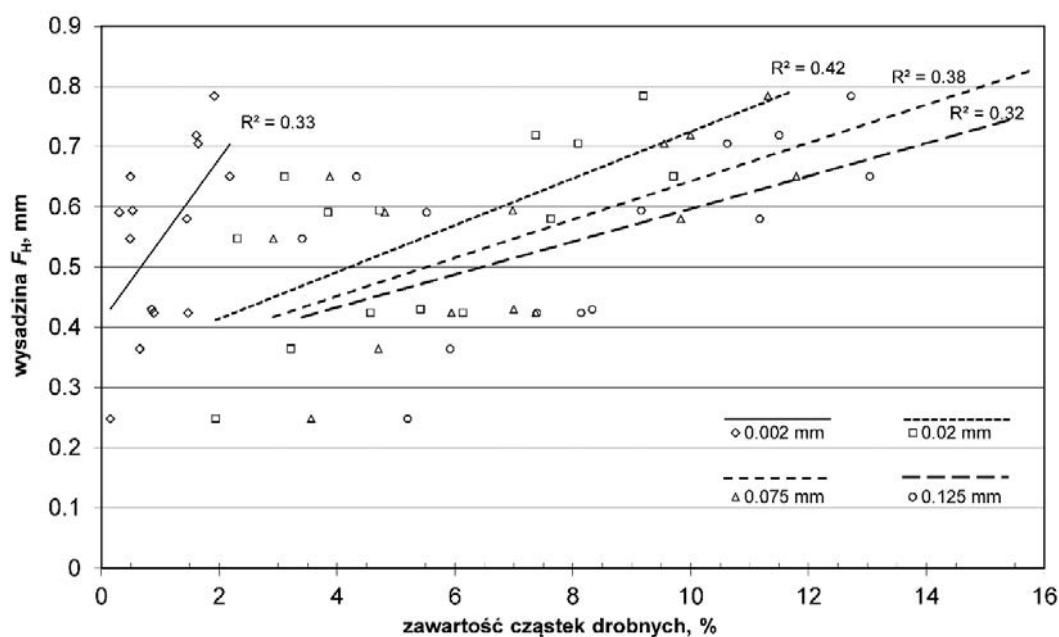
Badanie bezpośredniej wysadzinowej mrozowej wykonano na próbkach kruszyw przygotowanych w normowej formie CBR rodzaju B według normy PN-EN 13286-2. Na formie zainstalowano oprzyrządowanie do pomiaru pęcznienia liniowego. Zagęszczane próbki kruszyw schładzano granulem CO_2 do temperatury od -29 do -36 °C na górnej powierzchni próbki, pozostawiając dolną część próbki w wodzie o temperaturze od $+4$ do $+6$ °C. Pomiar trwał 4 doby, z rejestracją wysadzin 2 razy w ciągu doby. Na rys. 1 przedstawiono wartość wysadzin F_H w zależności od zawartości frakcji $< 0,002$ mm, $< 0,02$ mm, $< 0,075$ mm i $< 0,125$ mm. Między zawartościami cząstek drobnych mniejszych niż: 0,02 mm, 0,075 mm, 0,125 mm i 0,002 mm a wysadziną mrozową F_H uzyskano korelacje ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,32 \div 0,42$.

Zauważono, że wartość wysadzin może być przewidywana ze zbliżoną dokładnością na podstawie procentowej zawartości materiału przechodzącego przez sito: 0,02 mm, 0,075 mm lub 0,125 mm. Dla każdej frakcji powinno ustalić się indywidualne kryterium ich zawartości. Nieco odmienny charakter wykazywała zależność wartości wysadzin od zawartości frakcji iłowej ($< 0,002$ mm), co może być związane z większym oddziaływaniem tych cząstek na wysadzinowość w porównaniu do cząstek pyłowych. Należy zauważyć, że uzyskane korelacje o relatywnie niedużym współczynniku determinacji są charakterystyczne

