

Ryszard LIPSKI, Jerzy ZABOROWSKI

## ZAGOSPODAROWANIE ODPADOWEGO ŚCIERU GUMOWEGO Z WYEKSPLOATOWANYCH OPON SAMOCHODOWYCH

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono i dokonano analizy badań wpływu dodatku regeneratu i ściery gumowego otrzymanego ze zużytych opon, jako odpadowego materiału gumowego wchodzącego w skład kompozycji gumowych na wybrane właściwości fizyko-mechaniczne.*

*Na podstawie przeprowadzonych badań i ich analizy można stwierdzić, że regenerat gumowy jest bardzo dobrym modyfikatorem mieszanek gumowych zwłaszcza o wysokiej twardości. Również ściery gumowy może być z powodzeniem stosowany do modyfikacji mieszanek gumowych zwłaszcza o podwyższonej twardości. Oba recyklaty zwiększają elastyczność kompozycji gumowych przy małym spadku parametrów wytrzymałościowych.*

### **WSTĘP**

W Polsce działa kilka firm zajmujących się zbieraniem zużytych opon i kooperujących z nimi przedsiębiorstwami zajmującymi się ich przetwarzaniem. Jako przykład może posłużyć Centralna Składnica Złomu Gumowego w Gralewie k/Gorzowa Wielkopolskiego oraz ABC Recykling z Krosna Odrzańskiego, wytwarzająca granulaty gumowy. Zapotrzebowanie na zużyte opony firmy ABC wynosi ok. 15 000 ton rocznie. Firma Inter-Recykling z Trzebini, rozdrabnia ok. 600 ton opon rocznie. Znaczące ilości zużytych opon ok. 15 000 t rocznie, spala przy produkcji cementu cementownia Góraźdże Cement S. A. [2]. Firmy te posiadają urządzenia do cięcia opon, co pozwala znacznie zmniejszyć koszty ich transportu.

W ostatnich latach obserwuje się zainteresowanie zużytymi oponami, które wykorzystuje się w końcowym efekcie jako paliwo alternatywne, co w dużym stopniu wpływa korzystnie na środowisko naturalne. Opony mogą być wydajnym paliwem. Ich wartość energetyczna wynosi 7500 kcal/kg i jest wyższa od wartości energetycznej węgla (6300 kcal/kg), choć ustępuje ropie naftowej (9400 kcal/kg) [5, 6].

We wszystkich cementowniach w Polsce, przy zastąpieniu 10% paliwa konwencjonalnego zużytymi oponami, można by spalić ich ponad 300 tys. ton rocznie. Spalanie opon w piecach cementowych jest najlepszym sposobem ich utylizacji, ponieważ maksymalna temperatura w takim piecu wynosi 2000 °C, a wystarczy już 1200 °C, aby najbardziej odporne związki organiczne uległy zniszczeniu. Spalanie opon w cementowniach stosowane jest w Stanach Zjednoczonych, Niemczech i w Belgii. W Anglii i w Niemczech powstały pierwsze elektrownie, których paliwem są opony [3, 4].

## CEL BADAŃ

Celem badań było określenie wpływu dodatku regeneratu gumowego i ścieru gumowego na wybrane właściwości fizyko-mechaniczne kompozycji gumowych w zakresie procesu recyklingu odpadów gumowych ze zużytych opon samochodowych.

## 1. CHARAKTERYSTYKA SAMOCHODOWYCH ODPADÓW GUMOWYCH ICH ROZDRABNIANIE ORAZ WYKORZYSTANIE

### Charakterystyka odpadów gumowych

Odpadowe elementy gumowe stanowią tylko 7% całej masy samochodu, mimo to spełniają jednak bardzo ważną funkcję w celu ich dalszego zagospodarowania. Zapewniają uszczelnianie karoserii (okna, drzwi), absorbowanie energii (amortyzatory i elementy zawieszenia), zapewniają przepływ cieczy i gazów (węże, przewody) [3]. Jak wynika z tabeli 1 największy udział procentowy mają opony i uszczelnienia karoserii, które można łatwo wymontować i poddać recyklingowi. Uszczelnienia karoserii wykonane są przeważnie z materiałów wieloskładnikowych, po segregacji i rozdrobnieniu mogą być poddane regeneracji i wykorzystane w produkcji wyrobów gumowych. Stanowią jednak materiał niepełnowartościowy i nieekonomiczny, dlatego najczęściej pozostają we wraku kierowanym do strzępiarki tak jak pozostałe elementy gumowe stanowiące 10% masy komponentów gumowych. W tabeli 1 przedstawiono masowy udział elementów gumowych występujących w samochodzie osobowym.

