

dr inż. Daniel Pieniak

kpt. mgr inż. Agata Walczak

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

Wstępne badania degradacji mechanicznej materiałów wkładek absorbujących energię uderzenia wykorzystywanych w hełmach strażackich

Streszczenie

Do podstawowych funkcji hełmu strażackiego należy przechwycenie energii obciążenia zewnętrznego i jej rozproszenie w sposób bezpieczny dla strażaka ratownika. Wkładka absorpcyjna to drugi element, po skorupie, absorbujący energię uderzenia. Wykonana jest zwykle ze sztywnych materiałów porowatych, np. pianki poliuretanowej lub styropianowej. Wkładka często oddzielona jest od głowy wyłącznikiem cienką siatką, przez co podczas cyklicznego wkładania hełmu na głowę, w wyniku kontaktu, powstają cykliczne obciążenia eksploatacyjne. Ponadto w trakcie działań ratowniczo-gaśniczych, często dochodzi do niskoenergetycznych uderzeń hełmem, np. w przeszkodę w zadymionym pomieszczeniu. Cykliczne naprężenia ściskające, powstające w materiale wkładki, mogą powodować lokalne zmiany w strukturze materiału, np. lokalne zagęszczenie pianki w wyniku deformacji. W wyniku deformacji może zmienić się zdolność materiału wkładki do przeniesienia obciążeń krytycznych.

W odniesieniu do materiału absorbera stawiane jest wymaganie, aby naprężenie przy uderzeniu nie przekraczało wartości granicznej, przy jednoczesnym uzyskaniu jak największej wartości pochłoniętej energii (jak największego pola pod wykresem naprężenie – odkształcenie). W obecnie wytwarzanych hełmach właściwość ta może być odmienna od charakteryzującej struktury hełmów użytkowanych przez kilka lat.

Degradacja mechaniczna struktury materiału wkładki amortyzującej może prowadzić do pogorszenia właściwości absorpcyjnych. Dotychczas prowadzi się niewiele badań w tym kierunku. Jednakże jest to istotny problem, choćby z tego powodu, że uszkodzenia wkładki amortyzującej są trudne do wykrycia i zazwyczaj nie są podstawą do wycofania hełmu z eksploatacji.

Słowa kluczowe: hełm strażacki, próba ściskania

Preliminary Studies of Mechanical Degradation of Materials Used for Inserts Absorbing Impact Energy in Firefighters' Helmets

Abstract:

A basic function of firefighter's helmet is to absorb the energy of external load and disperse it in a safe manner for a firefighter. The absorptive insert is a second component after helmet's shell absorbing impact energy. It is usually made of a rigid porous material such as for example polyurethane or polystyrene foam. The insert is often separated from the firefighter's head only with a thin mesh, thus due to a repeated insertion of the helmet, the cyclic operational loads occur. Additionally, during the rescue and firefighting operations, the low energy impacts with helmet occurs e.g. hitting an obstacle in a smoky room. The cyclic compressive stresses taking place in the insert material can cause local changes in the material structure e.g. local foam compaction due to deformation. As a result of the deformation, an ability of the insert material to transfer critical loads can be changed.

With regards to the absorber's material, it is required that tension on impact does not exceed critical value reaching at the same time the highest value of absorbed energy (the largest area under stress – strain graph). In nowadays produced helmets this property can differ from the structure of the older helmets in use.

Mechanical degradation of insert material structure can lead to the deterioration of absorptive properties. So far, there are not many studies concerning that problem. However, it is a crucial problem even if by the reason of the fact that the damages of the insert are difficult to detect and usually are not the basis for the withdrawal of the helmets from the operational use.

Keywords: firefighter's helmet, compression test

1. WSTĘP

Główne zagrożenia występujące podczas prowadzenia działań ratowniczo-gaśniczych, w szczególności podczas pożarów wewnętrznych, pochodzą od czynników cieplnych i mechanicznych. Na zagrożenia mechaniczne w szczególności narażona jest głowa strażaka, chroniona przez hełm strażacki. Zadaniem hełmu jest m.in. absorbowanie części energii mechanicznej uderzenia działającej w kierunku ratownika. Ochrony indywidualne

chronią głowę przed obciążeniem udarowym jednokrotnym, pochodzącym od np.: oderwanego elementu konstrukcji [1], uderzeniem w wystające pręty zbrojeniowe, w niewidoczną przeszkodę czy też, co zdarza się rzadko, uderzeniem odłamków w trakcie wybuchu. Dynamiczny sposób obciążenia charakteryzuje krótkotrwałe, impulsowe działanie o dużej amplitudzie. Minimalizacja niekorzystnych skutków udarowych tego działania jest ważnym problemem.