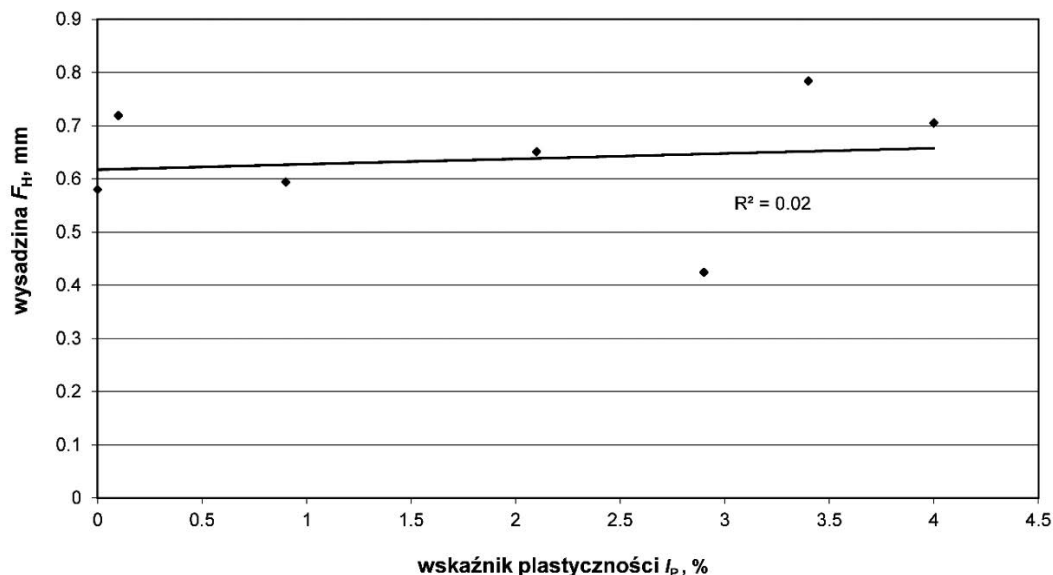
dla badań zależności geotechnicznych, w których na dokładność korelacji mają często wpływ inne czynniki, na przykład: kapilarność, różnoziarnistość lub skład mineralny gruntu.