**Tab. 1.** Masowy udział elementów gumowych w samochodzie osobowym [4]

Rodzaj materiału	Masa (kg)
Opony (5 x 8 kg)	40
Uszczelnienia karoserii (EPDM)	12
Elementy zawieszenia	3
Przewody	2,8
Uszczelki itp.	3,2
Razem	61

Każdego roku w Polsce wycofuje się z użytku od 120 000 do 155 000 ton opon. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku tylko 12% opon było poddawane bieżnikowaniu, a 4% odzyskowi materiałowemu [5].

### Rozdrabnianie odpadów gumowych

Rozdrabnianie odpadów gumowych można prowadzić następującymi metodami [5]:

- metodą klasyczną, opartą na mechanicznym cięciu i rozcieraniu opon,
- bądź nowszą metodą tzw. kriogeniczną.

Wstępnie pocięte opony rozdrabnia się w młynach lub miele na walcarkach. Rozdrabnianie jest utrudnione ze względu na dużą elastyczność gumy, dlatego też stosuje się specjalne noże oraz tarcze rozcierające. W I etapie tej operacji następuje cięcie i szarpanie, w wyniku, czego uzyskuje się kawałki wielkości kilkunastu centymetrów, które dalej transportuje się do następnych maszyn, gdzie następuje dalsze cięcie i rozcieranie. Miąż otrzymany tą metodą ma rozwiniętą i postrzępioną powierzchnię oraz nieregularny kształt. W metodzie tej występuje duże zużycie energii, noży, trzeba stosować elektromagnesy w celu usunięcia kawałków metalu. W celu usunięcia włókien kordu tekstylnego stosuje się separację pneumatyczną [6].

W metodzie kriogenicznej wykorzystuje się ciekły azot do zamrożenia pociętej wstępnie opony poniżej temperatury  $-120^{\circ}\text{C}$ , którą następnie rozdrabnia się w młynach młotkowych. Cząstki miążu mają regularny kształt, gładką powierzchnię i ostre krawędzie, zawierają mniej

zanieczyszczeń niż otrzymane metodą klasyczną. Zawierają za to więcej wilgoci (12-15%). Metoda kriogeniczna jest droższa od rozdrabniania metodą klasyczną w temperaturze otoczenia. Wiąże się to dużym kosztem urządzeń, kosztem ich eksploatacji jak również od ceny i dostępności ciekłego azotu. Uzupełnieniem powyższych metod jest technologia ścierania stosowana podczas regeneracji opon. Ścier gumowy powstaje podczas przygotowania opony do bieżnikowania w wyniku obróbki mechanicznej jej powierzchni [5].

W zależności od wielkości kawałków rozdrobnionej gumy powstają następujące rodzaje surowca do dalszego zagospodarowania (recyklingu) [4]:

- strzępy (40-300 mm),
- czipsy (10-40 mm),
- ścier (0-40 mm),
- granulaty (1-10 mm),
- miął (0-1 mm).

### **Wykorzystanie rozdrobnionych odpadów gumowych**

Strzępy i czipsy stosowane są, jako wypełniacze w elementach konstrukcyjnych budowli. Guma o takim stopniu rozdrobnienia ze względu na dobre właściwości izolacyjne, akustyczne, termiczne, wodoodporność, wykorzystywana jest przy budowie dróg, mostów, tuneli. Może być również stosowana do wytwarzania nawierzchni placów, boisk, mat izolacyjnych. Miął stosuje się, jako dodatek do mieszanek gumowych, z których powstają nowe wyroby [5]:

- opony wolnobieżne,
- wycieraczki,
- maty,
- dywaniki samochodowe,
- wycieraczki,
- wykładziny podłogowe,
- pachołki drogowe,
- pokrycia dachowe,
- coraz częściej miął gumowy dodaje się do asfaltu przy budowie dróg.

