



MARTA WASILEWSKA

Politechnika Białostocka
marta.wasilewska@pb.edu.pl



SYLWIA ZAŚKIEWICZ

BUDIMEX SA
sylwia.zaskiewicz@budimex.pl



KRZYSZTOF
BŁAŻEJOWSKI

Orlen Asphalt Sp. z o.o.
krzysztof.blazejowski@orlen.pl

Odporność na szok termiczny kruszyw grubych przeznaczonych do mieszanek mineralno-asfaltowych

Trwałość nawierzchni wykonanych z mieszanek mineralno-asfaltowych jest uwarunkowana szeregiem czynników związanych z zastosowanymi materiałami oraz technologią ich wykonania. W trakcie wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych na skutek oddziaływania wysokiej temperatury mogą zachodzić istotne zmiany we właściwościach zarówno lepiszczy, jak i kruszyw drogowych [1]. Jednym z takich badań, dotyczących zmiany w wytrzymałości kruszyw grubych w wyniku poddawania ich krótkotrwałemu oddziaływaniu bardzo wysokiej temperatury, jest oznaczenie odporności na szok termiczny zgodnie z normą PN-EN 1367-5:2011 *Badania właściwości cieplnych i odporności na działanie czynników atmosferycznych – Część 5: Oznaczenie odporności na szok termiczny*. W krajowym dokumencie WT-1 2014, w którym zostały określone wymagania wobec kruszyw przeznaczonych do

mieszanek mineralno-asfaltowych, nie umieszczono kryteriów wobec odporności na szok termiczny. Należy zaznaczyć, że w czasopiśmie krajowych i zagranicznych jest bardzo mało publikacji poświęconych temu zagadnieniu. W publikacji [2] przedstawiono wyniki badania odporności na szok termiczny wykonanego na kruszywach z ponad 95 zakładów produkcyjnych. Jednak brak jest szczegółowej interpretacji wyników w odniesieniu do poszczególnych rodzajów kruszyw.

Zjawisko szoku termicznego jest definiowane jako reakcja materiału, która zmienia parametry fizyczne w wyniku wysokiej i nagłej zmiany temperatury otoczenia. W przypadku kruszyw, jego miarą jest strata wytrzymałości V_{LA} wyrażona jako różnica pomiędzy współczynnikami LA określającymi odporność na rozdrabnianie oznaczone na kruszywie grubym przed i po poddaniu ich przez 180 s oddziaływaniu temperatury 700°C. Na zjawisko szoku termicznego jest przede wszystkim narażone kruszywo podczas przejścia przez suszarkę, przed wymieszaniami składników mieszanki mineralno-asfaltowej. Wykonanie badania ma na celu symulację kontaktu wilgotnego kruszywa z bardzo wysoką temperaturą występującą w suszarce otaczarki. Zakładano, że na skutek gwałtownej przemiany wody w kruszywie w parę wodną kruszywo zostanie osłabione, a jego wytrzymałość zmniejszona. W przypadku, kiedy strata wytrzy-

małości kruszywa jest istotna, może to skutkować pękaniem kruszywa podczas zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej. Przypadki pęknięcia ziaren kruszywa podczas pracy walców występują dość często. Zwykle przyczynę przypisuje się zbyt dużej energii zagęszczenia lub nieodpowiedniej odporności na rozdrabnianie kruszywa. Dodatkową właściwością, która może mieć istotny wpływ na wytrzymałość kruszywa podczas wykonania i użytkowania nawierzchni, jest ich odporność na szok termiczny. W związku z tym przeprowadzono badania, które miały na celu wstępne rozpoznanie problematyki odporności kruszyw na szok termiczny. Z tego powodu też nie należy uogólniać otrzymanych wyników badań na inne złoża. Dodatkowo wykonano oznaczenia wybranych właściwości fizycznych, tj. nasiąkliwości i mrozoodporności, kruszyw w celu określenia korelacji pomiędzy tymi parametrami.

Program badań

Do badań wytypowano kruszywa grube z różnych rodzajów skał tzn.: ze skał magmowych (gabro, bazalt), osadowych (dolomit, wapień, kwarcyt, piaskowiec, złoża polodowcowe) i metamorficznych (granitognejs). Kruszywa tak dobrano, aby różniły się pod względem składu mineralnego, tekstury i struktury. W przypadku kruszywa z dolomitu uwzględniono materiały pochodzące z dwóch złóż. Natomiast w przypadku kruszyw ze złóż polodowcowych wybrano trzy złoża tak, aby różniły się między sobą składem litologicznym (fot. 1–3).



