

KAZIMIERZ DĘBSKI, JANUSZ MAGIERA,
JAN PIELICHOWSKI

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: kazdeb@chemia.pk.edu.pl

Wpływ struktury sztywnych pianek poliuretanowych spienianych poroforem węglowodorowym na wartość zastępczego współczynnika przewodnictwa ciepła

THE EFFECT OF THE STRUCTURE OF RIGID POLYURETHANE FOAMS BLOWN WITH A HYDROCARBON BLOWING AGENT ON FOAM'S APPARENT THERMAL CONDUCTIVITY

Summary — The apparent thermal conductivity (λ_z) was measured (Fig. 1) in rigid polyurethane foams (RPURF) blown with a new type blowing agent, *viz.*, a mixture of pentanes (as an alternative to freons), over a broad range of apparent foam densities (ρ) (Figs. 2, 3). At low ρ , the λ_z vs. ρ curves exhibited a minimum. Several equations are presented, based on reported theoretical models, which allow to predict λ for PUR foams (Table 1). The values predicted for a given foam varied considerably. The equations developed for foams blown with freons were tested in terms of their usefulness to predict λ_z for pentanes-blown foams. The RPURF experimental λ_z -data were consistent only with the λ -data calculated from equation (4) based on the Glicksman model (Fig. 7). Contributions of individual heat transfer modes (conduction in gas phase, conduction in solid phase, radiation) to the overall heat transfer through the foam were estimated in relation to RPURF density (Fig. 8).

Key words: rigid polyurethane foams, hydrocarbon-type blowing agents, apparent thermal conductivity, foam density, heat conduction models.

Masowa produkcja tworzyw poliuretanowych powoduje wzrost wymagań stawianych zarówno tym produktom, jak i technologii ich wytwarzania. Obecnie dużego znaczenia nabiera problem wyeliminowania z procesu produkcyjnego związków toksycznych i tych, które stanowią zagrożenie dla środowiska. Pożądane jest także obniżenie kosztów produkcji oraz poprawa właściwości przetwórczych surowców z zachowaniem odpowiednich właściwości użytkowych produktów.

We współczesnym świecie panują tendencje do ograniczania zużycia energii. Jednym ze sposobów osiągnięcia tego celu jest poprawa izolacyjności cieplnych budynków, reaktorów, rurociągów grzewczych, magistrali przesyłowych. W wielu przypadkach wymaga się, aby warstwa stanowiąca izolację cieplną miała ograniczoną grubość, dlatego w takich zastosowaniach poprawę izolacyjności można uzyskać w wyniku zmiany materiału izolującego lub poprawy właściwości izolacyjnych już stosowanego materiału. Wydaje się, że pianki na podstawie poliuretanów (PUR) mogą osiągnąć najmniejszy współczynnik przewodnictwa ciepła wśród stosowanych materiałów izolacyjnych i

dlatego celowe są badania nad sposobami dalszej jego minimalizacji.

Sztywne pianki PUR są materiałem usieciowanym i zwykle charakteryzują się małą gęstością pozorną oraz dużą zawartością komórek zamkniętych. Do celów specjalnych, np. jako materiały dźwiękochłonne, otrzymuje się pianki o komórkach otwartych [1–5]. Jakość PUR opisuje się na podstawie określenia ich właściwości fizycznych i mechanicznych metodami standardowymi [6]. Materiały te zwykle spełniają funkcje konstrukcyjne lub izolacyjne [7]. Wyroby z PUR można stosować w zakresie temperatury od ok. -50°C do ok. +90°C [6]. Ta pożądana charakterystyka wynika z dużej trwałości wiązania uretanowego oraz specyficznych cech użytych surowców [8]. Właściwości pianek PUR silnie zależą od ich gęstości, która może się zmieniać w zakresie 10–600 kg/m³. Ponadto materiały te wykazują wysokie wartości temperatury mięknięcia i zeszklenia (>20°C) oraz dobrą odporność na działanie wielu rozpuszczalników [6, 7].

W niniejszej publikacji przedstawiamy wyniki badania wpływu gęstości pozornej na przewodnictwo ciepła

ne sztywnych pianek PUR spienianych mieszaniną pentanów. Krytycznie porównaliśmy przy tym przydatność znanych modeli literaturowych do wyznaczania wartości współczynnika przewodnictwa ciepła pianek PUR.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materialy

Do syntezy pianek PUR użyto następujących surowców:

Poliole

— „Polieterol D-24”, produkt reakcji dianu z tlenkiem etylenu, o liczbie hydroksylowej $L_{OH} = 260$ mg KOH/g; producent: Instytut Ciężkiej Syntezy Organicznej w Kędzierzynie Koźlu.

