sadzki betonowe utwardzane powierzchniowo są trzy razy częściej stosowane niż posadzki żywiczne, z uwagi na niższą cenę, krótszy czas wykonania i rozpoczęcia eksploatacji. Użytkowanie posadzki utwardzanej można rozpocząć już czwartego dnia po jej wykonaniu, natomiast jeśli chodzi o posadzkę żywiczną, spełnienie warunku wilgotności podkładu wymaga długiego okresu oczekiwania.
Szczególnie istotne jest też dla wykonania posadzek właściwe przygotowanie zagęszczonego podkładu gruntowego w zakresie nośności. Ważną rolę spełniają również przerwy dylatacyjne, które powinny być dyblowane przy dużych obciążeniach, mieć odpowiednie wymiary i być wypełnione odpowiednim materiałem.
Przy wykonywaniu posadzek żywicznych należy ściśle przestrzegać wytycznych w instrukcjach technicznych odnośnie sposobu nakładania poszczególnych warstw oraz warunków wykonania. Ważne też, by pamiętać, iż przy wykonywaniu posadzek powinno korzystać się ze sprawdzonych rozwiązań systemowych.
W artykule porównane zostały koszty wykonania trzech wybranych posadzek przemysłowych: betonowej – utwardzonej, z żywicy epoksydowej oraz z żywicy poliuretanowej. Najdroższa okazała się posadzka poliuretanowa. Koszt jej wykonania wynosi 551,09 zł za 1 m^2. Najtańsza natomiast jest posadzka betonowa – utwardzana, koszt wykonania to 284,61 zł za 1 m^2. Pośrodku zakwalifikowała się posadzka z żywicy epoksydowej, jest ona nieco tańsza od posadzki z żywicy poliuretanowej, natomiast zdecydowanie droższa od betonowej. Jej koszt wynosi 435,43 zł za 1m^2.
Można zdecydowanie powiedzieć, iż wszystkie przeanalizowane posadzki charakteryzują się dobrymi własnościami technicznymi i znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie przemysłowym. O wyborze konkretnej posadzki decydują zalecenia odnośnie użytkowania, przeznaczenia oraz niejednokrotnie zasobności portfela inwestora.

BIBLIOGRAFIA
[1] Lenkiewicz W., Urban L., Roboty tynkowe. Poradnik, ARKADY, Warszawa 1970
[2] Tejchman J., Małasiewicz A., Posadzki przemysłowe, Wydawnictwo Politechnika Gdańska 2006
[3] Czarnecki L., Rydz Z., Posadzki przemysłowe betonowe i z żywic syntetycznych, Wydawnictwo SIGMA-NOT 1998
[4] Bajno D., Małasiewicz A., Obliczenia cieplno-wilgotnościowe i wytrzymałościowe posadzek przemysłowych, Wydawnictwo Politechnika Gdańska 2006
[5] Jaroszewicz M., Najnowsze technologie stosowane w posadzkach przemysłowych, Wydawnictwo Politechnika Gdańska 2006
[6] Ogólnopolski informator posadzkarski, Wydawnictwo eVandor 2010

Nawierzchnie z betonowej kostki brukowej – zagadnienia materiałowe i eksploatacyjne

Dr inż. Paweł Kossakowski, Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Betonowych, dr hab. inż. Marek Iwański, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, Politechnika Świętokrzyska