Fot. 1. Kruszywo polodowcowe 1 (fot. S. Zaśkiewicz)



Fot. 2. Kruszywo polodowcowe 2 (fot. S. Zaśkiewicz)



Fot. 3. Kruszywo polodowcowe 2 (fot. S. Zaśkiewicz)

Badanie odporności na szok termiczny przeprowadzono zgodnie z PN-EN 1367-5:2011. Pobieranie próbek odbywało się zgodnie z normą PN-EN 932-1 *Badania podstawowych właściwości kruszyw. Metody pobierania próbek*. Masa próbki laboratoryjnej była na tyle duża, aby umożliwiła wykonanie dwóch oznaczeń odporności na rozdrabnianie w bębnie *Los Angeles* zgodnie z PN-EN 1097-2:2010 *Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Metoda oznaczania odporności na rozdrabnianie*. Następnie przygotowano po dwie próbki kruszywa grubego frakcji 10/14 o masie nie mniejszej niż 15 kg, które wymyło i następnie wysuszone do stałej masy. Na pierwszej z próbek wykonano oznaczenie odporności na rozdrabnianie w bębnie *Los Angeles*. Drugą próbkę umieszczono w pojemniku z wodą dejonizowaną i pozostawiono w temperaturze pokojowej. Po 2 godzinach kruszywo rozłożono na tkaninie pochłaniającej wodę i delikatnie osuszano do momentu uzyskania suchej powierzchni. Następnie kruszywo równomiernie rozłożono na nagrzaną wcześniej specjalnej płycie badawczej (fot. 4), przykryto metalową siatką i umie-



Fot. 4. Próbkę kruszywa z gabra na płycie (fot. S. Zaśkiewicz)



Fot. 5. Piec do badania odporności na szok termiczny kruszyw (fot. S. Zaśkiewicz)

szono w piecu w temperaturze $700 \pm 50^\circ\text{C}$ w czasie 180 ± 5 s (fot. 5). Po schłodzeniu kruszywa do temperatury pokojowej przesiewano je przez sito o wymiarze 5 mm i zgodnie ze wzorem (1) określono procentowy udział podziarna, które powstało na skutek szoku termicznego.

$$I = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

w którym:

- I – procentowy udział podziarna powstałego na skutek szoku termicznego [%];
- M_1 – masa kruszywa wymytego i wysuszonego przed szokiem termicznym [g];
- M_2 – masa kruszywa przechodzącego przez sito 5 mm po szoku termicznym [g].

Kruszywa po szoku termicznym poddano następnie oznaczeniu odporności na rozdrabnianie w bębnie *Los Angeles*. Na podstawie różnicy współczynników *Los Angeles* LA kruszywa przed szokiem termicznym i po nim wyznaczono stratę wytrzymałości ze wzoru (2)

$$V_{LA} = LA_2 - LA_1 \quad (2)$$

w którym:

- V_{LA} – strata wytrzymałości kruszywa na skutek szoku termicznego [%];

LA_1 – współczynnik Los Angeles kruszywa, które nie zostało poddane szokowi termicznemu [%];

LA_2 – współczynnik Los Angeles kruszywa, które nie zostało poddane szokowi termicznemu [%].

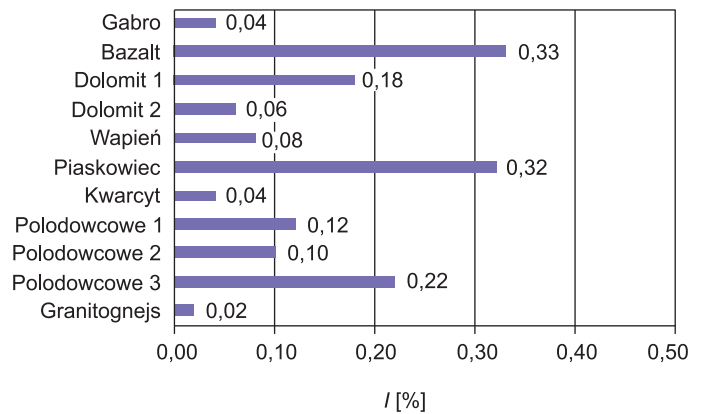
Dodatkowo wykonano oznaczenia podstawowych właściwości kruszyw grubych takich jak:

- nasiąkliwości i gęstości zgodnie z PN-EN 1097-6:2013 *Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw: Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości*;
- mrozoodporności zgodnie z PN-EN 1367-1:2007 *Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych. Oznaczanie mrozoodporności*.

