



foto: Grzegorz Łuj

Wpływ kruszywa na trwałość betonowej kostki brukowej

O roli kruszywa w technologii betonu nikogo nie trzeba przekonywać. Od jego jakości zależą w znacznej mierze późniejsze parametry betonu, w tym między innymi betonowej kostki brukowej z betonu wibroprasowanego.

Tabela 1. Przykładowe dane wg PN-86/B-06712 Kruszywa mineralne do betonu

grys jednofrakcyjny powyżej 4 mm i wielofrakcyjny	
	nie więcej niż; [%]
Marka	30
Wytrzymałość na miażdżenie	12
Zawartość ziarn słabych	-
Nasiąkliwość	1,5
Mrozoodporność	3,0
Zawartość ziarn nieforemnych	20
Zawartość pyłów mineralnych	1,5
Zawartość zanieczyszczeń obcych	0,25
Zawartość związków siarki	0,1
Zawartość zanieczyszczeń organicznych	barwa nie ciemniejsza od wzorcowej

Tabela 2. Zakres uziarnienia kruszywa wg PN-86/B-06712 i PN-EN 12620:2004

Kruszywo	Wymiar	Przesiew, w % masowych					Kategoria
		2D	1,4D	D	d	d/2b	
Grube	D/d ≤ 2 lub D ≤ 11,2 mm	100	98-100	85-99	0-20	0-5	G_c85/20
	Żwir 2-8 mm	100	-	85-100	0-15	-	-
	D/d > 2 i D > 11,2 mm	100	98-100	90-99	0-15	0-5	G_c90/15
	Żwir 2-16 mm	100	-	85-100	0-15	-	-
Drobne	D ≤ 4 i d = 0	100	95-100	85-99	-	-	G_f85
	Piasek 0-2 mm	100	-	85-100	-	30-60	-
Naturalnie uziarnione 0/8	D = 8 mm i d = 0	100	98-100	90-99	-	-	G_{Ng}90
	0-8 mm	100	-	85-100	-	-	-
O ciągłym uziarnieniu	D ≤ 45 mm i d = 0	100	98-100	90-99	-	-	G_A90
		100	98-100	85-99	-	-	G_A85
	0-16 mm	100	-	85-100	-	-	-
UWAGA:	Klasyfikacja wg PN-EN 12620:2004		Klasyfikacja wg PN-86/B-06712				

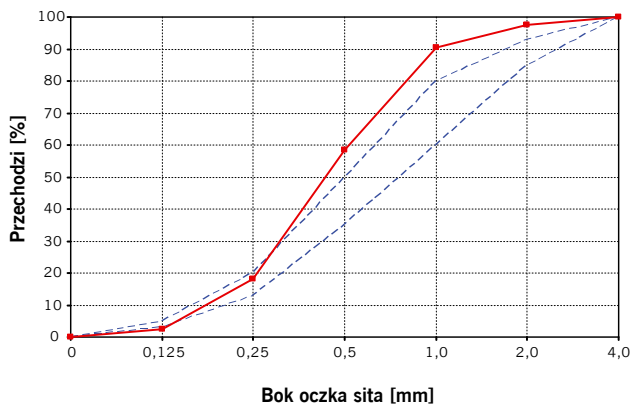
Technologia produkcji betonowej kostki brukowej charakteryzuje się pewnym zespołem cech, które determinują specyficzny dobór kruszywa. Przede wszystkim pamiętać należy, że zdecydowana większość betonowych elementów brukowych zaliczana jest do tzw. wyrobów małogabarytowych, których cechą szczególną jest grubość nieprzekraczająca z reguły 8 cm.

Natomiast wymagania co do parametrów mechanicznych i trwałości są bardzo wysokie. Sam fakt, że w wydawanych przed 2004 rokiem aprobatkach technicznych wytrzymałość na ścisnienie kostki brukowej w gatunku I wynosiła co najmniej 50 MPa, a w normie niemieckiej DIN co najmniej 60 MPa wymuszał zachowanie wyjątkowej staranności w prowadzeniu procesu technologicznego, w tym również w doborze kruszywa.

