



ALEKSANDER DUDA

Politechnika Rzeszowska
aduda@prz.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5549-3098



TOMASZ SIWOWSKI

Politechnika Rzeszowska
siwowski@prz.edu.pl
ORCID: 0000-0002-2003-000X

Pakiety zużytych opon samochodowych w budownictwie drogowym – przegląd zastosowań

Zużyte opony są obecnie jednymi z największych i najbardziej problematycznych źródeł odpadów, ze względu na znaczną liczbę produkowanych opon, ich długotrwały rozkład oraz odporność na wodę, chemikalia i ekstremalne temperatury. Głównym problemem środowiskowym i zdrowotnym są pożary na składowiskach, podczas których uwalniane są do atmosfery toksyczne chemikalia. Z tego względu składowiska zużytych opon stanowią znaczne obciążenie dla środowiska naturalnego. Te same cechy, które sprawiają, że opony stanowią problem odpadów, czynią je również jednymi

z najczęściej ponownie wykorzystywanych materiałów odpadowych. Sama guma z opon jest niezawodnym materiałem – elastycznym, trwałym, wodoodpornym i łatwym do recyklingu. Obecnie stosowane w Polsce formy recyklingu opon stanowią jednak dodatkowe i dotkliwie dla środowiska obciążenie związane z zanieczyszczeniem (spalanie) lub koniecznością zużycia dużych ilości energii (recykling materiałowo-energetyczny). Dlatego recykling produktowy zużytych opon może być preferowanym rozwiązaniem tego problemu.

Od 2000 roku w Europie Dyrektywa UE w sprawie składowania odpadów, zabrania składowania zużytych opon na składowiskach. Od tego czasu odpadowe produkty pochodne z opon (ang. TDP), w tym całe opony, pakiety opon, strzępy, granulaty oraz ścier gumowy są szeroko stosowane również w inżynierii lądowej. Większość tych zastosowań dotyczyła kruszywa gumowego pochodzącego z opon (ang. TDA), tj. strzępów, granulatu i ścieru, stosowanych w inżynierii drogowej [1–4]. Alternatywą jest prasowanie (belowanie) całych zużytych opon w celu wytworzenia prostopadłościennych, lekkich, wodoprzepuszczalnych pakietów [5, 6]. Belowanie jest obecnie najlepszym sposobem recyklingu produktowego zużytych opon. Umożliwia ponowne wykorzystanie całych opon z możliwością zastosowania niskoenergetycznej obróbki podczas recyklingu. Typowy pakiet zużytych opon zawiera od 100 do 115 opon samochodowych sprasowanych w blok i zabezpieczonych drutami ze stali ocynkowanej biegnącymi wzdłuż na całej długości pakietu. Prasowanie opon w pakiety zostało już ujednoczone w szczegółowej specyfikacji technicznej [7]. Korzyści wyni-

kające z obniżenia kosztów produkcji i transportu pakietów zużytych opon stwarzają nowe możliwości ich efektywnego, ekonomicznie ponownego wykorzystania w budownictwie.

Pakiety zużytych opon mają znaczny potencjał do wykorzystania w zastosowaniach drogowych, szczególnie tam, gdzie ich niska gęstość, właściwości drenażowe i łatwość wbudowania dają im przewagę do rozwiązań alternatywnych. Wykorzystanie tych elementów do budowy lekkiego nasypu lub podbudowy warstwy drogowej na gruncie o niskiej wytrzymałości na ścinanie, stabilizacji skarp lub naprawy osuwisk oraz wypełnienia konstrukcji oporowych może potencjalnie zaspokoić zapotrzebowanie na tanie materiały wykazujące tak korzystne właściwości.

Artykuł zawiera przegląd aktualnych zastosowań pakietów z opon w drogownictwie i został przygotowany przez autorów w celu przyspieszenia wdrażania pakietów zużytych opon w budownictwie drogowym i mostowym w Polsce oraz zachęcenia do niego.

Właściwości inżynierskie pakietów ze sprasowanych zużytych opon samochodowych

Wymiary geometryczne i właściwości inżynierskie pakietów zużytych opon są potrzebne przy projektowaniu i wykonawstwie konstrukcji składających się z tych elementów. Poza podstawowymi właściwościami wymiarowymi i masowymi, istotna jest również praktyczna znajomość gęstości i porowatości pakietów opon, np. przy ocenie stateczności konstrukcji na przesuw i obrót. Wodoprzepuszczalność jest kluczowym parametrem, w przypadku gdy pakiety są używane na warstwy odwadniające i drenażowe, ponieważ określa szybkość, z jaką woda może przechodzić przez warstwę pakietów. Właściwość ta również jest istotna ze względu na stabilność konstrukcji pod obciążeniem hydraulicznym.

Sztywność pakietów jest istotna, ponieważ decyduje ona o tym, w jaki sposób konstrukcje z nich zbudowane odkształcają się pod obciążeniem. Jest to również najistotniejszy parametr przy ocenie warunków stanu granicznego użyteczności konstrukcji.

Jednym z kluczowych wyznaczników stateczności konstrukcji wykonanej z pakietów opon oraz gruntu naturalnego jest wytrzymałość na ścinanie przy styku obu materiałów. W przypadku materiałów porowatych, takich jak pakiety opon, często stosuje się dwa parametry do zdefiniowania linii poślizgu. Parametry obejmują element stały związany ze spójnością „c” oraz opór ścinania opisany przez kąt poślizgu

Tabela 1. Geometryczne wymiary i właściwości masowe referencyjnych pakietów [7]