Wyniki badań i ich analiza

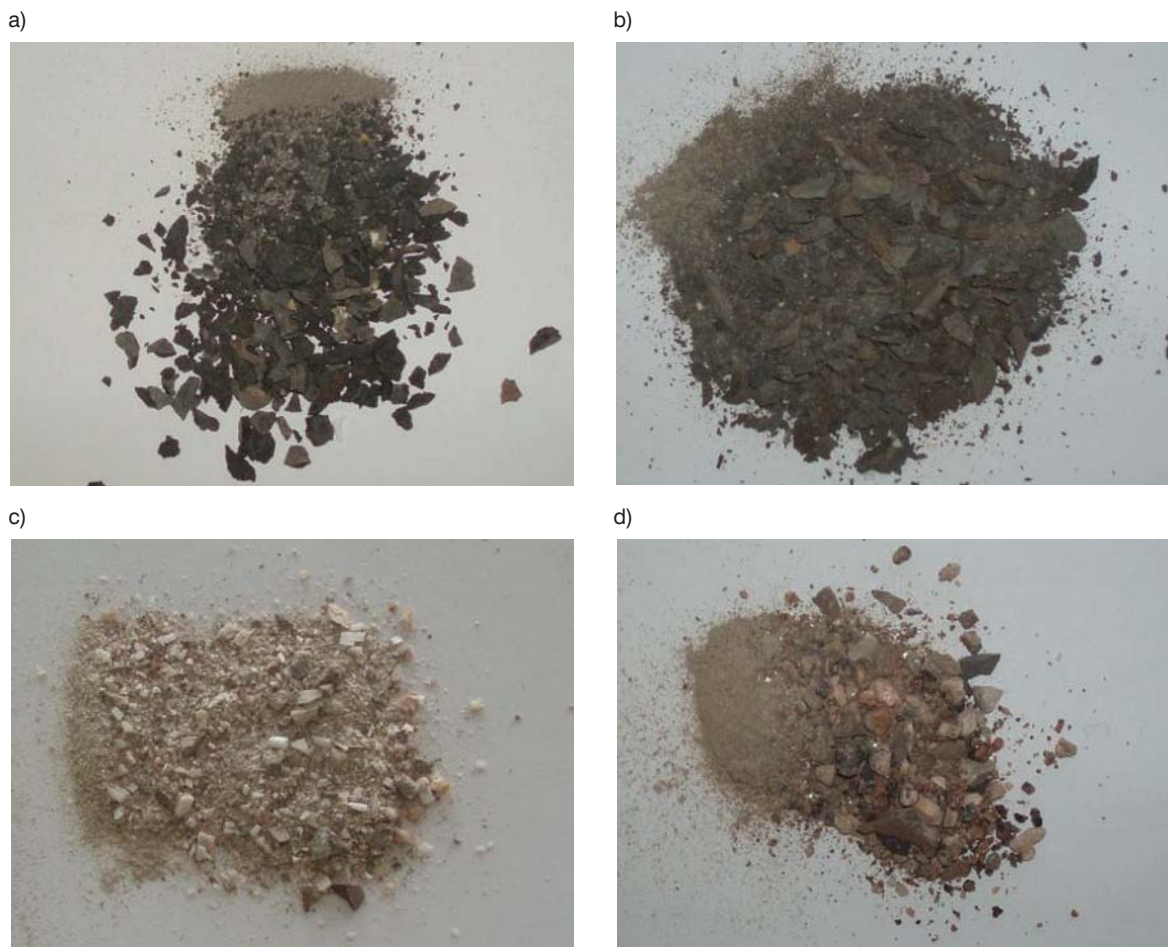
Na rysunku 1 przedstawiono procentowy udział podziarna I w poszczególnych kruszywach po szoku termicznym. Uzyskane wyniki są miarą wrażliwość kruszyw grubych na wysoką temperaturę.

Należy podkreślić, że w przypadku wszystkich kruszyw otrzymano bardzo małe procentowe udziały podziarna przechodzącego przez sito 5 mm, które nie przekraczają wartości 0,5 % [m/m]. Stwierdzono pewne różnice w reakcji kruszyw, jak również w zmianach ich wyglądu zachodzących na skutek poddawania ich oddziaływaniu wysokiej temperatury. Różnice te wynikają z charakterystyki petrograficznej skały, z której wyprodukowano kruszywo. Największy procentowy



Rys. 1. Procentowy udział podziarna I w poszczególnych kruszywach po szoku termicznym

