

## PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE RECYKLATÓW GUMOWYCH, JAKO SPOSÓB NA OCHRONĘ ŚRODOWISKA

Sebastian Białasz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: [sebastian.bialasz@pollub.edu.pl](mailto:sebastian.bialasz@pollub.edu.pl)

### STRESZCZENIE

Praca ta zawiera analizę obecnej wiedzy na temat ponownego wykorzystania odpadów gumowych, zwłaszcza użytkowych opon samochodowych, w tym sposobu gospodarowania odpadami, metod przetwarzania recyklatów oraz praktycznych zastosowań tego materiału. Opisano sposoby ograniczenia ilości odpadów polimerowych, omówiono materiały i związki chemiczne stanowiące budulec opon oraz zaprezentowano dostępne metody wytwarzania recyklatów gumowych. Ponadto sklasyfikowano rodzaje odpadów gumowych po rozdrobnieniu i przedstawiono przykładowe możliwości ich wykorzystania w przemyśle.

**Słowa kluczowe:** recykling, opony, odpady gumowe

### PRACTICE USE OF RUBBER RECYCLATES, AS A WAY TO PROTECT THE ENVIRONMENT

#### ABSTRACT

This paper contains an analysis of current knowledge about the reuse of rubber waste, especially post-consumer car tires, including waste management, recycling methods and practical applications of this material. The methods of reducing the amount of polymer waste are described, the materials and chemical constituents constituting the building blocks of the tires are discussed and the available methods of producing rubber recyclates are presented. In addition, the types of rubber waste after fragmentation were classified and examples of their use in industry were presented.

**Keywords:** recycling, tires, waste rubber

### WPROWADZENIE

Okres ostatnich kilkudziesięciu lat, to czas intensywnego rozwoju techniki i przemysłu, a wraz z nim wzrost konsumpcjonizmu. Rozwój ten poza szeregiem pozytywnych zmian w życiu, niesie za sobą również efekty niepożądane. Jednym z nich, możliwe że najgroźniejszym, jest globalne eksploatowanie zasobów naturalnych, w tym węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego, które są głównymi surowcami przemysłu chemicznego. Towarzyszy temu degradacja środowiska naturalnego, co jest szczególnym zagrożeniem, ze względu na bardzo wolny proces naturalnej odbudowy ekosystemu, lub co gorsza, bezpowrotne jego zniszczenie. Dodatkowo, wraz ze wzrostem

konsumpcjonizmu, rośnie także ilość generowanych odpadów, które zarządzane w niewłaściwy sposób, również degradują środowisko naturalne.

Jedną z grup odpadów szczególnie problematycznych, są odpady z tworzyw polimerowych. Wśród odpadów komunalnych tworzywa polimerowe stanowią od 7 do 14% ogólnej masy odpadów, co może stanowić nawet 30% ich objętości. Według badań w Polsce powstaje rocznie około 800 tys. ton odpadów tworzyw polimerowe. Stale rosnące zużycie tworzyw polimerowych oraz długi czas ich rozpadu generuje istotny do rozwiązania problem zagospodarowania odpadów z tworzyw polimerowych. Jedną z możliwości rozwiązania tego problemu jest recykling materiałowy, surowcowy i energetyczny, który pozwala

na ponowne włączenie odpadów do obiegu produkcyjnego. Nadal jednak znaczącym sposobem na zagospodarowanie odpadów tego typu jest ich składowanie, jest to metoda najmniej korzystna pod względem zarówno ekonomicznym, jak i ekologicznym. W Polsce w 2012 roku powstało około 1,48 mln ton po konsumenckich odpadów z tworzyw polimerowych, z czego około 24% poddano recyklingowi mechanicznemu, około 17% odzyskowi energii, natomiast pozostałe 59% odpadów trafiło na składowiska. W porównaniu do średniej europejskiej jest to nadal mało. Wpływ na recykling mają również napełniacze dodawane do tworzyw polimerowych w celu poprawienia ich parametrów przetwórczych oraz właściwości uzyskiwanych wytworów [Duda i Sobala 2017, Duda i in. 2016, Pyskło i Parasiewicz 2004, Sułkowski i in. 2002, Skalamowski 2003].

Wśród odpadów polimerowych, szczególnym przypadkiem są odpady gumowe, w tym opony. Technologia wytwarzania opon jest związana z procesem wulkanizacji, który ostatecznie nadaje im odpowiednie użytkowe parametry, przy czym jest to proces nieodwracalny. Reakcja między elastomerem, siarką i innymi składnikami powoduje powstanie wiązań poprzecznych między łańcuchami elastomeru, czego efektem jest otrzymanie przestrzennej sieci chemicznej. Największe problemy związane z recyklingiem stwarza sieć przestrzenna. Przywrócenie gumy do stanu wyjściowego, umożliwiającego powtórne przetwórstwo, przy obecnej technice stosując metody chemiczne, mechaniczne i termiczne nie jest osiągalne. W Unii Europejskiej około 80% poeksploatacyjnych wyrobów gumowych stanowią zużyte opony, które są największą grupą poeksploatacyjnych wyrobów gumowych, ale także ze względu na skład i budowę ich recykling jest znacznie trudniejszy niż w przypadku metali lub szkła. Wprowadzone uregulowania prawne, dotyczące przemysłu samochodowego narzucają stały wzrost wykorzystania surowców wtórnych pozyskiwanych z opon samochodowych. Recykling opon w porównaniu recyklingu metali szkła papieru jest nadal niewystarczający [Duda i in. 2016, Parasiewicz i Pyskło 2005, Skalamowski 2003].

Recykling opon samochodowych jest kosztowny, wymaga dużych nakładów finansowych oraz jest bardzo pracochłonny. Na ogół otrzymywany recyklat ma gorsze właściwości i jest mniej korzystny niż materiał pierwotny. Zużyte opony wykonane z wysokiej jakości kauczuków są pozornie dobrym źródłem surowców. Wy-

sokie wymagania odnośnie jakości wyrobów stanowią ograniczenie dla stosowania recyklatów w procesie produkcyjnym. Odpady gumowe stanowią poważny problem ekonomiczny i ekologiczny. Aktualne uregulowania dotyczące przemysłu samochodowego narzucają konieczność stosowania surowców wtórnych m. in. recyklatów opon samochodowych. Oprócz gumy, opony składają się z kordu tekstylnego oraz stalowego, który powinien zostać oddzielony podczas procesu recyklingu [Duda i Sobala 2017, Skalamowski 2003].