Lp.	Właściwość pakietu SZOS	Jednostka	Wartość
1.	Długość	[m]	1,33 (+0,08 / -0,06)
2.	Szerokość	[m]	1,55 ($\pm 0,07$)
3.	Wysokość	[m]	0,83 ($\pm 0,04$)
4.	Objętość	[m ³]	1,70 (+0,24 / -0,15)
5.	Masa	[kg]	810 (± 35)
6.	Gęstość nominalna	[kg/m ³]	470 (± 50)
7.	Gęstość rzeczywista	[kg/m ³]	500 (± 70)
8.	Porowatość	[%]	62 (± 5)
9.	Wodoprzepuszczalność w kierunku wysokości pakietu	[m/s]	0,1–0,2
10.	Wodoprzepuszczalność w kierunku długości pakietu	[m/s]	0,02–0,04
11.	Sztywność wyrażona jako moduł Younga	[kPa]	800–1100
12.	Wytrzymałość na ścinanie wyrażona jako kąt tarcia na styku pakietu z materiałem zasypowym	[°]	35–36
13.	Pełzanie całkowite (po 35 miesiącach)	[%]	do 1,1

(tarcia) „ φ ” przy danym naprężeniu normalnym – parametry Columba Mohra. Ostatnim istotnym parametrem opisującym pakiety opon jest ich zdolność do pełzania, czyli ich zdolności do odkształceń pod działaniem stałego i długotrwałego obciążenia. Determinuje to zwykle przeprowadzenie długookresowych testów obciążeniowych, zanim pakiety opon zostaną wprowadzone do zastosowań drogowych.

Właściwości geometryczne i techniczne pakietów podane w tabeli 1 opierają się na połączeniu ograniczonej liczby testów laboratoryjnych i terenowych, ale można je traktować jako wskaźnik rzędu wielkości odpowiedniej właściwości, z oszacowaniem po stronie bezpiecznej [7].

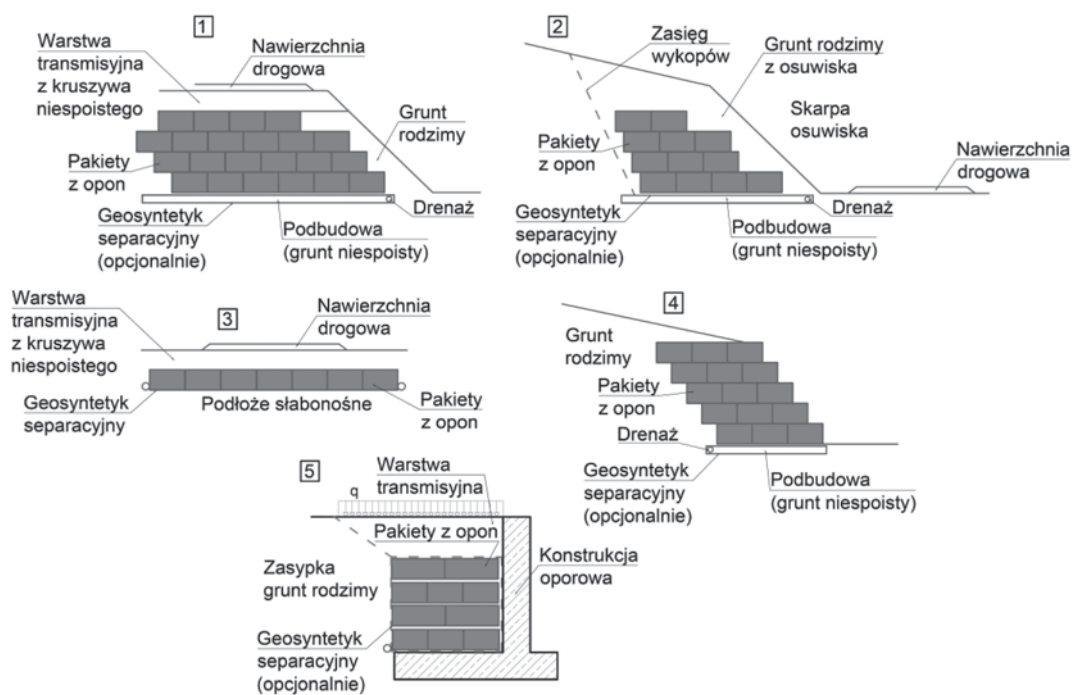
Ocena ryzyka środowiskowego wynikającego z użytkowania pakietów zużytych opon pod względem potencjalnego wpływu na zdrowie ludzi i środowisko wskazuje, że nie są one ani szkodliwe, ani niebezpieczne [8–11]. Dotyczy to w szczególności stosowania pakietów

opon w odniesieniu do ryzyka pożaru, potencjalnego wymywania chemikaliów i związków do lokalnych cieków wodnych oraz kwestii związanych ze zdrowiem i bezpieczeństwem ludzi. Pakiety opon nie pojawiają się na żadnej oficjalnej liście materiałów niebezpiecznych. W związku z tym zużyte opony i elementy spinające zapewniające ich kształt nie stanowią zagrożenia dla środowiska ani zdrowia ludzi, o ile przestrzegane są normalne środki ostrożności dotyczące przetwarzania, przechowywania i ich użytkowania.

Zastosowania pakietów opon w budownictwie drogowym

Wykorzystanie pakietów zużytych opon w budownictwie drogowym jest korzystne ze względu na ich unikalne właściwości, takie jak: trzykrotnie mniejszy ciężar objętościowy niż tradycyjne grunty, dobre właściwości drenażowe, wysokie opory tarcia oraz korzystne właściwości tłumiące drgania. Ponieważ pakiety ważą mniej niż konwencjonalne materiały wypełniające, powodują mniejsze osiadanie podłoża i niższe naciski boczne (parcie) na konstrukcje, takie jak ściany oporowe lub przyczółki mostów. Ze względu na dużą przepuszczalność wody pakiety pozwalają na dobry drenaż, analogicznie jak w przypadku zastosowania żwirów. Lekka zasypka z pakietów opon działa jak samonośny blok (analogia do koszy gabionowych), a wysoki ich opór tarcia wzdłuż powierzchni na styku opony i gruntu pozwala na zmniejszenie parcia gruntu w konstrukcji. Wreszcie dobre właściwości tłumiące zmniejszają szkodliwy wpływ budowy dróg na otoczenie.