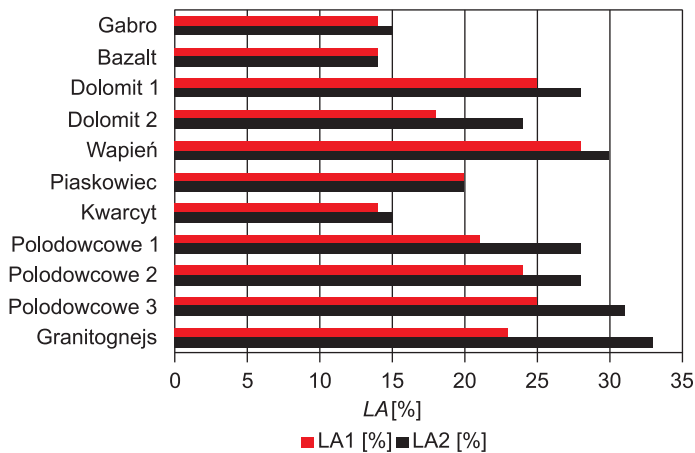
udział podziarna I powstałego na skutek szoku termicznego stwierdzono w przypadku kruszywa z bazaltu i piaskowca. W ich przypadku podczas badania występują głośne dźwięki tzw. „strzelanie”, co było spowodowane pękaniem poszczególnych ziaren kruszywa. Zauważono ponadto, że powstałe odłamki kruszywa bazaltowego i piaskowego mają płaski kształt, który kształtem przypomina łuski (fot. 6a i b). Zupełnie inny kształt miał materiał powstały na skutek szoku termicznego kruszyw z dolomitu (fot. 6c), wapienia i złóż polodowcowych (fot. 6d). Materiał ten charakteryzował się kubicznym kształtem ziaren o wymiarze od 2 do 5 mm. W przypadku



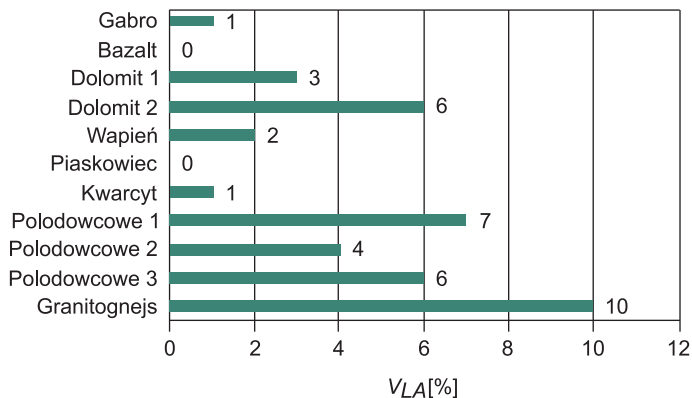
Fot. 6. Materiał przechodzący przez sito 5 mm kruszywa a) z bazaltu; b) piaskowca; c) dolomitu 1; d) polodowcowego 3 (fot. S. Zaśkie-wicz)

gabra, kwarcytu i granitognejsu procentowy udział podziarna I nie przekroczył nawet 0,05% [m/m].

Na rysunku 2 zamieszczono wyniki badań współczynników LA , przed i po szoku termicznym danego kruszywa.



Rys. 2. Wyniki współczynnika Los Angeles LA kruszyw przed i po szoku termicznym



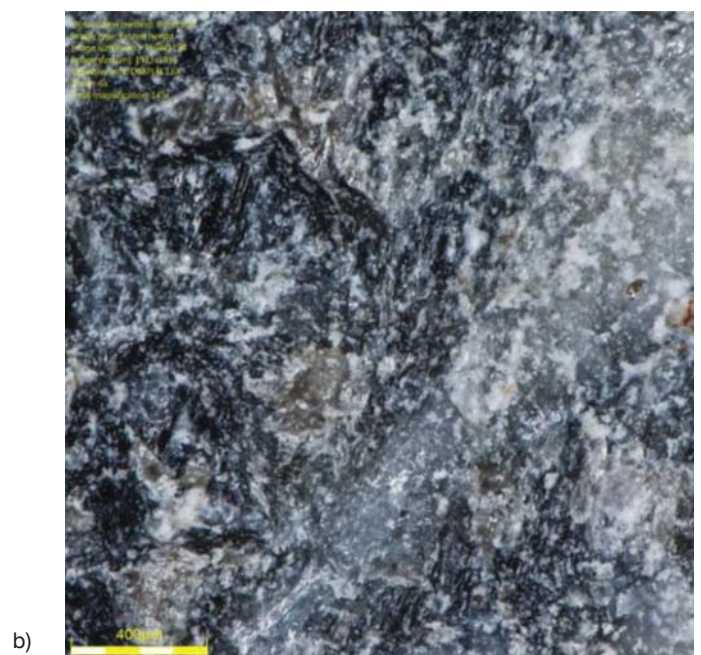
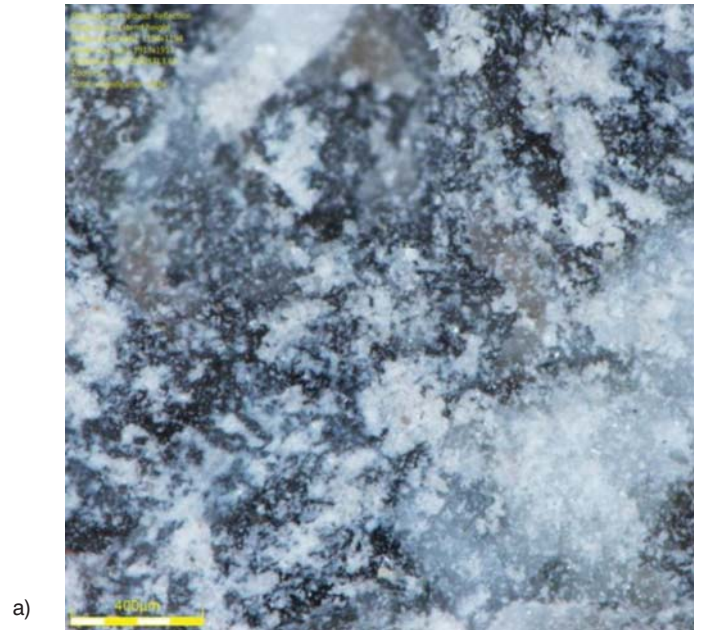
Rys. 3. Wyniki straty wytrzymałości V_{LA} kruszyw na skutek szoku termicznego