1. Wprowadzenie

Kamienne nawierzchnie brukowe cechuje powszechne zastosowanie i długa historia. W wielu miastach zachowane fragmenty bruku pozwalają wspomnieć i poczuć ducha dwudziesto– i dziewiętnastowiecznych aglomeracji, a szereg wybrukowanych ulic zostało wpisanych do rejestrów zabytków. Nawierzchnie tego typu wykonuje się również obecnie, przede wszystkim w zabytkowych centrach miast (rys. 1).
Bruk kamienny przez długi czas był również stosowany poza miastami do budowy traktów komunikacyjnych, jak również innych dróg, czego przykładem może być leśna rampa kolejowa pokazana na rysunku 2.
Niejako następcą bruku kamiennego jest bruk betonowy, wykonywany najczęściej z kostki z betonu wibroprasowanego (rys. 3).
W okresie ostatnich kilkudziesięciu lat kostka betonowa niejako opanowała nasz kraj, stając się podstawowym materiałem na nawierzchnie dróg, ścieżek rowerowych, ciągów pieszo–jezdnych, chodników dla pieszych, jak również zatok autobusowych, miejsc postojowych czy placów (rys. 4).
Z uwagi na relatywnie niski koszt betonowa kostka brukowa skutecznie konkuruje z kostką kamienną i dlatego w wielu sytuacjach znajduje tak powszechne zastosowanie. To, czy nawierzchnie z kostki betonowej są atrakcyjne, to rzecz gustu i preferencji zarówno ich użytkow-

ników, jak i inwestorów. Obecnie wydaje się, że mają one więcej przeciwników niż zwolenników, co jednak zasadniczo nie wpływa na zmniejszenie ich popularności w naszym kraju.
Jednymi z najistotniejszych czynników wpływających na walory użytkowe i komfort eksploatacji nawierzchni z kostki betonowej są: materiał, czyli beton użyty do wykonania samej kostki, konstrukcja podbudowy, przyjęte rozwiązania projektowe, wykonawstwo, jak również warunki i sposób użytkowania oraz oddziaływanie zjawisk atmosferycznych. Wszystkie te czynniki razem, jak i każdy z osobna, w bardzo krótkim czasie potrafią negatywnie wpłynąć na stan nawierzchni z kostki, co może prowadzić do jej uszkodzenia, a nawet awarii.

Rys. 1. *Nawierzchnia brukowa z kostki granitowej w historycznym centrum Krakowa (fot. Piotr Skucha) [1]*

Rys. 2. *Brukowana leśna rampa kolejowa (fot. Jan Bogdan Boczko) [2]*

2. Materiał stosowany do produkcji brukowej kostki betonowej

Kostka betonowa, z której wykonuje się nawierzchnie drogowe, jest obecnie najczęściej produkowana w oparciu o technologię wibroprasowania. Jest to nic innego jak zagęszczanie betonu przez wibrowanie z jednoczesnym formowaniem wyrobu za pomocą prasowania. Zastosowanie tej technologii pozwala na osiągnięcie dużej wydajności produkcji oraz uzyskanie wyrobu o szerokim asortymencie i wysokich parametrach technicznych (rys. 5).