Oprócz wyżej wymienionych zalet technicznych, pakiety opon są łatwe w obsłudze, co umożliwia użycie małego sprzętu do układania. Przy wbudowaniu pakietów opon re-



Rys. 1. Drogowe zastosowania pakietów z opon

dukuje się liczbę etapów zagęszczania zasyпки, przez co budowa jest łatwa i stosunkowo szybka. Koszt zastosowania pakietów opon uwzględniający ich korzystne cechy (odciążenie) w zastosowaniach inżynierii drogowej jest niższy niż w przypadku konwencjonalnych materiałów wypełniających. Finalnie, niepodważalne są korzyści dla środowiska wynikające z wykorzystywania materiałów odpadowych zamiast ich składowania na wysypiskach. Krótko mówiąc, pakiety opon zapewniają korzyści zarówno środowiskowe, jak i ekonomiczne, zwiększając tym samym zrównoważony rozwój w inżynierii drogowej.

Pakiety zużytych opon po raz pierwszy zastosowano w inżynierii lądowej pod koniec lat 90. XX wieku w USA [12]. Od tego czasu w drogownictwie zrealizowano kilkadziesiąt projektów wykorzystujących pakiety opon, głównie w USA, Kanadzie i Wielkiej Brytanii. Zastosowania drogowe pakietów opon obejmują między innymi budowę nasypów, stabilizację i naprawę zboczy (osuwiska), podbudowę dróg na podłożu odkształcalnym, grawitacyjne konstrukcje oporowe (typu gabionowego) i materiał zasypany do ścian oporowych. Najczęstsze zastosowania pakietów zużytych opon w inżynierii drogowej ujęto schematycznie na rysunku 1. W kolejnym rozdziale przedstawiono i zilustrowano kilka studiów przypadku, pokazujących możliwości wykorzystania pakietów zużytych opon w budownictwie drogowym w realizacjach budowanych na całym świecie.

Studium przypadku

Budowa nasypów

Pakiety opon są znacznie lżejsze niż konwencjonalne wypełnienia stosowane w nasypach drogowych, dzięki czemu można je stosować do budowy dróg na podłożu o niskiej wytrzymałości na ścinanie. Pakiety są trwałe, nie zanieczyszczają środowiska i wymagają mniejszego zagęszczenia niż konwencjonalne wypełnienia. Co więcej, są znacznie tańsze niż specjalne lekkie materiały stosowane zwykle w takich przypadkach.

Najbardziej spektakularnym przykładem wykorzystania pakietów zużytych opon w konstrukcji nasypu jest odcinek autostrady A-421 w pobliżu Bedford w Anglii [13]. Plan przebudowy A-421 wymagał budowy nowej drogi dwujezdniowej nad dwoma byłymi wyrobiskami, które zostały częściowo wypełnione do 20 m plastycznymi glinami. Krytyczny odcinek nasypu drogowego wykonano z lekkiego wypełnienia składającego się z kruszywa keramzytowego (Maxit) i pakietów zużytych opon wyprodukowanych zgodnie ze specyfikacją [7]. Rozwiązanie to zostało wybrane po rozważeniu różnych opcji przy wielu ograniczeniach wykonawczych. Wykonawca zdecydował się na lekkie wypełnienie zamiast wyznaczania podłoża dziesiątkami pali o długości co najmniej 29 m.

Maxit został po raz pierwszy użyty do utworzenia poziomej platformy, na której na odcinku o długości 240 m ułożono warstwę pakietów opon. Po ułożeniu jednej warstwy pakietów, Maxit użyto jako wypełnienie pustych przestrzeni między pakietami. Następnie na wierzchu pakietów ułożono geowłókninę, aby zapobiec migracji wypełnienia do wewnątrz, i dodano kolejną warstwę pakietów opon. Większość nasypu została utworzona z trzech warstw pakietów opon z naprzemiennymi cienkimi warstwami wyrównującymi z keramzytu. Wierzchnia warstwa pakietów była przykryta materiałem gruntowym o wysokości 1,0 m. Następnie tak wykonany nasyp został dodatkowo przeciążony, w celu przyspieszenia konsolidacji podłoża. Po zakończeniu okresu przeciążenia (6 miesięcy), wierzchnią warstwę z pakietów wykonano z gruntów słabo przepuszczalnych glin i ułożono konstrukcję nawierzchni drogowej. Wykorzystanie pakietów zużytych opon w tym projekcie przyniosło wiele korzyści środowiskowych i technicznych, w tym redukcję kosztów i łatwość transportu i wbudowania. Do wykonania nasypu potrzebnych było około 4500 pakietów opon, co odpowiada recyklingowi około 500 000 opon, a do warstw wypełniających między pakietami wykorzystano 11 000 m³ keramzytu (fot. 1).

Pakiety opon były również używane jako lekkie wypełnienie odcinka dojazdu w projekcie budowy zachodniej ob-



Fot. 1. Budowa lekkiego nasypu autostrady A-421, Anglia: a) pakiety opon umieszczone na geowłókninie; b) wypełnienie przestrzeni między pakietami keramzytem [13]

wodnicy Tampere o dużym natężeniu ruchu [14]. Odcinek wbudowania pakietów opon miał około 130 m długości. Bezpośrednio w podłożu zalegały słabonośne gliny o miąższości do około 10 m. Dolna warstwa nasypu drogowego składała się z jednej warstwy pakietów opon otoczonych tkaniną filtracyjną i przykrytych siatką z drutu stalowego.