Oznaczenie odporności na rozdrabnianie w bębnie *Los Angeles* ma na celu odzwierciedlenie warunków, na które jest narażone kruszywo w czasie wbudowania mieszanki mineralno-asfaltowej (szczególnie zagęszczenie z zastosowaniem wibracji). Wszystkie badane kruszywa grube spełniły kryterium wobec wymaganej kategorii LA określonej w WT-1 2014 w odniesieniu do warstw podbudowy wiążącej, wykonanych z mieszanek mineralno-asfaltowych obciążonych ruchem kategorii od KR1 do KR7 [4]. Najbardziej restrykcyjne wymaganie wobec odporności na rozdrabnianie zostało ustalone w odniesieniu do kruszyw przeznaczonych do warstwy ścieralnej o kategorii ruchu KR5-KR7 ($LA < 25\%$). Otrzymane wyniki współczynników LA kruszyw grubych, z wyjątkiem kruszywa wapiennego ($LA 28\%$), świadczą o spełnieniu też tego kryterium.

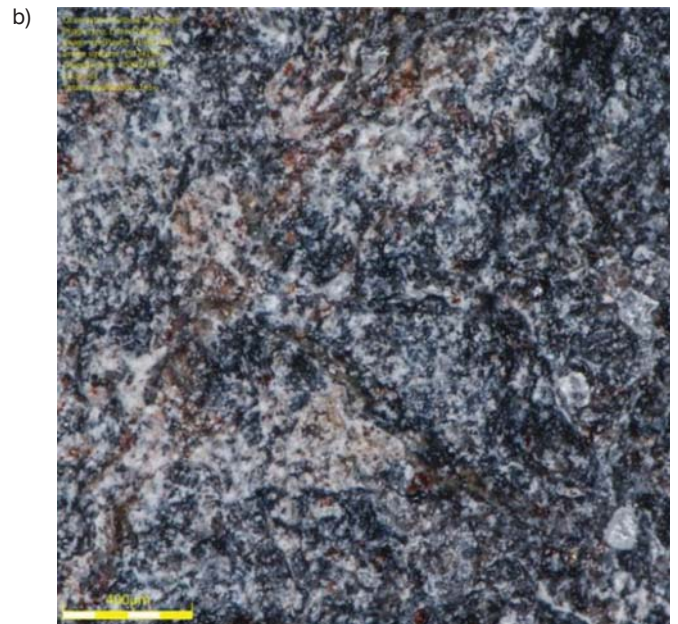
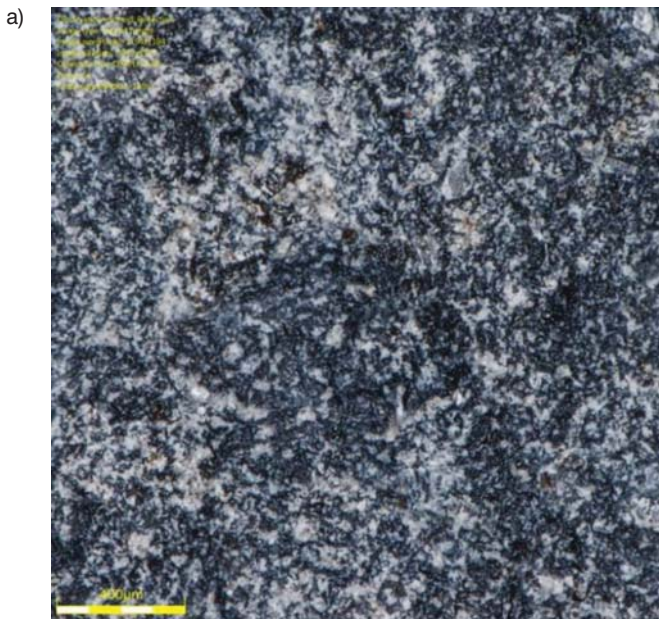
Po szoku termicznym w większości badanych kruszyw wartości współczynników LA_2 kruszyw są wyższe w stosunku wartości LA_1 . Straty wytrzymałości V_{LA} są zróżnicowane i mieszczą się w przedziale od 0 do 10%. W przypadku kruszywa z granitognejsu otrzymano wartość równą 10%, pomimo