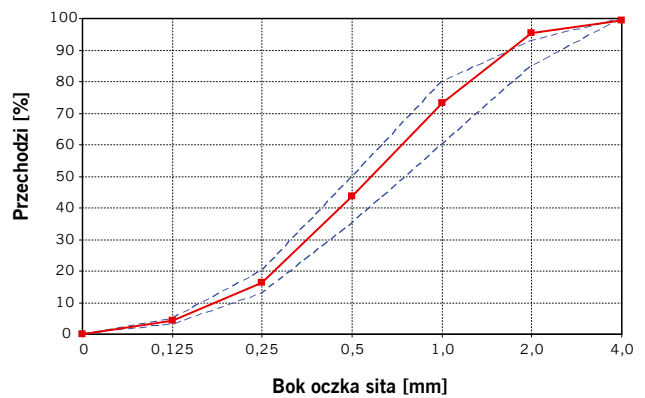
W składzie mieszanki betonowej do produkcji kostki brukowej udział kruszywa waha się w granicach 70-80%, dlatego błędy jakościowe i ilościowe popełnione przy doborze kruszywa niosą ze sobą daleko idące konsekwencje dla jakości produkowanych wyrobów. Dodać również trzeba, że wiele z tych błędów jest niemożliwych do skorygowania ani przez podniesienie ilości cementu, ani też przez zastosowanie dodatków czy domieszek chemicznych.

Dobór odpowiedniego kruszywa do produkcji betonowej kostki brukowej jest zatem sprawą szczególnie istotną. Jeszcze nie tak dawno był również znacznie ułatwiony. Funkcjonująca kilka lat temu norma PN-86/B-06712 „Kruszywa mineralne do betonu” w znacznej mierze taki wybór ułatwiała, ponieważ bardzo ściśle definiowała tzw. markę kruszywa, czyli zespół wielu cech i ich minimalnych bądź maksymalnych wartości, jakimi powinno charakteryzować się kruszywo. Przykład pokazano w tabeli 1.

Do produkcji betonowej kostki brukowej zalecano stosowanie kruszyw marki co najmniej 30 wg PN-86/B-06712 ewentualnie „dobrej jakości” marki 20, których przydatność wykazały próby technolo-



Rys. 1a. Krzywa uziarnienia zastosowanego piasku drobnego



Rys. 2a. Krzywa uziarnienia mieszaniny piasków

giczne. W momencie wprowadzenia normy PN-EN 12620:2004 „Kruszywa do betonu” sprawa doboru kruszyw do produkcji betonowej kostki brukowej nieco się skomplikowała. Przede wszystkim zniknęło pojęcie marki kruszywa. Natomiast wprowadzone zostało pojęcie kategorii definiowanej jako poziom właściwości kruszywa wyrażony jako przedział wartości lub wartość graniczna dla danego parametru. Przy czym norma nie wprowadza zależności pomiędzy kategoriami różnych właściwości, czyli nie definiuje ogólniejszego pojęcia, jakim była dawniej marka kruszywa. Producent kruszywa zobowiązany jest do deklarowania kategorii kruszywa, jakie produkuje, jednak norma nie narzuca wykonywania wszystkich badań. Wręcz jest w niej

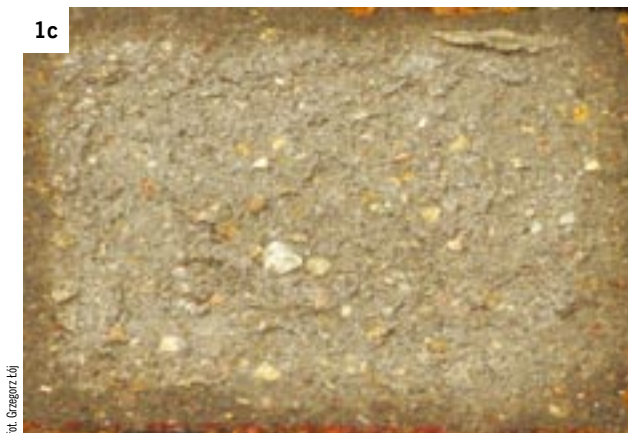
zapisane, że „konieczność badania i deklarowania ... właściwości powinna być ograniczona do poszczególnych zastosowań lub pochodzenia kruszywa”.

