

Daniel PIENIAK, Agata WALCZAK, Renata KAMOCKA-BRONISZ, Leszek GIL

Ocena doświadczalna pozostałej wytrzymałości i sztywności kompozytu polimerowego stosowanego w konstrukcji hełmów strażackich ze względu na temperaturę środowiska eksploatacji

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych właściwości mechanicznych kompozytu stosowanego w konstrukcji hełmów strażackich w symulowanych warunkach operacyjnych. Do badań wykorzystano próbki z poliamidu PA66 wzmocnionego włóknem szklanym, stosowanego do wytwarzania skorup hełmów strażackich metodą wtryskiwania. Przeprowadzono testy wytrzymałości statycznej i dynamicznej (udarowej). Próbkę poddano oddziaływaniu podwyższonej temperatury przed testem wytrzymałościowym lub w jej trakcie, w zależności od rodzaju obciążenia. Wykazano znaczący wpływ historii obciążenia eksploatacyjnego na właściwości mechaniczne poliamidu PA66 wzmocnionego włóknem szklanym. Ponadto, w przypadku wymuszenia udarowego, zanotowano zmianę charakteru zniszczenia kompozytu ze sprężysto-kruchości na sprężysto-plastyczny pod wpływem oddziaływania podwyższonej temperatury. Określone w symulowanych warunkach eksploatacji właściwości mechaniczne materiału, wykorzystywanego do wyrobu skorup, mogą być przydatne do modelowania budowy hełmów strażackich i

analiz,

np.

MES.

WSTĘP

Pożary, zwłaszcza wewnętrzne, charakteryzuje występowanie czynników o charakterze cieplnym i mechanicznym. Główne źródła zagrożenia termicznego w pracy strażaka stanowią gorące powierzchnie i gorące gazy. Ich intensywność działania zależy przede wszystkim od gęstości strumienia cieplnego, składu gazu lub dymu i temperatury [1]. Środowisko pożaru może działać bezpośrednio na ochronę indywidualną strażaka, co zauważono w trakcie działań oraz ćwiczeń gaśniczych. W przypadku skorup niektórych hełmów strażackich zanotowano łatwość odkształcania się i wystąpienie nadtopienia na powierzchni. Informacje te znalazły potwierdzenie w badaniach całych hełmów strażackich opublikowanych w pracy [2]. Wykazano w nich istotny wpływ mięknięcia tworzywa skorupy hełmu, po obróbie strumieniem gorącego powietrza na wartość maksymalnych sił działających na makietę głowy, na której osadzono hełm. W przypadku hełmu obrobionego cieplnie obserwowano niższe wartości sił czynnych i biernych redystrybuowanych w kierunku kręgosłupa szyjnego. Jednakże czas trwania impulsu siły był dłuższy, co jest niekorzystne (tę wielkość ujęto w kryterium HIC – Head Injury Criterion, stanowiącym miarę tolerancji obrażeń głowy wg [3]).

Według dyrektywy 89/656/EWG [4], w której zawarto główne zasady konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne środków ochrony indywidualnej, hełm strażacki to urządzenie – środek ochrony indywidualnej służący ochronie zdrowia i zapewnieniu bezpieczeństwa na możliwie najwyższym poziomie ochrony. Głównym zadaniem hełmu jest ochrona głowy ratownika przed narażeniami mechanicznymi występującymi w trakcie działań operacyjnych i ćwiczeń. Działanie obciążenia mechanicznego statycznego powstającego np. podczas zasypiania głowy ratownika, charakteryzuje się długotrwałą względną niezmiennością wartości przyłożonego obciążenia. Dynamiczny sposób obciążenia charakteryzuje krótkotrwałe, impulsowe działanie o dużej amplitudzie [2] i najczęściej związane jest z udarem mechanicznym działającym na hełm. Konstrukcja hełmu strażackiego powinna być zdolna do przeniesienia takich obciążeń oraz absorpcji i dyssypacji energii mechanicznej.

Obciążenia mechaniczne działające w kierunku głowy ratownika mogą prowadzić do urazów, często tzw. zamkniętych, w obrębie mózgowiczaszki, które stanowią większe zagrożenie dla życia, niż urazy twarzoczaszki. Urazy twarzoczaszki mogą być przyczyną poważnych problemów zdrowotnych, ale rzadko stanowią zagrożenie dla życia [5]. Dlatego też, znaczenie hełmu jako środka ochrony indywidualnej strażaka jest kluczowe.

