

Study of the mechanical properties of polymer foams used in the construction of firefighter's helmets

Badanie właściwości mechanicznych pianek polimerowych stosowanych w konstrukcji hełmów strażackich



DOI: 10.15199/62.2025.2.9

Samples of polyurethane foams from 3 different models of helmets made by Polish and foreign manufacturers were taken, and a compression test was carried out in accordance with the requirements of the std. The strength of foams previously kept in water for 2 and 12 h was also detd. Differences were found in the properties of the tested materials. The foam taken from a foreign manufacturer's helmet had the highest strength, stiffness and work to fracture. The material from helmet model 2 had the worst properties. Exposure of the foam to water for 2 h did not significantly affect its properties. However, exposure for 12 h increased the uncertainty of the foam's mech. properties.

Keywords: polyurethane foams, mechanical properties, helmets, impact energy

W ramach badań pobrano próbki z trzech różnych modeli hełmów wytwarzanych przez producentów z Polski i z zagranicy, po czym przeprowadzono próbę ściskania zgodnie z wymaganiami normowymi. W celu analizy wpływu narażenia na działanie wilgotnego środowiska przed próbą wytrzymałościową zanurzono próbki w wodzie destylowanej przez 2 i 12 h. Stwierdzono różnice właściwości badanych materiałów. Największą wytrzymałością, sztywnością oraz pracą potrzebną do zniszczenia charakteryzowała się pianka pobrana z hełmu zagranicznego producenta. Najgorszymi właściwościami cechował się materiał hełmu model 2. Narażenie pianki na działanie wody przez 2 h nie wpłynęło w sposób znaczący na jej właściwości. Narażenie przez 12 h wpłynęło na zwiększenie niepewności co do właściwości mechanicznych pianki.

Słowa kluczowe: pianki poliuretanowe, właściwości mechaniczne, hełmy, energia uderzenia

Pianki są materiałami porowatymi o małej gęstości względnej. Składają się ze szkieletu wzajemnie połączonych krawędzi i ścianek tworzących pojedyncze komórki. Wewnątrz komórek zbudowanych z ciała stałego znajduje się gaz lub ciecz. W zależności od właściwości sprężystych rozróżnia się pianki sztywne i elastyczne. Różnią się one mechanizmem niszczenia. Deformacja sztywnych pianek spowodowana jest odkształceniem plastycznym lub pęknięciem komórek, a elastycznych sprężystym zginaniem. Sztywne pianki stosowane są często w konstrukcjach warstwowych, w których istotną cechą jest odporność na

pęknięcie^{1,2}). Pianki elastyczne stosowane są jako materiały amortyzujące, w których nie dochodzi od razu do trwałego odkształcenia^{3,4}).

Do produkcji wkładek amortyzujących (absorberów energii) wykorzystywane są głównie pianki z polipropylenu spienionego (EPP), polistyrenu ekspandowanego (EPS) i poliuretanu elastomerowego (EPU). W hełmach strażackich dawniej jako wkładkę amortyzującą wykorzystywano polistyren ekspandowany, który w dalszym ciągu stosowany jest w kaskach motocyklowych. Spowodowane jest to dobrym stosunkiem właściwości do ceny^{5,6}). Pianki EPS wykazują dobrą zdolność pochłaniania energii, jednak w sytuacjach wielokrotnego uderzenia zdolność ta pogarsza się. Związane jest to ze zmianą sztywności spowodowaną zagęszczeniem materiału⁷). W procesie zagęszczenia dochodzi do trwałego odkształcenia materiału, przede wszystkim w zdarzeniach charakteryzujących się dużą energią uderzenia⁸). W związku z tym obecnie w hełmach strażackich stosowane są głównie pianki z EPU.