W myśl tej zasady to technolog zakładu produkującego kostkę brukową powinien określić minimalne parametry kruszyw potrzebnych mu do produkcji i dopiero mając takie wymagania powinien zwrócić się do wytwórcy kruszyw. Jak wygląda praktyka, sami Państwo wiedzą.

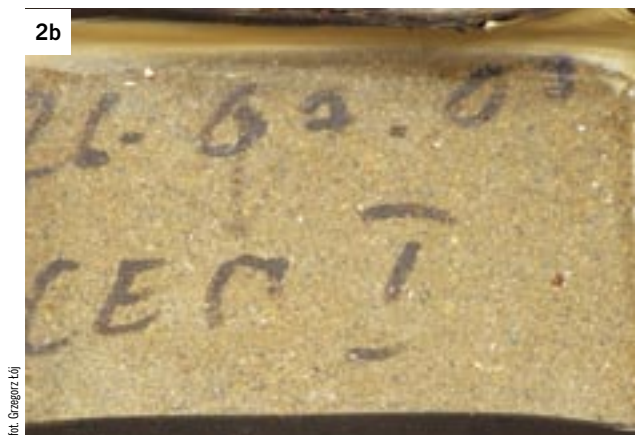
Nie zawsze to, czego byśmy potrzebowali, jest dostępne na naszym rynku lokalnym. W chwili obecnej dobór kruszywa do produkcji kostki brukowej jest daleko idącym kompromisem nie tylko pomiędzy wymaganiami ekonomicznymi a technologią,



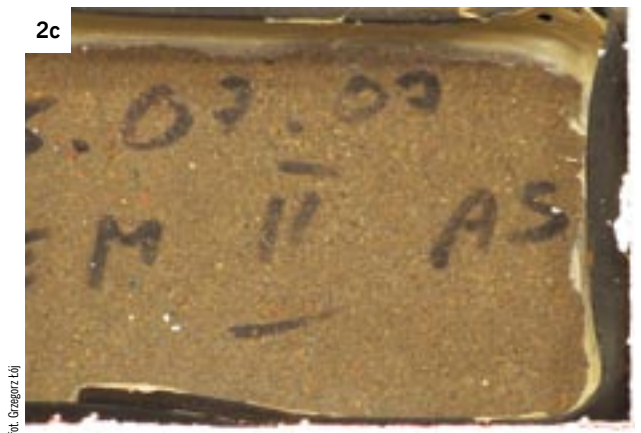
Rys. 1b. Próbką wykonana na cemencie CEM I 42,5R po ocenie odporności na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzających (ubytek masy 0,43 kg/m²)



Rys. 1c. Próbką wykonana na cemencie CEM I 42,5R po ocenie odporności na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzających (ubytek masy 2,32 kg/m²)



Rys. 2b. Próbką wykonana na cemencie CEM II/A-S 42,5R po ocenie odporności na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzających (ubytek masy 0,01 kg/m²)



Rys. 2c. Próbką wykonana na cemencie CEM III/A-S 42,5R po ocenie odporności na zamrażanie/rozmarzanie z udziałem soli odladzających (ubytek masy 0,02 kg/m²)



fot. Grzegorz Łój

Fot. 3. Uszkodzenia kostki brukowej spowodowane pęcznieniem kruszywa grubego podczas cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Spękania warstwy licowej

ale również i trzecim czynnikiem, którym jest dostępność tego surowca na rynku. Do produkcji betonowej kostki brukowej stosuje się zarówno kruszywa żwirowo-otoczkowe, jak i kruszywa łamane ze skał takich jak np. bazalty, granity czy nawet wapień. Jeśli chodzi o uziarnienie, to specyfika technologii produkcji betonowej kostki brukowej i innych betonowych elementów brukowych, takich jak płyty chodnikowe i krawężniki, wymusza stosowanie głównie kruszyw grubych frakcjonowanych o uziarnieniu 2-8 mm oraz piasków 0-2 lub 0-4 mm. Niekiedy, jeśli technologia w danym zakładzie tego wymaga lub na to pozwala, stosowane są frakcje 1-4 mm i 8-16 mm jako uzupełnienie stosu okruszowego mieszanki betonowej.