Właściwości omawianej ochrony indywidualnej zależą m.in. od temperatury środowiska pożaru. Hełm strażacki powinien zachowywać właściwości ochronne w warunkach determinowanych przez środowisko eksploatacji. Znaczenie ma również cykliczność działań operacyjnych, a więc i cykliczność narażeń kierowanych na hełm strażacki. Najbardziej zewnętrznym i narażonym elementem konstrukcji hełmu jest skorupa, dlatego też, w przedmiotowej pracy, badania zostały ukierunkowane na ocenę doświadczalną, w symulowanych warunkach operacyjnych, pozostałej wytrzymałości mechanicznej tej struktury.

W przedmiotowej pracy pozostała wytrzymałość jest rozumiana jako wytrzymałość pozostała (resztkowa) kompozytu uszkodzonego w wyniku udarów cieplnych.

1. METODA BADAWCZA

1.1. Materiał wykorzystany w badaniach doświadczalnych

Badaniami objęto próbki poliamidu PA66 (Ultramid) wykorzystywanego do wytwarzania skorup hełmów strażackich metodą wtryskiwania. Ultramid jest kompozytem stworzonym przez firmę BASF The Chemical Company na podstawie modyfikacji poliamidu PA66. Modyfikacja polegała m.in. na dodaniu do polimeru włókien szklanych, które stanowią 25% masy kompozytu. Wpływają one na właściwości mechaniczne tworzywa, poprawiają jego ognioodporność i wytrzymałość. Zgodnie z danymi producenta Ultramid może być bezpiecznie stosowany w temperaturze do 310°C, powyżej tej temperatury może ulegać rozkładowi termicznemu, w skutek którego do atmosfery wydzielają się gazowe produkty rozkładu, w postaci tlenku węgla, amoniaku oraz kaprolaktam. Ultramid jako półprodukt

dostarczany jest w formie granulatu gotowego do użycia. Charakterystyczne parametry tworzywa Ultramid przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry charakterystyczne kompozytu Ultramid wg danych producenta (BASF)

Ultramid PA66-GF25FR		
Parametr	Wartość	Jednostka
Wagowa zawartość włókien szklanych	25	%
Temperatura topnienia	260	°C
Gęstość	1,32	g/cm ³
Stopień wchłaniania wilgoci (w temp. 23°C i wilgotności względnej 50%)	1-1,4	%
Temperatura ugięcia przy obciążeniu 1,8 MPa	240	°C
Moduł sprężystości suchego materiału	6500	MPa

Na rysunku 1 przedstawiono hełm strażacki oraz skorupę hełmu wykonane z tworzywa Ultramid.



Rys. 1. Hełm strażacki i skorupa hełmu wykonane z Ultramidu metodą wtryskiwania do formy

Próbki do badań wykonano w Zakładzie Przetwórstwa Polimerów Politechniki Częstochowskiej. Wykonano je metodą wtryskiwania na urządzeniu KM65/160/C4 firmy KraussMaffei ze sterowaniem komputerowym, wyposażonym w termostat wodny dwubiegowy firmy Wittmann. Próbki wykonano przez wtrysk do uniwersalnej formy o wymiennych wkładkach formujących. Ich kształt i wymiary zostały określone na podstawie normy technicznej PN-EN ISO 527-1:2012 pt. "Tworzywa sztuczne - Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Część 1: Zasady ogólne" [6]. W przedmiotowych badaniach wykorzystano próbki oznaczone symbolem "1A" wg przedmiotowej normy technicznej, czyli bezpośrednio formowane metodą wtryskiwania, o kształcie „wioselek” i wymiarach przekroju 4 mm x 10 mm.

1.2. Badania wytrzymałości statycznej

Badania statyczne zrealizowano na maszynie wytrzymałościowej elektromechanicznej Zwick/Roell Z100 wyposażonej w makroekstensometr „mackowy” (rys. 2). Wykonano próbę rozciągania wg ISO 527-1:2012 [6].