Właściwości mechaniczne pianek są bardzo istotne z punktu widzenia użytkownika. Materiał wkładki amortyzującej jest odpowiedzialny za pochłonięcie największej części energii uderzenia mechanicznego poprzez długotrwałą deformację⁹). W pracy Bottlang i współpr.¹⁰) wykazano, że hełmy



Mł. bryg. dr inż. Agata WALCZAK (ORCID: 0000-0002-0303-1748) w roku 2011 ukończyła studia w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie (obecnie Akademia Pożarnicza). Stopień doktora uzyskała w 2017 r. w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych w Warszawie. Pracuje w Akademii Pożarniczej na stanowisku badawczo-dydaktycznym w Zakładzie Sprzętu Ratowniczego. Specjalność – inżynieria bezpieczeństwa.

*** Adres do korespondencji:**

Akademia Pożarnicza, ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa, email: awalczak@apoz.edu.pl

ochronne zapewniały mniejszą ochronę przed uderzeniami bocznymi niż kaski typu II ze względu na niewystarczającą powierzchnię pokrycia skorup wkładką. W celu zapewnienia właściwej ochrony ważna jest także sztywność pianki. Musi być ona dostosowana do przewidywanych wartości obciążenia dynamicznego. W wyborze pianek stosowanych w konstrukcji ochron głowy należy także uwzględnić komfort użytkowania, który jest zależny od konstrukcji wnętrza ochron, czyli m.in. materiału wkładki¹¹⁾.

Właściwości mechaniczne pianek polimerowych, jak i innych materiałów, zależą od środowiska eksploatacji. Ważne jest zatem określenie nie tylko właściwości danych materiałów, ale i wpływu środowiska na te właściwości. Pianki stosowane w hełmach strażackich narażone są na działanie wilgotnego środowiska powodowanego m.in. poceniem się strażaka i wysoką wilgotnością otoczenia podczas działań ratowniczych.

W badaniach wykazano, że absorpcja wody wpływa na zmianę właściwości mechanicznych pianek poliuretanowych^{12, 13)}. Gupta i Woldesenbet¹⁴⁾ wykazali, że narażenie na ciecz w większości przypadków spowodowało spadek wartości modułu Younga. W pracy Wang i współpr.¹⁵⁾ opisano wyniki badań wpływu wody na wytrzymałość na ściskanie pianek poliuretanowych, prowadzonych w Hefei University of Technology w Chinach. W pracy Yang¹⁶⁾ stwierdzono nieznaczny spadek wytrzymałości na ściskanie pianek narażonych na działanie wody przez 24 h. Lu¹⁷⁾ zauważył wzrost wytrzymałości na ściskanie po narażeniu na działanie wody przez 96 h. Wzrost wytrzymałości wytłumaczono wypełnieniem komórek wodą.

W literaturze zauważono również wpływ czasu narażenia na zmianę właściwości mechanicznych pianek polimerowych. Zanurzenie w wodzie powoduje dyfuzję cząsteczek wody przez komórki i ścianki. May-Pat i Aviles¹²⁾ dopiero po kilku dniach zanurzenia pianki odnotowali spęczenie komórek. Największe spęczenie komórek (określone jako stosunek średniej wielkości komórek przed zanurzeniem do średniej wielkości komórek po zanurzeniu) zauważono po 21 dniach zanurzenia. Natomiast Kaewunruen i współpr.¹³⁾ zauważyli wpływ wielkości i grubości pianek na obszar spęczenia powierzchni już po 24 h zanurzenia pianek w wodzie.

Wpływ wilgotnego środowiska zależy od wielu czynników, m.in. od użytego polimeru, rozmiaru komórek oraz porowatości pianki i czasu narażenia na działanie wody. Należy więc określić wpływ wilgotnego środowiska na właściwości mechaniczne pianek stosowanych w budowie hełmów strażackich, uwzględniając realny czas narażenia na te warunki.

Celem pracy było określenie właściwości mechanicznych pianek polimerowych stosowanych w różnych modelach hełmów strażackich typu B spełniających wymagania zawarte w normie¹⁸⁾ i wstępne określenie wpływu wilgotnego środowiska na właściwości mechaniczne wybranej pianki polimerowej.