— „Rokopol TD-34”, oksyalkilenowana *o*-toluilenodiamina o $L_{OH} = 420$ mg KOH/g; producent: Alfa Systems sp. z o.o. w Brzegu Dolnym.

Izocyjanian

— „Supracec DNR”, polimeryczny diizocyjanianodifenylometan zawierający 31% mas. wolnych grup -NCO; producent: Imperial Chemical Industries Ltd., Belgia.

Środek powierzchniowo czynny

— „SR-321”, olej silikonowy; producent: Union Carbide, USA.

Katalizator

— „Texacat DMCHA” — *N, N'*-dimetylocykloheksyloamina; producent: Texaco Chemical Deutschland GmbH, Niemcy.

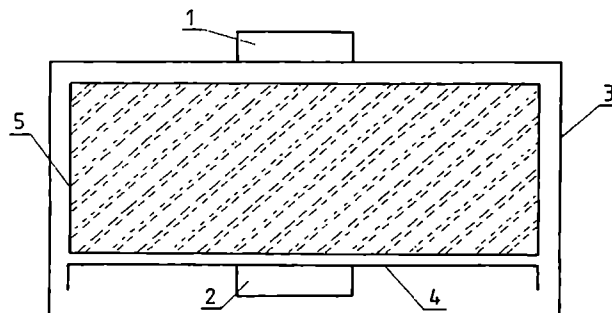
Porofor

— Pentan techniczny — mieszanina 75% *n*-pentanu i 25% izopentanu; producent: Rafineria Jedlicze.

Pomiar współczynnika przewodnictwa ciepła

Pomiarów współczynnika przewodnictwa ciepła λ dokonywano za pomocą aparatu „FOX 200” firmy Lasercomp. Pozwala on na określanie wartości λ w zakresie 20—100 mW/(m·K). Badana próbka ma wymiary 25 cm x 25 cm, zaś jej grubość może wynosić do 50 mm. Warunkiem koniecznym prawidłowego przeprowadzenia pomiaru jest całkowite wypełnienie komory pomiarowej. Schemat aparatu przedstawia rys. 1.

Podstawa komory (4) jest zamontowana tak, że można regulować jej położenia za pomocą czterech niezależnych od siebie silników krokowych. Takie rozwiązanie zapewnia dokładne przyleganie badanego elementu do górnej i do dolnej ścianki komory. Do tych ścian są zamontowane źródło oraz odbiornik ciepła. W minimalnej odległości od powierzchni badanej próbki umieszcza się



Rys. 1. Schemat urządzenia do pomiaru współczynnika przewodnictwa ciepła λ : 1 i 2 — moduły Peltiera, 3 — ściana komory pomiarowej, 4 — ruchoma podstawa, 5 — badana próbka (opis w tekście)

Fig. 1. The device for thermal conductivity (λ) measurements: 1, 2 — Peltier modules, 3 — measuring chamber wall, 4 — movable bottom, 5 — specimen (description in main text)

detektory do pomiaru temperatury z dokładnością do 0,01°C. Zastosowane w urządzeniu moduły Peltiera (1 i 2) pozwalają na wykonywanie pomiarów w warunkach przepływu ciepła w dwu kierunkach — zarówno w dół, jak i w górę. Metoda pomiaru wartości współczynnika λ polega na określeniu ilości ciepła przepływającego przez badany materiał w jednostce czasu podczas ustalonego przepływu ciepła, kiedy to ustala się różnica temperatury po przeciwległych stronach próbki badanego materiału.

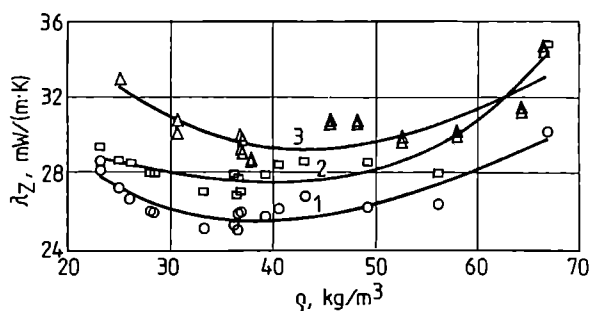
Pomiary wykonuje się w seriach po 512, w odstępach co 0,5 s. Po przeprowadzeniu założonej, minimalnej liczby serii pomiarów, na podstawie wyników otrzymanych w trzech ostatnich, sprawdza się warunki zakończenia pomiaru i jeśli zostały one spełnione, proces uznaje się za zakończony. Uzyskane wyniki i parametry pomiaru zostają zapisane w postaci pliku.