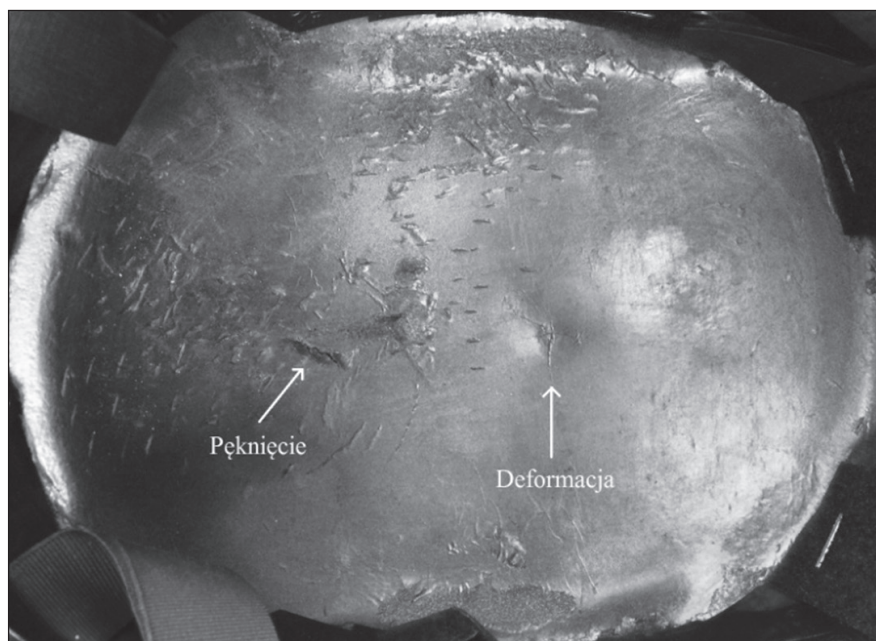
Do podstawowych elementów konstrukcji hełmu zalicza się skorupę, wkładkę absorbującą, więźbę, wizjer oraz kołnierz. Skorupa hełmu strażackiego, jako element zewnętrznym konstrukcji, przyjmuje uderzenie, pochłaniając część energii. Chroni również przed penetracją ostrych elementów w kierunku głowy. Zadaniem wkładki amortyzującej (rys. 2) jest absorpcja zewnętrznych obciążeń dynamicznych i dyssypacja energii uderzenia. Proces ten polega na zamianie energii kinetycznej na inną postać energii, w stabilny i kontrolowany sposób. Materiał wkładki, pochłania większą część energii udaru mechanicznego niż skorupa, głównie dzięki powolnej, stosunkowo długotrwałej deformacji [6]. Taki mechanizm sprzyja zwiększonej pracy odkształcenia i skutecznej dyssypacji energii udaru. Poza podstawową funkcją, absorber – wkładka amortyzująca, powinien ulegać deformacji w stopniu zapewniającym „przestrzeń przeżycia” chronionej osobie. Ponadto powinien ograniczać przyspieszenia [3] i redystrybucję sił w kierunku ciała ratownika [2,7]. Ze względu na mechanizm działania, absorber zastosowany w hełmie strażackim, jest pasywnym absorberem wielokrotnego działania, jeżeli energia kolejnego wymuszenia nie osiąga wartości krytycznych. Absorber, oprócz funkcji dyssypacji energii uderzenia, ma również służyć do częściowego przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych.

Wkładka amortyzująca wykonana jest zwykle ze sztywnych materiałów porowatych, zazwyczaj pianek polimerowych. Materiały te mają wiele korzystnych cech, charakteryzują się niską masą, wysoką gęstością dyssypowanej energii, niskim modułem sprężystości zapewniającym sztywność zbliżoną do ludzkich tkanek [7]. Pianki stosowane w hełmach strażackich, ze względu na swoją budowę, cechy wytrzymałościowe i cykliczny stan obciążenia, mogą ulegać stopniowemu niszczeniu w wyniku uszkodzeń struktury.

Obciążenia absorberów powstające w warunkach działań o charakterze rutynowym, mają zazwyczaj charakter quasi-statyczny. Związane są z osadzeniem hełmu na głowie i ruchami strażaka w kierunku pionowym.

