



PIOTR MACKIEWICZ

Politechnika Wroclawska
piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3170-6415



ANTONI SZYDŁO

Politechnika Wroclawska
antoni.szydlo@pwr.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3363-9391

Wybrane zastosowania materiałów pochodzących z recyklingu konstrukcji betonowych w nawierzchniach drogowych

Współczesny rozwój gospodarczy i nowoczesne technologie sprzyjają coraz częstszemu stosowaniu betonu cementowego w wielu konstrukcjach, w tym kubaturowych i liniowych. Trwałość materiałów betonowych jest duża, jednak nie jest nieograniczona. W związku z kończącym się okresem cyklu życia konstrukcji zawierających beton, powstaje problem racjonalnego wykorzystania wyeksploatowanych materiałów. Zagadnienie powtórnego wykorzystania materiałów odpadowych (recyklingu) jest tematem coraz częściej spotykanym w technice

budowlanej. Dzieje się tak również z betonami cementowymi. Kruszywo z recyklingu jest to kruszywo powstałe w wyniku przeróbki nieorganicznego materiału zastosowanego uprzednio w budownictwie; w tym przypadku betonu. Na świecie obserwowany jest systematyczny wzrost recyklingu materiałów betonowych. Szacuje się, że światowy przemysł betonowy zużywa około 10 miliardów ton piasku i naturalnego kruszywa rocznie oraz 11 miliardów ton odpadów pochodzących z konstrukcji, z czego 50–70% to odpady betonowe [1]. Jednym z krajów o bardzo wysokim stopniu odzysku betonowych materiałów odpadowych są Stany Zjednoczone [1].

Powtórne wykorzystanie materiałów odpadowych w znaczący sposób przyczynia się do ograniczenia zużycia surowców naturalnych. Wykorzystanie kruszywa betonowego z recyklingu pozwala na znaczne zredukowanie zapotrzebowania na drogę i coraz trudniej dostępne kruszywo naturalne. Ponadto użycie kruszywa recyklowanego prowadzi do praktycznego rozwiązania problemu środowiskowego: redukuje negatywny wpływ na środowisko, związany z wydobyciem kruszywa z zasobów naturalnych oraz powoduje ograniczenie emisji szkodliwych gazów cieplarnianych. Uzyskane w ten sposób korzyści ekonomiczne są nie do przecenienia.

Istnieje wiele różnych możliwości zastosowania betonu z recyklingu. Jedną z nich jest zastosowanie go jako kruszywa w warstwach nawierzchni drogowych. Szacuje się, że dużą część (ponad 75%) betonów recyklowanych stanowią materiały i kruszywa betonowe stosowane w drogownictwie [1]. Aby możliwe było właściwe zastosowanie kruszywa z re-

cyklingu w warunkach polskich, należy wprowadzić odpowiednie procedury kontroli i wykonania takich warstw konstrukcji nawierzchni oraz podłoża, jak również uregulować stosowne przepisy. Obecnie w kraju i zagranicą prowadzone są intensywne badania nad właściwościami fizyko-mechanicznymi recyklowanego kruszywa betonowego, nie dają one jednak jak do tej pory jednoznacznej odpowiedzi, co do możliwości zastąpienia kruszywa naturalnego NA (*natural aggregate*) przez kruszywo betonowe z recyklingu. Uważa się, że recyklowane kruszywo betonowe RCA (*recycled concrete aggregate*) szczególnie przydatne jest do stosowania w niższej leżących warstwach konstrukcji nawierzchni drogowej (podbudowy pomocnicze, podłoże ulepszone).