Część doświadczalna

Obiekt badań

Próbki pobrane z wkładek amortyzujących wykonanych z poliuretanu miały kształt prostopadłościanów o wymiarach $10 \times 10 \times 16$ mm. Pochodziły z różnych hełmów typu B spełniających wymagania zawarte w normie¹⁸⁾. Były to

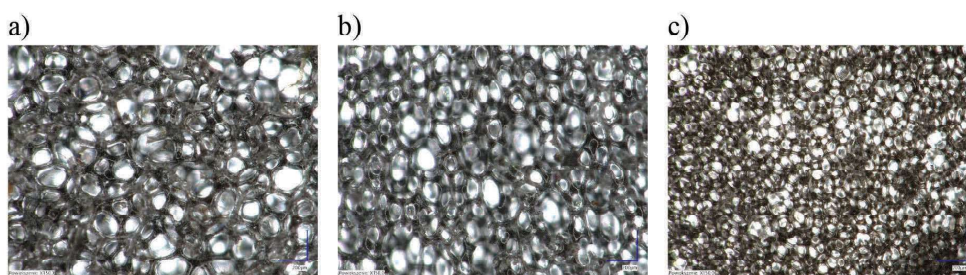


Fig. 1. Microscopic images of polymer foam cells taken from the cushioning inserts of helmets: a) model 1, b) model 2, c) model 3

Rys. 1. Zdjęcia mikroskopowe komórek pianek polimerowych pobranych z wkładek amortyzujących hełmów: a) model 1, b) model 2, c) model 3

hełmy wytwarzane przez polskich producentów (model 1 i 2) i producenta zagranicznego (model 3). Na rys. 1 przedstawiono zdjęcia mikroskopowe struktury pianek. Do analizy wpływu wilgotnego środowiska na właściwości pianki polimerowej pobrano próbki z wkładki hełmu modelu 1. Z uwagi na inne lata produkcji hełmów początkowe właściwości pianek były różne. Największym średnim polem powierzchni komórek cechowały się próbki pobrane z wkładki hełmu model 1 ($12\,652 \mu\text{m}^2$). Średnie pole

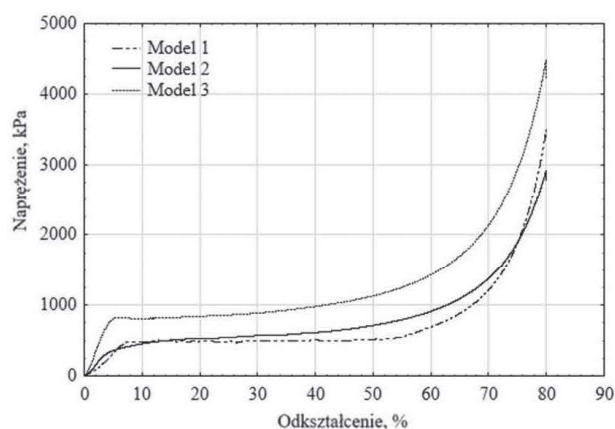


Fig. 2. Stress-strain characteristics of polymer foams

Rys. 2. Charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe pianek polimerowych

powierzchni komórek pianek absorbera z helmu model 2 wynosiło 10 737 μm^2 , a z modelu 3 – 5507 μm^2 . Oznacza to, że pianka pobrana z modelu 3 była najgęstsza.

Metodyka badań

Badanie właściwości mechanicznych pianek polimerowych

Badania właściwości mechanicznych pianek polimerowych wykonano w uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100. Wykorzystano głowicę siły o zakresie nominalnym 500 N. Badania prowadzono w warunkach obciążenia ściskającego *quasi*-statycznego do zniszczenia, z prędkością 5 mm/min, wg normy¹⁹⁾. Za zniszczenie przyjęto odkształcenie równe 80% początkowej wysokości próbki. Oznaczono następujące wielkości: naprężenie maksymalne (kPa), praca do zniszczenia (mJ), moduł Younga (MPa) oraz naprężenie przy 10-proc. odkształceniu (kPa).