Właściwości gotowego wyrobu wynikają z wymagań, jakie stawiane są drobnowymiarowym elementom, z których wykonywana jest nawierzchnia drogowa. Podstawowym warunkiem jest oczywiście odporność na oddziaływanie czynników eksploatacyjnych, zapewniająca prawidłowe użytkowanie tego typu nawierzchni. Dotyczy to przede wszystkim ruchu samochodowego, który nawet na drogach wewnętrznych czy osiedlowych potrafi być bardzo duży, oraz oddziaływania warunków atmosferycznych. Ten drugi czynnik jest na tyle istotny, że w zasadzie w największym stopniu determinuje szczegółowe i dość rygorystyczne wymagania normowe, jakie stawiane są kostce betonowej [6].
Dwie kwestie w tym zakresie są kluczowe. Pierwsza z nich to warunki klimatyczne Polski, gdzie w okresie zimowym mamy do czynienia z częstymi i znacznymi wahaniami temperatury i wilgotności powietrza. Nie pozostaje to bez wpływu na wiele elementów i konstrukcji wykonanych z betonu, który jest narażony na oddziaływanie powietrza atmosferycznego. Szczególnie istotne są spadki temperatury poniżej 0°C, powodujące zamrażanie. W przypadku ocieplenia powietrza i wzrostu temperatury powyżej 0°C, mamy do czynienia z procesem odwrotnym, tj. rozmarzaniem betonu. W zimie takich cykli zamarzania–rozmarzania jest bardzo dużo, co może być bardzo destrukcyjne właśnie dla elementów takich jak kostka betonowa.
Mechanizm zniszczenia struktury betonu polega na zamarzaniu wody znajdującej się w jego porach kapilarnych, co powoduje naturalne zwiększenie objętości lodu w stosunku do objętości wody. Powstające w ten sposób ciśnienie oddziałuje na nie zamarzniętą jeszcze wodę, która migruje do porów wypełnionych powietrzem. W sytuacji gdy w całej objętości materiału nie ma już wolnych porów, dochodzi do powstawania naprężeń powodujących rozsadzanie jego struktury, czego efektem są pęknięcia betonu w skali makro.
Drugim czynnikiem, który jest pośrednio związany z oddziaływaniem środowiska atmosferycznego na nawierzchnie z kostki betonowej, jest stosowanie soli odladzających w okresie zimowym. Czynnik ten jest nawet bardziej niebezpieczny niż zmiany temperatury powodujące zamrażanie i rozmrażanie betonu. W sytuacji stosowania soli odladzających, w tym popularnego roztworu NaCl, uszkodzeniu ulega głównie warstwa wierzchnia betonu. Dochodzi do jej złuszczania, które może przybierać znaczne rozmiary, a tym samym powodować znaczną redukcję grubości elementu.
Z uwagi na występujące procesy i zjawiska, które negatywnie oddziaływają na betonową kostkę brukową, jest ona od wielu już lat poddawana rygorystycznym badaniom w zakresie mrozoodporności, w tym przede wszystkim w środowisku agresywnym w postaci 3% roztworu NaCl [6].