Badania własne

Artykuł opracowano w związku z realizacją zadań badawczych w projekcie RID I pt. „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu”. Katedra Dróg i Lotnisk Politechniki Wrocławskiej uczestniczyła w realizacji Zadania 6. „Recykling nawierzchni betonowych”, w ramach wspólnego przedsięwzięcia Rozwój Innowacji Drogowych (RID), współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad. Przedmiotem artykułu jest zestawienie kluczowych wniosków wynikających z badań nad możliwością wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu konstrukcji betonowych w tym nawierzchni betonowych i powtórnego ich wbudowania w warstwy nawierzchni drogowych. Prace były publikowane m.in. w [2, 3, 4] i tam też można znaleźć szczegółowe wyniki badań. W zakresie tych studiów przeprowadzono badania i analizy w dwóch opcjach:

Opcja 1 – badania materiału pochodzącego z przekruszenia konstrukcji betonowych kubaturowych i warstw istniejących zdegradowanych nawierzchni betonowych w kruszarkach, na odpowiednie frakcje kruszywa i powtórne ich użycie do warstw konstrukcji nawierzchni drogowych, takich jak: podbudowy niezwiązane, podłoże ulepszone, warstwy filtracyjne, mrozoochronne, podbudowy związane spoiwem cementowym i asfaltowym, górne warstwy nasypów, wzmacnianie podłoża pod nasypy oraz nasypy drogowe.

Opcja 2 – badania materiału pochodzącego z kruszenia *in situ* istniejących zdegradowanych warstw nawierzchni betonowych metodami udarowymi

i powtórne ich wykorzystanie jako podbudowy nawierzchni podatnych lub sztywnych (betonowych) po uprzednim dogęszczeniu i profilowaniu.

Artykuł poświęcono technologii wykorzystania recyklingu betonowego wg opcji 1. Studia i badania nad możliwością wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu nawierzchni betonowych w kruszarkach i ponownego ich wbudowania w warstwach nawierzchni drogowych wg tej opcji obejmowały:

- badania i analizę betonów ze względu na różne pochodzenie,
- badania i analizę przydatności betonów do wykorzystania ich w niezwiązanych warstwach podbudowy i podłoża ulepszanego (w tym warstw filtracyjnych i mrozoochronnych),
- badania i analizę przydatności betonów do wykorzystania ich w warstwach podbudowy i podłoża związanych spoiwem cementowym i asfaltowym,
- badania i analizę przydatności betonów do wykorzystania ich w warstwach nawierzchniowych z betonu cementowego,
- badania i analizę przydatności betonów do wykorzystania ich w górnych warstwach nasypów oraz jako wzmocnienie podłoża nasypów i budowy skarp nasypów.

Na rysunkach 1– 4 zaprezentowano wybrane materiały wykorzystane w badaniach.

Dostępny materiał betonowy wstępnie rozkruszono przy użyciu młota wyburzeniowego zamocowanego do koparki (rys. 5), a następnie przekruszono w kruszarce (rys. 6).

Najważniejsze wnioski i ustalenia w zakresie badań nad możliwością wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu konstrukcji betonowych, w tym nawierzchni betonowych, w kruszarkach są następujące:

- W zakresie badań betonów przeznaczonych do recyklingu stwierdzono istotny wpływ pochodzenia kruszywa betonowego z recyklingu na uzyskiwane wyniki badań. W tym

zakresie przebadano kruszywo uzyskane z rozkruszenia betonów drogowych (płyty prefabrykowane i wylwane *in situ*) oraz konstrukcyjnych (stopy, ławy fundamentowe). W przypadku betonów drogowych stwierdzono zbliżone parametry fizyko-mechaniczne, niezależnie od pochodzenia kruszywa betonowego z recyklingu. Stwierdzono jednocześnie gorsze parametry (wytrzymałość, nasiąkliwość, mrozoodporność) betonów konstrukcyjnych używanych w budownictwie obiektów kubaturowych. W przypadku betonów nieznanego pochodzenia zaleca się badania wytrzymałości na ściskanie rdzeni z odwiertów, jako prognozowaną ocenę właściwości kruszywa betonowego z recyklingu po przekruszeniu.