Badanie wpływu wilgotnego środowiska

W celu symulacji wpływu wilgotnego środowiska na właściwości mechaniczne pianek polimerowych próbki zanurzano w wodzie destylowanej. Następnie naczynie z próbkami umieszczano w cieplarni w temp. 37°C. Próbki przetrzymywane były w cieplarni przez 2 i 12 h. Czasy narażenia zostały dobrane na podstawie czasów trwania interwencji prowadzonych przez strażaków Państwowej Straży Pożarnej w 2022 r.²⁰⁾. W czasie do 2 h prowadzonych było 85% zdarzeń, z czego ok. 29% w czasie 61–120 min,

w związku z tym za pierwszy czas narażenia pianek na oddziaływanie wilgotnego środowiska uznano 2 h. W czasie 2–12 h prowadzonych było ok. 13% interwencji, natomiast powyżej 12 h ok. 1%, więc za maksymalny czas trwania interwencji uznano 12 h.

W badaniach mikroskopowych wykorzystano mikroskop cyfrowy firmy Keyence serii VHX-7000. Badania mikroskopowe posłużyły do określenia wielkości komórek oraz analizy uszkodzeń pianek.

Wyniki badań

Właściwości mechaniczne pianek

Na rys. 2 przedstawiono reprezentatywne charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe uzyskane dla badanych pianek. W każdym przypadku wyraźne były 3 zakresy odkształceń: sprężysty, *plateau* i zagęszczenia pianki. Różnica w granicy plastyczności była znacząca i wynosiła od ok. 300 kPa (model 2) do ok. 700 kPa (model 3). Pianki o wyższej granicy plastyczności były sztywniejsze (odporniejsze na zginanie sprężyste), zawierały bardziej wytrzymałe ścianki komórek o lepszej odporności na wyboczenie²¹⁾. W niektórych przypadkach w zakresie *plateau* dochodziło do wyraźnego wzrostu naprężenia wraz ze wzrostem odkształcenia (model 2). Proces ten nie był korzystny ze względu na dyssypację energii mechanicznej i świadczył o powstawaniu trwałych zmian w strukturze. Jest on charakterystyczny dla pianek z polistyrenu ekspandowanego. Niemniej jednak, w niektórych badaniach pianek