Stabilizacja i naprawa zboczy

Pakiety opon można wykorzystać do wzmocnienia zboczy zagrożonych osuwaniem się (osuwiska) lub do naprawy uszkodzonych zboczy. Mała konstrukcja oporowa typu gabionowego może być uformowana z pakietów opon, stanowiąc dodatkową przyporę na skarpie. Jednak ze względu na swoją lekkość pakiety mogą być używane jako zabezpieczenie erozyjne skarp. Typowo utrata stateczności skarpy nasypu lub zbocza osuwiskowego wiąże się z występowaniem płytkiej krzywej poślizgu sięgającej do około 1,5 m poniżej powierzchni skarpy. Warstwowa zabudowa skarpy pakietami opon z przesunięciem powoduje po pierwsze odciążenie oraz wydłużenie potencjalnej powierzchni poślizgu, zwiększając wskaźnik stateczności skarpy [15]. Dodatkowo, umieszczenie pakietów opon w formie materaca w podstawie zbocza pozwala na sprawne odprowadzenie wody i odwodnienie terenu osuwiskowego.

W USA odbudowę niestatecznych zboczy zwykle wykonuje się poprzez ponowne wbudowanie gruntów, w tym częściowo ulepszanych spoiwami hydraulicznymi, często w połączeniu z wprowadzeniem w podłoże dodatkowej ściany ażurowej z kształtowników, aby zminimalizować czas przywrócenia drogi do przejeźdźności. W 2002 roku po raz pierwszy użyto pakietów opon do naprawy kilku uszkodzonych skarp nasypów. Najbardziej godnym uwagi przykładem takiej naprawy remediacyjnej była wcześniej nieudana naprawa zbocza, która miała miejsce na autostradzie międzystanowej I-30 w Fort Worth w USA [16]. Długość zniszczonego zbocza wynosiła około 46 m, wysokość zbocza osiągnęła 6,1 m przy stałym pochyleniu 1:3. Odbudowę zbocza przeprowadzono w kilku fazach, wykorzystując łącznie 360 pakietów opon zawierających średnio 100 zużytych opon na pakiet (fot. 2a). Po wykopaniu uszkodzonego zbocza, pakiety opon ułożono w podstawie wykopu. Odbudowę skarpy zrealizowano poprzez wbudowanie trzech warstw pakietów. Przewarstwienia między pakietami o grubości 0,2–0,3 m wykonano z gruntu spoiстого z osuwiska.

Również wierzchnia warstwa pakietów została przykryta gruntem spoiстым o miąższości 0,9 m, który następnie został obsiany trawą.

Monitoring odbudowanego miejsca wykazał, że naprawione zbocze pozostało stabilne, z lokalną deformacją powierzchni skarpy z uwagi na przepływ wody przez niezagęszczony grunt spoiсты i porowatość pakietów opon. Wstępna ocena wykazała, że ta metoda naprawy poprawiła współczynnik bezpieczeństwa skarpy 2–3-krotnie w porównaniu z pierwotnym wskaźnikiem stateczności [16]. Potencjalnie znaczna poprawa wskaźnika stateczności naprawionego zbocza jest zatem możliwa, gdy pakiety opon zastępują konwencjonalną zasypkę gruntową w obszarach, gdzie przeważają gliny o wysokiej plastyczności.



Fot. 2. Naprawa zbocza skarpy przy drodze I-30 w Fort Worth, USA: a) umieszczenie pakietów opon w podstawie skarpy; b) pakiety opon przykryte gruntem osuwiskowym z dopasowaniem pochylenia skarpy do otaczającego zbocza [16]

Podbudowa dróg na podłożu słabonośnym

Ze względu na swoje korzystne właściwości, pakiety opon są często wykorzystywane jako podbudowa dróg na podłożu słabonośnym. Pakiety opon są znacznie lżejsze i wymagają mniejszego zagęszczenia, są również tańsze niż konwencjonalne lub specjalne lekkie materiały, które można wykorzystać do lekkich podbudów drogowych. Pierwsze przykłady zastosowania tej techniki miały miejsce w latach 1999–2002 w hrabstwie Chautauqua, NY, USA, gdzie zrealizowano łącznie pięć projektów polegających na wykorzystaniu pakietów opon jako zamiennika podbudowy dla dróg na podłożu słabonośnym [17]. W każdym projekcie usuwano wierzchnią warstwę podłoża na głębokość pakietów opon i konstrukcji nawierzchni. W podłożu zalegały głównie gliny pylaste, które są ogólnie stabilne w stanie twaroplastycznym, ale bardzo wrażliwe na wilgoć, a tym bardziej na cykl zamrażania i rozmrażania. W wykopie ułożono geowłókninę separacyjną, na której umieszczono pojedynczą warstwę pakietów o grubości około 0,75 m, wypełniając żwirem przestrzenie między pakietami (fot. 3a). Między cienkim pakie-



Fot. 3. Pakiety opon jako podbudowa dróg w hrabstwie Chautauqua, USA: a) ułożenie warstwy przykrywającej na pakietach opon; b) ukończona droga [17]

tem warstw asfaltowych a pakietami opon ułożono warstwę podbudowy o grubości 0,45 m z zagęszczonych żwirów (fot. 3b). Finalnie zastosowanie pakietów opon na podbudowę dróg przyniosło korzyści finansowe (ograniczenie kosztów wzmocnienia) i przyspieszenie realizacji budowy.

Innym przykładem wykorzystania pakietów opon jako podbudowy drogowej na podłożu słabonośnym jest odcinek drogi B-871 w Sutherland w Szkocji [18]. Mimo że jest to droga o małym natężeniu ruchu, zalegające w podłożu torfy były przyczyną znacznego osiadania, powodując deformację drogi. Ostatecznie obciążenie dróg znacznie wzrosło z powodu dużego natężenia ruchu związanego z transportem drewna z pobliskich terenów leśnych, co wymagało wzmocnienia istniejącej drogi szutrowej. Na krytycznym odcinku drogi (o długości ok. 50 m) podłoże słabonośne wzmocniono 350 pakietami opon. Pakiety opon w korycie wykopu ułożono w dwóch warstwach: warstwa dolna szerokości 6 pakietów oraz warstwa górna szerokości 5 pakie-

tów opon. Podłoże rodzime odseparowano od pakietów za pomocą geotkaniny. Wolne przestrzenie między pakietami opon zostały wypełnione keramzytem. Nawierzchnia szutrowa jezdni o łącznej grubości 0,45 m składała się z trzech warstw gruntów kamiennych i żwirowo-piaskowych.