W trakcie działań ratowniczo-gaśniczych, w kierunku hełmu działają obciążenia dynamiczne o stosunkowo niewielkiej energii (podkrytycznej), np. pochodzące od uderzenia w niewidoczną przeszkodę lub upuszczenia hełmu z niewielkiej wysokości podczas przenoszenia lub zdejmowania. Rozwój i kumulacja uszkodzeń, związane są z cyklicznym użytkowaniem hełmu. Pośród uszkodzeń eksploatacyjnych podkrytycznych dominują lokalne deformacje i pęknięcia (rys. 1).

W związku z powyższym, przyjęto założenie: materiał wkładki amortyzującej nie powinien ulec pęknięciu niszczącemu – naprężenia nie powinny przekroczyć wytrzymałości, jednocześnie materiał powinien zaabsorbować i dysypować jak najwięcej energii uderzenia. Co w praktyce może być ocenione na podstawie pola powierzchni pod wykresem naprężenie – odkształcenie [3], tzw. „plateau” oraz rozmiaru i kształtu pętli histerezy w próbie ściskania jednoosiowego. Uszkodzenia mechaniczne struktury materiału wkładki amortyzującej, powodowane obciążeniami eksploatacyjnymi podkrytycznymi, mogą prowadzić do częściowej utraty zdolności do absorbowania energii (m.in. zmniejszenia pola powierzchni pod wykresem naprężenie – odkształcenie).

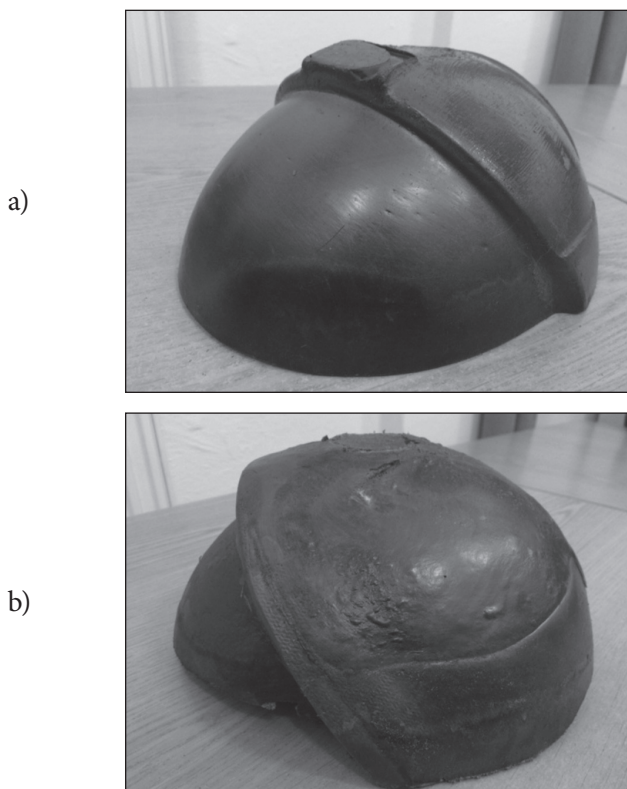


Rys. 1. Uszkodzenia eksploatacyjne pianek amortyzujących

Źródło: Opracowanie własne

2. METODA BADAŃ MATERIAŁU WKŁADKI ABSORBUJĄCEJ ENERGIĘ UDERZENIA

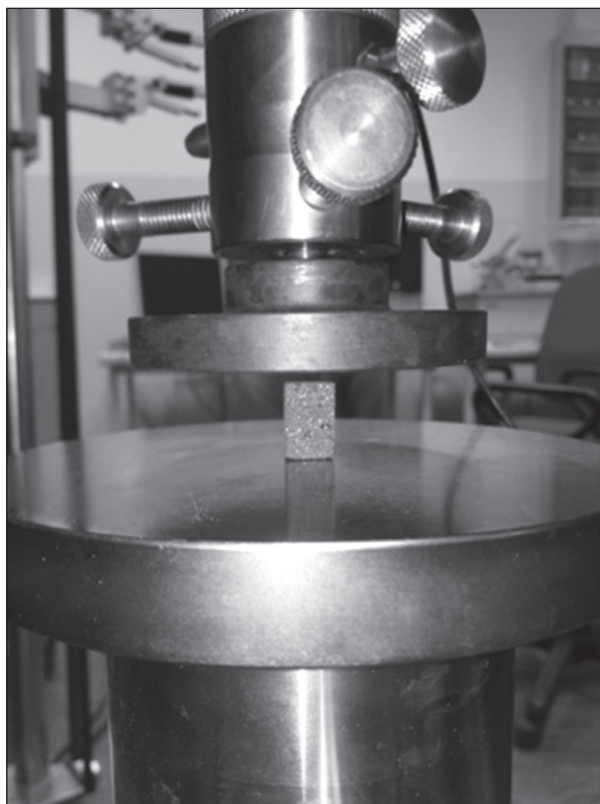
Próbki do badań wycinano z wkładek amortyzujących montowanych w najpopularniejszych w naszym kraju hełmach strażackich użytkowanych przez ratowników Państwowej Straży Pożarnej (PSP). Ze względu na możliwość porównania, wykorzystano taki sam model hełmu krajowego producenta. Jako referencyjne użyto próbki bez historii obciążenia, pozyskane z nowych hełmów. Następnie badano próbki pobrane z hełmów użytkowanych przez 4 lata w jednostce ratowniczo-gaśniczej (JRG) Szkoły Głównej Służby Pożarnej (SGSP) w Warszawie. Próbki do badań wykonano w kształcie prostopadłościanów o wymiarach 16 mm × 10 mm × 10 mm [6].