- Do warstw podbudowy pomocniczej i podłoża ulepszanego (zarówno związanych, jak i niezwiązanych) zaleca się stosowanie betonów, których graniczną wytrzymałością na ściskanie jest CC20, przy jednoczesnej wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu SC1,7.
- Do warstw podbudowy zasadniczej (zarówno związanych, jak i niezwiązanych) zaleca się stosowanie betonów, których graniczną wytrzymałością na ściskanie jest CC30, przy jednoczesnej wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu SC2,0.
- W zakresie badań nad wykorzystaniem kruszywa betonowego z recyklingu do warstw niezwiązanych stwierdzono, że stosowane może być ono w warstwach niezwiązanych podbudowy zasadniczej i pomocniczej oraz podłoża ulepszanego (w tym warstwach mrozoochronnych), w mieszankach z kruszywem naturalnym lub samodzielnie, pod warunkiem spełnienia wymagań odporności na rozdrabnianie oraz mrozoodporności pozyskanego kruszywa wg WT-4 [9].
- Kruszywo betonowe pozyskane z kruszenia nawierzchni drogowych ma lepszą odporność na rozdrabnianie oraz nasiąkliwość i mrozoodporność, w stosunku do kruszywa pozyskanego z kruszenia elementów kubaturowych. Zależność ta wyraźnie koreluje z wyższą wytrzymałością na ściskanie betonów z nawierzchni drogowych, w porównaniu do betonów stosowanych w budownictwie kubaturowym.
- Przeprowadzone badania wykazały, że kruszywo betonowe z recyklingu nie spełnia wymagań nasiąkliwości stawianych podbudowom zasadniczym, pomocniczym i podłożu ulepszanemu wg WT-4, przy czym zasadniczo spełnia wymagania mrozoodporności. Dopuszcza się odstępnie od wymagań nasiąkliwości w przypadku kruszywa betonowego z recyklingu i wykonywanie wyłącznie badań mrozoodporności. Z uwagi na dużą niejednorodność materiałów pochodzących z recyklingu zaleca się dla każdej partii pozyskanego kruszywa określić odporność na rozdrabnianie oraz mrozoodporność w odniesieniu do wymagań krajowych WT-4.



Rys. 1. Widok płyt betonowych z rozbiórki

- Kruszywo z recyklingu nawierzchni betonowych posiada wskaźnik nośności CBR wystarczający zarówno dla podłoża ulepszanego, jak i warstw podbudowy pomocniczej i zasadniczej wg WT-4. Ponadto możliwe jest zastosowanie kruszywa betonowego z recyklingu do warstw



Rys. 2. Widok wstępnie rozkruszonej płyty



Rys. 3. Recyklowane kruszywo betonowe uzyskane po przekruszeniu płyt



Rys. 4. Widok rdzeni betonowych odwierconych z płyt wylewanych na mokro

odsączających podłoża ulepszanego po odsianiu frakcji 0/0.063 mm.

- W zakresie badań nad wykorzystaniem kruszywa betonowego z recyklingu do warstw związanych cementem stwierdzono, że może ono być stosowane w mieszankach związanych cementem (do warstw podbudowy zasadniczej, pomocniczej i podłoża ulepszanego) lub do ulepszenia gruntów stabilizowanych cementem. Odstępuje się od wymagań nasiąkliwości oraz mrozoodporności kruszywa betonowego, na rzecz mrozoodporności gotowej mieszanki związanej cementem / gruntu stabilizowanego cementem wg WT-5 [8]. Gotowa mieszanka związana / grunt stabilizowany cementem powinny spełniać wymagania wytrzymałości wg WT-5, odpowiednie dla danej warstwy.
- W zakresie badań nad wykorzystaniem kruszywa betonowego do gruntów stabilizowanych cementem / mieszank związanych cementem na warstwy podbudowy pomocniczej i podłoża ulepszanego, badania wytrzymałościowe wskazują na możliwość istotnego zmniejszenia ilości spoiwa w mieszance po dodaniu kruszywa betonowego z recyklingu. Zawartość kruszywa betonowego z recyklingu w mieszankach/gruntach stabilizowanych cementem ma duży wpływ na wytrzymałość i mrozoodporność. W zależności od zawartości kruszywa betonowego z recyklingu i ilości cementu (od 4% do 8%) w mieszance uzyskano klasy wytrzymałości w zakresie C1,5/2,0–C3/4. Stwierdzono, że aby uzyskać wystarczającą mrozoodporność (na poziomie około 0,8), zawartość kruszywa betonowego z recyklingu w mieszance powinna wynosić około 30%. Dzięki temu można spełnić wystarczające wymagania wg WT-5 dla warstw podłoża ulepszanego wszystkich kategorii ruchu oraz warstw podbudowy pomocniczej KR1-KR4. Jednocześnie stwierdzono, że zwiększanie zawartości cementu podwyższa wytrzymałość gruntu stabilizowanego cementem, ale nie ma wpływu na jego mrozoodporność.
- W zakresie badań nad wykorzystaniem kruszywa betonowego do warstw związanych cementem na podbudowy zasadnicze (mieszank betonowych) przeprowadzono badania fizyko-mechaniczne kruszywa