Rys. 2. Próba rozciągania wg ISO 527

W oparciu o charakterystyki ustalono wartości wielkości charakterystycznych próby właściwe dla tworzyw sztucznych. Określono początkową i pozostałą wytrzymałość na rozciąganie, jako najwyższą wartość naprężenia rozciągającego, obliczenia wykonano w oparciu o poniższe równanie:

$$\sigma_M = \frac{F_m}{A_0} \quad (1)$$

gdzie:

σ_M – wytrzymałość na rozciąganie [MPa],

F_m – siła maksymalna [N],

A_0 – początkowe pole powierzchni przekroju próbki.

Ponadto określono odkształcenie ϵ_T odpowiadające sile maksymalnej. Moduły sprężystości początkowy i pozostały po obróbce cieplnej określono w zakresie odkształcenia od 0,05% metodą stycznej. Obliczenia wykonano zgodnie z równaniem:

$$E_M = tg \alpha_T \quad (2)$$

gdzie:

E_M – moduł sprężystości (Younga) rozciągania [MPa],

$tg \alpha_T$ – tangens kąta nachylenia stycznej do wykresu naprężenie-odkształcenie.

Pracę rozciągania określono z następującego równania:

$$W_M = \int_{l_0}^l F(l - l_0) \quad (3)$$

gdzie:

W_M – praca rozciągania [Nmm],

F – obciążenie w trakcie próby [N],

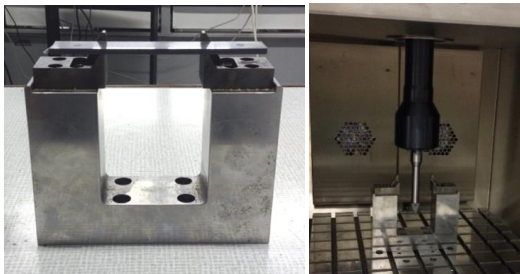
l_0 – długość początkowa próbki [mm],

$(l - l_0)$ – wydłużenie próbki [mm].

1.3. Badania wytrzymałości udarowej

Badania wytrzymałości udarowej przeprowadzono na urządzeniu LaborTech Drop Test, energia potencjalna młota wynosiła 15 J. Zastosowano bijak o zaokrąglonej końcówce (rys. 3). W teście rejestrowano charakterystyki siły w funkcji czasu trwania impulsu siły. Przemieszczenie bijaka określono za pomocą czujnika optycznego, natomiast siłę rejestrowano za pomocą czujnika piezoelektrycznego. Badania wykonano na próbkach płaskich o wymiarach przekroju poprzecznego 23 mm x 4 mm. Na rysunku 4 przedstawiono fotografię próbki, o wymiarach ponadnormatywnych, umieszczonej na suporcie do zginania udarowego. Do określenia odporności na obciążenia dynamiczne wybrano próbę udarowego zginania próbek bez karbu. Taki sposób obciążenia charakteryzuje złożony stan naprężenia najbardziej zbliżony do stanu naprężenia w skorupie hełmu strażackiego. Układ badawczy przedstawiono na rysunku

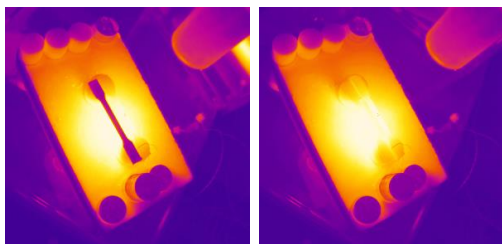
3. Badania wykonywano w warunkach skojarzonych obciążeń cieplnych i mechanicznych.



Rys. 3. Próbka umieszczona na podporcie do zginania uderowego i widok układu pomiarowego umieszczonego we wnętrzu komory temperaturowej

1.4. Procedura termiczna

Przed badaniem wytrzymałości statycznej próbki poddane były oddziaływaniu termicznemu, w polach temperaturowych o wysokiej szybkości generowania energii cieplnej (rys. 4). Procedurę tą prowadzono na stanowisku wspomagającym badania, symulującym warunki rzeczywiste. Wykorzystano moduł stanowiska generujący strumień gorącego powietrza o określonych parametrach. Moduł ten wyposażony jest w nagrzewnicę gorącego powietrza HOTWIND SYSTEM o mocy grzewczej 3680 W. Urządzenie umożliwia wygenerowanie strumienia o prędkości przepływu od 100 do 900 l/min i temperaturze do 650°C.