Prace przy wzmocnianiu dróg postępowały sprawnie i metodycznie w następujący sposób. Koparka dziobowa wykonała wykop około 1,5 m poniżej istniejącej drogi, na długości odcinka wynoszącego 5 m. W miarę usuwania materiału rodzimego układano geosyntezyk separacyjny w poprzek przekroju poprzecznego, pozostawiając nadwyżkę do owinięcia pakietów (fot. 4a). Maszyna wyposażona w chwytak, analogiczny do prac przy wycinie drzew, służyła do układania kolejnych pakietów opon. Lekkie wypełnienie zostało wysypane na pakiety w celu wypełnienia wolnych przestrzeni (fot. 4b). Zasypane dwie warstwy pakietów opon stanowiły jednocześnie platformę roboczą do pracy koparek oraz wozidła.



Fot. 4. Pakiety opon jako podbudowa drogi B-871, Szkocja: a) ułożenie pakietów opon na geosyntytyku separacyjnym; b) wypełnienie wolnych przestrzeni między pakietami kruszywem keramzytowym [18]



Fot. 5. Pakiety opon jako podbudowa drogi B-871, Szkocja: a) warstwa szutrowa przykrywająca pakiety opon wzmocniona siatkami stalowymi; b) droga B-871 po odbudowie nawierzchni i poboczy [18]

Bezpośrednio po wykonaniu podbudowy drogi z pakietów ułożono warstwę wyrównawczą z kruszywa o grubości 0,25 m. W warstwie tej umieszczono spawaną stalową siatkę zbrojeniową (pręty 8 mm w rozstawie 200 mm) (fot. 5a). Uznano, że wzmocnienie siatką zapewni dodatkową wytrzymałość i klinowanie kruszywa w warstwie przykrywającej, ograniczając wielkość koleiny. Finalnie wykonano dodatkową warstwę nawierzchni z kruszywa o grubości 0,1 m nad warstwą przykrywającą, co umożliwiło ponowne otwarcie drogi dla ruchu publicznego (fot. 5b).

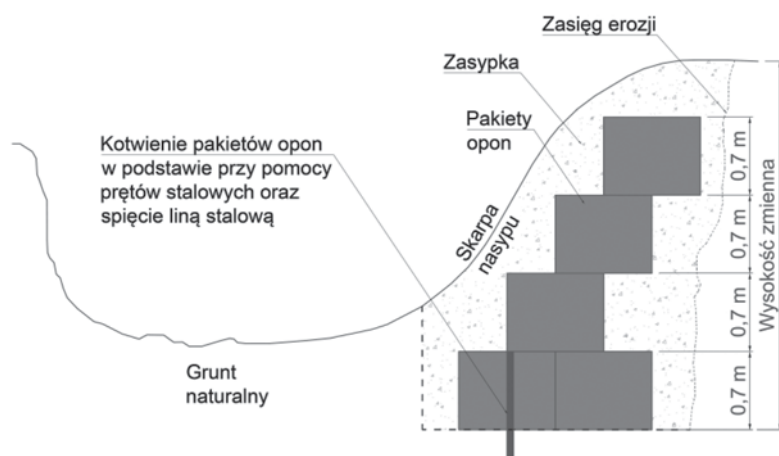
Grawitacyjne konstrukcje oporowe typu gabionowego

Pakiety opon mają dość regularny rozmiar i kształt, przez co mogą być używane jako modułowe bloki do budowy grawitacyjnych ścian oporowych, zastępując konwencjonalne kosze gabionowe. Dzięki zastosowaniu zasyпки z pakietów można zmniejszyć wymiary konstrukcji oporowej oraz naciski przenoszone na podłoże. Pakiety z opon są również znacznie tańsze niż konwencjonalne konstrukcje gabionowe, uwzględniając nawet dodatkowy materiał kamienny, stosowany jako oblicowanie powierzchni bocznej pakietów opon.

Dwa projekty wykorzystujące pakiety opon w postaci grawitacyjnej ściany oporowej zrealizowano w Winston i Hillsboro w stanie Nowy Meksyk w USA, w pobliżu dwóch dróg stanowych [19]. W pierwszej lokalizacji rzeka tymczasowa Arroyo biegła prawie równolegle do południowej strony drogi. Znaczna erozja brzegów rzeki, która powstała po silnych powodziach, zagrażała drodze podmyciami. W drugim przypadku wschodni brzeg rzeki Arroyo przebiega prawie prostopadle do drogi za pomocą przepustów, które zostały zamulone i doprowadziły do zalania drogi i obrywów brzegów rzeki. W obu przypadkach pakiety opon zostały zastosowane w celu ustabilizowania brzegów Ar-

royo w tych lokalizacjach, jako alternatywa do gabionów kamiennych.

Podobne rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe zastosowano do budowy grawitacyjnych konstrukcji oporowych w Winston i Hillsboro, USA. Konstrukcje oporowe zostały zbudowane z kilku warstw pakietów opon (rys. 2). Budowę rozpoczęto od umieszczenia dwóch rzędów pakietów opon poniżej linii przepływu kanału. Pakiety kotwiono między sobą i z podłożem za pomocą prętów stalowych długości 3 m w kształcie litery L w rozstawie co około 6 m. W dolnej warstwie pakietów zamontowano dodatkowe spięcie za pomocą liny o średnicy 9,5 mm przechodzącej przez pręty kotwiące. Kolejne warstwy pakietów układano na sobie z przesunięciem wynoszącym około połowę szerokości pakietu. Powierzchnię boczną elewacyjną pakietów zabezpieczono materiałem ziemnym oraz siatką gabionową. Na fotografii 6 widoczne są tylko dwie górne warstwy pakietów wieńczących konstrukcję oporową. Początkowe przykrycie pakietów materiałem ziemnym zostało odsłonięte po obfitych opadach deszczu. Brzeg Hillsboro został naprawiony



Rys. 2. Typowy przekrój poprzeczny przez grawitacyjną konstrukcję oporową z pakietów w Nowym Meksyku, USA



Fot. 6. Grawitacyjne konstrukcje oporowe z pakietów opon wykonane w a) Winston i b) Hillsboro, Nowy Meksyk, USA [19]

przy użyciu 160 pakietów opon, a około 610 pakietów opon umieszczono wzdłuż 396 m południowego brzegu Arroyo, który biegnie równoległe do drogi stanowej w Winston.