że ilość podziarna I wyniosła tylko 0,02%. Warto zauważyć, że V_{LA} równe 0 uzyskano przy kruszywach, które charakteryzowały się dość dużym wskaźnikiem I , tj. bazaltu i piaskowca. Przyczyną tego jest usunięcie z próbek najłagodniejszych części ziaren, które odpadły w wyniku działania temperatury (części odsiane na sicie 5 mm).

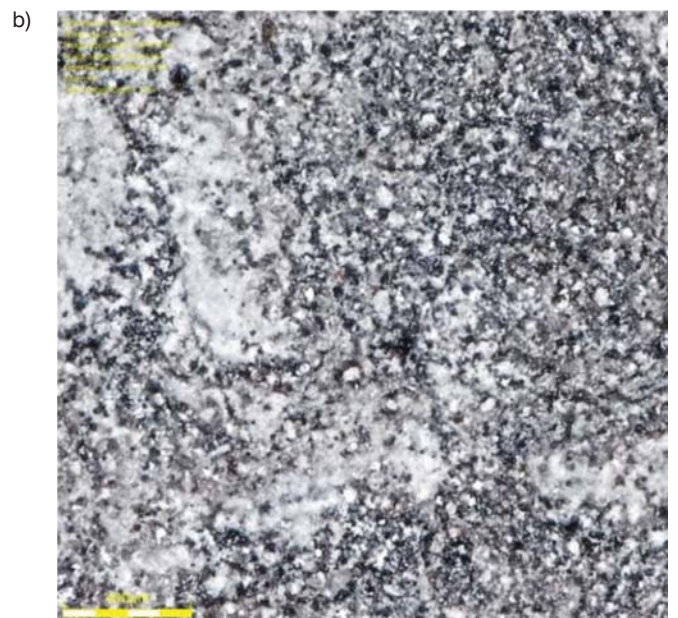
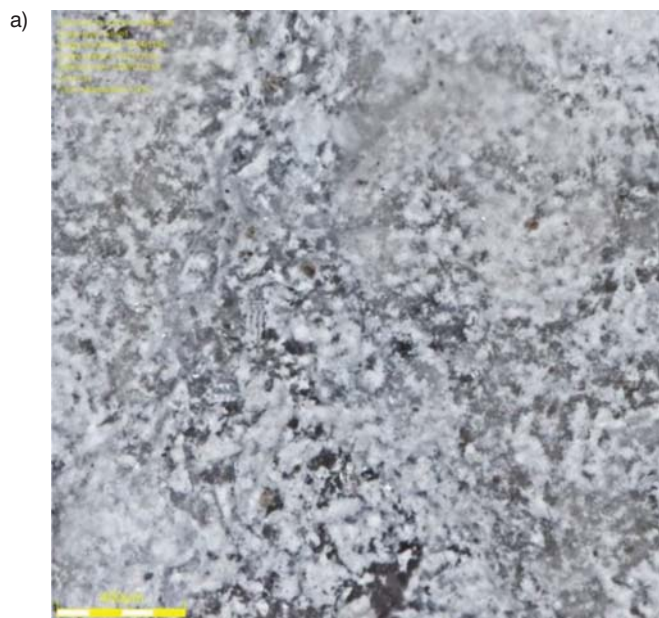
W celu sprawdzenia jakie zmiany powstały na powierzchni kruszywa na skutek szoku termicznego i badaniu w bębnie *Los Angeles*, wykorzystano obrazy wykonane pod mikroskopem optyczno-cyfrowym. Na fotografiach 7–8 przedstawiono obrazy powierzchni kruszywa gabra, bazaltowego oraz wapiennego przed wykonaniem oznaczenia odporności na szok termiczny i po nim.