ZALEŻNOŚCI MIĘDZY WYSADZINOWOŚCIĄ KRUSZYW A ICH GRANICAMI ATTERBERGA ORAZ WSKAŹNIKIEM PLASTYCZNOŚCI

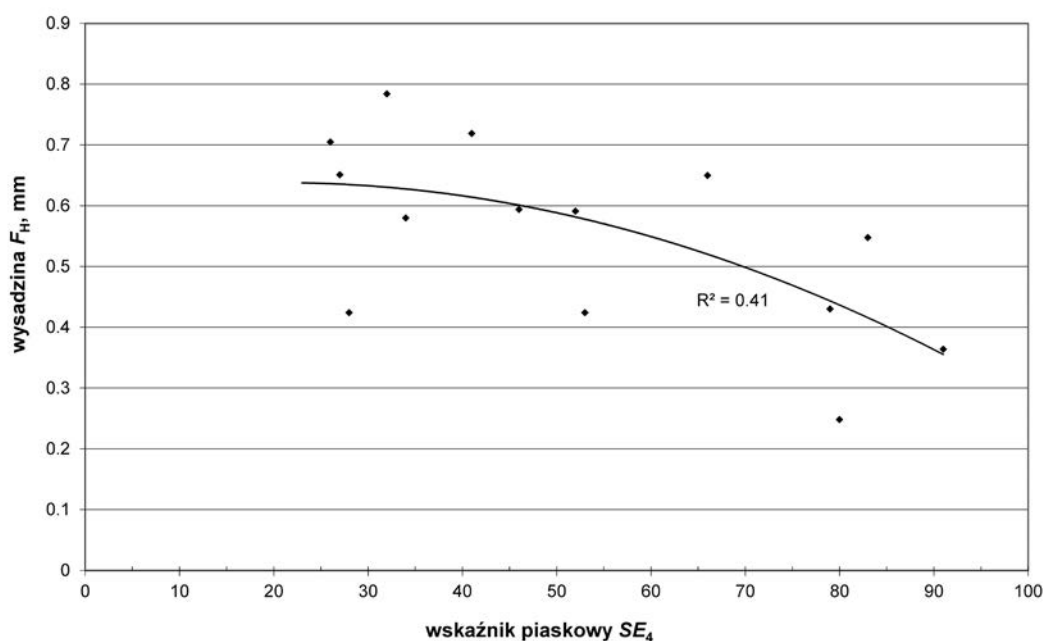
Do oceny wysadzinowości gruntów i kruszyw często stosuje się wskaźnik plastyczności I_p [9]. Dlatego kolejnymi zbadanymi właściwościami były: granica plastyczności, granica płynności oraz obliczony wskaźnik plastyczności. W przypadku siedmiu kruszyw nie było możliwe oznaczenie granicy płynności, a w przypadku sześciu kruszyw – granicy plastyczności. Było to spowodowane małą zawartością frakcji iłowej, która wynosiła $0,2 \div 2,2\%$. Z tego względu obliczono wskaźnik plastyczności siedmiu badanych kruszyw. Stwierdzono brak korelacji między granicą plastyczności a wysadziną określoną metodą bezpośrednią, a w przypadku granicy płynności – korelację liniową. Jednakże problemy z określaniem obu granic przy małej zawartości drobnych cząstek utrudniały wykorzystanie granic Atterberga do prognozowania wysadzinowości kruszyw. Ponadto stwierdzono brak korelacji między wskaźnikiem plastyczności a wysadziną



Rys. 1. Zależności między zawartością cząstek drobnych a wysadziną mrozową [2, 3]



Rys. 2. Zależność między wskaźnikiem plastyczności a wysadźciną mrozową kruszyw [5]



Rys. 3. Zależność między wskaźnikiem piaskowym a wysadźciną mrozową kruszyw [2,3]

określoną metodą bezpośrednią (rys. 2), co oznaczało, że wskaźnik plastyczności w zakresie $I_p = 0 \div 4\%$ nie jest odpowiednim parametrem do prognozowania wysadźcinowości kruszyw.