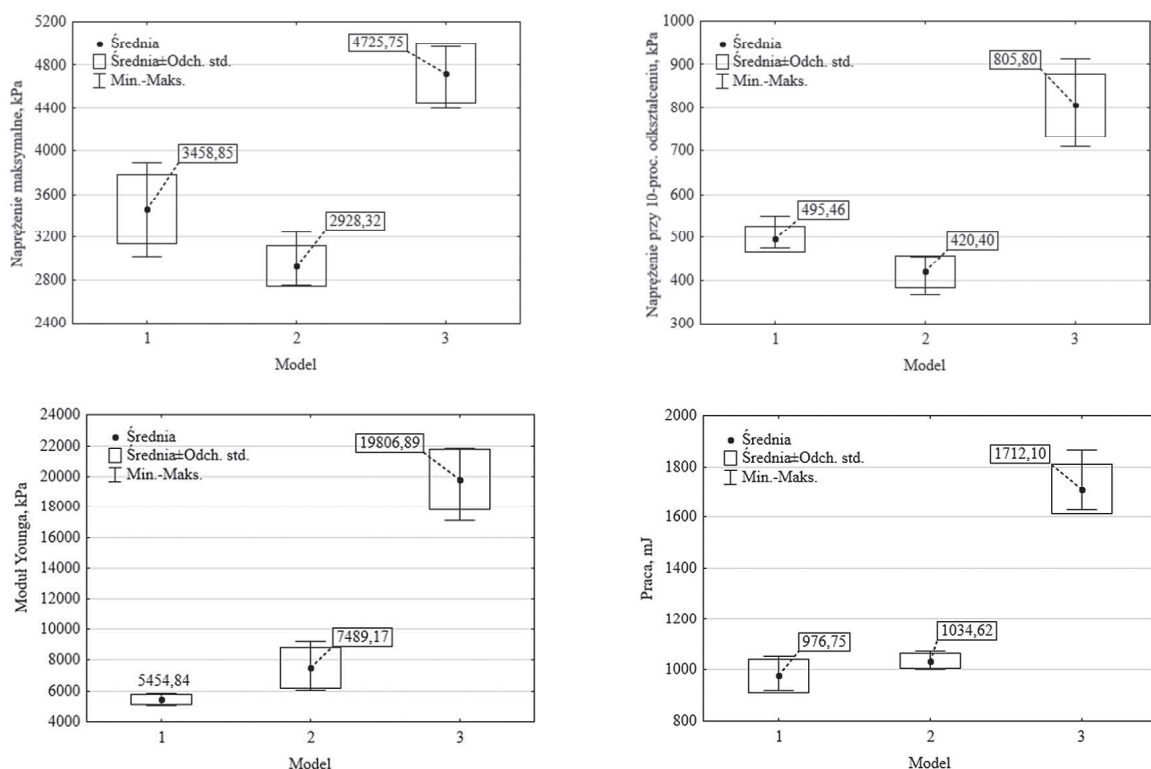


Fig. 3. Descriptive statistics of the results of the compressive strength test

Rys. 3. Statystyki opisowe wyników próby wytrzymałości na ściskanie

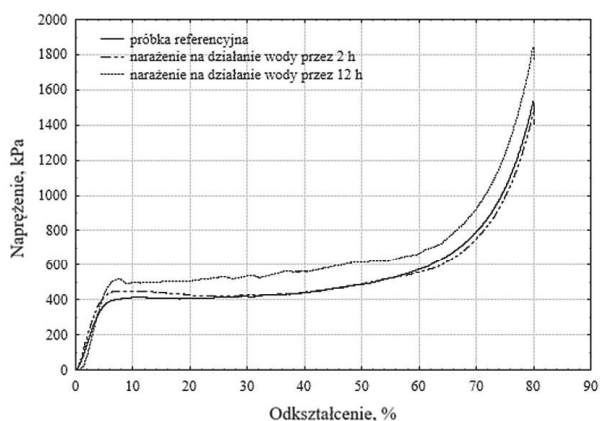


Fig. 4. Stress-strain characteristics of polymer foams kept in a wet environment conditions

Rys. 4. Charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe pianek polimerowych przetrzymywanych w warunkach wilgotnego środowiska

poliuretanowych również odnotowano dane zjawisko^{21, 22}. W przypadku pianek pobranych z modeli hełmów 1 i 3 zauważono długie *plateau* bez cech towarzyszących zagęszczeniu pianki. W każdym przypadku zagęszczenie intensyfikowało się przy ok. 70-proc. odkształceniu.

Na rys. 3 przedstawiono statystyki opisowe wartości naprężenia maksymalnego, naprężenia przy 10-proc. odkształceniu względnym, pracy do zniszczenia oraz modułu Younga. Uwzględniono wartości: średnie, odchylenia standardowego, minimalną i maksymalną. Widoczne były znaczące różnice w otrzymanych wartościach. Pianka wyko-

rzystywana w hełmach producenta zagranicznego charakteryzowała się dużo wyższymi wartościami analizowanych parametrów. Cechowała się większą wytrzymałością, była sztywniejsza i przed zniszczeniem pochłaniała największą ilość energii. Pianka z hełmu model 2 była sztywniejsza niż zastosowana w absorberze modelu 1. Nie przekładało się to jednak na jej właściwości wytrzymałościowe oraz zdolność pochłaniania energii. Pianka modelu 1 cechowała się większą wytrzymałością i mogła pochłonąć podobną ilość energii mechanicznej co pianka z absorbera hełmu model 2. Ponadto trwałe odkształcenia pianki modelu 2 powstały przy najmniejszym naprężeniu. Uwzględniając charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe, należy stwierdzić, że pianka z hełmu model 2 cechowała się najgorszymi właściwościami mechanicznymi.