Rys. 3. *Bruk z kostki z betonowej [3]*

Rys. 4. *Nawierzchnia brukowa z kostki wibrobetonowej [4]*

Rys. 5. *Kostka brukowa z wibrobetonu [5]*

Przykłady uszkodzeń kostek betonowych, między innymi na skutek czynników opisanych powyżej pokazano na rysunku 6. Jak widać, niektóre kostki są popękane, co jest związane zarówno z wpływem odbywającego się ruchu drogowego, jak i cyklami zamrażania i rozmrażania, które negatywnie wpływają na wytrzymałość betonu, z jakiego je wykonano. Niebagatelny wpływ na uszkodzenia ma również jakość wykonania konstrukcji drogi, a w szczególności jej podbudowy i zasypki, skutkująca dużą podatnością poszczególnych kostek na ugięcia pod wpływem obciążenia eksploatacyjnego. Uszkodzeniu uległa również warstwa powierzchniowa wielu kostek, co może być spowodowane agresywnym oddziaływaniem soli odladzających i niewystarczającą odpornością materiału w tym zakresie.

3. Wpływ warunków eksploatacyjnych na stan techniczny nawierzchni z kostki betonowej

O jakości nawierzchni brukowej decyduje cały szereg czynników obejmujących najogólniej rzecz biorąc stosowane rozwiązania materiałowe, projektowe i wykonawcze. Ale równie ważne są warunki eksploatacyjne, ponieważ w sytuacji nieprawidłowego użytkowania nawierzchnia brukowa jest narażona na znaczące uszkodzenia, nawet w przypadku kiedy jest ona prawidłowo zaprojektowana i wykonana. Oczywiście podstawowym elementem jest tutaj ruch pojazdów. W pewnych jednak sytuacjach ważniejsze są czynniki klimatyczne, częściowo już opisane w odniesieniu do zagadnień destrukcji betonu, z którego produkuje się kostkę brukową.
Oprócz oddziaływania temperatury i wilgotności powietrza bardzo duży wpływ na konstrukcję nawierzchni brukowej ma woda opadowa, ponieważ warstwy ścieralne wykonane z elementów drobnowymiarowych nie są szczelne. Dotyczy to w szczególności nawierzchni z kostki betonowej, która w odróżnieniu od szczelnych nawierzchni wykonanych w technologii monolitycznej, jest podatna na oddziaływanie wody. W sytuacji gdy podsypka, na której układane są kostki, jest przepuszczalna, może dochodzić do przesiąkania wody w głąb konstrukcji nawierzchni. Co gorsza, woda ta gromadzi się bezpośrednio pod warstwą ścieralną z kostki – i dalej w niższych warstwach konstrukcyjnych, tj. w podbudowie wykonanej np. z kruszywa.
Nawadnianie nawierzchni z kostki betonowej jest szczególnie niebezpieczne w okresie zimowym, kiedy następuje obniżenie temperatury poniżej 0°C. W związku z zamarzaniem wody, która gromadzi się w spoinach, dochodzi do naturalnego zwiększenia objętości lodu w stosunku do objętości wody. W efekcie tego następuje rozluźnianie i wykruszanie się materiału uszczelniającego kostki. Istotnym tutaj czynnikiem jest cykliczność procesu zamarzania i rozmarzania. Podczas słonecznych zimowych dni, gdy temperatura wzrasta powyżej 0°C dochodzi do rozmarzania wody w wierzchnich warstwach nawierzchni, podczas gdy w nocy następuje jej zamarzanie. W konsekwencji spoiny są na tyle zdegradowane, że dochodzi do ich całkowitego otwarcia. W takiej sytuacji woda ma już swobodny i nieograniczony dostęp do niższych warstw konstrukcyjnych, co prowadzi do dalszych uszkodzeń.
Kluczowy w tym zakresie jest zastosowany materiał, gdyż od jego właściwości i jakości zależy podatność na uszkodzenia spowodowana oddziaływaniem temperatury na wodę w nim zgromadzoną. Podstawowym zjawiskiem, jakie zachodzi na skutek nawadniania kon-

Rys. 6. *Uszkodzenia brukowych kostek betonowych związane z oddziaływaniem czynników eksploatacyjnych (fot. Paweł Kossakowski)*

strukcji dróg, są wysadziny, tworzące się bezpośrednio pod warstwą ścieralną z kostki brukowej oraz w warstwie podbudowy. Dochodzi do nich na skutek tworzących się soczewek lodowych, które powstają w zamarzającym gruncie. W klasycznym przypadku podciągają one wodę ze stref bardziej zawilgoconego lub wodonośnego gruntu, powiększając tym samym swą objętość. Zasadniczo wysadziny powstają w tzw. gruntach wysadzinowych, które zawierają pewną ilość drobnych cząstek pyłowych i iłowych [7].

Wysadziny powodują podnoszenie nawierzchni drogi. Na skutek cyklicznego rozmarzania–zamarzania wody następuje zwiększenie objętości wolnych przestrzeni, które pojawiają się w okresie dodatnich temperatur, niejako robiąc miejsce dla coraz to większych mas lodu. W efekcie obserwuje się coraz to większe deformacje nawierzchni. Procesy te wpływają w zasadniczy sposób na warunki użytkowania dróg. W okresie odwilży, na skutek rozmarzania wysadzin i spływania wody, dochodzi do powstawiania wolnych przestrzeni, których objętość może przybierać znaczne rozmiary. Konstrukcja drogi w takim stanie potrafi do pewnego stopnia przenosić ruch pojazdów, jaki się po niej odbywa. Na skutek cyklicznego obciążenia pojazdami w pewnym zakresie dochodzi nawet do zagęszczania warstw podbudowy w obszarach oddziaływań ruchu samochodowego. Niestety, w takiej sytuacji nawierzchnie z kostki betonowej, a ściślej pojedyncze kostki, ulegają uszkodzeniom z uwagi są wysoką podatność zdegradowanego podłoża. W najgorszym przypadku obserwuje się pęknięcia kostek, przebiegające najczęściej na styku pasa drogi, po którym odbywa się ruch samochodów, z obszarem, gdzie ten ruch jest rzadki (części skrajne drogi).