## **2. METODYKA BADAŃ**

### **Część doświadczalna**

Celem części doświadczalnej było określenie wpływu dodatku regeneratu i ścieru gumowego do mieszanek gumowych na właściwości fizyko-mechaniczne badanych kompozycji. Kompozycje mieszanek gumowych wykonano na walcach w Chemiczno – Wytwórczej Spółdzielni Pracy „SPOIWO” w Radomiu. W laboratorium Spółdzielni SPOIWO określono początek wulkanizacji i wykonano pomiar twardości próbek przed i po wulkanizacji, oraz gęstość po wulkanizacji. Badania wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenie względne wykonano w Katedrze Technologii Materiałów Organicznych, Zakład Chemii i Technologii Polimerów.

Wykonano następujące kompozycje [1]:

- mieszanka gumowa - regenerat gumowy (M-1)
- mieszanka gumowa - ścier gumowy (M-2),

Dla wszystkich kompozycji wykonano następujące badania:

- wytrzymałość na rozciąganie,
- wydłużenie względne przy zerwaniu,
- twardość Shore, a A po wulkanizacji,
- gęstość.

Część doświadczalna obejmowała [8]:

- przygotowanie surowców,

- sporządzenie mieszanek,
- wykonanie próbek do badań,
- wulkanizacja,

W tabeli 2 przedstawiono właściwości fizyko-mechaniczne regeneratu gumowego.

**Tab. 2.** Porównanie właściwości fizyko-mechanicznych regeneratu gumowego [8]

L.p.	Właściwości	Jednostki	Wartość
1	Zawartość substancji lotnych, w 110°C	%	0,5 – 1
2	Zawartość popiołu	%	4,1 – 6,3
3	Ekstrakt acetonowy	%	17,3 – 23,8
4	Wytrzymałość na rozciąganie	MPa, min	4,9 – 6,0
5	Wydłużenie względne w chwili zerwania	%	300 – 350
6	Lepkość wg Mooney'a	1-4 (100 °C)	30 – 36
7	Zawartość elementów metalicznych	g	0

Ścier gumowy do badań został otrzymany ze zużytych opon w Zakładach Przemysłu Gumowego „Stomil” w Wolbromiu.

### Proces badań i wykonanie próbek

Skład badanych kompozycji mieszanek przedstawiono w tabeli 3.

**Tab. 3.** Skład badanych kompozycji mieszanek gumowych [8]

Rodzaj recyklatu	Rodzaj mieszanki gumowej	
	Mieszanka M-1	Mieszanka M-2
Zawartość recyklatu w % wag.		
Regenerat	0	0
	10	10
	20	20
	30	30
Ścier gumowy	0	0
	10	10
	20	20
	30	30

Zhomogenizowane kompozycje w postaci grubych płyt po ochłodzeniu zostały pocięte w prostokąty o odpowiednich wymiarach i zwulkanizowane. Proces wulkanizacji prowadzono na prasie hydraulicznej PH-2PW w temperaturze 150 °C przez 15 minut. Z otrzymanych prostokątów wycięto za pomocą specjalnego wykrojnika kształtki (wiosełka i kwadraty) przeznaczone do badań.

### Badania wytrzymałościowe

Badanie wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenie względne przy zerwaniu wykonano za pomocą maszyny wytrzymałościowej INSTRON-5566 i programu komputerowego MERLIN IV [8].

Pomiar wytrzymałości materiałów został przeprowadzony zgodnie z normą PN-93/C-04205 [8]:

- wyznaczanie wytrzymałości badanych próbek na rozciąganie określono poprzez oznaczenie siły potrzebnej do ich zerwania,
- zasada oznaczania polega na rozciąganiu aż do zniszczenia, standardowej próbki do badań w kształcie wiosełka, zamocowanej w szczękach maszyny wytrzymałościowej (rozstaw szczęk – 50 mm).

Do badań pobrano próbki w kształcie wiosełek o wymiarach [8]:

- długość całkowita (minimum) – 115 mm,
- szerokość na końcach – 25 mm,
- długość wąskiej równoległej części – 33 mm,
- szerokość wąskiej równoległej części – 6 mm,
- mały promień – 14 mm,
- duży promień – 25 mm,
- grubość – 2 mm.