## SPOSOBY OGRANICZENIA ILOŚCI ODPADÓW POLIMEROWYCH

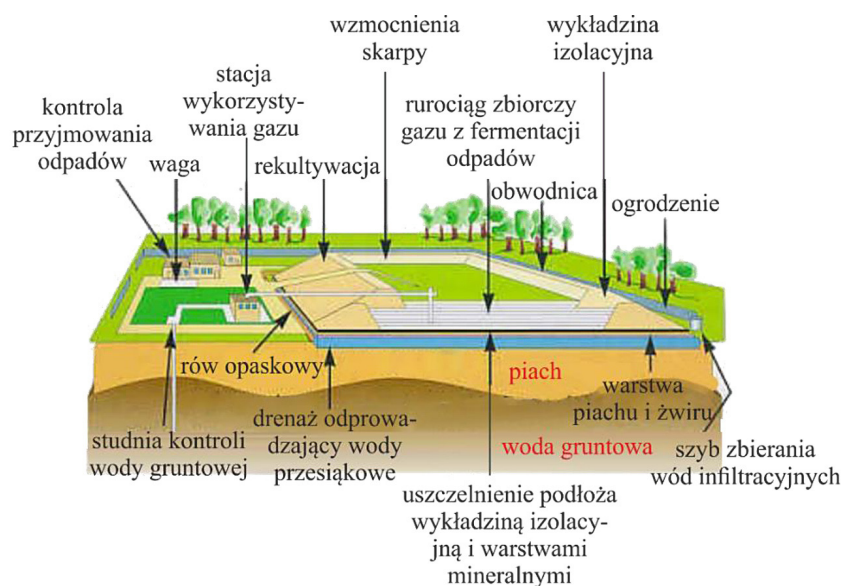
Wieloletnie doświadczenia w recyklingu odpadów tworzywowych pokazały, iż system ten posiada wiele ograniczeń, uwarunkowanych uregulowaniami prawnymi oraz różnorodnością właściwości chemicznych tworzyw. Odpady powinny być wykorzystywane zgodnie z regułami tzw. „zielonej chemii”, czyli w taki sposób, aby surowiec był wykorzystywany tak długo, jak długo będzie można to racjonalnie uzasadnić. Należy również wykorzystywać, w miarę możliwości, do procesów produkcji surowce odnawialne, które pozwolą na unikanie substancji trujących [Smejda-Krzewicka i in. 2015].

Wśród głównych metod przeciwdziałania nadmiernej kumulacji odpadów można wyróżnić 3 grupy:

- ograniczenie zużycia tworzyw
- składowanie odpadów tworzywowych
- recykling odpadów

Ograniczenie zużycia tworzyw to podstawowy krok w ochronie środowiska. Przykładowym zastosowaniem tego działania, może być zastąpienie polietylenowych woreczków do żywności, papierowymi torbami. Składowanie odpadów tworzywowych, odbywa się na specjalnych złomowiskach. Jest to droga inwestycja, ponieważ wymaga odpowiedniego przygotowania terenu i wyłączenia go z normalnego użytkowania (rys. 1).

Sposobem umożliwiającym najszersze spektrum możliwości jest recykling odpadów. Recykling, w rozumieniu polskiego prawa, jest to taki odzysk, który polega na powtórny przetwarzaniu substancji lub materiałów zawartych w procesie produkcyjnym w celu uzyskania substancji i/ lub materiałów o przeznaczeniu pierwotnym lub



**Rys. 1.** Schemat nowoczesnego składowiska odpadów  
**Fig. 1.** Scheme of a modern landfill

o innym przeznaczeniu. Recykling może mieć charakter materiałowy, surowcowy lub energetyczny.

Recykling materiałowy jest procesem uzdatniania odpadów w celu otrzymania materiałów do powtórnego przetwórstwa. Podczas tego rodzaju recyklingu stosuje się fizyczne procesy przetwórcze, takie jak oczyszczanie, mycie, rozdrabnianie i inne. Jest to najbardziej racjonalny sposób utylizacji odpadów polimerowych, ponieważ odzyskiwane materiały umożliwiają ograniczenie produkcji polimerów oryginalnych. Pozwala to na zmniejszenie wielkości emisji do środowiska szkodliwych związków oraz zużycie energii niezbędnej do wytworzenia nowych tworzyw. Jego celem jest uzyskanie pełnowartościowego tworzywa. Metoda ta jest jednak ograniczona w zasadzie do tworzyw termoplastycznych. Jednakże krotkość przetwórstwa tworzyw termoplastycznych jest ograniczona, ze względu na pogarszające się właściwości odzyskiwanego tworzywa i jego podatności na przetwórstwo, czyli przetwarzalności. [Smejda-Krzewicka i in. 2015, Trojnar i Duda 2016]

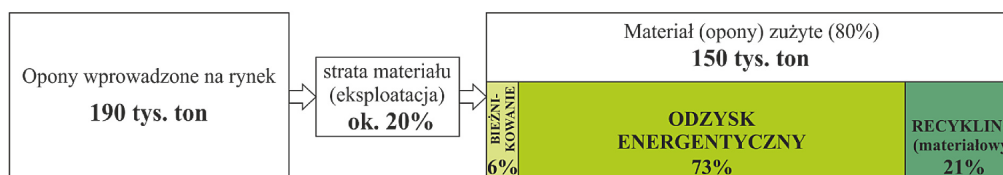
Recykling surowcowy to taki, gdzie następuje rozkładanie polimerów na frakcje o mniejszej masie cząsteczkowej w celu odzyskania monomerów. Polega na poddaniu tworzywa procesom chemicznym jak: hydroliza, alkoholiza, glikoliza, uwodnienie, piroliza, hydrokraking, czy zgazowanie. W procesach tych otrzymywane są związki małowartościowe, które mogą być dalej przerabiane na surowce chemiczne lub paliwa. W taki sposób mogą być przetwarzane odpady z

różnych tworzyw, bez uprzedniego ich sortowania i mycia. Jednak są to procesy drogie i wymagające specjalistycznych instalacji.

Recykling energetyczny polega na spalaniu odpadów tworzyw polimerowych z odzyskiem zawartej w nich energii. Wykorzystanie ciepła ze spalania tych odpadów jest opłacalne ze względów energetycznych, gdyż mają wartość kaloryczną, wynoszącą średnio 35 MJ/kg, a zatem wyższą od węgla kamiennego.