WYNIKI POMIARÓW I ICH KONFRONTACJA Z DANymi LITERATUROWymi

Opublikowano szereg prac, które dotyczą transportu ciepła w obrębie pianek poliuretanowych w warunkach ustalonych [9—21]. Na ogół intensywność tego transportu opisuje się zastępczym współczynnikiem przewodzenia ciepła λ_z , który ujmuje w sobie różne fizyczne mechanizmy (przewodzenie przez fazę stałą polimeru, przewodzenie przez fazę gazową, promieniowanie cieplne, konwekcja w fazie gazowej). Tak definiowany współczynnik λ_z w przypadku jednoosiowego, ustalonego transportu ciepła może być opisany równaniem:

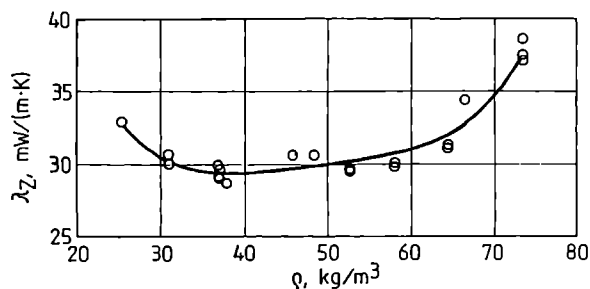
$$\lambda_z = q / \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

gdzie: q — gęstość sumarycznego strumienia cieplnego (W/m^2) transportowanego na drodze x , dT/dx — gradient temperatury w kierunku x .



Rys. 2. Zależność wartości zastępczego współczynnika przewodnictwa cieplnego (λ_z) od gęstości pozornej (ρ) sztywnej pianki PUR (RPURF); pomiary wykonano po 3 dobach (krzywa 1), po 10 dobach (krzywa 2) oraz po 183 dobach (krzywa 3) od syntezy pianki

Fig. 2. The apparent thermal conductivity (λ_z) of rigid PUR foam (RPURF) in relation to RPURF density; measurements made in: 1 — 3 days, 2 — 10 days, 3 — 183 days after synthesis of foam



Rys. 3. Zależność wartości zastępczego współczynnika przewodnictwa cieplnego (λ_z) od gęstości pozornej (ρ) RPURF; pomiary wykonano po upływie 183 dób od syntezy pianki

Fig. 3. The apparent thermal conductivity (λ_z) of rigid PUR foam (RPURF) in relation to RPURF density; measurements made in 183 days after synthesis of foam

Rysunki 2 i 3 przedstawiają przebieg zależności wartości zastępczego współczynnika przewodnictwa ciepła od gęstości sztywnej pianki PUR (RPURF). Zależność ta wykazuje minimum wartości λ_z odpowiadające gęstości w zakresie 33–37 kg/m³.

Badania mikroskopowe wykazały, że pianki o najmniejszych wartościach gęstości mają komórki o stosunkowo dużych wymiarach. Znany jest fakt, że duże wymiary komórek pogarszają właściwości izolacyjne materiału porowatego.

W przypadku małej gęstości ścianki, żeberka międzykomórkowe pianek są zbudowane z małej ilości materiału poliuretanowego, przez co stanowią znacznie słabszą barierę w procesie ich penetracji przez promieniowanie podczerwone. Ścianki komórek o małej grubości stanowią słabszą barierę dla transportu ciepła. Zaobserwowany przez nas przebieg zależności $\lambda_z = f(\rho)$ jest wywołany prawdopodobnie tym, że w zakresie bardzo małej gęstości pianek (a więc dużej przejrzystości)

udział promieniowania w całkowitym mechanizmie transportu ciepła jest duży. Maleje on ze wzrostem gęstości aż do osiągnięcia wartości $\lambda_{z \min}$. Dalszy wzrost gęstości pianki nie wywołuje już, praktycznie biorąc, zmiany wartości strumienia ciepła transportowanego przez promieniowanie, wzrasta natomiast udział przewodzenia przez fazę stałą, głównie żeberek, gdyż materiał fazy stałej przede wszystkim tam jest lokowany. Hipotezę tę potwierdzają obliczenia wykonane z wykorzystaniem modelu Glicksmiana [por. równanie (4)].