Zасыпка tradycyjных конструкций опорowych

Dzięki zastąpieniu niektórych zasypek gruntowych bezpośrednio za sztywną ścianą oporową lekkimi pakietami opon, które są zasadniczo samonośne, można uzyskać znaczne zmniejszenie siły parcia działającej na ścianę oporową, co pozwala na zastosowanie stosunkowo lekkiej konstrukcji ściany. Ponadto przepuszczalne pakiety mogą zapewnić dobrą ścieżkę dla drenażu przy tylnej ścianie, dzięki czemu mogą zastąpić warstwę drenażową stosowaną konwencjonalnie, w celu zminimalizowania sił hydrostatycznych działających na ścianę. Jednak w przypadku przyczółków mostowych należy zadbać o to, aby obciążenie pionowe naziomu nie powodowało nadmiernego zagęszczenia strefy przejściowej, gdzie bezpośrednio za ścianą znajdują się pakiety opon. Typowo stosowane płyty przejściowe będą wystarczające, aby ograniczyć deformacje strefy przejściowej zbudowanej z pakietu opon.

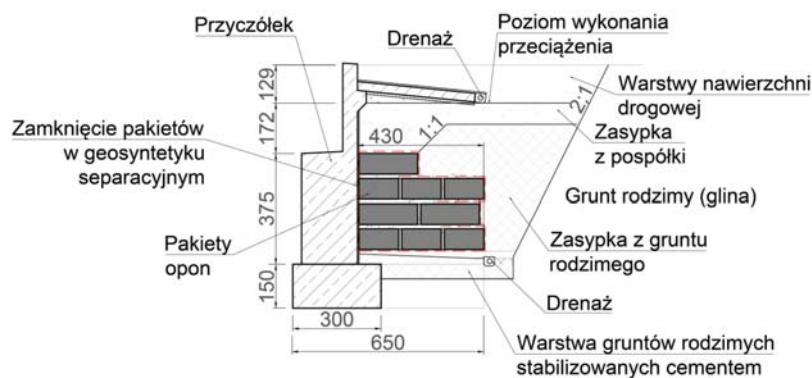
Zaletą stosowania pakietów opon jako zasypki jest jeszcze bardziej oczywista w przypadku mostów zintegrowanych / ramowych, gdzie przyczółki są strukturalnie połączone z przęsłem bez łożysk i dylatacji. W takich przypadkach wydłużenie termiczne przęsła może zostać przejęte przez sprężystą warstwę absorbującą naprężenia między tylną ścianą a materiałem wypełniającym nasyp. Bez takiej warstwy buforowej, mocno dogęszczona zasypka powoduje powstanie znacznego odporu. Pakiety opon zapewniają znacznie niższe parcie bierne niż konwencjonalna zasypka z gruntów niespoistych. Naciski boczne wywierane przez pakiety opon na przyczółek zintegrowany mogą być na poziomie znacznie mniejszym, niż parcie w tradycyjnych przyczółkach wspornikowych generowane przez konwencjonalną zasypkę, co znacznie zmniejsza koszt konstrukcji przyczółka.

Wykorzystanie pakietów opon jako zasypki konwencjonalnych konstrukcji oporowych było głównym przedmiotem projektu badawczego realizowanego przez autorów na Politechnice Rzeszowskiej [20, 21]. Badania laboratoryjne obejmowały pomiary i ocenę pełnowymiarowych pakietów opon w celu określenia podstawowych wielkości ich geometrii i masy jednostkowej, charakterystyk ścisłości, w tym modułu Younga i współczynnika Poissona, wytrzymałości na ścinanie wzdłuż powierzchni opona–opona i opona–materiał wypełniający, pęczania i degradacji sztywności pod obciążeniem cyklicznym. Poniżej przedstawiono krótkie zarysy wniosków wyciągniętych z tych badań, podając otrzymane wartości wraz z jakościowym porównaniem z odpowiednią literaturą [5, 6, 23].

Do produkcji pojedynczych pakietów testowych użyto około 135 opon samochodowych, sprasowanych w specjalnie zaprojektowanej maszynie i ustabilizowanych drutami spinającymi. W wyniku prasowania otrzymano prostopadłościenny pakiet o wymiarach około $2,05 \times 1,30 \times 0,75$ m, masie około 1030 kg, średniej objętości około $2,0$ m³ i ciężarze jednostkowym określonym na podstawie średniej objętości około $0,515$ Mg/ m³. Stwierdzono, że otrzymana masa jednostkowa była nieco niższa niż wartości podawane w literaturze. Do pomiaru ścisłości pakietów opon pod obciążeniem normalnym wykorzystano maszynę wytrzymałościową. Przybliżony moduł Younga dla pakietu z opon wyniósł 826 kPa i jest zbliżony do wartości podawanych w literaturze. Pomiary odkształceń poziomych wykazały stosunkowo niski współczynnik Poissona rzędu 0,11, podczas gdy wartości te podawane w literaturze wahały się od 0,08 do 0,24. Wyniki badań tarcia na styku suchej opony między pakietami wykazały kąt poślizgu (z lokalnym dociskiem) o wartości $46,0^\circ$, wykazując jednocześnie umiarkowaną zmienność między różnymi pakietami w zakresie od 0,11% do 21,53%. Odpowiednie wyniki badań wytrzymałości na poślizg pomiędzy wilgotną powierzchnią opon pakietów a materiałem zasypowym wykazały, że dla piasku średniego można oszacować liniową obwiednię zniszczenia przy małych wartościach