Z tego rodzaju recyklingiem odpadów z tworzyw polimerowych wiąże się nadzieja na globalne rozwiązanie przetwarzania zwłaszcza tych odpadów, które nie mogą być przerobione i zagospodarowane w inny sposób. Zaletą recyklingu energetycznego jest fakt, że niezależnie od rodzaju zastosowanego tworzywa polimerowego, użytych wypełniaczy i dodatków, a także charakteru i postaci odpadu, nie zachodzi potrzeba wstępnej segregacji odpadów ani ich mycia, czy usuwania elementów innych substancji organicznych. W Polsce głównym sposobem odzysku opon jest odzysk energetyczny (rys. 2), który polega na spalaniu najczęściej w piecach cementowni lub elektrociepłowniach.

Spalanie opon wytwarza więcej energii niż węgiel, przez co jest bardzo efektywne energetycznie (rys. 3). Spalanie najczęściej stosowane są w cementowniach w specjalnie zaprojektowanych do tego procesu piecach, jako 20% dodatek do paliwa. Takie zagospodarowanie gumowego recyklatu jest bardzo powszechne w krajach rozwijających się np. USA, Japonia,



Rys. 2. Recykling opon w Polsce  
Fig. 2. Tire recycling in Poland

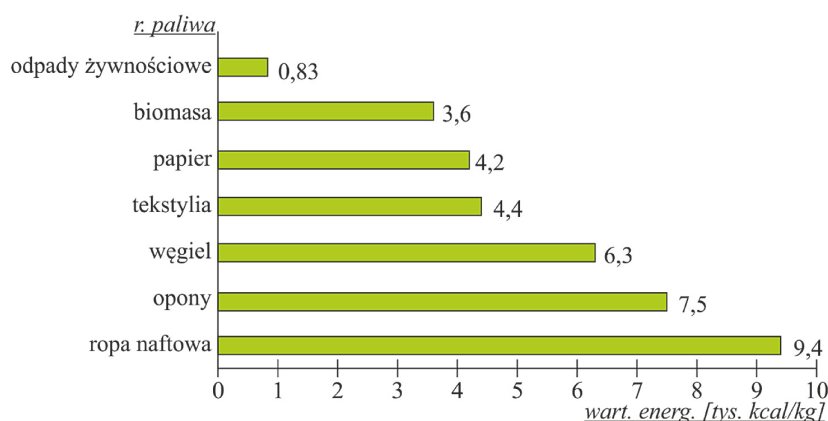
Niemcy. W Polsce takie rozwiązanie jest stosowane między innymi w Cementowni Chełm. Opony stosowane jako paliwo mogą być w postaci stałej lub rozdrobnionej jako paliwo podstawowe lub dodatkowe do produkcji pary, energii elektrycznej, cementu, papieru, wapna, stali oraz spalarniach śmieci. Paliwo z opon oznaczane jest skrótem TDF (tyre derived fuel). Wysoka temperatura (>1000 °C) w piecach cementowych pozwala na całkowite spalanie opon oraz utlenienie zawartej w nich stali. Jest bardzo korzystna obecność kordu stalowego w przypadku wypalania klinkieru, ponieważ w tym procesie dodawane są tlenki żelaza [Parasiewicz i Pyskło 2005]. Na rysunku 3 przedstawiono wartość energetyczną spalanych opon w porównaniu z innymi materiałami spalany.

### OPONY SAMOCHODOWE

Opony samochodowe z upływem czasu tracą swoje właściwości użytkowe. Przyjmuje się że granicą czasową dopuszczającą oponę do użytku jest okres 10 lat od chwili wyprodukowania. Największy wpływ na stopień zużycia opony mają warunki w jakich jest eksploatowana takie jak: obciążenie, temperatura pracy, niewłaściwe ciśnienie, styl jazdy.

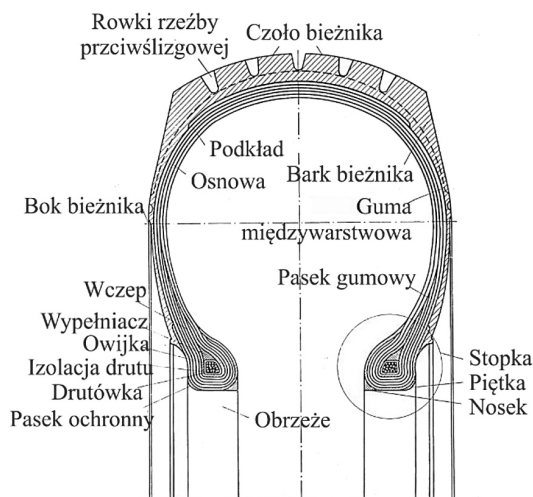
Opony dostępne na rynku występują jako bezdętkowe lub z wewnętrzną dętką. Bardziej popularne są bezdętkowe z uwagi na lepsze właściwości użytkowe. Opona samochodowa składa się z części nośnej i bieżnika. Bieżnik (rys. 4) jest szczelną zwulkanizowaną powłoką, której elementy to elastyczna osnowa, która składa się z kilku warstw tkanin kordowych pokrytych gumą; opasanie, stanowiące kilka warstw nici między osnową a bieżnikiem; drutówka, utworzona z nierozciągliwego rdzenia otoczonego warstwami kordu. W przekroju poprzecznym opony wyróżnia się strefy: czoło opony, jest miejscem gdzie opona styka się z nawierzchnią, posiada rowki zwane lamelami; bark opony, jest to strefa między czołem a bokiem opony, jej grubość zmniejsza się od czoła do boku; bok opony, część pomiędzy barkiem a stopką, składa się z osnowy pokrytej gumą, charakteryzuje się wysoką elastycznością i niewielką grubością; stopka, utworzona ze zwojów drutu stalowego owiniętego paskiem cienkiej tkaniny krzyżowej, ustala pozycje opony na półkach obręczy [Krzyżak 2004].