Wraz ze wzrastającą gęstością pozorną RPURF, zwiększa się ilość materiału poliuretanowego przypadająca na jednostkę objętości pianki. Niewielkie nawet zmniejszenie wartości średniej długości komórek w tym zakresie gęstości powoduje, że wzrost ilości polimeru musi powodować wzrost grubości zarówno ścian komórkowych, jak i żeberek. W takiej sytuacji ilość energii cieplnej przenoszona w postaci promieniowania w fazie gazowej oraz udział przewodzenia w tej fazie nie powinny ulec zmianie. Natomiast rośnie ilość ciepła przewodzona przez fazę stałą, której w piankach o największych wartościach gęstości jest w jednostce objętości trzykrotnie więcej niż w RPURF o najmniejszej gęstości.

W pracach [9–21] dokonano próby wyodrębnienia poszczególnych mechanizmów transportu, traktując zastępczy współczynnik λ_z jako równy sumie następujących współczynników:

$$\lambda_z = \lambda_S + \lambda_G + \lambda_R + \lambda_K \quad (2)$$

gdzie: indeksy dolne S, G, R i K odpowiadają odpowiednio przewodzeniu w fazie stałej, przewodzeniu w fazie gazowej, promieniowaniu w fazie gazowej oraz konwekcji w fazie gazowej.

Z uwzględnieniem równania (1) pozwala to również na wyodrębnienie składowych gęstości strumienia ciepła q w taki sposób, że:

$$q = q_S + q_G + q_R + q_K \quad (3)$$

gdzie: indeksy dolne zachowują swe znaczenia z równania (2).

Na ogół panuje zgodność co do tego, że w przypadku obecności w piance pęcherzyków gazu o wymiarach mniejszych niż 1 mm mechanizm transportu konwekcyjnego w fazie gazowej można pominąć [10], a więc $\lambda_K = 0$ i $q_K = 0$.

W tabeli 1 zestawiono opublikowane zależności, które mogą służyć do określenia wartości współczynników λ odpowiadających poszczególnym mechanizmom.

Poszczególne symbole występujące w tabeli 1 mają następujące znaczenia:

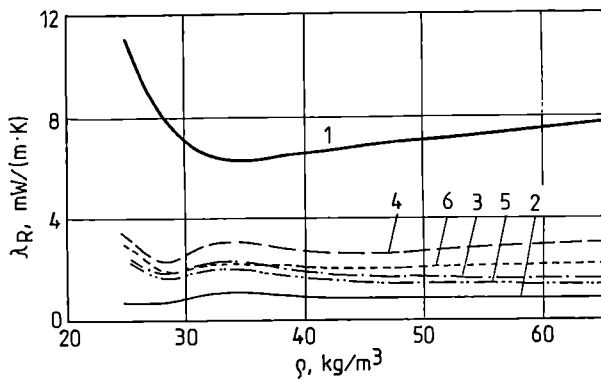
k — współczynnik ekstynkcji (1/m), C_d — średnica komórek (m), T — temperatura (K), p_f — gęstość pozorna pianki (kg/m³), ρ_s — gęstość poliuretanu (kg/m³), L — grubość warstwy pianki poliuretanowej (m), y — ułamek molowy, η — lepkość gazu (Pa·s), M — masa molowa, ε — udział objętościowy porów pianki, f_s — udział masy polimeru wbudowanego w żeberka, σ — stała Stefana—Boltzmana wynosząca $5,6705 \cdot 10^{-8}$ W/(m²·K⁴), e — transmitancja ścian komórkowych, λ_p — współczynnik przewodzenia ciepła przez niespieniony PUR.

T a b e l a 1. Zależności opisujące transport ciepła przez pianki PUR
T a b l e 1. Equations describing heat transfer through PUR foams