Wpływ wilgotnego środowiska na właściwości mechaniczne pianek polimerowych

Na rys. 4 przedstawiono reprezentatywne charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe otrzymane w badaniach niszczących w warunkach wilgotnego środowiska. Podobnie jak w innych pracach zauważono wzrost naprężenia maksymalnego w przypadku pianek narażonych na działanie wody przez 12 h^{23, 24}. Narażenie na działanie wody przez 2 h nie wpłynęło w sposób znaczący na zmianę charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej.

W przypadku zanurzenia pianek przez 2 h w wodzie nie zauważono znaczących zmian w otrzymanych wynikach (rys. 5). W strukturze pianki obserwowano tylko deformacje

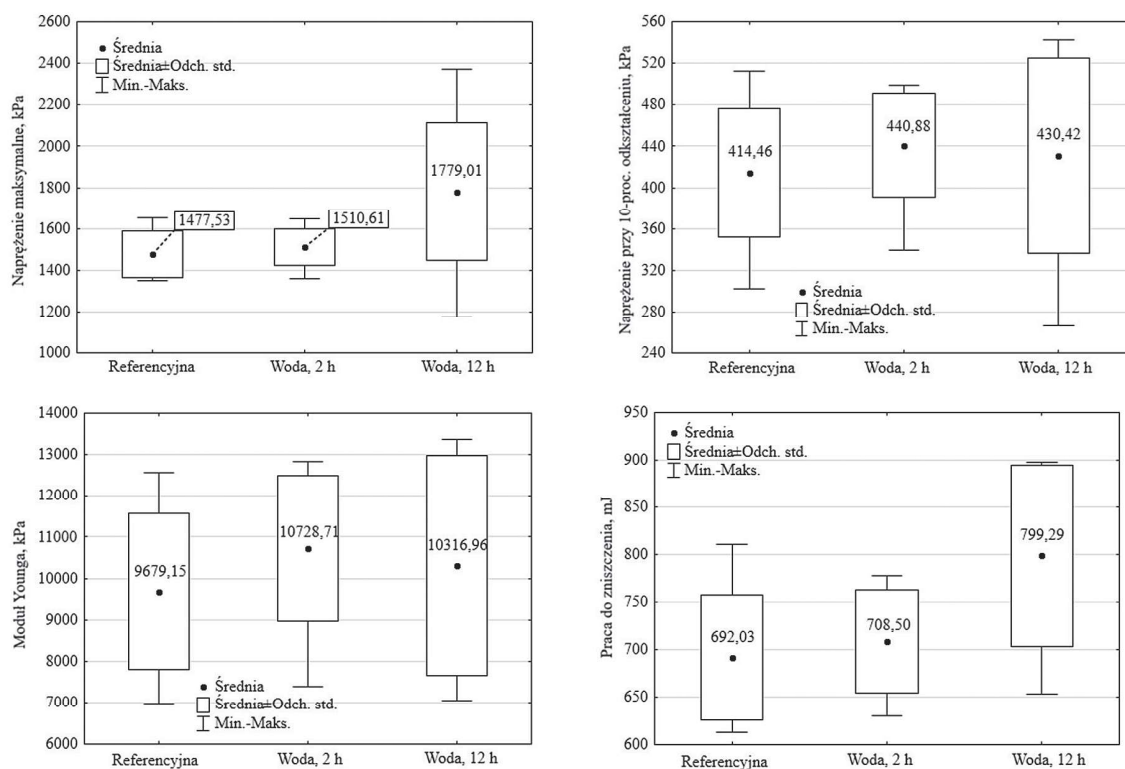


Fig. 5. Descriptive statistics of the results of compressive strength tests of samples kept in a wet environment

Rys. 5. Statystyki opisowe wyników próby wytrzymałości na ściskanie pianek przetrzymywanych w warunkach wilgotnego środowiska