Podstawowym składnikiem mieszanki gumowej jest kauczuk. Kauczuki wykorzystywane do produkcji opon muszą charakteryzować się dobrymi właściwościami mechanicznymi, ale najczęściej mają małą odporność na oleje i łatwo ulegają starzeniu. Do tej grupy kauczuków nale-



Rys. 3. Wartość energetyczna różnych paliw (tys. kcal/kg)  
Fig. 3. Energy value of various fuels (thousand kcal/kg)





Rys. 4. Przekrój przykładowej opony  
Fig. 4. A cross-section of an example tire

żą: kauczuk naturalny (NR), butadienowy (BR) oraz butadienowo–styrenowy (SBR). Kauczuk naturalny posiada dobrą charakterystykę zmęczenia, jest stosowany w największych ilościach. Przedmieszkę kauczuku naturalnego i sadzy otrzymuje się mieszając lateks oraz zawieszinę sadzy, wykorzystując mieszalnik strumieniowy. Efektem tego procesu jest dobra makro i mikrodyspersja mieszaniny [raport PlasticEurope 2013, Sułkowski i in. 2002]. Typowy skład chemiczny gumy do produkcji opon przedstawiono w tabeli 1.

Opony mogą zawierać także 1,3-2,2% siarki i 0,2% chloru, a także metale ciężkie takie jak: kadm, ołów, cynk, chrom, czy nikiel.

Głównymi materiałami stosowanymi w warstwach osnowy są: poli(tereftalan etylenu) – PET oraz włókno wiskozowe, które ze względu na relatywnie niski koszt i dobrą wytrzymałość mechaniczną oraz termiczną są najczęściej stosowane w przemyśle oponiarskim. Wyjątkowo dobrymi właściwościami charakteryzują się: poli(naftalan

etylenu) (PEN) i poliolefinoketon (POK), jednak ze względu na wysokie koszty oraz ograniczone zastosowanie w przemyśle są stosowane rzadko. Kord stalowy stosowany kiedyś wyłącznie do samochodów ciężarowych i maszyn ciężkich, znalazł powszechne zastosowanie przy produkcji opon do samochodów osobowych. Kord o średnicy nieprzekraczającej 1 mm, jest pokrywany warstwą mosiądzu przed procesem kalandrowania. Warstwa mosiądzu poprawia łączenie drutu z mieszką gumową [Krzyżak 2004, Szydło i Koba 2009].

Opona nadająca się do eksploatacji powinna spełniać następujące warunki: brak ubytków w budowie opony, prawidłowa geometria, prawidłowa głębokość bieżnika, określony termin przydatności opony nie został przekroczony, nie występuje podwyższona utrata powietrza. Gdy opona przestaje spełniać choć jeden z warunków dopuszczenia do użytku zostaje wycofana z eksploatacji. Opony samochodowe nienadające się do eksploatacji są klasyfikowane z punktu widzenia ich dalszego wykorzystania. Głównymi kryteriami są: zużycie, wiek oraz uszkodzenia opon. Używane opony przy klasyfikacji dzielone są na dwie kategorie:

- nadające się do bieżnikowania, są to opony które zostają poddane procesowi bieżnikowania, aby mogły zostać ponownie wykorzystane w pojazdach samochodowych. Bieżnikowanie polega na usunięciu resztek starego bieżnika, a następnie trwałego przyłączenia nowego bieżnika w procesie wulkanizacji. Warunkiem dopuszczenia opony do tego procesu jest jej nieuszkodzony korpus (tzw. karkas).
- całkowicie zużyte, które nie podlegają procesowi bieżnikowania, mogą zostać poddane procesom recyklingu lub wykorzystane jako paliwo energetyczne – w całości lub po rozdrobnieniu.

Tabela 1. Typowy skład chemiczny gumy do produkcji opon [Parasiewicz i Pyskło 2005]

Table 1. Typical chemical composition of rubber for tire production

Związek chemiczny	Masa [kg]	Masa [%]
SBR – polimer gumowy	6,09	62,1
Sadza	3,04	31,0
Rozcieńczalnik	0,19	1,9
Tlenek cynku	0,19	1,9
Kwas stearynowy	0,12	1,2
Siarka	0,11	1,1
Katalizator	0,07	0,7

## METODY WYTWARZANIA RECYKLATÓW GUMOWYCH

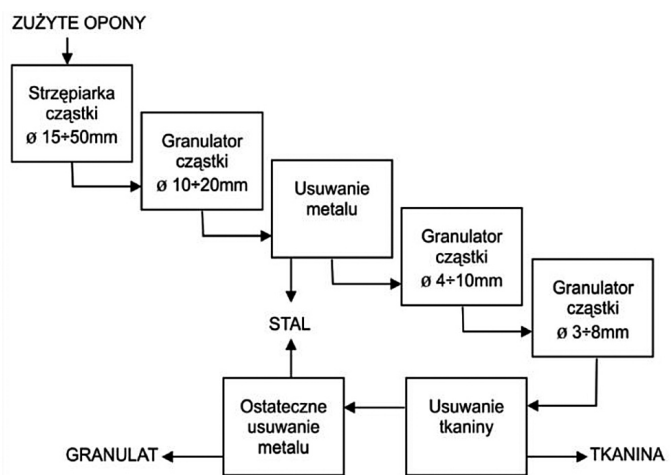
Do głównych metod stosowanych przy produkcji recyklatu ze zużytych opon należą: metoda rozdrabniania mechanicznego w temperaturze otoczenia, metoda kriogeniczna, metoda Berstroffa, metoda „na mokro” oraz metoda rozdrabniania wodą pod wysokim ciśnieniem. Wybór zastosowanej metody zależy głównie od przeznaczenia recyklatu oraz zaplecza technicznego.

Proces rozdrabniania opon w temperaturze otoczenia, zaczyna się od wstępnego pocięcia opony (rys. 5), zależnie od docelowej frakcji recyklatu stosuje się młyny, granulatory lub mieli się na walcarkach. Najmniejsze cząstki wówczas osiągają ok. 400  $\mu\text{m}$ . Podczas rozdrabniania wymagane jest schładzanie gumy z uwagi na wydzielanie się znacznych ilości ciepła podczas cięcia. Zbyt wysoka temperatura procesu może doprowadzić do degradacji makrocząsteczek kauczuków. W celu usunięcia kordu tekstylnego i metalu stosuje się separatory.