Rys. 2. Wkładki amortyzujące uderzenie stosowane w hełmach strażackich: a) nowa – bez historii obciążenia, b) używana przez okres 4 lat w JRG SGSP

Źródło: Opracowanie własne

Badanie wytrzymałości, w warunkach obciążenia quasi-statycznego, wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell (rys. 3). Wykorzystano głowicę siły o zakresie nominalnym 500 N. Próbę ściskania wykonano wg normy technicznej ISO 844 [9]. Obciążenie realizowano ze stałą prędkością, która wynosiła $10\% \epsilon / \text{min}$.



Rys. 3. Próba ściskania materiału absorbera

Źródło: Opracowanie własne

Próbę obciążenia dynamicznego zrealizowano na tym samym stanowisku badawczym. Przyjęto następujące prędkości badania: do siły wstępnej 50 mm/min, w trakcie obciążania w cyklu – 100 mm/min, w trakcie odciążania w cyklu 50 mm/min (ze względu na retardację). Spośród parametrów cykli ściskania wpływających na przebieg niszczenia materiału wkładki, największe znaczenie ma amplituda obciążenia. Dla celów porównawczych wykonano program obciążenia uwzględniający 10 cykli o rosnącej mono-

tonicznie amplitudzie obciążenia. Obciążenie początkowe wynosiło 50 kPa, w każdym kolejnym cyklu amplituda obciążenia wzrastała o 50 kPa. Maksymalną amplitudę odniesiono do poziomu „plateau” materiałów wkładek, wyznaczonego w próbie statycznej. Na podstawie uzyskanych histerez obliczono wartości energii mechanicznej (odkształcenia) rozproszonej w każdym cyklu. Zależność uzyskuje się za pomocą całkowania numerycznego pola pod wykresem w części „obciążenia” – W_{iBel} , „odciążenia” – W_{iEnt} i pola powierzchni pętli histerezy – ΔW (energia dyssypacji). Ponadto obliczono całkowitą energię odkształcenia podczas obciążenia cyklicznego – $W(F_{max})$. Dodatkowym celem próby było wykazanie różnic w sztywności dynamicznej obu badanych struktur, która może być traktowana jako miara uszkodzenia.

3. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

W tabeli 1 i 2 przedstawiono wyniki badań próby ściskania wykonanej w warunkach obciążenia quasi-statycznego. Uwzględniono następujące wielkości: $\sigma_{(10\%F_{max})}$ – naprężenie odpowiadające 10% siły maksymalnej F_{max} , $W_{(10\%F_{max})}$ – pracę odkształcenia odpowiadającą 10% siły maksymalnej F_{max} , F_{max} – siłę maksymalną, ϵ_{max} – odkształcenie maksymalne, $W_{(F_{max})}$ – pracę odkształcenia do siły maksymalnej, E_d – moduł sprężystości, $F_{(\epsilon 10\%)}$ – siłę przy odkształceniu 10% oraz $\sigma_{(\epsilon 10\%)}$ – naprężenie przy odkształceniu 10%.