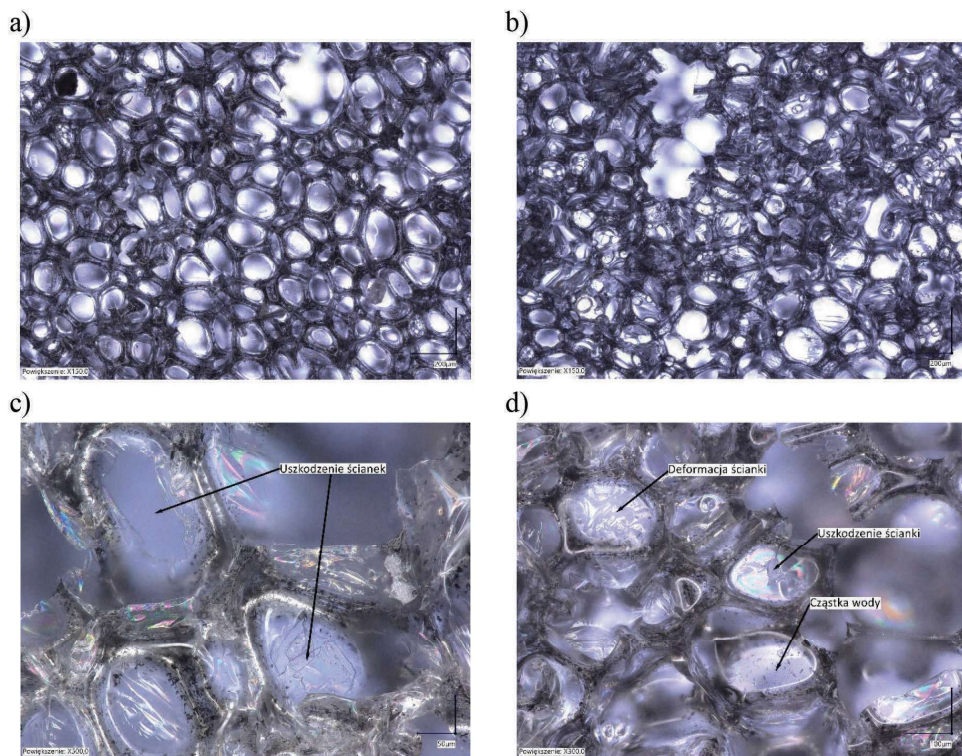


Fig. 6. Pictures of the surface layer of foams: a) not exposed to water, b) exposed for 2 h to water, c) and d) exposed for 12 h to water

Rys. 6. Zdjęcia warstwy wierzchniej pianek: a) nienałożonych na działanie wody, b) narażonych przez 2 h na działanie wody, c) i d) narażonych przez 12 h na działanie wody

ścianek komórek w warstwie wierzchniej (rys. 6b). Większe zmiany w strukturze warstwy wierzchniej zauważono po narażeniu przez 12 h na działanie wody. Widoczne były deformacje oraz pęknięcia ścianek komórek (rys. 6c i 6d). Zauważono istotną zmianę naprężenia maksymalnego oraz pracy do zniszczenia (rys. 5). Ponadto obserwowano największy rozrzut wyników pomiarów. Było to niekorzystne, gdyż właściwości pianki stawały się mniej przewidywalne, losowe. Wypełnienie komórek wodą mogło wpłynąć na wzrost analizowanych wartości. Natomiast uszkodzenia warstwy wierzchniej przy występowaniu większych defektów strukturalnych mogły wpłynąć na spadek wartości analizowanych wielkości.

Podsumowanie

W badaniach wykazano istotne różnice we właściwościach mechanicznych pianek polimerowych stosowanych w konstrukcjach hełmów strażackich typu B. Właściwości te przekładają się na zdolność pochłaniania energii uderzenia przez hełmy. Wykazano, że największą wytrzymałością, sztywnością oraz pracą potrzebną do zniszczenia charakteryzowała się pianka absorbera hełmu zagranicznego producenta. Najgorszymi właściwościami cechowała się pianka z hełmu model 2. W tym materiale zauważono wzrost naprężenia w zakresie *plateau*. Proces

ten jest niekorzystny, świadczy o powstaniu trwałych uszkodzeń w strukturze pianki. Narażenie pianek na działanie wody przez 2 h nie wpływa istotnie na ich właściwości. Narażenie na działanie wody przez 12 h spowodowało uszkodzenia ścianek w warstwie wierzchniej próbek. Ponadto wpłynęło na zwiększenie nieprzewidywalności co do właściwości mechanicznych pianki, co może się przekładać na amortyzację uderzenia przez hełm.