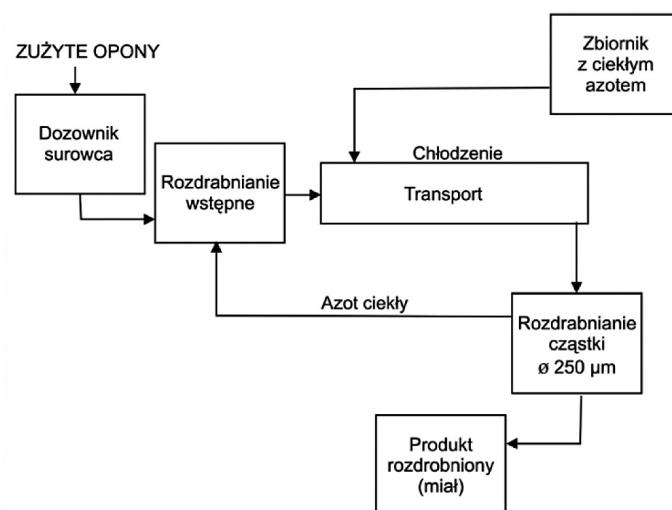
W metodzie kriogenicznej, wstępnie pocięte opony chłodzone są ciekłym azotem poniżej temperatury kruchości (<80 °C) i poddawane rozdrobnieniu za pomocą młynów młotkowych. Cząstki miazgi otrzymanego tą metodą mają regularny kształt, gładką powierzchnię i ostre krawę-

dzie. Miazg otrzymany w ten sposób zawiera mniej zanieczyszczeń w stosunku do metody w temperaturze otoczenia, jednak posiada więcej wilgoci (12-15%). Wielkości otrzymanych cząstek wynoszą ok. 240  $\mu\text{m}$ . Dużą wadą metody kriogenicznej są koszty utrzymania całej linii technologicznej. Na rysunku 6 przedstawiono schemat linii do rozdrabniania kriogenicznego [praca zbiorowa 1981].

Metoda Berstroffa jest udoskonaleniem procesu rozdrabniania mechanicznego. W metodzie tej, na walcarkach o walcach ryflowanych oraz w wyłaczarce dwuślimakowej, rozcierana jest uprzednio rozdrobniona guma. Linia technologiczna składa się z trzech niezależnych podzespołów, a proces dzieli się na trzy etapy: cięcie opony na kawałki w młynie nożowym i usunięcie drutu; rozcieranie za pomocą walców ryflowanych oraz oddzielenie kordu stalowego i tekstylnego; oraz



Rys. 5. Schemat linii do rozdrabniania w temperaturze otoczenia  
Fig. 5. Diagram of the line for grinding at ambient temperature



Rys. 6. Schemat linii do rozdrabniania kriogenicznego [Parasiewicz, Pyskło i Magryta 2005]  
Fig. 6. Scheme of a line for cryogenic grinding

rozcieranie na wyciarczarce dwuślimakowej wraz z intensywnym chłodzeniem. Otrzymywany granulak charakteryzuje się małą wielkością cząstek ( $100 \div 600 \mu\text{m}$ ) i dobrze rozwiniętą powierzchnią.

Metoda rozdrabniania na mokro jest powszechnie stosowana w USA, gdzie miał jest stosowany jako dodatek do produkcji opon samochodowych. Zaletą tej metody są niższe koszty niż w przypadku metody kriogenicznej. Miał charakteryzuje się jednorodnością i czystością. Frakcja mieści się w zakresie  $125\text{-}250 \mu\text{m}$ . Wstępnie rozdrobniony recyklat jest mielony w młynie z pomocą wody, która zabezpiecza przed degradacją oraz oczyszcza recyklat z pyłu [praca zbiorowa 1981].

Metoda rozdrabniania wodą pod bardzo wysokim ciśnieniem, jest metodą opracowaną przez firmę Regum Recykling Ltd z Węgier i polega na oddzielaniu gumy od kordu stalowego, po czym podzieleniu jej na bardzo małe cząstki o rozwiniętej powierzchni. Powierzchnia właściwa otrzymanego miału gumowego wynosi  $2\text{-}3 \text{ m}^2/\text{g}$ . Otrzymany miał gumowy można stosować jako reaktywny napełniacz NBR, SBR i EPDM lub do modyfikacji asfaltu. Kord stalowy nie ulega uszkodzeniu. Możliwe jest oddzielenie wewnętrznej wykładziny opony z kauczuku butylowego. Zużycie energii jest mniejsze niż podczas rozdrabniania kriogenicznego. Zaletą tej metody jest niski poziom hałasu, mała ilość zanieczyszczeń powstających podczas produkcji oraz miał gumowy o stosunkowo dobrze rozwiniętej powierzchni. Możliwe jest wytwarzanie granulatu o rozmiarach: do  $200 \mu\text{m}$ ,  $200\text{-}300 \mu\text{m}$ ,  $300\text{-}600 \mu\text{m}$ ,  $600\text{-}100 \mu\text{m}$  [praca zbiorowa 1981].

## ZASTOSOWANIE GRANULATÓW Z OPON

Sposób ponownego wykorzystania rozdrobnionych odpadów gumowych jest uwarunkowany przez stopnia ich rozdrobnienia. W normie europejskiej EN-14243 na materiały pozyskiwane z recyklingu opon wprowadzono klasyfikację zaprezentowaną w tabeli 2.

Niezależnie od gradacji recyklatu, w większości przypadków jest on stosowany jako napełniacz do kompozytów, stanowiących materiał budulcowy nowych wyrobów. Do najbardziej popularnych kompozytów należą kompozyty polietylenowo-gumowe, kompozyty uretanowo-gumowe, czy modyfikowane asfalty. W zależności od gradacji, znajdują one zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu.

**Tabela 2.** Klasyfikacja materiałów otrzymywanych ze zużytych opon wg. EN-14243

**Table 2.** Classification of materials obtained from used tires acc. EN-14243

Rodzaj odpadów gumowych po rozdrobnieniu	Wielkość cząstek [mm]
Ścier (jako produkt uboczny bieżnikowania)	0-40
Miał	0-1
Granulat	1-10
Chipsy	10-50
Strzępy	40-300
Opony cięte (kawałki)	>300

W budownictwie drogowym opony częściowo pocięte na elementy o charakterystycznym wymiarze powyżej  $300 \text{ mm}$  mają zastosowanie głównie jako wypełnienie warstwy nośnej nasypów pod drogi. Obecnie takie zastosowanie ma kierunek rozwojowy. Pierwsze próbne odcinki dróg, będące pod stałą kontrolą, długości  $105 \text{ m}$  w tej technologii powstały w Madrycie wzdłuż autostrady, drugi na Teneryfie. Projekt rozpoczął się w 2009 roku, nadal trwają badania nad zachowaniem się nawierzchni. Do tej pory nie stwierdzono defektów drogi związanych z zastosowaniem jako wypełniacza pociętych opon.