Numer	Proponowana zależność	Autorzy	Uwagi i założenia
Promieniowanie w fazie gazowej			
1.1	$\lambda_R = \frac{16\sigma T^3}{3 \cdot k}$	Sinofsky, Glicksman (wg [10])	Można stosować tylko w temp. 75°F, co odpowiada ok. 298 K
1.2	$\lambda_R = 4 \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot C_d \cdot T^3$	Bhattacharjee i współpracownicy [11]	
1.3	$\lambda_R = \frac{1,51 \cdot C_d \cdot \sigma \cdot T^3}{\sqrt{f_s \frac{\rho_f}{\rho_s}}}$	[12]	
1.4	$\lambda_R = \frac{16 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \cdot C_d}{2 - \epsilon}$	Cunningham i Sparrow [13]	Założono, że $\epsilon = 0,8$
1.5	$\lambda_R = \frac{16\sigma T^3 C_d}{3 \cdot 3,68 \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_s}}}$	Glicksman i Torpey [14] oraz założenia Hottel i Sarofim [15]	Posłużono się analogią do teorii molekularnej gazów. Założono, że żeberka mogą absorbować i emitować promieniowanie. Komórki są dwunastokątami pentagonalnymi.
1.6	$\lambda = \lambda_G + \lambda_R = \lambda_G + \frac{4\sigma T^3 L}{1 + \left(\frac{L}{C_d}\right)\left(\frac{1}{\epsilon} - 1\right)}$	Williams i Aldao [16]	
Przewodzenie w fazie gazowej złożonej z mieszaniny gazów			
2.1	$\lambda_G = \sum (y_i \cdot \lambda_i)$	wg [17]	Można stosować tylko gdy wartości λ_i są zbliżone
2.2	$\lambda_G = \frac{1}{\sum \left(\frac{y_i}{\lambda_i}\right)}$	wg [17]	Można stosować tylko gdy wartości λ_i są zbliżone
2.3	$\lambda_G = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^n y_j A_{ij}}$	Vassileva (wg [18])	A_{ij} — funkcja Vassilevy
2.4	$A_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{n_i}{n_j}\right)^{0,5} \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{0,25}\right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)\right]^{0,5}}$	Mason i Saxen wg [18]	Jeden z proponowanych opisów funkcji Vassilevy
Przewodzenie w fazie stałej			
3.1	$\lambda_s = \left(\frac{2}{3} - \frac{f_s}{3}\right)(1 - \epsilon) \cdot \lambda_p$	Sinofsky i Glicksman wg [10]	Założenia autorów: $\epsilon = 0,979$; $f_s = 0,8$ — opisuje ułożenie materiału stałego w przestrzeni
3.2	$\lambda_s = \lambda_p \cdot (1 - \epsilon) \cdot \varphi$	Sparks i Arvidson [20]	φ — Współczynnik sferyczny, związany z orientacją komórek
Modele złożone			
4.1	$\lambda_{s+G} = \lambda_G + \frac{2}{3}(1 - \epsilon)\lambda_p$	Schuetz i Glicksman [21]	Założenie: komórki są sześciانami
4.2	$\lambda_{s+G} = \lambda_G + \left(\frac{2}{3} - \frac{f_s}{3}\right)(1 - \epsilon)\lambda_p$	Schuetz i Glicksman [21]	Górna granica przewodnictwa pianek rzeczywistych
4.3	$\lambda_{s+G} = \lambda_G + 0,8 \cdot \left(\frac{2}{3} - \frac{f_s}{3}\right)(1 - \epsilon)\lambda_p$	Schuetz i Glicksman [21]	Dolna granica przewodnictwa pianek rzeczywistych

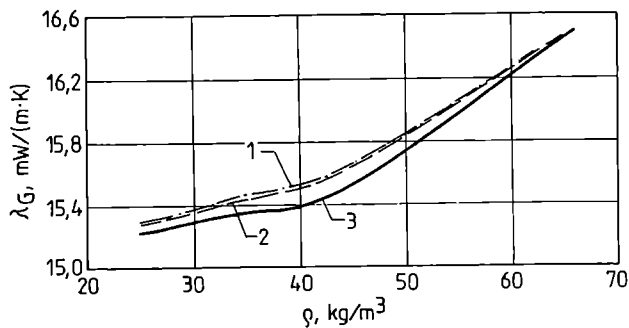
Rysunek 4 przedstawia wartości λ uzyskane na drodze obliczeń z równań zamieszczonych w tabeli 1. Jak wynika z tego rysunku, obliczona ilość ciepła przenoszona na drodze promieniowania przez taką samą pian-

kę waha się w szerokich granicach. Wartości największe i najmniejsze różnią się nawet o rząd. Natomiast obliczone różnymi przytoczonymi w tabeli 1 metodami wartości współczynnika przewodzenia ciepła dotyczące



Rys. 4. Wartości współczynnika promieniowania ciepła w fazie gazowej (λ_R) obliczone na podstawie równań z tabeli 1; krzywe odpowiadają następującym numerom wzorów: 1 — 1.1, 2 — 1.2, 3 — 1.3, 4 — 1.4, 5 — 1.5, 6 — 1.6

Fig. 4. The radiative heat transfer coefficient (λ_R) in the gas phase as calculated from equations 1.1 (curve 1), 1.2 (curve 2), 1.3 (curve 3), 1.4 (curve 4), 1.5 (curve 5) and 1.6 (curve 6) listed in Table 1

