

Experimental verification of energy absorption and dissipation of expanded polypropylene structures used in pedestrian protection components

Doświadczalna weryfikacja absorpcji i dyssypacji energii struktur z ekspandowanego polipropylenu stosowanych w elementach ochrony pieszych



Samples of expanded polypropylene (EPP) of different dimensions were tested for quasi-static and dynamic strength. With increasing EPP dimension the material's ability to transfer loads increased, while the highest efficiency in absorbing impact energy was demonstrated by samples of medium dimension, absorbing less energy but characterized by higher resistance to permanent deformations. Based on DSC calorimetric tests conducted in the temp. range of -30–120 °C, no phys. changes were found in the tested EEP.

Keywords: foamed polypropylene, energy dissipation, cells materials, EPP foam

Analizie poddano i doświadczalnie zweryfikowano efektywność zastosowania pianki EPP jako elementu energochłonnego w absorberze energii pojazdu osobowego. Oceniono wartości oraz udział energii absorbowanej i dyssypowanej przez zespół w trakcie zderzenia. Przeprowadzono badania mające na celu identyfikację właściwości termicznych materiału za pomocą kalorymetrii różnicowej DSC. Stwierdzono, że tworzywo sztuczne w postaci pianki EPP, zastosowane w elementach zabezpieczających, charakteryzuje się korzystnymi właściwościami dyssypacyjnymi. Odpowiedni dobór gęstości materiału przekłada się na uzyskanie jeszcze lepszych właściwości aplikacyjnych.

Słowa kluczowe: spieniony polipropylen, dyssypacja energii, materiały komórkowe, pianka EPP

Ochrona i zabezpieczenie użytkowników transportu drogowego jest priorytetowym kierunkiem działań mających zapewnić realizację zrównoważonego transportu. Problematyka i złożoność zagadnień w przedmiocie bezpieczeństwa jest zależna od efektów i wyników prac obejmujących układy bezpieczeństwa biernego i czynnego pojazdu. Bezpieczeństwo tzw. niechronionych użytkowników dróg (NUD) jest obecnie jednym z przewodnich tematów w przedmiocie bezpieczeństwa pojazdów. Ocena procesów zachodzących w trakcie kolizji drogowych z NUD stała się podstawą prac mających na celu opracowanie rozwiązań minimalizujących występowanie oraz ograniczających skutki nieszczęśliwych zdarzeń.

Rosnące zainteresowanie materiałami absorbującymi energię uderzenia doprowadziło do intensywnych badań nad spienionym polipropylemem (EPP) ze względu na jego właściwości mechaniczne. Materiał wykorzystywany jest w wielu aplikacjach, w tym w motoryzacji, lotnictwie, a szczególnie w systemach ochrony pieszych. Jako materiał komórkowy EPP charakteryzuje się małą gęstością, wysoką sprężystością oraz zdolnością do pochłaniania i dyssypacji energii.

EPP należy do grupy materiałów termoplastycznych o dwufazowej strukturze komórkowej. W pracach¹⁻⁴⁾ udowodniono, że struktura komórkowa EPP umożliwia skuteczne pochłanianie energii dynamicznej, zwłaszcza podczas uderzeń o wysokiej intensywności. Mała gęstość materiału (typowo



Mgr inż. Przemysław RUMIANEK (ORCID: 0000-0001-7324-360X) w roku 2010 ukończył studia na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej, specjalność wspomaganie komputerowe prac inżynierskich. Obecnie pracuje jako asystent badawczo-dydaktyczny w Zakładzie Mechaniki Instytutu Podstaw Budowy Maszyn na macierzystym wydziale. Specjalność – inżynieria mechaniczna, budowa i eksploatacja maszyn, symulacja numeryczna i projektowanie.



Dr hab. inż. Piotr ŻACH, prof. PW (ORCID: 0000-0001-9432-3748), jest kierownikiem Zakładu Techniki Wytwarzania na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Specjalizuje się w badaniach numerycznych i eksperymentalnych mechaniki i wytrzymałości zaawansowanych materiałów hiperelastycznych, porowatych o budowie losowej z uwzględnieniem złożonych stanów naprężenia i zmiennych prędkości odkształcenia, w szczególności tworzyw sztucznych i struktur kompozytowych, oraz projektowaniu nowych materiałów o modulowanych właściwościach. Zajmuje się opracowaniem metod badania i diagnostyki bezpieczeństwa maszyn roboczych i pojazdów oraz praktycznymi aspektami technologii przetwórstwa, odzysku i recyklingu materiałów polimerowych.