Fot. 7. Obrazy powierzchni ziaren kruszyw gabra a) przed i b) po wykonaniu oznaczenia odporności kruszywa na szok termiczny (fot. M. Wasilewska)



Fot. 8. Obrazy powierzchni ziaren kruszywa bazaltowego a) przed i b) po wykonaniu oznaczenia odporności na szok termiczny (fot. M. Wasilewska)



Fot. 9. Obrazy powierzchni ziaren kruszywa wapiennego a) przed i b) po wykonaniu oznaczenia odporności na szok termiczny (fot. M. Wasilewska)

Naturalna tekstura ziaren kruszyw przed badaniem zależy od struktury skały oraz od właściwości mechanicznych minerałów (stopnia łupliwości minerałów lub jego braku – przełam). Najbardziej zróżnicowaną rzeźbą mikronierówności charakteryzowały się kruszywa ze skał o jawnokrystalicznej strukturze – gabra i granitognejs oraz ziarna granitów, sjenitów, gnejsów i diorytów wchodzących w skład kruszyw polodowcowych. Porównując obrazy przed oznaczeniem i po nim zauważono, że zmiany widoczne na powierzchni kruszywa powstały w większości na skutek uderzeń kul stalowych w bębnie *Los Angeles*. Jedynie w przypadku kruszywa wapiennego i dolomitowego zaobserwowano bardziej porowatą teksturę po badaniu.

W celu sprawdzenia czy istnieje korelacja pomiędzy parametrami charakteryzującymi odporność na szok termiczny i parametrami opisującymi inne właściwości kruszyw, wykonano oznaczenia gęstości ziaren ρ_a , gęstości ziaren wysuszonych w suszarce ρ_{rd} , gęstości ziaren nasyconych i powierzchniowo osuszonych ρ_{ssdr} , nasiąkliwości W_{24} , oraz mrozoodporności w wodzie F . Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Analizę zależności rozpoczęto od sporządzenia macierzy korelacyjnych wykresów rozrzutu zmiennych X i Y (rys. 4). Ten sposób prezentacji danych umożliwia przeprowadzenie wizualnej oceny siły i rodzaju zależności korelacyjnych pomiędzy parametrami (zmiennymi), które odnoszą się do poszczególnych właściwości kruszyw [3].

Tabela 1. Wyniki badań kruszyw grubych

Lp.	Rodzaj kruszywa	ρ_a [Mg/m ³]	ρ_{rd} [Mg/m ³]	ρ_{osd} [Mg/m ³]	WA ₂₄ [%]	F [%]
1	Gabro	3,04	2,97	2,99	0,7	0,2
2	Bazalt	3,14	3,00	3,04	1,5	0,8
3	Dolomit 1	2,78	2,72	2,74	0,8	1,7
4	Dolomit 2	2,82	2,76	2,78	0,7	1,7
5	Wapień	2,69	2,55	2,60	1,9	1,4
6	Piaskowiec	2,72	2,66	2,68	0,9	0,6
7	Kwarcyt	2,66	2,61	2,63	0,6	0,2
8	Polodowcowe 1	2,71	2,64	2,66	1,0	0,9
9	Polodowcowe 2	2,70	2,64	2,66	1,0	0,9
10	Polodowcowe 3	2,71	2,63	2,66	1,1	0,9
11	Granitognejs	2,67	2,64	2,65	0,5	0,2

Tabela 2. Wartości współczynnika korelacji r pomiędzy poszczególnymi zmiennymi

Zmienne	V _{LA}	I	WA ₂₄	F
V _{LA}	–	$r = -0,440$ $p = 0,176$	$r = -0,342$ $p = 0,303$	$r = 0,069$ $p = 0,840$
I	$r = -0,440$ $p = 0,176$	–	$r = 0,385$ $p = 0,242$	$r = 0,143$ $p = 0,675$
WA ₂₄	$r = -0,342$ $p = 0,303$	$r = 0,385$ $p = 0,242$	–	$r = 0,375$ $p = 0,256$
F	$r = 0,069$ $p = 0,840$	$r = 0,143$ $p = 0,675$	$r = 0,375$ $p = 0,256$	–

Określone współczynniki korelacji liniowej Pearsona r , pozwalają ocenić wzajemne powiązanie pomiędzy poszcze-

gólnymi zmiennymi na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Korelacje są statystycznie istotne, kiedy określona w programie STATISTICA 10 wartość testowa $p < \alpha$ [3]. W tabeli 2 zamieszczono współczynniki korelacji r i wartości p w odniesieniu do poszczególnych zmiennych.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że nie występują zależności liniowe pomiędzy poszczególnymi parametrami, które odnoszą się do poszczególnych właściwości badanych kruszyw.