Praca została sfinansowana ze środków przyznanych Akademii Pożarniczej przez Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji na utrzymanie i rozwój potencjału badawczego w ramach wniosku RW-2/3.601.5.2024.

Otrzymano: 16-12-2024

Zrecenzowano: 04-01-2025

Zaakceptowano: 09-01-2025

Opublikowano: 20-02-2025

LITERATURA

- [1] J. Andersons, U. Cābulis, L. Stiebra, M. Kirplūks, E. Spārniņš, *Int. J. Fract.* 2017, **205**, 111.
- [2] E. Linul, L. Marsavina, [w:] *Fracture at all scales* (red. G. Pluvinage, L. Milovic), Springer, Cham 2017, 221.
- [3] S. Demirel, B.E. Tuna, *Polym. Test.* 2019, **76**, 146.
- [4] D.T. Morton, A. Reyes, A.H. Clausen, O.S. Hopperstad, *Mater. Today Commun.* 2020, **23**, 100917.
- [5] L. Di Landro, G. Sala, D. Olivieri, *Polym. Test.* 2002, **21**, 217.
- [6] M. Tabary, S. Ahmadi, M.H. Amirzade-Iranaqiinni, *Accid. Anal. Prev.* 2021, **154**, 106065.
- [7] S.J. Bonin, J.C. Gardiner, A. Onar-Thomas, S.S. Asfour, G.P. Siegmund, *Accid. Anal. Prev.* 2017, **106**, 315.
- [8] R.A. De Sousa, D. Gonçalves, R. Coelho, F. Teixeira-Dias, *Simul.-T. Soc. Mod. Sim.* 2021, **88**, 580.
- [9] A. Walczak, D. Pieniak, P. Lonkwić i in., *ASTRJ* 2023, **17**, 171.
- [10] M. Bottlang, M. Hodgdon, S. Tsai, S. Madey, *Saf. Sci.* 2023, **168**, 106296.
- [11] A. Krystosik-Gromadzińska, *JOSE* 2017, **24**, 91.
- [12] A. May-Pat, F. Aviles, *Mater. Des.* 2014, **57**, 728.
- [13] S. Kaewunruen, Ch. Ngamkhanong, M. Papealias, C. Roberts, *Constr. Build. Mater.* 2018, **187**, 1092.
- [14] N. Gupta, E. Woldesenbet, *Compos. Struct.* 2003, **61**, 311.
- [15] J. Wang, S. Gao, Ch. Zhang, Y. Deng, P. Zhang, *Polym.* 2022, **14**, 5099.
- [16] D.Y. Yang, Master's Thesis, Wuhan Engineering University, Wuhan, Chiny, 2015.
- [17] L. Lu, Master's Thesis, Hefei University of Technology, Hefei, Chiny, 2017.
- [18] EN 443:2008, *Hełmy stosowane podczas walki z ogniem w budynkach i innych obiektach*.
- [19] ISO 884:1978, *Cellular plastics. Compression test for rigid materials*.
- [20] <https://www.gov.pl/web/kgpsp/intervencje-ppsp>, dostęp 10.10.2024 r.
- [21] J. Bhinder, S.K. Verma, P.K. Agnihotri, *MSEB* 2021, **274**, 115496.
- [22] B.J. Ramirez, V. Gupta, *Mater. Des.* 2018, **137**, 298.
- [23] C.S. Karthikeyan, A. Kishore, S. Sankaran, *J. Reinf. Plast. Comp.* 2001, **20**, 982.
- [24] R.L. Sadler, M. Sharpe, R. Panduranga, K. Shivakumar, *Compos. Struct.* 2009, **90**, 330.