Efektem opisanych powyżej zjawisk są uszkodzenia nawierzchni z kostki betonowej zdiagnozowane w czasie odwilży wiosennej, pokazane na rysunku 7. Na obszarze zalegania wody opadowej doszło do zapadnięcia nawierzchni, na skutek rozmarznięcia wysadzin (soczewek lodowych). Na pozostałej powierzchni wolnej od nasączania wodą nawierzchnia została wyniesiona na skutek przemarzania warstw konstrukcji drogi. Podstawowym czynnikiem w analizowanym przypadku było zastosowanie podsypki o frakcji 0–4 mm zamiast piasku stabilizowanego cementem. Takie spoinowanie kostki nie stanowiło warstwy szczelnej, która tym samym była podatna na działanie wody, opisane szczegółowo poprzednio.

W pewnych specyficznych warunkach wysadziny mogą się tworzyć z różną intensywnością i wielkością. Podstawowym czynnikiem determinującym ich rozwój jest niejednolitość oddziaływania (przenikania) mrozu. Zjawisko to dotyczy w szczególności właśnie dróg, gdzie mamy do czynienia z zaleganiem śniegu na poboczach, podczas gdy ich środkowe pasmo jest wolne od niego. Stąd największe wysadziny tworzą się właśnie w środkowej części dróg, czego objawem jest wyniesienie nawierzchni w tym obszarze. Na skutek przekroczenia wytrzymałości warstwy ścieralnej dochodzi również do podłużnych pęknięć nawierzchni w osi jezdni, czyli przełomów. Schemat tworzenia się wysadzin w omawianym przypadku pokazano na rysunku 8.

Zjawisko wysadzin jest szczególnie destrukcyjne dla nawierzchni podatnych, w tym nawierzchni z kostki brukowej. W sytuacji lokalnego zalegania śniegu na poboczach, w części środkowej dochodzi do tworzenia się wysadzin o większej intensywności. Na skutek różnej prędkości parowania wody z konstrukcji drogi części zaśnieżonej (niejako izolowanej) i niezaśnieżonej, kry-

Rys. 7. *Uszkodzenie nawierzchni brukowej z kostki betonowej na skutek oddziaływania wody opadowej w okresie zimowym (fot. Paweł Kossakowski)*

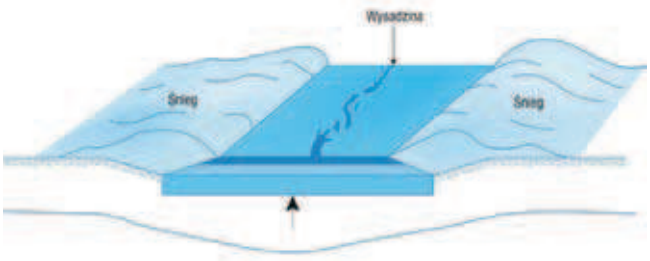
tycznym obszarem jest granica tych stref. Część wolna od śniegu jest deformowana (wynoszona) intensywniej w stosunku do części niezaśnieżonej. Dochodzi do przekroczenia naprężeń na ścinanie na granicy tych obszarów, czego efektem jest klawiszowanie kostek w tym obszarze oraz ich podłużne pęknięcia (przełomy).

Przykład i efekty tego typu zniszczeń obrazuje rysunek 9, gdzie pokazano fragment drogi, na której śnieg zalegał na odcinkach bocznych i nie był z nich usuwany. Na skutek tworzących się wysadzin, obszar środkowy drogi został znacznie wyniesiony, czego nie zaobserwowano w częściach bocznych, na których zalegał śnieg.

W efekcie doszło do powstania przełomów (pęknięć) nawierzchni na skutek mechanizmu opisanego wyżej. Widok pękniętej kostki pokazano na rysunku 10.