Rys. 4. Pola temperatur badanej próbki na początku i na końcu procedury obróbki temperaturowej

W przedmiotowych badaniach klasyfikowano poziomy pożarowych ekspozycji termicznych, które zależą od czasu ekspozycji i temperatury. W pracy [7] przyjęto następujące poziomy obciążenia wyjątkowych (pożarowych): rutynowy, niebezpieczny, ekstremalny i awaryjny (krytyczny) (tab. 2). Na tej podstawie, uwzględniając potrzebę zachowania podobieństwa cykli badawczych do rzeczywistych (eksploatacyjnych), przyjęto następujące temperatury i czasy ekspozycji: 20°C, 100°C przez 25 min, 120°C przez 15 min, 140°C przez 10 min i 160°C przez 1 min, najwyższą temperaturę ograniczono do 160°C, ze względu na możliwości czujnika strumienia gorącego powietrza.

Tab. 2. Parametry termiczne oddziałujące na ratownika [6]

Zakres pracy ratownika	Czas pracy ratownika	Temperatura
------------------------	----------------------	-------------

Rutynowy	-	20°C
Niebezpieczny	25 min	100°C
Ekstremalny	10 min	140°C
Krytyczny	1 min	170°C

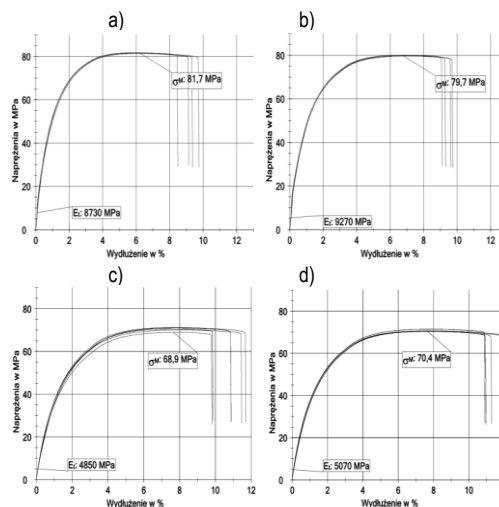
Pierwszą serię badań wytrzymałości statycznej realizowano po wystudzeniu próbek po 48 godz. Badania rozszerzono o ocenę pozostałej wytrzymałości i sztywności po 5 cyklach takich obciążeń cieplnych. Kolejne cykle realizowano co 3 – 6 dni, symulując uczestnictwo strażaka w kolejnych akcjach ratowniczo-gaśniczych.

Celem badania pozostałej wytrzymałości uderowej było określenie wpływu temperatury występującej w środowisku pożaru na uderową wytrzymałość dynamiczną (udarową) tworzywa Ultramid. W związku z tym, próbki poddano obróbce termicznej bezpośrednio przed testem i w jego trakcie, w komorze temperaturowej (rys. 4) wg temperatur i czasu ekspozycji określonych w tabeli 2.

2. WYNIKI BADAŃ

2.1. Wyniki badań pozostałej wytrzymałości statycznej

Wybrane charakterystyki naprężenie – odkształcenie uzyskane w próbie rozciągania zaprezentowano na rysunku 5. Kolejne rysunki przedstawiają krzywe uzyskane dla próbek w zależności od temperatury strumienia, czasu ekspozycji próbek i liczby cykli obciążeń cieplnych. Dla ułatwienia porównywania uzyskanych wyników ustawiono ten sam zakres osi naprężenia i wydłużenia na wszystkich wykresach. W tabeli 3 przedstawiono statystyki opisowe wyników próby rozciągania. W tabeli ujęto wartości średnie, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności prezentowanych wartości. Wyniki odniesiono do temperatur i czasów działania strumienia gorącego powietrza.



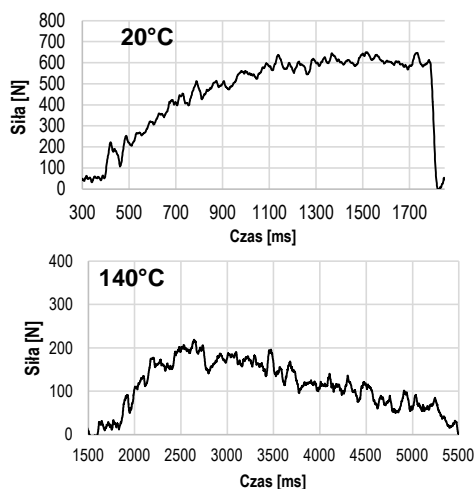
Rys. 5. Wybrane charakterystyki σ - ϵ uzyskane w próbie rozciągania po 1 cyklu ekspozycji termicznej: a) 20°C, b) 160°C - 1 min, c) 5 x 100°C - 25 min, d) 5 x 160°C - 1 min