Podsumowanie

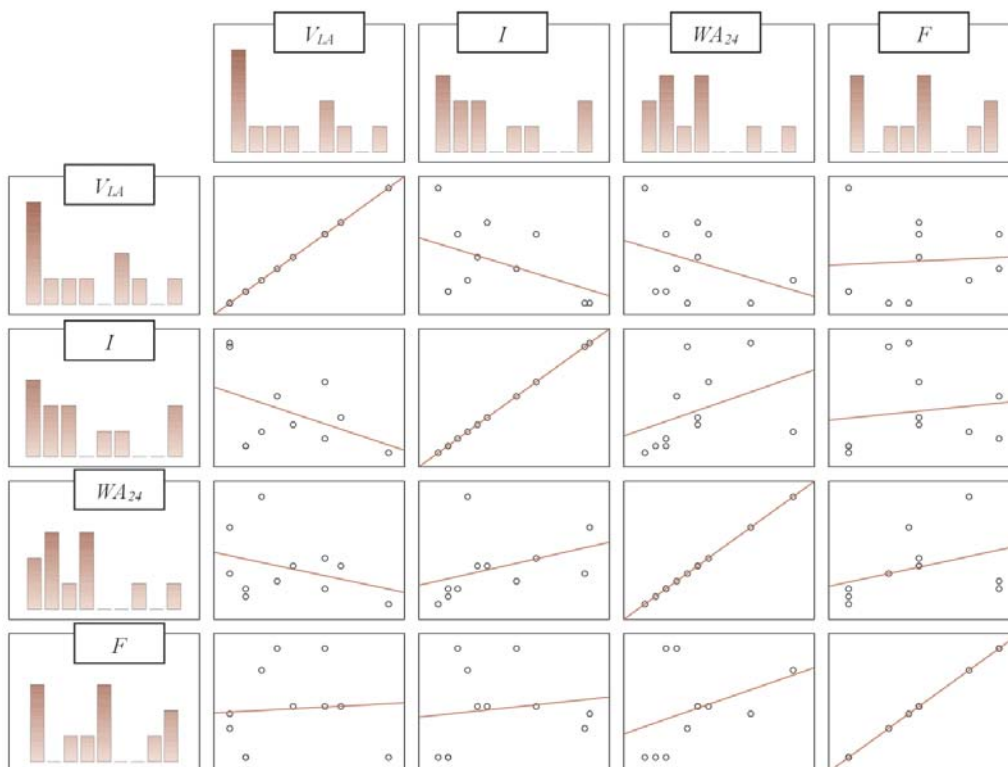
Na szok termiczny narażone jest głównie kruszywo grube podczas wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej. Na podstawie wykonanego zakresu badań wykazano, że strata wytrzymałości V_{LA} w przypadku badanych kruszyw zawiera się w przedziale od 0 do 10%. Szczególną uwagę należy zwrócić na kruszywa ze skał jawnokrystalicznych, które odznaczają się niższą odpornością na rozdrabnianie. Wykorzystanie obrazów z mikroskopu optycznego pozwoliły głównie zidentyfikować zniszczenia po badaniu w bębnie *Los Angeles* występujące na powierzchni ziaren kruszywa. Jedynie na powierzchni kruszyw ze skał osadowych można było zaobserwować powierzchniową porowatość powstałą na skutek szoku termicznego. Nie stwierdzono natomiast istotnej korelacji pomiędzy parametrami charakteryzującymi nasiąkliwość i mrozoodporność a odpornością na szok termiczny w grupie ocenianych kruszyw. Uzyskane wyniki okazały się na tyle interesujące, że badania w tym zakresie powinny być kontynuowane z uwzględnieniem innych kruszyw, w szczególności o zróżnicowanej charakterystyce petrograficznej.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować Instytutowi Badawczemu Materiałów Budowlanych w Warszawie, za udostępnienie laboratoriów do wykonania badań oraz wsparcie w procesie badawczym.

Bibliografia

- [1] Błażejowski K., Styk S.: *Nawierzchnie drogowe*. Poradnik – Technologia warstw asfaltowych. WKŁ, Warszawa, 2004
- [2] Góralczyk S., Kukielska D.: *Jakość krajowych kruszyw*. *Górnictwo i Geoinżynieria*, Rok 34, Zeszyt 4, 2010.
- [3] Stanisław A.: *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny. Tom 1. Statystyki podstawowe*. StatSoft. Kraków, 2006.
- [4] Załącznik do zarządzenia Nr 46 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 25.09.2014 r. *Kruszyw do mieszank mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utwardzeń na drogach krajowych*. WT-1 2014. *Kruszywa. Wymagania Techniczne*. Warszawa, 2014



Rys. 4. Macierzowy wykres rozrzutu zmiennych