4. Podsumowanie

Jakość nawierzchni z betonowej kostki brukowej w dużym stopniu zależy od zastosowanych materiałów, co odnosi się zarówno do betonu, z którego produkuje się kostkę, jak i warstw, na których jest ona układana, a także sposobu użytkowania dróg. Prawidłowe utrzymanie dróg jest tym zakresie zagadnieniem podstawowym. Dotyczy to przede wszystkim wpływu czynników atmosferycznych, takich jak woda opadowa oraz śnieg i lód.
Szczególnie destrukcyjna w tym zakresie jest woda opadowa, zwłaszcza w przypadku gdy podsypka pod warstwą ścieralną z kostki jest nieszczelna (np. wykonana z kruszywa drobnego) oraz gdy materiał podbudowy



Rys. 8. *Schemat powstawania i działania wysadzin [8]*

Rys. 9. *Podłużne przełomy nawierzchni z kostki betonowej na granicy stref odśnieżanych i nieodśnieżanych (fot. Paweł Kossakowski)*

jest drobnoziarnisty. Lepszym rozwiązaniem jest stosowanie podsypki piaskowo–cementowej jako materiału spoinującego, tak jak to zalecają przepisy techniczne [9]. Dzięki temu w znacznym stopniu udaje się ograniczyć przesiąkanie wody do warstw niższych, co zabezpiecza nawierzchnię przed uszkodzeniami.
Niestety przyjęcie poprawnych rozwiązań materiałowych wcale nie gwarantuje długiej i bezawaryjnej eksploatacji nawierzchni z kostki betonowej. Kluczowe w tym zakresie jest jej odpowiednie użytkowanie dotyczące prawidłowego odwodnienia powierzchniowego. Pokazane w artykule przykłady uszkodzeń były spowodowane zaleganiem wody opadowej na powierzchni dróg właśnie na skutek niedrożnego systemu odwodnienia. W efekcie doprowadziło to uszkodzeń tak znacznych, że pewne odcinki dróg funkcjonowały w stanie przedawaryjnym.
Kolejnym czynnikiem powodującym znaczne uszkodzenia dróg jest zalegający na nich śnieg, który sprzyja tworzeniu się nierównomiernych wysadzin, prowadzących do przełomów nawierzchni, czyli pękania kostek betonowych. Najczęściej śnieg i lód zalega w strefach bocznych dróg, przyczyniając się do niedrożności rowów odwadniających, co skutecznie uniemożliwia prawidłowe odwodnienie.
Podsumowując należy podkreślić, że w przypadku dróg o nawierzchni z brukowej kostki betonowej kluczowym zagadnieniem jest ich prawidłowa eksploatacja i utrzymanie. Dotyczy to zwłaszcza okresu zimowego, gdyż w razie nieprawidłowego użytkowania są one narażone na uszkodzenia nie obserwowane w przypadku nawierzchni innego typu.

Rys. 10. *Pęknięcie kostki betonowej (fot. Paweł Kossakowski)*

BIBLIOGRAFIA
[1] http://zabytkowo.blox.pl/resource/Obraz_053.jpg, fot. Piotr Skucha, 2009
[2] http://www.ciekawepodlasie.pl/image/9446/PolskoSowiecka_rampa_kolejowa.jpg, fot. Jan Bogdan Boczko
[3] http://cdn23.pb.smcloud.net/t/files/27/c6/da/203170d5d3/nawierzchnia-z-kostki-brukowej-poz-bruk-bruk.jpg.
[4] http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik: Paver_Blocks_Exterior_Circular_Cropped_1918px.jpg
[5] http://brukowa.com.pl/photos/kostka-brukowa-behaton-holland-a-kropol-bloczek-2252020101_orginal.jpg
[6] Łój G., Mróz kostce niestraszny, Autostrady Nr 3/2004
[7] Wiłun Z., Zarys geotechniki, Wyd. 5, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001
[8] http://www.izolacje.com.pl/images/photos/24/921/__b_d0f23d30a-9ca531ef93bb3ff7c130958.jpg
[9] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 9 marca 1999 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. z 1999 r. nr 43 poz. 430).