* Adres do korespondencji:

Instytut Podstaw Budowy Maszyn Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych, Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, e-mail: przemyslaw.rumianek@pw.edu.pl

Table. EPP panel properties

Tabela. Właściwości płyt EPP

Oznaczenie próbki	Gęstość, g/dm ³	Odporność temperaturowa, °C	Odporność chemiczna	Pamięć kształtu	Absorpcja wody	Odporność na promieniowanie UV
1	20	150	TAK	TAK	NIE	TAK
2	120	150	TAK	TAK	NIE	TAK
3	200	150	TAK	TAK	NIE	TAK

30–150 g/dm³) w połączeniu z wysoką elastycznością i odpornością na uszkodzenia mechaniczne sprawia, że EPP znajduje szerokie zastosowanie w konstrukcjach ochronnych, takich jak zderzaki samochodowe i elementy absorbujące energię w strefach kontrolowanego zgniotu⁵⁾.

Morton²⁾ podkreśla, że EPP charakteryzuje się doskonałą sprężystością, co pozwala na wielokrotne użycie w aplikacjach wymagających absorpcji energii, a jego zdolność do regeneracji zależy od gęstości i geometrii komórek materiału. W literaturze istnieje wiele badań dotyczących absorpcji energii przez materiały komórkowe, w tym EPP. Badania prowadzone przez Gibsona i Ashby'ego⁶⁾ w zakresie mechaniki materiałów komórkowych wykazały, że struktura komórkowa jest kluczowa dla zdolności pochłaniania energii. W badaniach EPP Avalor⁷⁾ przeprowadził testy dynamiczne i *quasi*-statyczne, które potwierdziły, że materiał ten wykazuje doskonałe właściwości pochłaniania energii w szerokim zakresie prędkości uderzenia. Ponadto materiał o większej gęstości absorbuje więcej energii przy mniejszych odkształceniach, co zostało także potwierdzone w badaniach prowadzonych przez Xinga⁸⁾.

Zdolność do dyssypacji energii, czyli rozpraszania energii kinetycznej, jest równie istotna w przypadku materiałów komórkowych, szczególnie w kontekście ochrony przed uderzeniami. Avalor⁹⁾ oraz Lin¹⁰⁾ wykazali, że struktura komórkowa EPP rozprasza energię przez lokalne odkształcenia ścianek komórek, co pozwala na skuteczne zmniejszenie przeciążeń działających na pojazd i niechronionych użytkowników ruchu w momencie kolizji. Jest to szczególnie ważne w zastosowaniach związanych z ochroną pieszych. Ocena wykonana przez autorów obejmowała zjawiska do tej pory nieuwzględniane w badaniach, wpływ warunków zewnętrznych, takich jak temperatura i wilgotność, na zdolność absorpcyjną EPP. Weingart i współpr.¹¹⁾ wskazali, że w przypadku materiałów komórkowych takie czynniki mogą mieć istotny wpływ na ich właściwości mechaniczne.

Dodatkowo w literaturze brakuje badań długoterminowych dotyczących trwałości EPP w systemach ochronnych. Wpływ wielokrotnych cykli uderzeń na właściwości absorpcyjne materiału jest kluczowy, szczególnie w kontekście jego zastosowania w systemach ochrony pieszych, gdzie konieczne jest zapewnienie trwałości materiału przez długi okres eksploatacji¹¹⁾.

Celem pracy było eksperymentalne określenie zdolności spienionego polipropylenu do absorpcji energii, stosowanego w absorberach energii pojazdów osobowych, oraz ocena wartości i udziału energii absorbowanej i dyssypowanej z uwzględnieniem wpływu temperatury.

Część doświadczalna

Materiał

Do przeprowadzenia badań przygotowano próbki z płyt EPP o parametrach przedstawionych w tabeli, produkowanych przez polską firmę Izoblok. Próbki do badań zostały wycięte mechanicznie, bez uszkodzenia struktury, z płyt przemysłowych o różnych gęstościach.