Ograniczenie maksymalnej wielkości ziarna do 8 mm wynika zarówno z przyczyn estetycznych jak i jakościowych. Grubsze ziarna kruszywa przy zagęszczaniu mieszanki betonowej metodą wibroprasowania mają tendencję do podnoszenia się do góry, co powoduje pogorszenie estetyki wyrobów

Fot. 4. Uszkodzenia kostki brukowej spowodowane pęcznieniem kruszywa grubego podczas cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Odprysk na warstwie licowej w postaci charakterystycznego „lejka” z kruszywem pęczniącym – w tym wypadku marglem w środku



fot. Grzegorz Łój

(w przypadku elementów jednowarstwowych) i naruszenie jednorodności mikrostruktury zagęszczonego betonu. Może to w konsekwencji spowodować obniżenie trwałości betonu, szczególnie w warunkach intensywnego stosowania soli odładzających.

Zestawienie stosu okruszowego do produkcji mieszanki betonowej jest uzależnione od stosowanej technologii. I tak dla kostki jednowarstwowej stosuje się z reguły mieszankę kruszynową o uziarnieniu 0-8 mm i punkcie piaskowym w granicach 50-65%. Natomiast do produkcji elementów dwóch zestawów kruszywa o uziarnieniu odpowiednio:

- dla warstwy konstrukcyjnej 0-8 mm (0-16 mm) i punkcie piaskowym 40-55%
- dla warstwy fakturowej 0-3 mm (0-4 mm) i punkcie piaskowym $\geq 85\%$ (natomiast uziarnienie kostek o powierzchni uszlachetnianej musi być dostosowane do specyfiki konkretnej technologii ich obróbki).

W tabeli 2 porównane zostały wymagania dotyczące uziarnienia starej i nowej normy dla kruszyw do betonu.

Wprowadzenie przez nową normę dodatkowego kryterium wielkości nadziarna, tj. 1,4D spowodowało, że w wielu wypadkach zamawiając np. kruszywo 2-8 mm zakłady otrzymywały materiał o dominującym uziarnieniu do 6 mm. Stwarzało to niejednokrotnie konieczność nie tylko przeprojektowania receptur dla mieszanek betonowych, ale również znacznej korekty ustawień agregatu formującego. Zdarzały się również przypadki, że zastosowanie takiego kruszywa pogorszyło znacznie wytrzymałości na rozłupywanie betonowej kostki brukowej oraz zwiększało jej nasiąkliwość.

Dlatego w nowoczesnych zakładach produkcyjnych stosuje się system zestawiania odpowiedniego stosu okruszowego mieszanki betonowej nawet z 3 lub 4 kruszyw. Oprócz poprawy i stabilizacji parametrów gotowych wyrobów otrzymuje się mieszankę kruszynową o odpowiednio niskiej jamistości, przez co pozostaje znacznie mniej pustych przestrzeni do wypełnienia przez zaczyn cementowy, co z kolei przynosi często wymierny efekt ekonomiczny.

Zestawienie optymalnego stosu okruszowego oraz stosunku zaczynu do kruszywa tak, aby zaczyn cementowy szczelnie go wypełniał, stwarza optymalne warunki zagęszczania mieszanki betonowej metodą wibroprasowania. Ma to zasadniczy wpływ na uzyskanie szczelnego betonu, dzięki czemu poprawiają się nie tylko parametry mechaniczne i trwałość betonu, szczególnie w warunkach zamrażania/rozmrażania z udziałem środków odładzających, ale również zmniejsza się ryzyko powstawania wykwitów na powierzchni elementów brukowych.

Jak istotny jest wpływ uziarnienia kruszywa na odporność warstwy licowej kostki brukowej na działanie soli odładzających, pokazuje przykład przedstawiony na rysunkach 1 i 2. Zastosowanie zbyt drobnego kruszywa spowodowało znaczne pogorszenie odporności warstwy licowej kostki brukowej, szczególnie w przypadku zastosowania do produkcji cementów portlandzkich z dodatkami z grupy CEM II.

Gwoli ścisłości dodać należy, że analizując metodykę badania mrozoodporności zgodnie z euronormami na kostkę brukową odnieść można wrażenie, że na działanie mrozu narażona jest tylko warstwa licowa kostki brukowej. Nic bardziej mylnego. Jaki wpływ na mrozoodporność kostki ma dobór kruszywa do betonu warstwy konstrukcyjnej, można zobaczyć na przytoczonych niżej przykładach.