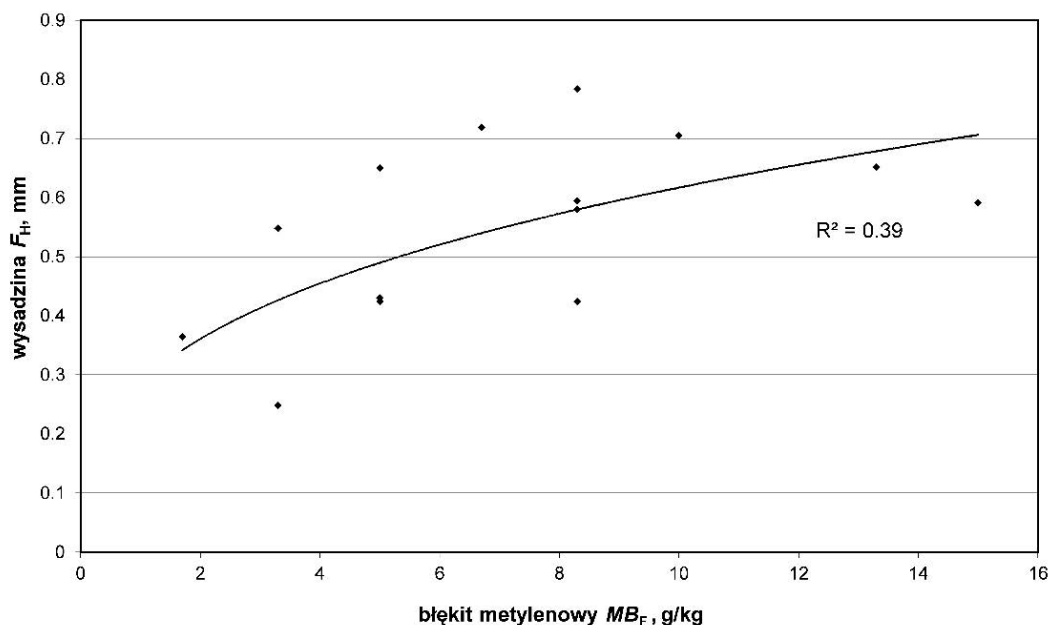
ZAŁĘŻNOŚĆ MIĘDZY WYSADZINOWOŚCIĄ KRUSZYW A ICH WSKAŹNIKIEM PIASKOWYM

Następną analizowaną właściwością był wskaźnik piaskowy SE_4 , najczęściej stosowany w drogownictwie do prognozowania wysadźcinowości gruntów i kruszyw. Według polskich wymagań niewysadźcinowe są grunty lub kruszywa, których $SE_4 \geq 35$ [9]. Badane kruszywa charakteryzowały się wartościami wskaźnika piaskowego SE_4 z zakresu od 26 do 91. Zależność wartości

wysadźciny od wartości wskaźnika piaskowego przedstawiono na rys. 3. Z przeprowadzonej analizy wynikało, że wskaźnik piaskowy może być wykorzystany do prognozowania wysadźcinowości.

ZAŁĘŻNOŚĆ MIĘDZY WYSADZINOWOŚCIĄ KRUSZYW A ICH SORPCJĄ BŁĘKIEM METYLENOWYM

Przeanalizowano także zależność między sorpcją błękitem metylenowym a wysadźcinowością kruszyw. W badaniu błękitem metylenowym uzyskano wartości MB_F od 1,7 do 15 g/kg. W polskich wymaganiach przyjmuje się, że materiały niewysa-



Rys. 4. Zależność między sorpcją błękitem metylenowym a wysadziną mrozową kruszyw [3]

dzinowe powinny charakteryzować się sorpcją $MB_F \leq 10$ g/kg [9]. Zależność wartości wysadziny bezpośredniej od wartości MB_F zbadanych kruszyw przedstawiono na rys. 4. Z przeprowadzonej analizy wynikało, że sorpcja błękitem metylenowym może być także wykorzystana do prognozowania wysadzinowości.

PRZYKŁADOWE KRYTERIA OCENY WYSADZINOWOŚCI GRUNTÓW I KRUSZYW STOSOWANYCH DO PODŁOŻA NAWIERZCHNI DROGOWEJ

Z przeprowadzonych badań wynikało, że wysadzinowość gruntów i kruszyw stosowanych do podłoża nawierzchni drogowej może być oceniana na podstawie zawartości drobnych cząstek (< 0,02 mm, 0,075 mm i 0,125 mm), wskaźnika piaskowego lub sorpcji błękitem metylenowym. Zwrócono uwagę na potrzebę zweryfikowania niektórych dotychczas stosowanych kryteriów wysadzinowości tak, aby uzyskać lepszą zgodność oceny wysadzinowości gruntów i kruszyw różnymi metodami pośrednimi. Przyjmując na przykład dopuszczalną wysadzinę $F_H = 0,60$ mm, kryteria wysadzinowości mogą być następujące:

- zawartość cząstek < 0,02 mm $\leq 7\%$,
- zawartość cząstek < 0,075 mm $\leq 9\%$,
- zawartość cząstek < 0,125 mm $\leq 10\%$,
- wskaźnik piaskowy ≥ 38 ,
- sorpcja błękitu metylenowego ≤ 8 g/kg.