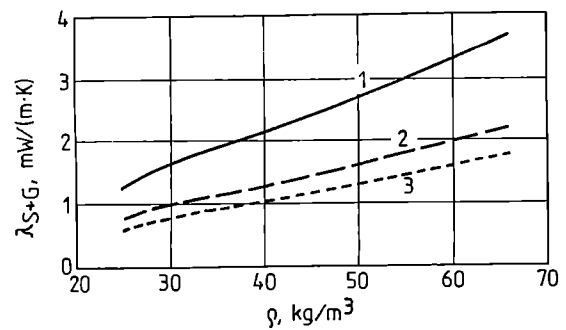


Rys. 5. Wartości współczynnika przewodnictwa ciepła mieszaniny gazowej (przez pęcherzyki pianki) (λ_G) obliczone na podstawie równań z tabeli 1; krzywe odpowiadają następującym numerom wzorów: 1 — 2.1, 2 — 2.2, 3 — 2.3 i 2.4

Fig. 5. The coefficient (λ_G) of heat transfer in foam cells (gas phase) calculated from equations 2.1 (curve 1), 2.2 (curve 2), 2.3 and 2.4 (curve 3) listed in Table 1

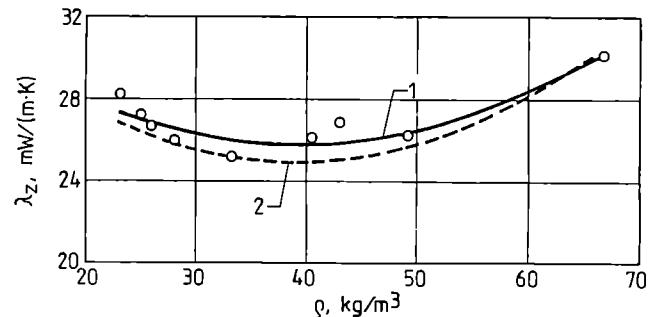
gazów zamkniętych w pęcherzykach pianki różnią się między sobą tylko nieznacznie (rys. 5). Duże różnice występują znowu w przypadku współczynnika przewodzenia ciepła obliczonego zgodnie z równaniami dotyczącymi modeli złożonych (λ_{S+G}) (rys. 6).

Przeprowadzone przez nas obliczenia odnoszące się do danych wyjściowych odpowiadających piankom użytym do badań i analiza równań z tabeli 1 pozwalają na stwierdzenie, że modelem, który najlepiej przybliża wyniki naszych badań doświadczalnych jest model Glicksmana, opisywany równaniami 1.1 i 4.1 w połączeniu z równaniem 2.3 odnoszącym się do przewodzenia w fazie gazowej. Pokazano to na rys. 7. Linia, która najlepiej opisuje uzyskane wyniki (po 3 dobach od chwili syntezy pianki) jest linia przerywana na tym rysunku.



Rys. 6. Wartości współczynnika przewodnictwa ciepła obliczone na podstawie równań z tabeli 1 dotyczących modeli złożonych (λ_{S+G}); krzywe odpowiadają następującym numerom wzorów: 1 — 4.1, 2 — 4.2, 3 — 4.3

Fig. 6. The coefficient of heat transfer by conduction (λ_{S+G}) in the PU/R skeleton as calculated from complex-model equation 4.1 (curve 1), 4.2 (curve 2) and 4.3 (curve 3) listed in Table 1



Rys. 7. Porównanie przebiegu całkowitego strumienia ciepła zmierzonego (λ_z po 3 dobach od chwili syntezy pianki) i obliczonego z równania (4) w odniesieniu do średniej temperatury 298 K: 1 — wartości zmierzone, 2 — wyniki obliczeń

Może ona być opisana równaniem stanowiącym sumę równań 1.1, 4.1 i 2.3:

$$\lambda_z = \frac{16 \cdot \delta \cdot T^3}{3 \cdot K} + \frac{2}{3} (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_p + \lambda_G \quad (4)$$

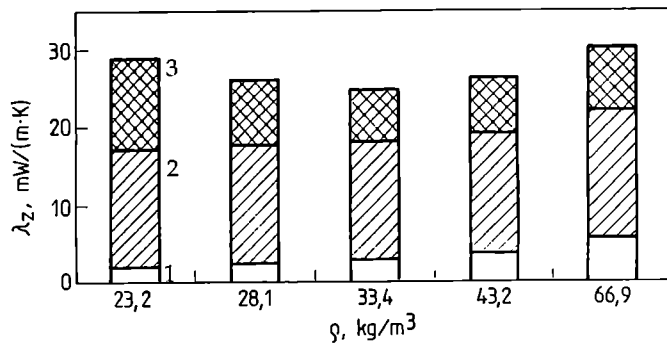
(λ_G wg równania 2.3 z tabeli 1)

Rysunek 8 przedstawia wynikające z równania (4) wkłady poszczególnych strumieni w transport ciepła przez różniące się gęstością RPURF. Zmiany procentowych udziałów poszczególnych mechanizmów w zastępczym współczynniku λ_z (opisującym całkowity transport) ze wzrostem gęstości pianek kształtują się w następujący sposób:

— Przewodzenie w fazie stałej: wzrasta od ok. 7 do ok. 20%.