Przykład 1.

Obecność w kruszywie ziaren nietrwiałych

Do produkcji betonowej kostki brukowej wykorzystane zostały żwiry morenowe sklasyfikowane jako granitowo-wapienne. Pomimo bardzo dobrych parametrów, takich jak wskaźnik rozdrabniania w bębnie Los Angeles LA_{25} , nasiąkliwość nieprzekraczająca 1,6% czy mrozoodporność F_1 , kruszywo to spowodowało uszkodzenia elementów brukowych w ciągu jednej zimy. Dla sprawdzenia przyczyn tych uszkodzeń kostkę brukową poddano wstępnie badaniu mrozoodporności tzw. metodą zwykłą, czyli bez udziału soli odładzających wg PN-88/B-06250. Zaplanowane na 150 cykli zamrażania/rozmarzania testy przerwano już po 60 cyklach, a efekty działania mrozu można zobaczyć na zdjęciach (rys. 3, 4, 5).

W tym przypadku zniszczenia betonu w betonowych elementach brukowych spowodowane były obecnością tzw. ziaren nietrwiałych. Prof. Adam Neville w swojej książce „Właściwości betonu” (edycja polska, wydanie 4, Kraków 2000) wyróżnia dwa podstawowe rodzaje takich ziaren. Pierwszy rodzaj to ziarna ulegające rozpadowi, natomiast do rodzaju drugiego zaliczmy ziarna, które wykazują niszczące pęcznienie przy zamarzaniu lub nawet przy działaniu wody.

Trwałość kruszywa oznacza jego zdolność do przenoszenia znacznych zmian objętości spowodowanych zmiennością warunków fizycznych takich jak: zamrażanie i odmarżanie, zmiany cieplne przy temperaturach powyżej punktu zamarzania oraz przemienne nawilżanie i suszenie. Kruszywo uważane



fol. Gregorz Luj

jest za nietrwiałe, jeśli zmiany jego objętości, wywołane czynnikami fizycznymi, spowodują zniszczenie betonu. Zakres takiego zniszczenia może być bardzo różny, od miejscowego złuszczenia lub tzw. odprysków, do rozległych pęknięć powierzchni, a nawet w krańcowych przypadkach do rozpadu betonu na znacznej głębokości. Na zdjęciach próbek poddanych badaniu mrozoodporności widoczne są dwa pierwsze rodzaje zniszczeń, natomiast gdyby badane próbki poddano większej ilości cykli zamrażania i rozmrażania, to mogłyby pojawić się jeszcze zniszczenia struktury całego elementu, o czym może świadczyć rozległe pęknięcie widoczne na powierzchni elementu (zdjęcie 3).

Do ziarn nietrwiałych zaliczamy porowate rogowce, łupki osadowe, niektóre wapienie, szczególnie wapienie uwarstwione (poprzerastane warstwami minerałów ilastych, margle) oraz niektóre piaskowce. Zaznaczyć tutaj trzeba, że jeżeli takie kruszywo

Fot. 5. Uszkodzenia kostki brukowej spowodowane pęcznieniem kruszywa grubego podczas cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Ubytek krawędzi bocznej spowodowany pęcznieniem i rozpadem ziarna kruszywa



Fot. 6.

fol. Marcin Burek



fot. Mariusz Buzarek

Fot. 7.

znajduje się w warunkach, w których ma możliwość odprowadzania wody (kruszywo nieotoczone zaczynem cementowym) będzie wykazywało odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. W powyżej przytoczonej książce prof. A. Neville'a znajdziemy również stwierdzenie, że trwałość takiego kruszywa nie może być w pełni określona inaczej niż wtedy, kiedy kruszywo otoczone jest uwodnionym zaczynem cementowym: ziarno może być dostatecznie wytrzymałe na przenoszenie ciśnienia lodu, lecz pęcznienie może spowodować rozerwanie otaczającej je zaprawy. Zjawisko takie zostało zauważone w badanych próbkach kruszywa, które w badaniach wykazały się współczynnikiem mrozoodporności F_1 i F_2 , niską nasiąkliwością oraz dobrymi parametrami mechanicznymi, natomiast doprowadziły do destrukcji elementów betonowych.