spójności 0,77 kPa i kącie tarcia 29,6°, od której średnie i maksymalne odchylenie wyników wynosiło odpowiednio 4 i 12%. Oba wyniki (kąty tarcia i spójność) dobrze korelują z wartościami podanymi w literaturze. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie na styku opona–grunt w porównaniu ze średnią wytrzymałością piasku określoną w próbach bezpośredniego ścinania dostarczyły dowodów, że wytrzymałość na styku opona–grunt jest o około 15% niższa niż wytrzymałość samego materiału zasypowego. Jednak w literaturze ujawniono nawet 20% redukcję wytrzymałości na ścinanie. Odształcenie od pełzania pod wpływem utrzymującego się obciążenia normalnego ściskającego przez okres do pięciu dni stanowiło 6,1% średniej wysokości beli. Znaczna część deformacji od pełzania (około 95%) wystąpiła pierwszego dnia, a maksymalna deformacja wystąpiła w ciągu trzech dni od obciążenia. Oszacowany współczynnik pełzania w okresie jednego roku wyniósł 0,0039 i jest to wartość bardzo zbliżona do uzyskiwanych w literaturze na podstawie badań polowych. Wyniki testów obciążenia cyklicznego otrzymane jako wartość sprężystości (różnica między maksymalnym a minimalnym odształceniem) były prawie stałe w ciągu około 400 minut obciążenia, nie wykazując degradacji sztywności pakietów opon pod obciążeniem cyklicznym. Do tej pory nie przeprowadzono podobnych testów nigdzie indziej.

Oprócz badań opisanych powyżej, autorzy przeprowadzili szereg badań doświadczalnych i numerycznych pakietów zużytych opon, wykorzystywanych jako zasypka dla mostów zintegrowanych. Eksperyment został przygotowany i przeprowadzony z wykorzystaniem specjalnego pełnowymiarowego stanowiska badawczego zbudowanego w celu symulacji rzeczywistych warunków działających na przyczółek mostu. Eksperyment wykazał, że naciski (zarówno czynne, jak i spoczynkowe) na tylną ścianę przyczółka były znacznie mniejsze w przypadku zasypki z pakietów opon w porównaniu do zwykłej zasypki z piasku średniego [21].



Rys. 3. Zasypka przyczółka mostowego w Sielnicy, Polska: układ warstw pakietów opon

Pozytywne wyniki badań laboratoryjnych i polowych pozwoliły na pierwsze znane zastosowanie pakietów opon w zasypce przyczółka, trójprzęstowego mostu, zlokalizowanego w miejscowości Sielnica w południowo-wschodniej części Polski [22]. Ze względu na złożony stan naprężeń spowodowany zakotwieniem przęseł skrajnych na przyczółkach, pakiety opon umieszczone w zasypce posłużyły do odciążenia fundamentów i znacznego zmniejszenia parcia gruntu na ścianę przyczółka. W zasypce każdego z przyczółków wbudowano 30 sztuk pakietów ułożonych w czterech warstwach. Liczba pakietów opon w poszczególnych warstwach wynosiła odpowiednio 4, 9, 8 i 9 licząc od górnej warstwy, a poszczególne warstwy pakietów układano na zakład (rys. 3). Wypełnienie przestrzeni między pakietami stanowiły przewarstwienia z piasku średniego o grubości 10 ÷ 15 cm (fot. 7a). Pakiety opon wraz z przewarstwieniami z piasku zostały odseparowane od gruntu nasypu zbudowanego z glin za pomocą geosyntetyków separacyjnych. Aby uniknąć nadmiernego odształcenia pakietów opon pod wpływem zmiennego obciążenia pionowego zastosowano tradycyjną płytę przejściową. Ponadto, aby zminimalizować deformacje (osiadanie) innowacyjnej zasypki, przed wykonaniem płyt przejściowych zastosowano czasowe przecię-



Fot. 7. Zasypka przyczółka mostowego w Sielnicy, Polska: a) ułożenie pojedynczej warstwy pakietów opon; b) przecięcie zasypki (A. Duda)

żenie zasypki na okres 7 dni w postaci prefabrykowanych płyt drogowych o łącznej masie 40 ton (fot. 7b). Obecnie, 5 lat po oddaniu mostu do ruchu, monitoring geodezyjny nawierzchni na dojeździe do obiektu mostowego nie wykazał żadnych deformacji.

Podsumowanie i wnioski

Obecnie wiele odpadów postrzeganych jest jako cenne źródło surowca. Rynek przetwarzania odpadów rozszerza się na nowe obszary. Zużyte opony są odpadem niezwykle uciążliwym, ponieważ nie ulegają biodegradacji i stanowią poważne zagrożenie pożarowe. Nie można ich składować na składowiskach odpadów ze względu na możliwość samozapłonu. Energia czy paliwo pozyskiwane z opon wydaje się być dobrym rozwiązaniem tego problemu, jednak w rzeczywistości daleko mu do efektywnego gospodarowania odpadami. Kiedy opona jest spalana w piecu cementowym, jest tracona na zawsze, wytwarzając duże ilości gazów cieplarnianych. Opony, które są ponownie przetwarzane w celu wytworzenia produktów o wyższej wartości lub w celu powielenia materiałów, dają drugie, trzecie, a nawet czwarte życie surowcowi, który nadal może być wykorzystany jako paliwo w końcowej fazie użytkowania.