Metodyka badań

W celu określenia właściwości termicznych materiału przeprowadzono badania kalorymetryczne za pomocą kalorymetru DSC 1 STARe System (Mettler Toledo) z chłodzeniem ciekłym azotem. Przez komorę, w której znajdowała się próbka przepuszczano azot o wysokiej czystości przy stałym natężeniu 20 cm³/min. Aparat skalibrowano na podstawie próbek indu. Eksperymenty kalibracyjne oraz badania próbek pianek przeprowadzono przy szybkości ogrzewania 5 K/min w zakresie temp. 240–360 K.

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono dla trzech typów gęstości EPP. Każda z próbek miała postać sześcianu o wymiarach 20×20×30 mm. W pierwszym etapie badań wykonano testy *quasi*-statyczne, które polegały na wolnym ściskaniu próbek za pomocą maszyny wytrzymałościowej (Zwick/Roell Z005) o zakresie pomiarowym do 5 kN. W trakcie badań wyznaczono charakterystyki siła-odkształcenie.

Przeprowadzono badania dynamiczne próbek, które poddano nagłym obciążeniom z prędkościami wymuszenia zawierającymi się w przedziale 5–20 m/s, za pomocą młota opadowego Zwick/Roell Amsler HIT200F. Rejestrację przebiegu deformacji oraz wyznaczenie szybkości odkształcenia próbek wykonanych z pianki EPP przeprowadzono



Mgr inż. Tomasz DOBOSZ (ORCID: 0000-0001-5639-0501) w roku 2012 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Warszawskiej. Jest asystentem w Katedrze Konstrukcji Badań Maszyn i Pojazdów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Specjalność – modelowanie 3D, obliczenia numeryczne (MES i MED) oraz inżynieria projektu.

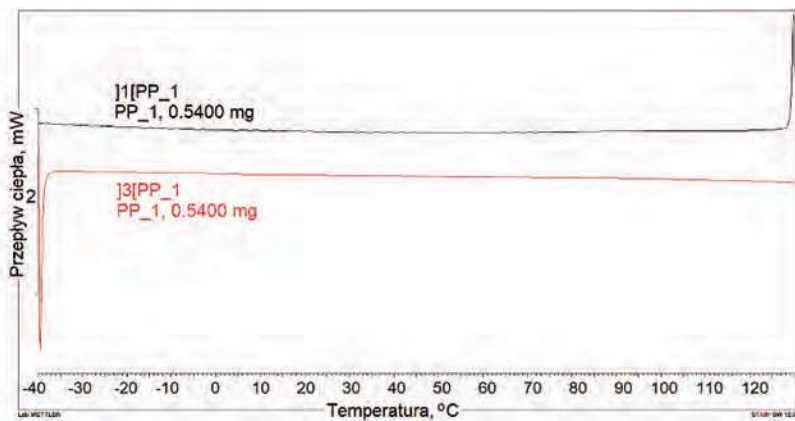


Fig. 1. DSC thermogram EPP for 0.5400 mg samples

Rys. 1. DSC termogram EPP dla próbek 0,5400 mg

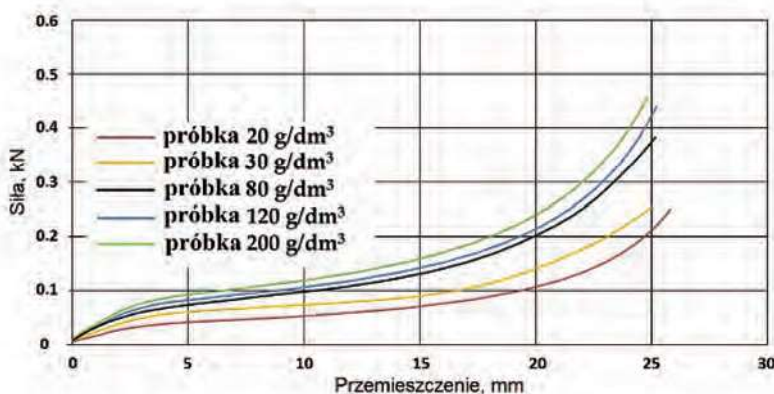


Fig. 2. Force-displacement curve for compression of EPP foam of different densities

Rys. 2. Krzywa siła-przemieszczenie dla ściskania próbek EPP o różnych gęstościach