Tab. 1. Wyniki badań uzyskane w próbie ściskania w warunkach obciążenia quasi-statycznego próbek wykonanych z wkładek amortyzujących uderzenia hełmu strażackiego bez historii obciążenia

Parametr statystyczny	$\sigma_{(10\%F_{max})}$ [kPa]	$W_{(10\%F_{max})}$ [mJ]	F_{max} [N]	ϵ_{max} [mm]	$W_{(F_{max})}$ [mJ]	E_d [MPa]	$F_{(\epsilon 10\%)}$ [N]	$\sigma_{(\epsilon 10\%)}$ [kPa]
Średnia	186,50	42,53	197,05	12,12	799,95	6,57	50,1	480
Odchylenie standardowe s	15,3	7,81	18,29	0,21	83,33	0,919	3,21	48,6
Wsp. zmienności v [%]	8,2	18,36	9,28	1,71	10,42	13,99	6,40	10,13

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 2. Wyniki badań uzyskane w próbie ściskania w warunkach obciążenia quasi-statycznego próbek wykonanych z wkładek amortyzujących uderzenia hełmu strażackiego użytkowanych przez 4 lata w JRG

Parametr statystyczny	$\sigma_{(10\%F_{\max})}$ [kPa]	$W_{(10\%F_{\max})}$ [mJ]	F_{\max} [N]	ϵ_{\max} [mm]	$W_{(F_{\max})}$ [mJ]	E_d [MPa]	$F_{(\epsilon 10\%)}$ [N]	$\sigma_{(\epsilon 10\%)}$ [kPa]
Średnia	107,69	23,9	109,54	12,78	524,86	4,27	25,8	252
Odchylenie standardowe s	19,15	6,06	19,12	0,06	72,94	1,26	3,59	37,9
Wsp. zmienności v [%]	17,78	25,37	17,46	0,44	13,9	26,7	13,91	15,03

Źródło: Opracowanie własne

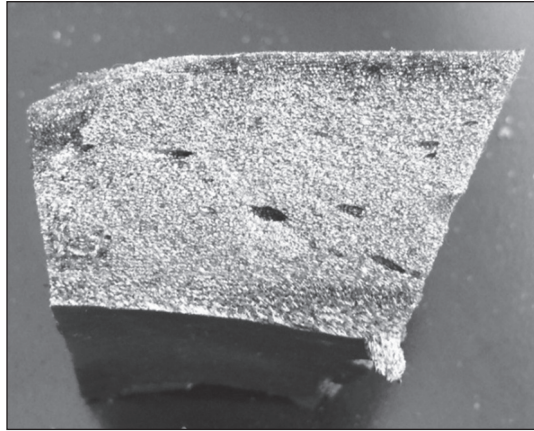
Wyniki próby ściskania w warunkach obciążenia quasi-statycznego wskazują wpływ struktury i eksploatacji na właściwości mechaniczne materiału wkładek. Obserwowano niższe wartości parametrów mechanicznych materiału wkładek używanych. Pod wpływem eksploatacji spadkowi uległa wytrzymałość, sztywność oraz zdolność do pochłaniania energii materiału. Przykładowo, siła maksymalna była niższa o 87,51 N (44%), moduł sprężystości o 2,3 MPa (35%) a praca odkształcenia do siły maksymalnej o 275,09 mJ (34%). Ponadto należy zauważyć, że większość analizowanych wielkości materiału z historią obciążenia, charakteryzowało się wyższymi wartościami współczynnika zmienności w stosunku do materiału bez historii obciążenia. Może to świadczyć o występowaniu większej ilości wad (np. pustek) w materiale z historią obciążenia (rys. 4).

W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań próby ściskania w warunkach obciążeń dynamicznych, cyklicznych. Uwzględniono następujące parametry: numer cyklu, W_{iBel} – pracę odkształcenia do obciążenia, W_{iEnt} – pracę odkształcenia do odciążenia, ΔW_i – energię dyssypacji, F_{\max} – siłę maksymalną, $d_L(F_{\max})$ – wydłużenie przy sile maksymalnej, $W(F_{\max})$ – pracę odkształcenia do siły maksymalnej, t_{badania} – czas trwania badania.

Tab. 3. Wyniki próby ściskania w warunkach obciążeń dynamicznych tętniących monotonicznie rosnących

Nr cyklu	$W_{i_{Bel}}$ [mJ]	$W_{i_{Ent}}$ [mJ]	ΔW_i [mJ]	F_{max} [N]	$dL(F_{max})$ [mm]	$W(F_{max})$ [mJ]	$t_{badania}$ [s]
Nowy							
1	0,38	0,36	0,01	54,5	1,5	66,34	200,56
2	1,38	1,13	0,25				
3	2,57	2,12	0,46				
4	4,05	3,31	0,73				
5	5,92	4,70	1,23				
6	8,24	6,38	1,86				
7	11,22	8,25	2,97				
8	15,12	10,36	4,76				
9	21,52	12,52	9,00				
10	44,86	14,74	30,13				
4 lata użytkowania							
1	0,38	0,38	0,001	51,4	8,1	363,25	329,11
2	1,41	1,27	0,13				
3	2,93	2,54	0,38				
4	5,16	4,28	0,88				
5	8,36	6,64	1,72				
6	13,07	9,73	3,34				
7	26,45	14,13	12,32				
8	153,71	26,68	127,04				
9	134,63	31,68	102,95				
10	113,84	35,89	77,95				