PODSUMOWANIE

Na wznios kapilarny istotny wpływ ma zawartość i stężenie środków przeznaczonych do zimowego utrzymania. Środki te powodują zmniejszenie wzniosu kapilarnego w gruntach. Uwzględnienie tego zjawiska w ocenie wysadzinowości podłoża

za nawierzchni drogowej wymaga dalszych badań związanych z określeniem stopnia zanieczyszczenia podłoża środkami do zimowego utrzymania.

Właściwości wysadzinowe gruntów i kruszyw zależą głównie od zawartości cząstek drobnych. Między zawartością cząstek drobnych w kruszywach przeznaczonych do podłoża nawierzchni a wysadziną zbadaną metodą bezpośrednią stwierdzono korelacje liniowe.

Wskaźnik plastyczności stosuje się często do oceny wysadzinowości gruntów i kruszyw. W badanym zakresie wskaźnika plastyczności $I_p = 0 \div 4,0\%$ nie stwierdzono korelacji między tym wskaźnikiem a wysadziną zbadaną metodą bezpośrednią. Ponadto, ze względu na trudności w oznaczaniu granic Atterberga gruntów o małej zawartości drobnych cząstek, uznano, że zarówno te granice, jak i wskaźnik plastyczności nie są odpowiednimi parametrami do oceny wysadzinowości kruszyw.

Między wskaźnikiem piaskowym a wysadziną określaną metodą bezpośrednią oraz między sorpcją błękitem metylenowym a wysadziną określaną metodą bezpośrednią stwierdzono korelacje nieliniowe. Wyniki oceny wysadzinowości kruszyw przy stosowanych kryteriach dotyczących wskaźnika piaskowego i sorpcji błękitem metylenowym dały dość zgodne rezultaty i właściwości te mogą być wykorzystywane do oceny wysadzinowości kruszyw metodami pośrednimi.

Podsumowując, można stwierdzić, że wysadzinowość gruntów i kruszyw stosowanych do podłoża nawierzchni drogowej może być oceniana na podstawie zawartości drobnych cząstek (< 0,02 mm, 0,075 mm i 0,125 mm), wskaźnika piaskowego lub sorpcji błękitem metylenowym.

LITERATURA

1. Ćwiąkała M., Kołodziejczyk U., Rafalski L.: The influence of selected chemical compounds used in winter road maintenance on the active capillarity of soils. *Journal of Soils and Sediments*, January 2013.

2. Ćwiąkała M., Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L.: Laboratory investigation of frost susceptibility of aggregates applied to road base courses. Proceedings of 6th Transport Research Arena, Warsaw 18-21 April, Transportation Research Procedia 14, 2016, 3476-3484.
3. Ćwiąkała M., Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L.: Recapitulation of research on frost susceptibility of unbound mixtures for pavement structures. Roads and Bridges – Drogi i Mosty 15/2016, 285-300.
4. Kraszewski C., Rafalski L., Wilczek J.: Investigations of unburnt coal shale modified by activated fly ash as material for road embankments. XV Danube – European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014) 9-11 September 2014, Vienna, Austria.
5. Kraszewski C., Rafalski L.: Laboratory examination of frost-having properties of road unbound mixtures based on fines content and plasticity index. Advances in Transportation Geotechnics, The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics, 4-7 September 2016, Guimaraes, Portugal, Procedia Engineering, Volume 143, 2016, 836-843.
6. Rafalski L.: Podłoże nawierzchni drogowej. Referat na XV Konferencję Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej, Bydgoszcz 2009.
7. Rafalski L.: Podłoże nawierzchni drogowej. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2009.
8. Rafalski L., Wilczek J.: Polish experience with testing of selected shales as material for road base courses. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
9. Rafalski L., Wilczek J., Kraszewski C.: Ochrona przeciwmrozowa nawierzchni drogowych na przykładzie wybranych krajów. Drogownictwo, nr 2/2014.