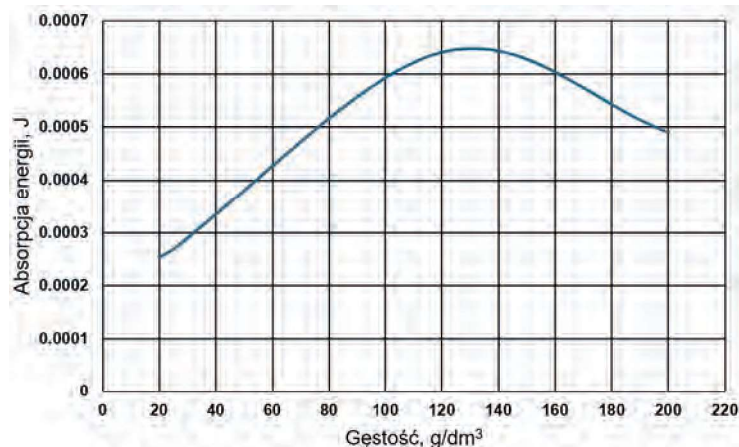


Fig. 3. Energy absorption curve relative to density

Rys. 3. Krzywa absorpcji energii w stosunku do gęstości

za pomocą kamery Phantom v1612 High Speed. W badaniach dynamicznych analizowano ilość pochłoniętej energii przez próbki oraz ich zdolność do odzyskiwania kształtu po uderzeniu.

Wyniki badań

Na podstawie badania DSC (rys. 1) nie stwierdzono żadnych sygnałów świadczących o krystalizacji, topnieniu lub przemianach typu kryształ-kryształ, zmianach konformacji

kryształów, jak również o zeszkleniu próbki tworzywa. Próbka w badanym zakresie temp. -30 – 120°C nie ulegała żadnym przemianom termicznym.

Wyniki testów *quasi*-statycznych wykazały, że wraz ze wzrostem gęstości EPP wzrastała także zdolność materiału do przenoszenia obciążeń (rys. 2). Próbki o gęstości 200 g/dm^3 wykazały najwyższą wytrzymałość na ściskanie, osiągając siłę maksymalną wynoszącą $0,4\text{ kN}$, podczas gdy próbki o gęstości 20 g/dm^3 charakteryzowały się siłą maksymalną na poziomie $0,25\text{ kN}$.

W testach dynamicznych próbki o gęstości 120 g/dm^3 wykazały najwyższą efektywność w pochłanianiu energii uderzenia (rys. 3). Średnia ilość pochłoniętej energii dla tych próbek wyniosła 85% energii kinetycznej młota opadowego, co potwierdza ich potencjał w zastosowaniach ochronnych. Próbki o gęstości 20 g/dm^3 pochłaniały mniej energii, na poziomie ok. 45% , ale charakteryzowały się większą odpornością na trwałe odkształcenia. Stwierdzone zjawisko jest kluczowym czynnikiem decydującym o zastosowaniu materiału na elementy poddawane wielokrotnym obciążeniom.

Wyniki badań potwierdziły, że struktury EPP są efektywnym materiałem absorbującym energię w systemach ochrony pieszych. Materiał o mniejszej gęstości wykazywał lepsze właściwości absorpcyjne, co sprawia, że jest bardziej odpowiedni do zastosowań, gdzie priorytetem jest maksymalna redukcja energii przekazywanej na ciało pieszego w momencie kolizji. Z kolei EPP o większej gęstości może być bardziej odpowiedni, gdy istotna jest trwałość i odporność na wielokrotne obciążenia, co może mieć zastosowanie w strukturach narażonych na częste uderzenia.

Podsumowanie

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem gęstości materiału EPP maleje zdolność polimeru do absorpcji energii w przeliczeniu na jednostkę masy. Na podstawie badania DSC stwierdzono, że w przedziale temperatur planowanej eksploatacji nie zachodzą przemiany fizyczne w strukturze materiału zależne od temperatury. Wykonane badanie jednoznacznie potwierdziło zasadność wyboru materiału EPP na elementy absorbujące energię mające zastosowanie w szczególności w pojazdach do ochrony NUD.

Przeprowadzone badania doświadczalne dostarczają cennych informacji na temat właściwości absorpcyjnych i dyssypacyjnych struktur EPP stosowanych w systemach ochrony pieszych. Wykazano, że gęstość materiału jest kluczowym czynnikiem wpływającym na zdolność do pochłaniania energii i odzyskiwania kształtu po uderzeniu.

Materiały o większej gęstości oferują większą trwałość, co może być korzystne w systemach narażonych na częste dynamiczne obciążenia.