Rys. 5. Wstępne kruszenie nawierzchni betonowej przy użyciu młota wyburzeniowego



Rys. 6. Widok kruszarki

betonowego, pozyskanego z przekruszenia płyt betonowych, z rozbiórki istniejących nawierzchni, które wykazały zdecydowanie większą nasiąkliwość i gorszą mrozoodporność kruszywa betonowego, w porównaniu z kruszywem granitowym. Wykazano, że wysoka wytrzymałość na ściskanie (ok. 50 MPa) odwierconych rdzeni z płyt betonowych przeznaczonych do recyklingu, nie gwarantuje wymaganej mrozoodporności pozyskanego kruszywa betonowego wg WT-5. Tym niemniej pozytywnie zweryfikowano możliwość wykorzystania takiego kruszywa w mieszankach związanych cementem do warstw podbudowy.

- Wytrzymałość na ściskanie mieszanek stabilizowanych cementem na bazie kruszywa granitowego oraz takich, w których kruszywo granitowe stanowiło szkielet (frakcje grube) była wyższa od wytrzymałości mieszanek na bazie kruszywa betonowego (z recyklingu), w zależności od zawartości cementu. W obu jednak przypadkach spełnione zostały wymagania stawiane podbudowom pomocniczym i zasadniczym wg WT-5. W zależności od ilości cementu,

mieszanki na bazie kruszywa betonowego osiągały wytrzymałości od 4,5 do 16 MPa, przy wymaganych klasach wytrzymałości na podbudowy zasadnicze od C3/4 dla KR1-2 do C8/10 dla KR5-7. Podobnie w przypadku mrozoodporności – choć mieszanki na bazie kruszywa granitowego wykazywały większą mrozoodporność ($> 0,9$), to jednak mieszanki na bazie kruszywa betonowego również zdecydowanie (wskaźnik mrozoodporności na poziomie 0,8) spełniały wymagania mrozoodporności stawiane podbudowom w WT-5. Zaznaczyć przy tym należy, że mrozoodporność mieszanek została spełniona, mimo braku wymaganej w WT-5 mrozoodporności kruszywa betonowego użytego w mieszankach. W związku z powyższym proponuje się zrewidowanie wymagań mrozoodporności kruszywa z recyklingu w wytycznych krajowych.

- W zakresie badań nad wykorzystaniem kruszywa betonowego z recyklingu w warstwach MCE (mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne) wykazano przydatność zastosowania kruszywa betonowego z recyklingu do wytworzenia warstw konstrukcyjnych nowych nawierzchni drogowych z mieszanek typu MCE. Stosowane kruszywo betonowe z recyklingu wymaga odpowiedniego doziarnienia w celu spełnienia pola dobrego uziarnienia dla mieszanek MCE. Mieszanki MCE z kruszywem betonowym mogą być stosowane w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych obciążonych ruchem KR1 – KR4.