— Przewodzenie w fazie gazowej: minimalny wzrost udziału z ok. 53 do ok. 57%.

— Promieniowanie: początkowo maleje z ok. 40% do

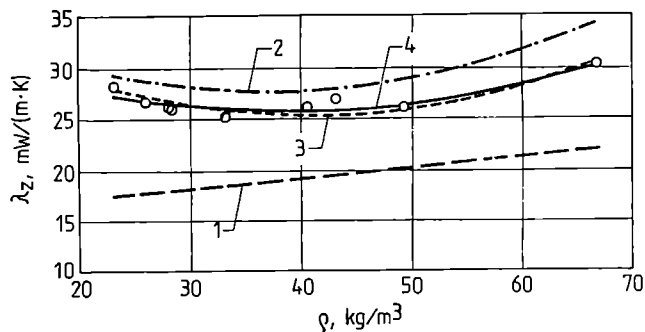


Rys. 8. Wynikające z równania (4) wkłady poszczególnych strumieni w transport ciepła przez różniące się gęstością RPURF: 1 — przewodzenie w fazie stałej, 2 — przewodzenie w fazie gazowej, 3 — promieniowanie

Fig. 8. Component heat transfer rates in RPURF of varying densities, calculated from equation 4: 1 — conduction in solid phase, 2 — conduction in gas phase, 3 — radiation

ok. 23%, natomiast w obszarze pianek o największej gęstości nieznacznie rośnie do ok. 28%.

Rysunek 9 przedstawia zależności jak na rys. 8, ale wzbogacone o dwie krzywe opisujące maksymalne i minimalne wartości współczynnika λ_z , określone na podstawie zależności z tabeli 1.



Rys. 9. Obliczone z tabeli 1 minimalne (krzywa 1) i maksymalne (krzywa 2), jak również wynikające z równania (4) (krzywa 3) oraz zmierzone (krzywa 4) wartości współczynnika λ_z różniących się gęstością RPURF

Fig. 9. The minimum (curve 1), maximum (curve 2), calculated (equation 4, curve 3) and measured coefficients λ_z for RPURF of varying densities

Maksymalne wartości współczynnika λ_z są tylko nieznacznie większe od wartości wynikających z danych doświadczalnych, natomiast wartości minimalne wyraźnie mniejsze od wartości zmierzonych. Zamieszczone w tabeli 1 zależności zostały opracowane w odniesieniu do pianek poliuretanowych otrzymanych z zastosowaniem freonów jako porofoforów. W naszej obecnej pracy jako porofofor stosowaliśmy pentany [22, 23], które mają większe wartości współczynnika przewodnictwa ciepła w fazie gazowej λ_G , co powoduje, że otrzymywane z ich

udziałem RPURF charakteryzują się również większą wartością współczynnika przewodnictwa ciepła λ_z . Ten fakt może także tłumaczyć to, że obliczone maksymalne wartości λ_z na rys. 8 są tylko nieznacznie mniejsze od wartości doświadczalnych.

WNIOSKI

— Wartość zastępczego współczynnika przewodnictwa ciepła — ujmującego wszystkie możliwe mechanizmy transportu ciepła — sztywnych pianek poliuretanowych spienionych porofoforem węglowodorowym wykazuje minimum w zakresie gęstości w obszarze 33–37 kg/m^3 , gdzie wynosi ona ok. 25 $\text{mW}(\text{m}\cdot\text{K})$. Taki charakter zmienności współczynnika λ_z w funkcji gęstości pianek (ρ) jest podobny w przypadku pianek badanych po 3, 10 i 183 dobach od ich otrzymania.

— Z opublikowanych w literaturze i przytoczonych w niniejszej pracy modeli oraz opisujących je równań jedynie model Glicksmana z zadowalającą dokładnością opisuje zależność $\lambda_z = f(\rho)$ dotyczącą pianek po 3 dobach od ich otrzymania.

— Aczkolwiek doświadczalnie nie udało się wyodrębnić poszczególnych mechanizmów transportu ciepła w obrębie pianek poliuretanowych, jednak zmierzony zastępczy współczynnik λ_z wykazuje dobrą zgodność z równaniem (4) opisującym model Glicksmana.