Zgodnie z sugestiami prof. A. Neville'a, nie istnieje lepszy sposób weryfikacji właściwości kruszywa zawierającego ziarna nietrwałe jak tylko poprzez poddanie go ocenie mrozoodporności w betonie.

**Przykład 2.
Zanieczyszczenia organiczne
i niewłaściwie dobrany stos okruschowy**

Początkowo wykonane badania bieżące kostki brukowej nie wskazywały na tak drastycznych jak pokazany na zdjęciach 6-8 finał oceny odporności kostki brukowej na zamrażanie/rozmrażanie z udziałem soli odladzających.

Fot. 8.



fot. Mariusz Buzarek

Wytrzymałość kostki na rozłupywanie wynosiła ok. 3,8 MPa, nasiąkliwość była na poziomie ok. 5,3%, nawet złuszczenie betonu z powierzchni po 28 cyklach badania odporności na środki odladzające mieściła się w granicach wyznaczonych przez normę i wynosiła ok. 0,7 kg/m². Natomiast zaskoczeniem dla badających była całkowita destrukcja warstwy konstrukcyjnej podczas testów zamrażania/rozmrażania z udziałem soli odladzających.

Przyczyną tak poważnych uszkodzeń było przede wszystkim nieprawidłowe dobranie uziarnienia zarówno w warstwie licowej jak i w warstwie konstrukcyjnej badanych elementów. Dodatkowym czynnikiem była w tym przypadku obecność w kruszywie zanieczyszczeń organicznych, które wpłynęły na zaburzenie procesu hydratacji cementu.

Od nawierzchni z betonowej kostki brukowej wymaga się szeregu cech, w szczególności przenoszenia odpowiednich obciążeń, trwałości w różnych warunkach pogodowych oraz zachowania odpowiedniej estetyki, mimo bardzo intensywnej eksploatacji. Dlatego od technologa zależy w znacznej mierze, czy poprzez odpowiednie dobranie surowców, w tym przede wszystkim kruszywa, wyprodukowany zostanie wyrób o odpowiednich parametrach.

Na zakończenie zwrócić jeszcze trzeba uwagę na to, jak normy dla elementów brukowych odnoszą się do wymagań dla surowców. W rozdziale 4 normy PN-EN 1338:2005 „Betonowa kostka brukowa. Wymagania i metody badań” oraz w normach dla krawężników i płyt brukowych czytamy:

„Do produkcji betonowych kostek brukowych powinny być stosowane tylko takie materiały, których przydatność do stosowania została ustalona pod względem ich właściwości i skuteczności. Wymagania dotyczące przydatności stosowanych materiałów producent powinien podawać w dokumentacji kontroli produkcji”.

Dlatego wprowadzając jakiegokolwiek zmiany w technologii, a szczególnie w stosowanych surowcach, trzeba się poważnie zastanowić, jakie będą one miały konsekwencje dla jakości produkowanych elementów. Jeśli jakość przedstawionych do akceptacji surowców budzi jakiegokolwiek wątpliwości, to lepiej spokojnie przeprowadzić odpowiednią próbę przemysłową niż później narazić się na straty wynikłe z pozornych oszczędności. Trzeba również pamiętać, że nawet przeprowadzenie rzetelnej wstępnej próby przydatności nie zwalnia nas od systematycznej kontroli surowców stosowanych w produkcji kostki brukowej, a w szczególności od kontroli dostaw kruszyw.

**dr inż. Grzegorz Łój
AGH, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki**

Literatura

- 1 W. Brylicki, *Kostka brukowa z betonu wibroprasowanego*, Polski Cement, Kraków 1998
- 2 A. Neville, *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków 2000
- 3 PN-EN 12620:2004+AC:2004 *Kruszywa do betonu*
- 4 PN-EN 1338:2005+AC:2007 *Betonowa kostka brukowa. Wymagania i metody badań*
- 5 PN-86/B-06712 *Kruszywa mineralne do betonu*
- 6 *Materiały informacyjne z sympozjów i szkoleń techników SPBKD (materiały niepublikowane)*