Zawartość emulsji asfaltowej w mieszankach MCE zawierających kruszywo betonowe z recyklingu powinna wynosić w granicach od 6% do 8%.

- Zawartość cementu w mieszankach MCE zawierających kruszywo betonowe z recyklingu powinna wynosić w granicach od 2% do 3%. Zalecana zawartość kruszywa betonowego z recyklingu w mieszance mineralnej (MM) powinna wynosić od 20% do 60%. Krzywa uziarnienia MM powinna być płynna i ciągła oraz mieścić się w polu dobrego uziarnienia dla mieszanek typu MCE. Analizy zespolonego modułu sztywności mieszanek MCE wskazują, że minimalna wartość modułu sztywności powinna wynosić 2000 MPa. Pozwala to na uzyskanie optymalnych właściwości mieszanek MCE pod kątem ich przyszłej eksploatacji w nawierzchni drogowej. W celu ograniczenia szybkiego skurczu oraz spękań podbudowy zaleca się, aby wartość zespolonego modułu sztywności w temp. 10°C nie przekraczała 4000 MPa.
- W zakresie badań nad wykorzystaniem kruszywa betono-

wego z recyklingu do warstw nawierzchniowych z betonu cementowego przeprowadzono badania odporności na rozdrabnianie i mrozoodporności kruszywa z recyklingu. Zdecydowano o nieprzydatności kruszywa betonowego z recyklingu do warstw nawierzchniowych z betonu cementowego z uwagi na niewystarczającą mrozoodporność i wątpliwą odporność na rozdrabnianie. Badania wykazały, że wymagana odporność na rozdrabnianie kruszywa do betonów nawierzchniowych jest możliwa do spełnienia w zależności od partii kruszywa betonowego z recyklingu. Niespotykana w przypadku kruszywa betonowego z recyklingu jest natomiast wymagana mrozoodporność, niezależnie od przeznaczenia do górnych lub dolnych warstw nawierzchni betonowej oraz kategorii ruchu KR. Wskazano na dodatkowy argument do odrzucenia kruszywa betonowego z recyklingu, do zastosowań w betonach nawierzchniowych, jakim jest niedopuszczalna wg [7] niejednorodność i możliwa obecność zanieczyszczeń oraz niewiadoma reaktywność alkaliczna takiego materiału. Doświadczenia z wykorzystaniem kruszywa betonowego z recyklingu, w warstwach nawierzchniowych z betonu cementowego, pokazują, że może to być przyczyną powstawania spękań nawierzchni.

- W zakresie badań nad wykorzystaniem kruszywa betonowego z recyklingu do górnych warstw nasypów, wzmocnienia podłoża nasypów oraz budowy skarp nasypów, przeprowadzono badania spójności i kąta tarcia wewnętrznego. Wykazano, że mieszanka kruszywa betonowego i gruntu spoistego zagęszcza się lepiej niż każdy z tych materiałów z osobna. Wykonane przykładowe analizy stateczności skarp nasypów drogowych z takiego materiału, posadowionych na podłożu nośnym (przy nachyleniu skarp 1:1,5), wykazały że nie wymagają one zbrojenia. Jednocześnie stwierdzono ograniczoną przydatność kruszywa betonowego do ulepszenia materiałów spoistych, nieprzydatnych do budowy i umacniania skarp nasypów.
- Dodanie ekonomicznie uzasadnionych ilości kruszywa z recyklingu betonowego (około 20%) do materiału spoistego w technologii mieszania na miejscu w warunkach budowy powoduje nieistotną zmianę parametrów spójności i kąta tarcia wewnętrznego. Jednocześnie dodanie do kruszywa betonowego z recyklingu nawet niewielkich ilości (około 20%) materiału spoistego powoduje znaczny spadek kąta tarcia wewnętrznego. Przeprowadzone badania kruszywa pochodzącego z recyklingu betonu wykazały, że możliwe jest jego zastosowanie do górnych warstw nasypu pod warunkiem odsiania frakcji 0/0.063 mm i spełnienia warunków w zakresie filtracji i uziarnienia (współczynnik filtracji oraz wskaźnik uziarnienia). Możliwe jest również wzmocnienie podłoża nasypu „materacem” z kruszywa betonowego, pod warunkiem spełnienia wymagań jak dla warstw podbudowy wg WT-4. Jednocześnie wątpliwe, głównie ze względów ekonomicznych, jest wykorzystanie materiału z recyklingu do nasypów drogowych jako samodzielnego materiału lub zmieszanego z gruntem spoistym.