LITERATURA

1. Pielichowski J., Puszyński A.: „Technologia tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 1999, str. 140–147.
2. Król P.: „Analiza uwarunkowań strukturalnych właściwości mechanicznych i akustycznych tworzyw poliuretanowych”, Proceedings VIII Conference on Structural Acoustics, Zakopane 1999, str. 161–169.
3. Prociak A., Sterzyński T., Pielichowski J.: *Polym. Eng. Sci.* 1999, **39**, nr 9, 1689.
4. Prociak A., Pielichowski J., Modesti M., Simoni F.: *Cell. Polym.* 1997, **16**, nr 4, 284.
5. Modesti M., Simoni F., Checchin M., Prociak A., Pielichowski J.: *Cell. Polym.* 1999, **18**, nr 5, 329.
6. „Polyurethane Handbook”, Hanser Publisher. Monachium-Wiedeń-New York 1994, str. 359–369.
7. Wirpsza Z.: „Poliuretany. Chemia, technologia, zastosowanie”, WNT, Warszawa 1998, str. 240–248.
8. Sikorski R. T.: „Podstawy chemii i technologii polimerów”, PWN, Warszawa 1985, str. 431–436.
9. Stevenson M. E. Jr, Mark M.: *ASHRAE J.* 1961, **3**, nr 2, 75.
10. Booth L. D.: Polyurethanes World Congress 1987, str. 85; wg Sinofsky M., Glicksman L. R.: „Property Measurements and Thermal Performance Predictions of Foam Insulation”, M. S. Thesis, MIT, 1983.

11. Bhattacharjee D., King J. A., Whitehead M. R.: *J. Cell. Plast.* 1991, **27**, nr 5, 240.
12. Booth L. G.: Polyurethanes World Congress 1987, str. 85.
13. Cunningham A., Sparrow D. J.: *Cell. Polym.* 1986, **5**, 327.
14. Glicksman L. R., Torpey M. R.: Polyurethanes World Congress 1987, str. 80—83.
15. Hottel H. C., Saforim A. F.: „Radiative Transfer”, McGraw-Hill, Nowy Jork 1967, str. 326—342.
16. Williams R. J. J., Aldao C. M.: *Polym. Eng. Sci.* 1983, **23**, nr 6, 293.
17. Hobler T.: „Ruch ciepła i wymienniki”, wyd. 5., WNT, Warszawa 1979, str. 572—614.
18. Merten A. K., Rotermund U.: Polyurethanes World Congress 1997, str. 317.
19. Glicksman L. R., Torpey M., Marge A.: *J. Cell. Plast.* 1992, **28**, nr 6, 571.
20. Sparks L. L.: National Bureau of Standards Report, NBSIR 1982, str. 82.
21. Schuetz M. A., Glicksman L. R.: *J. Cell. Plast.* 1984, **20**, nr 2, 114.
22. Prociak A., Pielichowski J.: *Polimery* 1997, **42**, 544.
23. Pielichowski J., Polaczek J., Prociak A.: *Polimery* 1993, **38**, 208.

Otrzymano 3 VII 2000 r.

W kolejnym zeszycie ukaza się następujące artykuły:

- Postępy w dziedzinie kontrolowanej polimeryzacji żyjącej w środowisku wodnym. Cz. III. Kontrolowana/żyjąca polimeryzacja w środowisku wodnym (*wersja angielska*)
- Pultruzja — efektywna metoda wytwarzania półwytworów z tworzyw wzmocnionych włóknami
- Wpływ tlenku cynku na właściwości kauczuków etylenowo-propylenowych
- Warstwa wierzchnia a tarcie elastomerów
- Wpływ fosforowych opóźniaczy palenia na zachowanie się w płomieniu sztywnych pianek poliuretanowych ekspandowanych pentanem (*wersja angielska*)
- Utwardzanie ciekłych dianowych żywic epoksydowych adduktami poliamin z 2-merkaptobenzotiazolem i synteza tych adduktów
- Układ katalityczny „Visico-Ambicat” umożliwiający sieciowanie polietylenu w temperaturze pokojowej
- Ocena stopnia zgodności charakterystyk geometrycznych wyprasek wtryskiwanych z poliamidu z wymaganiami technologicznymi
- Materiały opatrunkowe stosowane w ortopedii i traumatologii. Cz. II. Quasi-prepolimery uretanowe — chemoreaktywne składniki opatrunków z kompozytów poliuretanowo-tkaninowych
- Modelowanie kinetyki polimeryzacji dimetakrylanu podczas efektu następczego (*wersja angielska*)