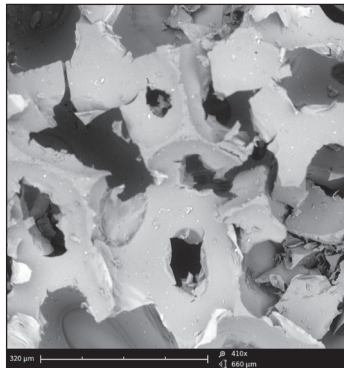
Źródło: Opracowanie własne



Rys. 4. Uszkodzenia wewnętrzne wkładki użytkowanej przez 4 lata
Źródło: Opracowanie własne

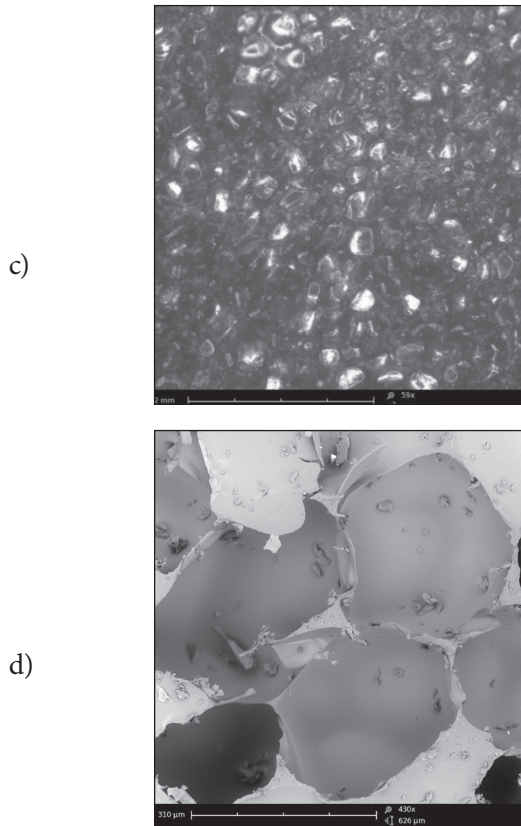
Na rys. 5 przedstawiono zdjęcia z mikroskopu skaningowego struktury badanych materiałów.

a)



b)





Rys. 5. Obrazy SEM i obraz optyczny struktury badanych próbek: a) struktura próbki bez historii obciążenia eksploatacyjnego, b) struktura próbki materiału eksploatowanego, obraz z kamery optycznej (c) i SEM próbki pozyskanej z hełmu eksploatowanego przez 4 lata (d)

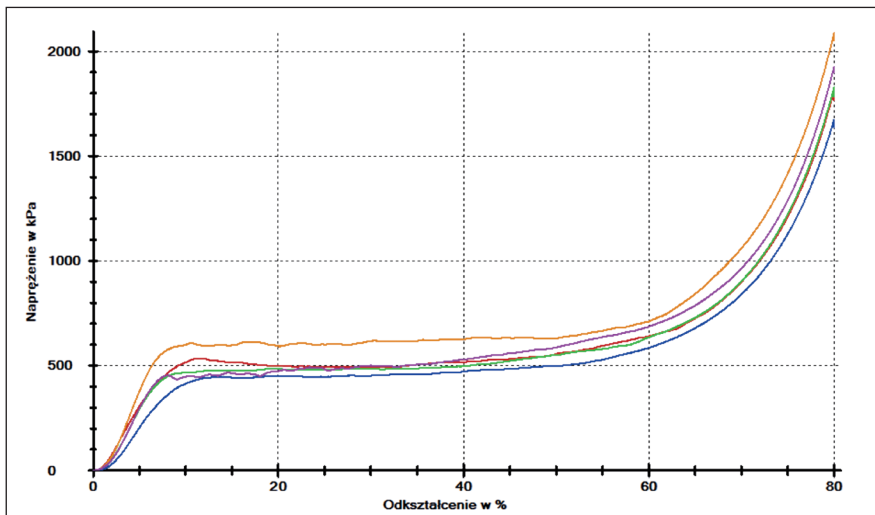
Źródło: Opracowanie własne

Na rys. 6 i 7 przedstawiono charakterystyki σ - ϵ próby ściskania w warunkach obciążenia quasi-statycznego wkładek amortyzujących uderzenia hełmu strażackiego. Na rys. 8 przedstawiono pętle histerezy uzyskane w próbie ściskania w warunkach dynamicznych i cyklicznych.