Badania materiału pochodzącego z kruszenia *in situ* istniejących zdegradowanych warstw nawierzchni betonowych metodami udarowymi i powtórne ich wykorzystanie jako

podbudowy nawierzchni podatnych lub sztywnych (betonowych) po uprzednim dogęszczeniu i profilowaniu (opcja 2) będzie przedmiotem dalszych publikacji.

Podsumowanie

Przedmiotem prac, w związku z realizacją zadań badawczych w projekcie pt. „Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu. Zadanie 6. Recykling nawierzchni betonowych”, w ramach wspólnego przedsięwzięcia Rozwój Innowacji Drogowych (RID), współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad, były studia i badania nad możliwością wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu nawierzchni betonowych i powtórne ich wbudowania w warstwy nawierzchni drogowych.

W trakcie realizacji zadania 6. osiągnięto wszystkie założone rezultaty. Przeprowadzone badania, studia i analizy pozwoliły na kompleksową ocenę możliwości zastosowania kruszywa betonowego z recyklingu konstrukcji betonowych i wyeksploatowanych nawierzchni betonowych w warunkach polskich.

Efektem końcowym prac w granie są wytyczne podające kryteria recyklingu konstrukcji betonowych i wyeksploatowanych nawierzchni betonowych oraz określające warunki powtórne wykorzystania materiału, pochodzącego z recyklingu wyeksploatowanych nawierzchni betonowych. Obejmują one szczegółowe wytyczne wykorzystania kruszywa betonowego z recyklingu w kruszarkach stacjonarnych w warstwach podłoża ulepszonego, warstwach mrozochronnych, filtracyjnych i podbudów niezwiązanych, warstwach związanych cementem, warstwach MCE oraz górnych warstwach nasypów i skarp.

Bibliografia

- [1] Ruoyu Jina, Qian Chen, Investigation of concrete recycling in the U.S. construction industry. *Procedia Engineering* 118 (2015), 894 – 901, doi:10.1016/j.proeng.2015.08.528
- [2] Bartłomiej W. Krawczyk, Antoni Szydło, Piotr Mackiewicz, Dariusz Dobrucki, Assessment criteria of the recycled aggregate cement bound bases. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 2019, vol. 18, nr 2, s. 109–126, doi:10.7409/rabdim.019.007
- [3] Bartłomiej W. Krawczyk, Antoni Szydło, Piotr Mackiewicz, Dariusz Dobrucki, Suitability of aggregate recycled from concrete pavements for layers made of unbound and cement bound mixtures. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*. 2018, vol. 17, nr 1, s. 39–53, doi:10.7409/rabdim.018.003
- [4] Bartłomiej W. Krawczyk, Elżbieta Stilger-Szydło, Przydatność materiałów pochodzących z recyklingu betonu przy realizacji budowli ziemnych i podłoża ulepszonego obiektów infrastruktury transportowej. *Przegląd Komunikacyjny*. 2018, R.73, nr 11, s. 37–43
- [5] PN-EN 13242. Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym
- [6] PN-EN 13242. Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym
- [7] Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych. Nawierzchnia z betonu cementowego. Warszawa, 2019
- [8] Wymagania Techniczne WT 5. Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych. GDDKIA, Warszawa 2010
- [9] Wymagania Techniczne WT-4. Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych. GDDKIA, Warszawa 2010