Wytrzymałość na rozciąganie w MPa obliczono ze wzoru [8]:

$$P = \frac{F}{A} [\text{MPa}] \quad (1)$$

- F - siła zrywająca, [N],
- A - początkowe pole przekroju [ $\text{mm}^2$ ].
- Wydłużenie względne przy zerwaniu [8]:

$$E = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

- L – odległość między liniami tworzącymi odcinek pomiarowy próbki w chwili jej zerwania, [mm],
- $L_0$  – odległość początkowa między liniami tworzącymi odcinek pomiarowy próbki [mm].

Badanie twardości Shore, a A

Oznaczanie twardości wykonano przy użyciu małego twardościomierza zgodnie z normą PN-93/C-04206. Do oznaczeń pobrano próbki o grubości nie mniejszej niż 6 mm. Inne wymiary dobrano tak, aby umożliwiały wykonanie pomiaru w odległości nie mniejszej niż 12 mm od krawędzi próbki. Powierzchnia próbek, na której wykonywano pomiary była płaska w miejscu styku ze stopką naciskową. Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej [8].

Badanie gęstości [8]:

Pomiar gęstości przeprowadzono według normy PN-83/C-04215. Metoda oznaczania polega na pomiarze masy próbki zważonej w powietrzu i w cieczy o znanej gęstości, a następnie obliczeniu gęstości badanej próbki. Próbki po wulkanizacji powinny być kondycjonowane w temperaturze pokojowej przez 20 h, a następnie 3 h w temperaturze badania 23 °C. Próbkę gumy zważono w powietrzu z dokładnością do 0,01g.

Gęstość gumy ( $\rho$ ) w gramach na centymetr sześcienny obliczono ze wzoru [8]:

$$P = \frac{m}{m - m_1 + m_2} \cdot \rho_c [\text{g/cm}^3] \quad (3)$$

gdzie:

- m – masa próbki w powietrzu, g,
- $m_1$  – masa próbki w wodzie, g,
- $m_2$  – waga drucika, g,
- $\rho_c$  – gęstość cieczy (wody destylowanej) użytej do badania w temperaturze pomiaru, [ $\text{g/cm}^3$ ].
- gęstość wody w temperaturze 23 °C wynosi  $1\text{g/cm}^3$ .

### Grubość próbek

Do pomiaru grubości próbek użyto grubościomierza typu Meissner.

### 3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań właściwości fizyko-chemicznych badanych kompozycji przedstawiono w tabeli 4 zaś w tabeli 5 wpływ zawartości ściery gumowego na właściwości mieszanek gumowych M-1 i M-2.

**Tab. 4.** Wpływ zawartości regeneratu na właściwości mieszanek gumowych

L.p.	Badane właściwości	Zawartość regeneratu w % wag.							
		Mieszanka M-1				Mieszanka M-2			
		0	10	20	30	0	10	20	30
1	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	7,80	7,61	7,73	7,90	12,34	11,97	9,92	8,68
2	Wydłużenie względne przy zerwaniu [%]	642,33	548,67	561,00	599,33	140,00	181,00	191,33	185,67
3	Twardość przed wulkanizacją [°Sh A]	40	40	40	40	85	85	85	85
4	Początek wulkanizacji [minuta]	1,30	2	2	2	1	1	1	1
5	Twardość po wulkanizacji [°Sh A]	45	43	44	45	87	84	80	78
6	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	1,172	1,165	1,168	1,169	1,327	1,320	1,323	1,324

Analizując wyniki badań wpływu dodatku, jako recyklatu regeneratu gumowego na właściwości mieszanki gumowej M-1 widać, że wraz ze wzrostem zawartości regeneratu:

- wytrzymałość na rozciąganie nieznacznie obniża się zwłaszcza przy zawartości 10% regeneratu, a następnie ulega podwyższeniu i przy zawartości 30% jest wyższa niż dla czystej gumy,
- wydłużenie względne przy zerwaniu jest niższe niż czystej gumy, jednak wzrasta stopniowo w miarę wzrostu ilości regeneratu,
- twardość przed wulkanizacją nie zmienia się, zaś po wulkanizacji jest nieznacznie niższa a przy zawartości 30% regeneratu taka jak czystej gumy,
- gęstość kompozycji jest niższa niż czystej gumy, jednak stopniowo wzrasta w miarę wzrostu zawartości regeneratu.