Otrzymano: 30-09-2024

Zrecenzowano: 25-10-2024

Zaakceptowano: 29-10-2024

Opublikowano: 20-11-2024

LITERATURA

- [1] R. Bouix, P. Viot, J. L. Lataillade, *Int. J. Impact Eng.* 2009, **36**, nr 2, 329, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2007.11.007.
- [2] D.T. Morton, A. Reyes, A.H. Clausen, O.S. Hopperstad, *Mater. Today Commun.* 2020, **23**, 100917, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.100917.
- [3] P. Rumianek, T. Dobosz, R. Nowak, P. Dziewit, A. Aromiński, *Materials (Basel)* 2021, **14**, nr 2, doi: 10.3390/ma14020249.
- [4] D. Miedzińska, J. *KONES. Powertrain Transp.* 2012, **19**, nr 2, 321, doi: 10.5604/12314005.1137948.
- [5] S. Yang, Y. Sun, C. Qi, *Int. J. Mech. Sci.* 2020, **165**, 105210, doi: 10.1016/J.IJMECSCI.2019.105210.
- [6] L.J. Gibson, M.F. Ashby, *Cellular solids. Structure and properties*, Cambridge University Press, 1997.
- [7] M. Avalor, G. Belingardi, R. Montanini, *Int. J. Impact Eng.* 2001, **25**, nr 5, 455, doi: 10.1016/S0734-743X(00)00060-9.
- [8] Y. Xing, D. Sun, M. Zhang, G. Shu, *Polymers* 2023, **15**, nr 9, 2059, doi: 10.3390/POLYM15092059.
- [9] M. Avalor, G. Belingardi, A. Ibba, *Int. J. Impact Eng.* 2007, **34**, nr 1, 3, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2006.06.012.
- [10] H.R. Lin, *Polym. Test.* 1997, **16**, nr 5, 429, doi: 10.1016/S0142-9418(97)00003-2.
- [11] N. Weingart, D. Raps, J. Kuhnigk, A. Klein, V. Altstädt, *Polymers (Basel)* 2020, **12**, nr 10, 1, doi: 10.3390/POLYM12102314.

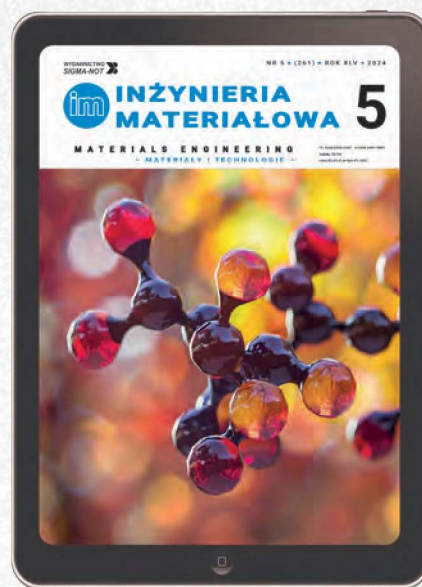
Ukazujący się nieprzerwanie od 1980 r. polski dwumiesięcznik adresowany do inżynierów-technologów i materiałoznawców w zakładach przemysłowych, pracowników zaplecza badawczo-rozwojowego i projektowego przemysłu, kadry naukowej i dydaktycznej instytutów badawczych oraz wyższych uczelni, a także słuchaczy specjalności materiałoznawczych i technologicznych.

Promuje i upowszechnia krajowe i światowe osiągnięcia w zakresie rozwoju zaawansowanych materiałów i technologii, w tym nowoczesnych stopów żelaza i metali nieżelaznych, stopów opartych na związkach międzymetalicznych, biomateriałów, kompozytów, materiałów warstwowych, inżynierii powierzchni, nanomateriałów i materiałów gradientowych.

Prezentuje zagadnienia dotyczące: projektowania, wytwarzania, badania oraz doboru i użytkowania materiałów metalowych, ceramicznych, polimerowych i kompozytów o przeznaczeniu konstrukcyjnym i funkcjonalnym.

Zapraszamy do lektury najnowszych wydań, a także do publikowania na naszych łamach.

- ✓ 6 wydań w roku, przeciętny zeszyt 40 stron
- ✓ internetowa baza publikacji od 2004 r. na Portalu Informacji Technicznej www.sigma-not.pl
- ✓ 40 punktów MNiSW



+48 663-311-933



i.materialowa@sigma-not.pl

WYDAWNICTWO SIGMA-NOT