Strzępy i chipsy mają zastosowanie głównie przy budowie dróg, mostów, lotnisk, przejść podziemnych i w zabudowie naziemnej obiektów zawierającej kondygnacje podziemne. Stosowane są tam gdzie wymagane są izolacje akustyczne oraz termiczne. Dużą zaletą jest przepuszczalność dla wód deszczowych. Jako paliwo są natomiast stosowane w cementowniach. Przykładowe wykorzystanie tej frakcji przedstawiono na rysunku 7.

Granulat największe zastosowanie znajduje jako wypełnienie nawierzchni sportowych, boisk piłkarskich, boisk do hokeja na trawie. Dobierając odpowiednie lepiszcze z granulatu wykonuje się m.in. nawierzchnie placów zabaw, boisk sportowych, płyty wibroizolacyjne, izolacje dźwiękochłonne, ekrany tłumiące, podkłady amortyzujące uderzenia, elastyczną kostkę brukową, czy konfekcję drogową (bariery bezpieczeństwa, spowalniacze ruchu, pachołki) [praca zbiorowa 1981].

Z kompozycji odpadowego polietylenu  $> 50\%$  wag. oraz odpowiednio ukształtowanego granulatu gumowego o grubości  $3\text{-}5 \text{ cm}$  lub miału  $< 50\%$  wag. produkowane są płyty akustyczne. Jako napełniacz dodawany jest fosfogips uzdatniany oraz kreda. Płyty są przymocowane do betonowych konstrukcji nośnych. Według normy ISO 2555





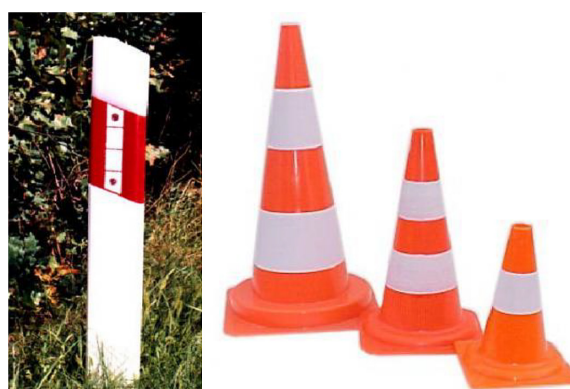
Rys. 7. Przykładowe zastosowanie recyklatu w budownictwie drogowym  
 Fig. 7. Example application of recycilate in road construction



Rys. 8. Przykładowy ekran akustyczny  
 Fig. 8. An example of an acoustic screen

izolacyjność akustyczna ekranów dźwiękochłonnych powinna wynosić co najmniej 25 dB, w przypadku ekranu z kompozytem gumowym parametr ten wynosi ok. 46 dB. Granulat gumowy ma bardzo wysoką zdolność tłumienia dźwięku, powyżej 4 dB. Ekranu tego typu mają zastosowanie wszędzie, gdzie wymagana jest dobra izolacja akustyczna, najczęściej są to przydrożne bariery dźwiękochłonne oraz hale przemysłowe [Manuel i Dierkes 1997, Skalamowski 2003]. Przykład takiego zastosowania przedstawiono na rysunku 8.

Innym zastosowaniem granulatu z odpadów gumowych są elementy elastyczne takie jak słupki i pachołki. W tym wypadku stosuje się kompozycję w następujących proporcjach: 30-40% wag. aglomerat PE, 50-60% wag. zwulkanizowany odpady gumowe oraz 10% wag. kopolimeru EVA. Przykładowe wyroby przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Przykłady elementów wykonanych z kompozytu polietylen-guma:  
 po lewej – słupek U1a do oznakowania skrajni drogi,  
 po prawej – pachołki drogowe U23

Fig. 9. Examples of elements made of polyethylene-rubber composite:  
 left – U1a post for marking the road gauge,  
 right – U23 road cones

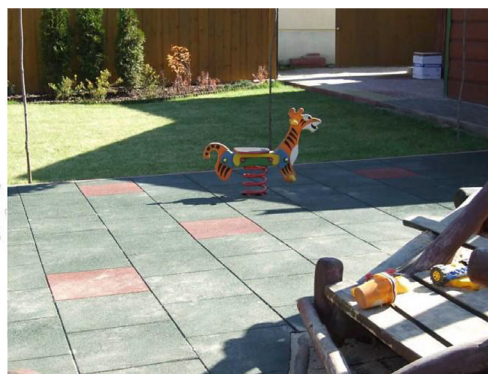


Kolejnymi wyrobami wykorzystującymi recyklaty z opon, są detale wykonane z kompozytów uretanowo-gumowych. Regranulat gumowy z rozdrobnionych opon jest stosowany przy produkcji kompozytowych elastomerów uretanowych które posiadają wysokie właściwości mechaniczne. Zastosowanie takich kompozytów jest w fazie rozwoju. Prowadzone jest wiele badań mających na celu poprawę własności. Obecnie mieszanki SBR-PU znajdują zastosowanie głównie jako płyty chodnikowe, kostki brukowe (rys. 10). Kompozyty uretanowo-gumowe wykonano z granulatu gumowego o ziarnistości 1,5-2 mm i miazgi gumowej o ziarnistości poniżej 1,5 mm (90% wagowo) oraz klejów uretanowych: Chemolan B-3, Chemolan M oraz Chemolan M-50 (10% wagowo). Taki wybór składu otrzymanych kompozytów podyktowany był tym, że prowadzone poprzednio badania dla granulatu gumowego o różnej ziarnistości i różnych klejów uretanowych, utwardzonych z użyciem środków sieciujących lub nie pokazały, że najczęściej kompozyty o najlepszych właściwościach uzyskiwano dla składu od 8-12% wagowo kleju uretanowego i 88-92% granulatu. Stwierdzono również, że obciążenie do 0,42 kG/cm<sup>2</sup> jest niewystarczające do otrzymania trwałych kompozytów, na co szczególnie wskazywały wyniki badań ścieralności. Dlatego kompozyty przygotowano pod obciążeniem 0,84 kG/cm<sup>2</sup>. Dla wykonanych kompozytów przeprowadzono badania ich właściwości mechanicznych i termogravimetrycznych. Kształtki uretanowo-gumowe o wymiarach 50 mm, 29 mm, 16 mm, wygrzewane były w temp. 80-90 °C pod obciążeniem 0,84 kG/cm<sup>2</sup> przez 1,5 godziny. Największą twardość kompozytu oraz najniższe odkształcenie trwałe uzyskano dla kleju uretanowego Chemolan B-3. Oznacza to lepsze połączenie, rozprowadzenie i

wypełnienie kleju względem recyklatu. Najniższą ścieralnością charakteryzowały się kompozyty z klejem Chemolan M-50. Najlepszymi parametrami odznaczał się kompozyt miazgi gumowego z klejem uretanowym Chemolan B-3. Posiadał największą twardość, wysoką odporność na odkształcenia trwałe oraz jest najbardziej stabilny termicznie [Parasiewicz i Pyskło 2005, Tartakowski 2000].