Mieszanka M-2 wraz ze wzrostem zawartości regeneratu obserwuje się następujące zmiany właściwości kompozycji:

- wytrzymałość na rozciąganie ulega obniżeniu aż do ok. 30%,
- wydłużenie względne przy zerwaniu podwyższa się aż do ok. 30%,
- twardość przed wulkanizacją nie zmienia się, zaś po wulkanizacji ulega obniżeniu aż do 10%,
- gęstość kompozycji jest nieznacznie niższa, ale wraz ze wzrostem ilości regeneratu wzrasta.

Porównując wpływ regeneratu na właściwości mieszanek gumowych można stwierdzić, że nieznacznie wpływa on na właściwości mieszanki M-1, zaś zdecydowanie na właściwości mieszanki M-2, która staje się bardziej elastyczna, choć traci na wytrzymałości na rozciąganie. Tak, więc regenerat w zależności od potrzeb może być stosowany, jako dodatek do mieszanki M-1 o niskiej twardości (45 °Sh A) ponieważ nie pogarsza jej, jakości, a także, jako modyfikator elastyczności do mieszanek gumowych o wyższej twardości (M-2).

**Tab. 5.** Wpływ zawartości ścieru gumowego na właściwości mieszanek gumowych

L.p.	Badane właściwości	Zawartość ścieru gumowego w % wag.							
		Mieszanka M-1				Mieszanka M-2			
		0	10	20	30	0	10	20	30
1	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	7,80	6,11	5,33	5,27	12,34	11,63	11,32	8,95
2	Wydłużenie względne przy zerwaniu [%]	642,33	490,33	465,00	417,67	140,00	197,67	198,00	150,33
3	Twardość przed wulkanizacją [ <sup>o</sup> Sh A]	40	40	40	40	85	85	85	85
4	Początek wulkanizacji [minuta]	1,30	2	2	2	1	1	1	1
5	Twardość po wulkanizacji [ <sup>o</sup> Sh A]	45	47	47	47	87	83	83	83
6	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	1,172	1,167	1,164	1,159	1,327	1,289	1,291	1,294

Na podstawie otrzymanych wyników badań przedstawionych w tabeli 5 można stwierdzić, że dodatek ścieru gumowego do mieszanki M-1 wpływa w następujący sposób na jej właściwości:

- wytrzymałość na rozciąganie obniża się od 25 do 30% w miarę wzrostu ilości ścieru i jest niższa niż dla czystej gumy,
- wydłużenie względne przy zerwaniu także obniża się od 25 do 35% i jest niższe niż dla czystej gumy,
- twardość przed wulkanizacją nie zmienia się, po wulkanizacji jest nieznacznie wyższa niż czystej gumy,
- gęstość kompozycji nieznacznie zmniejsza się w miarę wzrostu zawartości ścieru gumowego.

Jeśli chodzi o mieszankę M-2 wraz ze wzrostem zawartości ścieru gumowego obserwuje się następujące zmiany właściwości kompozycji:

- wytrzymałość na rozciąganie nieznacznie obniża się, dopiero przy zawartości 30% ścieru wytrzymałość obniża się ok. 25%,
- wydłużenie względne przy zerwaniu przy zawartości ścieru 10 i 20% jest wyższe o ok. 40% niż dla czystej gumy,
- twardość przed wulkanizacją nie zmienia się, zaś po wulkanizacji jest nieznacznie niższa (o ok. 5%),
- gęstość kompozycji jest niższa niż czystej gumy, ale wzrasta stopniowo wraz ze wzrostem zawartości ścieru.

Porównując wpływ ścieru gumowego na właściwości mieszanek gumowych można stwierdzić, że dodatek ścieru gumowego obniża częściowo właściwości kompozycji na bazie mieszanki gumowej M-1 i to tym bardziej im większy jest jego udział. Jeśli chodzi o właściwości kompozycji na bazie mieszanki M-2 to dodatek ścieru gumowego do 20% zawartości nie pogarsza wytrzymałości na rozciąganie, a wydłużenie względne rośnie, a twardość obniża się. Powyższe może świadczyć o poprawie elastyczności kompozycji. Jedynie przy zawartości 30% ścieru w kompozycji obserwuje się większe pogorszenie wytrzymałości.