Tab. 3. Statystyki opisowe wyników badań na rozciąganie Ultramid
po obróbce strumieniem gorącego powietrza

Temperatura [°C]	Czas [min]	N	Średnia	odch.st.	wsp.zm [%]
Wytrzymałość na rozciąganie σ_T [MPa]					
20	-	5	81,6	0,139	0,17
100 (1 cykl)	25	5	78,8	0,666	0,85
100 (5 cykli)	25	5	70,3	0,914	1,30
120	15	5	80,0	0,754	0,94
140 (1 cykl)	10	5	80,4	0,564	0,7
140 (5 cykli)	10	5	70,5	0,348	0,49
160 (1 cykl)	1	5	79,8	0,221	0,28
160 (5 cykli)	1	5	70,7	0,418	0,59
Moduł sprężystości rozciągania E_T [MPa]					
20	-	5	8560	485	5,67
100 (1 cykl)	25	5	9270	726	7,84
100 (5 cykli)	25	5	4810	203	4,21
120	15	5	9410	804	8,55
140 (1 cykl)	10	5	9900	871	8,80
140 (5 cykli)	10	5	5230	154	2,93
160 (1 cykl)	1	5	9430	401	4,25
160 (5 cykli)	1	5	5110	242	4,74
Praca do siły maksymalnej W_f [Nmm]					
20	-	5	6982,82	146,82	2,10
100 (1 cykl)	25	5	7731,17	172,10	2,23
100 (5 cykli)	25	5	7117,95	193,78	2,72
120	15	5	7794,86	120,54	1,55
140 (1 cykl)	10	5	7770,21	203,90	2,62
140 (5 cykli)	10	5	7144,93	90,07	1,26
160 (1 cykl)	1	5	7640,31	81,85	1,07
160 (5 cykli)	1	5	7175,73	202,04	2,82
Wydłużenie ϵ_T [%]					
20	-	5	6,1	0,1	1,99
100 (1 cykl)	25	5	7,0	0,2	2,33
100 (5 cykli)	25	5	7,8	0,1	1,38
120	15	5	7,0	0,1	2,06
140 (1 cykl)	10	5	6,9	0,2	2,34
140 (5 cykli)	10	5	7,7	0,1	1,32
160 (1 cykl)	1	5	6,8	0,1	0,94
160 (5 cykli)	1	5	7,8	0,1	1,87

2.2. Wyniki badań pozostałej wytrzymałości udarowej

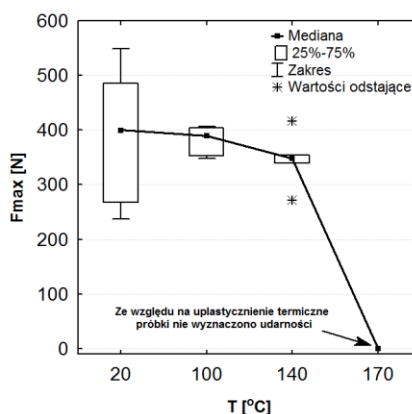
Wybrane charakterystyki siła – czas uzyskane w próbie udarowego zginania przedstawiono na rysunku 6. Na wykresach widoczne są różnice w przebiegu siły w funkcji czasu, w szczególności w udziale odkształcenia sprężystego i niesprężystego. Taki przebieg charakterystyk świadczy o wrażliwości tworzywa Ultramid na warunki termiczne eksploatacji.



Rys. 6. Zestawienie wybranych charakterystyk zginania udarowego

Na rysunku 7 zaprezentowano wykres ramkowy wyników wytrzymałości udarowej określonej, jako siła maksymalna w zależności od temperatury (czasy ekspozycji zgodnie z tabelą 2). Mediany wytrzymałości udarowej zmieniają się w niewielkim stopniu w zakresie obciążenia cieplnego ratownika od rutynowego do ekstremalnego.

W tym przedziale wytrzymałość udarowa nieznacznie maleje. Jednakże w zakresie krytycznym 170°C tworzywo mięknie w stopniu uniemożliwiającym zbadanie udarności, w tej temperaturze kompozyt polimerowy praktycznie traci wytrzymałość mechaniczną na zginanie.