Materiał z recyklingu zużytych opon w postaci pakietów opon charakteryzuje się wyjątkowymi właściwościami wytrzymałościowymi, mechanicznymi, wibroizolacyjnymi, drenażowymi i izolacyjnymi i może wkrótce znaleźć szerokie zastosowanie w budowie lub utrzymaniu dróg i mostów. Jednak brak norm i obawa przed zanieczyszczeniem gleby i wody przez pakiety ograniczały liczbę projektów inżynierii drogowej, w których stosowano pakiety zużytych opon w większości krajów Europy. Przedstawione studia przypadków wykazały, że wykorzystanie pakietów zużytych opon jako materiału wypełniającego w nasypach lub zasypkach oraz w projektach stabilizacji dróg lub skarp nie stanowi potencjalnego zagrożenia dla środowiska w wyniku wypłukiwania chemikaliów nieorganicznych lub organicznych. Ponadto, istnieją dalsze potencjalne obszary zastosowania pakietów opon w inżynierii drogowej, na przykład jako warstwy przeciwwderzeniowe filarów mostów, ochrona przed erozją brzegów rzecznych lub jako budowa ekranów dźwiękochłonnych. Żadna aplikacja z tej grupy nie została wdrożona przez 30 lat stosowania pakietów w budownictwie. Niniejszy artykuł ma na celu zachęcenie i przyspieszenie wdrażania pakietów opon w budownictwie drogowym i mostowym w Polsce.

Objaśnienia:

Pakiety SZOS – pakiety sprasowanych zużytych opon samochodowych;

TDA – Tire-derived aggregate

TDP – Tire-derived Product

Bibliografia

[1] P.J. Bosscher, T.B. Edil, S. Kuraoka, "Design of highway embankments using tire chips", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123: 295-304, 1997.

- [2] J.H. Lee, R. Salgado, A. Bernal, C.W. Lovell, "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125: 132-141, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1999\)125:2\(132\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1999)125:2(132)).
- [3] R.K. Mittal, G. Gill, "Sustainable application of waste tire chips and geogrid for improving load carrying capacity of granular soils", *Journal of Cleaner Production*, 200: 542-551, 2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.287>.
- [4] A. Mahgoub, H.E. Naggar, "Coupled TDA-geocell stress-bridging system for buried corrugated metal pipes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146: July, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103761>.
- [5] J.D. Simm, M.G. Winter, S. Waite, "Design and specification of tyre bales in construction", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 161: 67-76, 2008. <https://doi.org/10.1680/warm.2008.161.2.67>.
- [6] M.G. Winter, J.M. Reid, P.I.J. Griffiths, "Tyre bales in construction: case studies", Report PPR 045. TRL Limited, Crowthorne, UK, 2005.
- [7] PAS (Publicly Available Specification), "Specification for production of tyre bales for use in construction", PAS 108. London, UK, 2007.
- [8] A. Duda, M. Kida, S. Ziembowicz, P. Koszelnik, "Application of material from used car tyres in geotechnics – an environmental impact analysis", *PeerJ* 8:e9546, 2020. <https://doi.org/10.7717/peerj.9546>
- [9] M. Gualtieri, M. Andrioletti, C. Vismara, M. Milani, M. Camatini, "Toxicity of tire debris leachates", *Environment International*, 31: 723-730, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.02.001>
- [10] P. Hennebert, S. Lambert, F. Fouillen, B. Charrasse, "Assessing the environmental impact of shredded tires as embankment fill material", *Canadian Geotechnical Journal*, 51: 469-478, 2014. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0194>. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0194>.
- [11] L. Liu, G. Cai, J. Zhang, X. Liu, K. Liu, "Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering: A compressive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 126: 109831, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109831>.
- [12] K. Sonti, S. Senadheera, P.W. Jayawickrama, P.T. Nash, D. D. Gransberg, "Evaluate the uses for scrap tires in transportation facilities". Research Study No 0-1808, Centre for Multidisciplinary Research in Transportation. Texas Tech University, Lubbock, TX, USA, 2000.
- [13] I.F. Hodgson, S.P. Beales, M.J. Curd, "Use of tyre bales as lightweight fill for the A421 improvements scheme near Bedford, UK", *Engineering Geology Special Publications*, 26: 101-108, 2012. <https://doi.org/10.1144/EGSP26.12>.
- [14] H. Harri, "Tyre bales form part of Finnish Road", *World Highways*, 14: March, 18, 2005.
- [15] M.G. Winter, G.R.A. Watts, P.E. Johnson, "Tyre bales in construction". Report PPR 080. TRL Limited, Crowthorne, UK, 2006.
- [16] W. Prikryl, R. Williammee, M.G. Winter, "Slope failure repair using tyre bales at Interstate Highway 20, Tarrant County, Texas, USA", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38: 377-386, 2005. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/04-065>.
- [17] M.G. Winter, "Road foundation construction using lightweight tyre bales", *Proceedings of the 18th ICSMGE*, Paris, pp. 3275-3278, 2013.
- [18] C. Mackenzie, T. Saarenketo, "The B871 tyre bale project. The use of recycled tyre bales in a lightweight road embankment over peat", Research report. Roadscanners, Rovaniemi, Finland, 2003.
- [19] P. Bandini, A. T. Hanson, F. P. Castorena, S. Ahmed, "Use of tire bales for erosion control projects in New Mexico", *ASCE Geotechnical Special Publication 179: Characterization, Monitoring, and Modeling of Geosystems*, pp. 638-645, New Orleans, LA, USA, 2008.
- [20] A. Duda, D. Sobala, "Initial research on recycled tyre bales for road infrastructure applications", *SSP - Journal of Civil Engineering*, 12: 55-62, 2017. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2017-0019>
- [21] A. Duda, T. Siwowski, "Pressure evaluation of bridge abutment backfill made of waste tyre bales and shreds: experimental and numerical study", *Transportation Geotechnics*, 24: 100366, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100366>.
- [22] A. Duda, T. Siwowski, "Experimental investigation and first application of lightweight abutment backfill made of used tyre bales", *Proceedings of CEE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*, 47: 66-73, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_9
- [23] B. Freilich, J.G. Zornberg, "Mechanical properties of tire bales for highway applications". Report No. FHWA/TX-10/0-5517-1, Center for Transportation Research. University of Texas, Austin, TX, USA, 2009.