Wykresy naprężenie-odkształcenie materiałów wkładek amortyzujących otrzymane w próbie ściskania w warunkach obciążenia quasi-statycznego mają podobny przebieg. Główna różnica między przebiegami wykresów polega na nachyleniu oraz wysokości plateau. Wzrost naprężenia powoduje wzrost odkształcenia aż do ok. 10% (w przypadku materiału bez historii

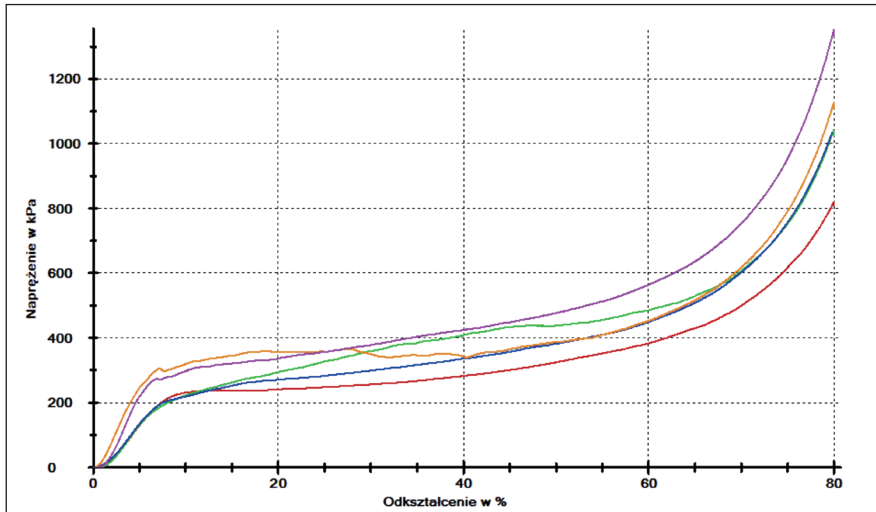
obciążenia) i ok. 8% (w przypadku materiału z historią obciążenia). W materiale nowym naprężenia są wyższe niż w używanym. W nowym materiale, następuje znaczne zwiększenie odkształcenia przy prawie stałym obciążeniu. W przypadku używanego jest podobnie, widoczny jest wzrost odkształcenia, jednak następuje ono przy niższym obciążeniu. Po przekroczeniu poziomu odkształcenia, wynoszącego dla materiałów nowego ok. 60% i 70% dla używanego, dochodzi do znacznego zwiększenia obciążenia, przy jednoczesnym, stosunkowo niewielkim wzroście odkształcenia.

Kształt i rozmiary pętli histerezy różnią się istotnie. Dla obu testowanych materiałów odkształcenia rosną w funkcji obciążenia. Jednakże, efekt działania podkrytycznego obciążenia mechanicznego jest bardziej zauważalny w przypadku materiału eksploatowanego przez 4 lata. Wyraźna jest granica powstawania dużej retardacji odkształcenia po 7 cyklu.



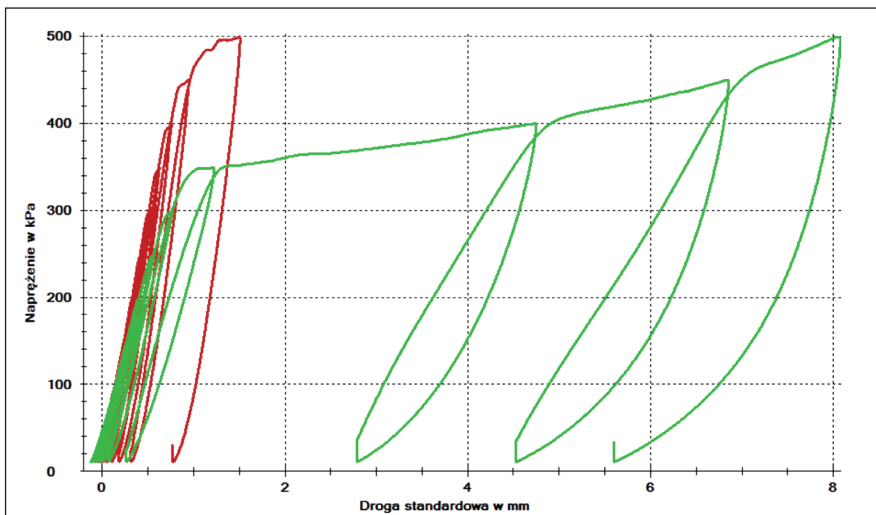
Rys. 6. Charakterystyka σ - ϵ nowych wkładek amortyzujących obciążenia z próby ściskania w warunkach obciążenia quasi-statycznego

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7. Charakterystyka σ - ε używanych wkładek amortyzujących z próby ściskania w warunkach obciążenia quasi-statycznego

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 8. Pętle histerezy uzyskane w kolejnych cyklach narastającego obciążenia tętniącego próbek pianek pobranych z absorberów nowych (bez historii obciążenia – kolor czerwony) i użytkowanych przez 4 lata (kolor zielony)

Źródło: Opracowanie własne

4. WNIOSKI

Podczas prac nad wkładkami amortyzującymi sformułowano następujące wnioski:

1. Uzyskane w badaniach krzywe odkształcenie-naprężenie są zgodne z opisywanymi w literaturze. Charakterystyki zawierają strefę nieliniową-sprężystą (z małymi deformacjami plastycznymi), strefę quasi-liniową plateau oraz nieliniową strefę zagęszczania materiału [4]. Strefa plateau jest wyraźniej zaznaczona w próbkach bez historii obciążenia. Koniec tej strefy wyznacza najczęściej granicę efektywnego wykorzystania materiału [3]. W przypadku obydwu grup próbek wyraźne przejście do strefy zagęszczenia materiału następuje przy odkształceniu na poziomie 60%.
2. Zakłada się, że obciążenia eksploatacyjne materiałów porowatych nie powinny przekraczać 10% obciążeń niszczących – krytycznych [6]. W badaniach wykazano, że próbki pozyskane z nowych hełmów cechuje wyższy poziom obciążeń dopuszczalnych.
3. Wyniki badań quasi-statycznych wykazały wyższy rozrzut właściwości materiałów porowatych użytkowanych przez 4 lata, może on być wynikiem nierównomiernego starzenia materiału w objętości wkładki oraz związany z występowaniem lokalnych imperfekcji struktury.
4. Próbki pianki bez historii obciążenia wykazywały wyższą wartość siły maksymalnej, przy tej samej wartości odkształcenia, co może przekładać się na wyższą wartość przenoszonego przyspieszenia opóźniającego [5].
5. Materiał nowy cechuje się wyższą sztywności. Wyższa sztywność powoduje większą niezgodność z tkankami ludzkimi.
6. W badaniach dynamicznych, obydwa badane materiały zaabsorbowały energię wymuszenia, materiał hełmu używanego podczas cykli obciążenia o największej amplitudzie nie powrócił (od 8 cyklu) do wymiarów zbliżonych do początkowych po impulsie obciążenia, chociaż zakres obciążenia został dobrany w zakresie plateau.
7. W kolejnych etapach, planuje się prowadzenie przedmiotowych badań pod działaniem obciążeń udarowych.

LITERATURA

- [1] Bednarek Z., Drzymała T. Zagrozenie występowania eksplozyjnego odpryskiwania betonu w czasie pożaru w tunelach komunikacyjnych. Konferencja Naukowo-Techniczna „Transcomp 2015”.
- [2] Jamroziak K. Próba oceny urazu głowy w ochronie balistycznej miękkiej. *Modelowanie Inżynierskie* 2011, nr 42, s. 179–190.
- [3] Jankowski M., Kotelko M. Doświadczalna identyfikacja związków fizycznych w piankach poliuretanowych. *Przegląd Mechaniczny* 2010, nr 4, s. 30–33.
- [4] Kłasztorny M., Małachowski J., Dziewulski P., Nycz D., Gotowicki P. Badania eksperymentalne i modelowanie piany aluminiowej Alporas. *Modelowanie Inżynierskie* 2011, nr 42, s. 97–112.
- [5] Lisiecki J., Błażejewicz T., Kłysz S., Gmurczyk G. Wytworzenie i badanie elastycznej pianki poliuretanowej o ujemnym współczynniku Poissona. *Modelowanie Inżynierskie* 2011, nr 42, s. 241–248.
- [6] Liu D., Chang C., Fan C., Hsu S. Influence of environmental factors on energy absorption degradation of polystyrene foam in protective helmets. *Engineering Failure Analysis* 2003, nr 10, s. 581–591.
- [7] Pawłowski K. Rozprawa doktorska pt. Systemy adaptacyjnej absorpcji obciążeń udarowych. Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 2011.