Rys. 7. Wykres ramkowy wyników badań zginania udarowego

PODSUMOWANIE

Pogorszenie parametrów wytrzymałościowych po jednorazowym działaniu strumienia gorącego powietrza i wystudzeniu jest nieznaczne. Materiał Ultramid w wysokim stopniu zachowuje swoje właściwości wytrzymałościowe. Widoczna jest jednak zmiana sztywności, określonej wartością modułu Younga, badanych próbek. Taki stan rzeczy może pośrednio świadczyć o częściowej krystalizacji wtórnej tworzywa bądź innych przemianach fazowych zależnych od poziomu temperatury. Proces krystalizacji prowadzi do powstawania układów nierównowagowych, charakteryzujących się częściową krystalicznością. Polimer krystaliczny, oprócz pewnej ilości fazy stałej zawiera jeszcze polimer amorficzny o charakterze cieczy. Konsekwencją powstawania układów częściowo krystalicznych, w których poszczególne kryształy mają różną wielkość i różny stopień doskonałości, jest złożona struktura tych polimerów [8]. Niewielkie zmiany właściwości tworzywa po ustąpieniu narażenia wskazują również na zmianę tych właściwości podczas działania narażenia. Prawdopodobnie zmiany właściwości są wyższe, po pewnym czasie są częściowo odnawiane po ustąpieniu narażenia termicznego (takie wnioskowanie jest możliwe również w oparciu o wyniki badań udarowych). W rzeczywistych warunkach eksploatacji helmu strażackiego, przez wiele lat, narażenia występują cyklicznie w kolejnych działaniach gaśniczych. Można założyć, że zmiany właściwości kumulują się, co w konsekwencji przekłada się na niepewność właściwości ochronnych w przewidywanym, jak wiadomo niedookreślonym prawnie, czasie użytkowania helmu do zużycia.

Wyniki badań wytrzymałości statycznej tworzywa Ultramid w warunkach cyklicznych obciążeń cieplnych wskazują na degradację zmęczeniowo-starzeniową. Uszkodzenia stopniowe w materiałach wieloskładnikowych przyjmują postać różnego rodzaju nieciągłości lub zmian właściwości składników kompozytu [9]. Stopień

uszkodzenia okresowego kompozytów polimerowych można wyrazić za pomocą miar fenomenologicznych opartych o degradację wytrzymałości bądź sztywności [9]. W przedmiotowym przypadku najbardziej widoczna jest zmiana modułu sprężystości co przekłada się wprost na zmianę sztywności. Warto zaznaczyć, że dotychczas nie opracowano zależności pozwalających na ocenę wytrzymałości kompozytu na podstawie współczynników sprężystości np. modułu Younga. Jak wyjaśnia Bełzowski [10], wartości współczynników sprężystości reprezentują średni stan struktury materiału uszkodzonego, a wytrzymałość zależy od uszkodzeń powodujących największe lokalne osłabienie.

Kształty krzywych uzyskanych w badaniach dynamicznych różnią się w zależności od temperatury. Uzyskane w temperaturach normalnej wskazują na sprężysto-kruchy sposób zniszczenia, natomiast w temperaturach pożarowych ma charakter sprężysto-plastyczny. Mięknienie tworzywa Ultramid w temperaturze 170°C uniemożliwiło badanie udarności. Pogorszenie sztywności dynamicznej w wyższych temperaturach może przekładać się na zdolności dyssypacji energii uderzenia oraz skupienie się obciążenia na mniejszej powierzchni co może zwiększać zagrożenie perforacji skorupy.

W badaniu dynamicznym kompozytu ilość energii wydatkowanej na odkształcenie, aż do siły maksymalnej jest zbliżona do wydatkowanej na dalszy rozwój niszczenia. Wydaje się, że zastosowany sposób zbrojenia kompozytu nie stanowi istotnej przeszkody w procesie rozwoju zniszczenia kompozytu [11, 12]. Taki proces niszczenia wpływa na dyssypację energii uderzenia.