Miazga gumowa stosowana jest głównie do mieszanek produktów o niskich wymaganiach. Dodatek miazgi gumowej pogarsza własności, więc aby temu zapobiec poddaje się go modyfikacji lub dodaje w ograniczonej ilości do 10%. Główne zastosowanie znajduje przy wytwarzaniu wycieraczek samochodowych, mat podłogowych, płyt podeszwowych, wykładzinach podłogowych, czy pokryciach dachów [Parasiewicz i Pyskło 2005, praca zbiorowa 1981]. Przykładowy wyrób wytworzony z wykorzystaniem miazgi gumowej przedstawiono na rysunku 11.

Obecnie jednym z najszybciej rozwijającym się zastosowaniem recyklatów z opon, jest dodawanie miazgi gumowej do asfaltu. Metoda dodawania miazgi gumowej do asfaltu jest wdrażana głównie w USA, Kanadzie oraz krajach skandynawskich. Prekursorem zastosowania miazgi ze zużytych opon samochodowych do nawierzchni bitumicznych był Mac Donald, który w roku 1966 w stanie Arizona po raz pierwszy zastosował mieszankę asfaltu i miazgi gumowej do napraw lokalnych uszkodzeń nawierzchni bitumicznych. W Europie mieszanki z wykorzystaniem miazgi gumowej produkowane są w Portugalii, Włoszech, Szwecji i od 3 lat również w Polsce. Technologią modyfikacji asfaltu gumą w warunkach laboratoryjnych zajmowali się w Polsce Gaweł, Radziszewski, Piłat, Kalabińska i Sybilski. Pierwsze próby zastosowania miazgi gumowej



Rys. 10. Zastosowanie płyt wykonanych z mieszanki SBR-poliuretan  
Fig. 10. The use of panels made of SBR-polyurethane composite



Rys. 11. Wąż porowaty wykonany z polietylenu i miazgi gumowego jako napełniacza  
 Fig. 11. Porous hose made of polyethylene and fine rubber as a filler

do modyfikacji mieszanek mineralno-bitumicznych w warunkach laboratoryjnych w Politechnice Wrocławskiej podjęto w roku 1995. Wyniki tych testów zakończyły się niepowodzeniem. Po dziesięciu latach, dzięki współpracy z Uniwersytetami amerykańskimi (Uniwersytet w Clemson - Płd. Karolina), technologia modyfikacji asfaltu gumą powróciła w zastosowaniu praktycznym. Efekt modyfikacji mieszanek mineralnych gumą zależy od zastosowanej technologii mieszania asfaltu z gumą, rodzaju i właściwości zastosowanego granulatu gumowego, ilości dodawanego granulatu, rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej oraz technologii jej wbudowania. Wg Guido Van Haystraetena z Belgijskiego Centrum Badawczego dróg cena m<sup>2</sup> warstwy wierzchniej o grubości 4 cm jest o 20% wyższa od ceny zwykłego asfaltu, w przypadku modyfikowania elastomerem termoplastycznym, a o 37% przy zastosowaniu do modyfikacji asfaltu miazgi gumowego. Stosowane są dwie metody modyfikowania asfaltów gumą, metoda na mokro oraz na sucho. Metoda na mokro jest procesem polegającym na mieszanii rozdrobnionej gumy z asfaltem w podwyższonej temperaturze 175 do 220 C w czasie 1 do 2 godzin. Według normy ASTM D8 jako lepiszcze gumowo asfaltowe, uważa się mieszaninę asfaltu drogowego oraz miazgi gumowego, który przereagował w podwyższonej temperaturze. Za-

wartość miazgi w lepiszczu powinna wynosić 15-20%. Metoda na sucho charakteryzuje się zastosowaniem miazgi gumowego jako substytutu kruszywa. Przy tej metodzie konieczne jest dodawanie większej ilości lepiszcza (1,5-3%) w porównaniu ze standardową mieszanką. W porównaniu z metodą mokrą stosuje się gumę o większych cząstkach, przeważnie od 2,3 do 6,6 mm. Dodatek gumy do kruszywa wynosi 3-4% masy. Kruszywo ogrzane do temperatury 160-180 C miesza się z gumą przez 15-30 sekund. Następnie dodawany jest asfalt. Całkowity czas mieszania wynosi 120-180 sekund. Stwierdzono, że najlepiej do modyfikacji asfaltu nadają się regranulaty z opon samochodów osobowych z uwagi na największą zawartość naturalnych kauczuków. Jednak należy zwrócić uwagę na bok opony samochodu osobowego, który jest wykonany najczęściej z mieszaniny kauczuku butadienowo-styrenowego co niekorzystnie wpływa na proces mieszania z asfaltem [Jaworski 1967, praca zbiorowa 1981, Trojnar i Duda 2016, Zborowski i Ruttmar 2014, Skalamowski 2003].

Najważniejsze korzyści wynikające z zastosowania asfaltu modyfikowanego gumą to: trwałe (niż na bazie asfaltów tradycyjnych) pokrycia asfaltowe dróg i lotnisk; warstwy są odporne na spękania (termiczne i mechaniczne); pokrycia są bardziej odporne na deformacje trwałe (koleiny);



Rys. 12. Wygląd nawierzchni drogowej wykonanej z dodatkiem miazgi gumowego  
 Fig. 12. The appearance of a road surface made with the addition of fine rubber



warstwy ścieralne nawierzchni na bazie asfaltu modyfikowanego gumą charakteryzują się lepszą szczepnością z oponami kół pojazdów samochodowych (krótsza droga hamowania); nawierzchnie lepiej tłumiące hałas (do 3-4 dB), recykling, niższe koszty utrzymania nawierzchni w okresie lata i zimy [Trojnar i Duda 2016, Zborowski i Ruttmar 2014, Skalamowski 2003]. Przykład nawierzchni drogowej wykonanej z dodatkiem miazgi gumowego, przedstawiono na rysunku 12.

Ścier gumowy, ze względu na stopień rozdrobnienia, znajduje podobne zastosowanie jak granulatu gumowy. Stosuje się go głównie na nawierzchnie sportowe oraz przy produkcji elementów konfekcji drogowej.

## PODSUMOWANIE

W dzisiejszych czasach recyklaty z użytkowych opon samochodowych zyskują coraz większą popularność z uwagi na ich dostępność oraz przystępną cenę. Ponadto następuje stały rozwój metod uzyskiwania recyklatu gumowego oraz sposoby jego zastosowania. Recyklat gumowy jest najczęściej stosowany jako tani wypełniacz w produktach nie wymagających wysokiej jakości. Przyszłość wykorzystania gumowych recyklatów wygląda bardzo obiecująco. Przemysł motoryzacyjny stale dostarcza surowca w postaci opon, natomiast regulacje prawne zapewniają odpowiednie jego zagospodarowanie. Przemysł powinien być nastawiony na wykorzystanie w większym stopniu recyklatu jako surowca wtórnego.

Recykling surowcowy, choć potencjalnie bardzo korzystny, jest na razie bardzo kosztowny, lecz badania nad takimi procesami jak piroliza, hydroliza czy uwodornianie pozwolą być może w przyszłości na zbudowanie opłacalnej ekonomicznie, pracującej na dużą skalę instalacji wykorzystującej odpady tworzyw

Wykorzystywanie tego materiału jako paliwa, również jest bardzo opłacalnym rozwiązaniem, pod warunkiem zachowania wszystkich wymogów sposobu spalania i filtracji oparów, tak aby zminimalizować ilość zanieczyszczeń prowadzących do pogłębiania się efektu cieplarnianego.

Należy zwrócić uwagę na najbardziej ekonomiczne oraz ekologiczne wykorzystanie recyklatów z użytkowych opon samochodowych. W dzisiejszych czasach gdzie dbałość o środowisko jest tak często podejmowaną tematyką w skali globalnej istotne jest szukanie racjonalnych

sposobów wykorzystania już istniejących a wyeksploatowanych produktów. Coraz częściej do głosu dochodzą stanowiska ekologów, co pozwala rozwijać coraz to nowe pomysły w wykorzystaniu wszelkiego rodzaju odpadów w gospodarce. Nie tylko ekologiczne podejście jest tutaj istotne, ale również ekonomiczne w celu zmniejszenia kosztów produkcji przy jednoczesnym wykorzystaniu dostępnych surowców wtórnych. Dlatego inicjatywa przetworzenia opon zużytych pozwala patrzeć z optymizmem na kierunek, w którym podąża ciągle rozwijająca się gospodarka. Sytuacja ta daje możliwości tworzenia nowych technologii oraz produktów.

## LITERATURA

1. Duda A., Sobala D. 2017. Badania zużytych opon do wykorzystania w budownictwie. *Builder*, 11, 74-77.
2. Duda A., Sobala D., Siwowski T., Kaleta D. 2016. Wykorzystanie materiałów z recyklingu opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej* 21, 97-111.
3. Epps A. 1991. *Uses of Recycled Rubber Tires in Highways*. National Research Council, Washington
4. Jaworski J. 1967. *Guma w pojazdach mechanicznych*. WKiŁ, Warszawa.
5. Krzyżak A. 2004. *Bestimmung von Verarbeitungseigenschaften von Phenol-Formaldehyd-Pressstoffen Mittels BIP Methode*, Mat. konf. *Polymeric Materials*, Halle/Salle.
6. Magryta J. 2007. *Recykling i Odzysk Materiałów Polimerowych*. Nauka – Przemysł. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego, Warszawa.
7. Manuel H.J., Dierkes W. 1997. *Recycling of Rubber*. *RAPRA Technology LTD.*, 3, 7.
8. Marcinkowski T. 2011. *Kompleksowe zarządzanie gospodarką odpadami*. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Poznań
9. Parasiewicz W., Pyskło L. 2005. *Guma w samochodach – odzysk i recykling*. *Recykling* 11, ABRYŚ, Poznań.
10. Parasiewicz W., Pyskło L., Magryta J. 2005. *Recykling zużytych opon samochodowych*. Instytut Przemysłu Gumowego „STOMIL”, Piastów.
11. *Praca zbiorowa*. 1981. *Guma Poradnik inżyniera i technika*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
12. Pyskło L., Parasiewicz W. 2004. *Odzysk i recykling wyrobów gumowych*, *Forum recyklingu POLEKO 2004*, *Recykling* 11, ABRYŚ, Poznań.

13. Raport PlasticEurope, Tworzywa sztuczne – Fakty 2013 Analiza produkcji, zagospodarowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie w roku 2012.
14. Sadhan K., White R. 2003. Poradnik technologia gumy. Instytut Przemysłu Gumowego „STOMIL”, Piastów.
15. Smejda-Krzewicka A., Olejnik A., Dmowska-Jasek P. 2015. Przegląd metod recyklingu opon. Elik-sir czasopismo naukowo-dydaktyczne Wydziału Chemicznego Politechniki Łódzkiej, Nr 2, 12-15.
16. Sułkowski W., Kordus K., Makarucha B. 2002. Zastosowanie granulatu gumowego ze zużytych opon do produkcji kompozytów uretanowo – gumowych. Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Konferencje Czechy, Jeseník.
17. Szydło A., Koba H. 2009. Mieszanki mineralno-asfaltowe na bazie asfaltu modyfikowanego gumą redukujące hałas Raport serii nr U 156 /2009. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
18. Tartakowski Z. 2000. IV Seminarium Naukowo-Techniczne Recykling Tworzyw Sztucznych. Wydawnictwo Uczelniane PSz, Szczecin.
19. Trojnar K., Duda A. 2016. Wykorzystanie zużytych opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym. Materiały Budowlane, Nr 7, 80-82.
20. Zborowski A., Ruttmar I. 2014. Asfalt modyfikowany gumą z zużytych opon. Przegląd Komunalny, Nr 4, 47-49.
21. Zespół autorów pod redakcją dr hab. Skalmowskiego K. 2003. Poradnik gospodarowania odpadami. Wydawnictwo Verlag Dashofer.