## PODSUMOWANIE

Na podstawie dokonanej analizy zagadnień recyklingu i utylizacji materiałów gumowych ze zużytych i złomowanych samochodów w Polsce można stwierdzić, że jesteśmy na początku drogi, w fazie organizacji i wdrożenia rozwiązań systemowych obejmujących cały kraj. Wprawdzie posiadamy odpowiednie uregulowania prawne, powstały pierwsze sieci i stacje demontażu pojazdów jak firma „Marput” w Radomiu, ale wdrożenie ogólnokrajowego systemu potrwa zapewne jeszcze kilka lat.

Podsumowując część doświadczalną pracy można stwierdzić, że możliwy i realny jest recykling materiałów polimerowych ze zużytych i złomowanych samochodów, co pokazano na podstawie badań recyklingu tak trudnego polimeru, jakim jest guma (opony).

Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu dodatku wybranych recyklatów tj. regeneratu gumowego i ścieru gumowego na właściwości mieszanek gumowych M-1 i M-2 można stwierdzić, że regenerat gumowy jest bardzo dobrym modyfikatorem mieszanek gumowych zwłaszcza o wysokiej twardości. Również ścier gumowy może być z powodzeniem stosowany do modyfikacji mieszanek gumowych zwłaszcza o wyższej twardości. Oba recyklaty zwiększają elastyczność kompozycji gumowych przy małym spadku cech wytrzymałościowych.

Jednocześnie należy stwierdzić, że nie jest celowe modyfikowanie mieszanek zwłaszcza mieszanki M-1 (o niższej twardości) recyklatem zawierającym jednocześnie regenerat i ścier gumowy.

## BIBLIOGRAFIA

1. Informacje uzyskane z firmy „SPOIWO” w Radomiu, 2011 r.
2. Kuzio B.: Recykling niemetalowych części samochodów, Recykling 5(65), 2006.
3. Lipski R.: Recykling elementów polimerowych w procesie złomowania samochodów. III Konferencja Naukowa pod patronatem JM Rektora Politechniki Wrocławskiej, Recykling Tworzyw Sztucznych, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, 17-20, 09. 02, Czechy Jeseník.
4. Lipski R.: Wybrane problemy recyklingu i utylizacji materiałów polimerowych z eksploatowanych i likwidowanych pojazdów samochodowych, III Środkowo - Europejska Konferencja „Recykling Materiałów Polimerowych. Nauka-Przemysł” Krynica 8 – 10 listopada 2004.
5. Merkisz-Guranowska A.: Aspekty rozwoju recyklingu w Polsce. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, 2005.
6. Parasiewicz W.: Guma w samochodach. Recykling, 11(59), 2005.
7. Ustawa z dnia 20 stycznia 2005r. o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji ( Dz. U. Nr 25 poz. 202 z dnia 11 lutego 2005r.).
8. Wyniki badań. Katedra Technologii Materiałów Organicznych, Zakład Chemii i Technologii Polimerów. PR Radom. 2011.

## DEVELOPING SCRAP OF RAGSU RUBBER FROM EXPLOITED CAR TYRES

### *Abstract*

*This paper presents and analyzes the effect of the addition of research and pulp regenerated rubber-tion obtained from used tires, waste rubber material as forming part of the rubber composition*



*of selected physical and mechanical properties.*

*Based on the research and analysis it can be concluded that the regenerated rubber modifier is very good especially rubber with high hardness. Abrasive rubber can also be successfully used to modify the rubber especially at elevated hardness. Both recyclates increase flexibility rubber composition with a small decrease in strength parameters.*

***Autorzy:***

**dr inż. Ryszard LIPSKI, Prywatna Wyższa Szkoła Ochrony Środowiska w Radomiu**

**dr inż. Jerzy ZABOROWSKI, Instytut Pojazdów, Wydział SIMR, Politechnika  
Warszawska.**