Wartości pracy zginania dynamicznego są mniejsze w przypadku próbek ogrzanych i wynoszą np. 5,4 J – 20°C, 4,7 J – 100°C, 3,6 J – 140°C. Może to pośrednio świadczyć o mniejszej zdolności materiału do absorbowania energii uderzenia w temperaturach pożarowych, co prawdopodobnie wpływa na właściwości amortyzacyjne całego hełmu.

Zastosowanie narzędzi symulacji komputerowej np. (LS-Dyna, PamCrash, HUMOS), umożliwiających analizy jakości ochron indywidualnych w symulacjach z wykorzystaniem wirtualnych manekinów antropometrycznych [5], wymaga znajomości parametrów struktur ochron. Dlatego też, określenie właściwości struktur hełmu strażackiego w warunkach eksploatacji w gorącym środowisku może być przydatne do modelowania budowy hełmów i analiz np. MES (Metodą Elementów Skończonych).

W kolejnych etapach badań autorzy zamierzają podjąć próby testowania tworzyw o większej zawartości włókien szklanych.

BIBLIOGRAFIA

- Pieniak D., Oszust M., Ocena odporności udarowej i sztywności skorup hełmów strażackich w warunkach termicznych środowiska pożaru. *Logistyka* 2015 nr 5.
- Pieniak D., Bronisz S., Badania redystrybucji sił przejmowanych przez hełm strażacki w kierunku kompresyjnym kręgosłupa szyjnego. *Zeszyty Naukowe SGSP* 2016 nr 2.
- National Highway Traffic Safety Administration, Occupant crash protection – head injury criterion. DC: NHTSA, Waszyngton 1972 (S6.2 of FMVSS 571.208).
- Dyrektywa 89/656/EWG w sprawie minimalnych wymagań w dziedzinie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników korzystających z wyposażenia ochronnego (trzecia dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG).
- Radziszewski L. *Kaski Rowerowe. Konstrukcja, technologie, użytkowanie*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Kielce 2015.
- PN-EN ISO 527-1:2012, Tworzywa sztuczne. Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Część 1: Zasady ogólne
- Sawicki T., Czynniki zagrażające bezpieczeństwu strażaków w warunkach pożaru. *Bezpieczeństwo Pracy* 2004, nr 7-8.
- Narebska A., *Podstawy chemii i fizykochemii polimerów*. Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 1984.
- Bełzowski A., *Metoda oceny stopnia uszkodzenia kompozytów polimerowych*. *Kompozyty (Composites)* 2002, nr 4.
- Topoliński T., *Analiza teoretyczna i badania doświadczalne kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych konstrukcyjnych kompozytów polimerowych*. Wyd. Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1997.
- Hyla I., Lizurek A., Zastosowanie badań dynamicznych do analizy mechanizmu pęknięcia udarowego kompozytów warstwowych. *Kompozyty (Composites)* 2002 nr 5.
- Krzyżak A., Drabik M., Zyśko Ł., Dulebova L., Selected Properties and Shrinkage Compensating Effect by Injection Moulding of Origin and Recycled Thermoplastic Composites with Polypropylene (PP) Matrix, Talcum and Glass Fiber. *Advanced Materials Research* 2014, nr 1001.

Experimental evaluation of residual strength and stiffness of polymer composite applied in firefighting helmets due to temperature of operating environment

Abstract

This paper presents results of experimental studies of mechanical properties of composite applied in firefighting helmets at simulated operating conditions. For the studies samples of PA66 polyamide reinforced with fiberglass, applied for manufacturing of firefighting helmets shells by injection method have been applied. Static and dynamic strength tests have been conducted. The samples were exposed to high temperature before the test or during the test, depending on the type of the load. A significant influence of operating load history on the mechanical properties of polyamide PA66 reinforced with fiberglass has been demonstrated. Additionally, in case of the impact load change of type of composite damage from elastic-fragile to elastic-ductile under the impact of high temperature has been observed. Mechanical properties of material simulated at operating conditions, used for manufacturing of helmets' shells, can be useful for modelling of firefighting helmets construction and analysis e.g. MES.

Autorzy:
dr inż. **Daniel Pieniak** – Zakład Mechaniki i Budowy Maszyn, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie
kpt. dr inż. **Agata Walczak** – Zakład Sprzętu Ratowniczo-Gaśniczego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie

ml. bryg. dr inż. **Renata Kamocka-Bronisz** – Zakład Mechaniki Stosowanej, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie
dr inż. **Leszek Gil** – Zakład Transportu, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie