

st. kpt. dr inż. Agata Walczak^{a)}, dr inż. Daniel Pieniak^{b)}, st. bryg. dr inż. Ireneusz Naworol^{a)*},
kpt. mgr inż. Wiktor Wąsik^{a)}, bryg. mgr inż. Piotr Chudy^{a)}, kpt. mgr inż. Monika Sutula^{a)}

^{a)} Szkoła Główna Służby Pożarniczej / The Main School of Fire Service

^{b)} Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie / The University of Economics and Innovation in Lublin

* Autor korespondencyjny / Corresponding author: inaworol@sgsp.pl

Badania właściwości absorpcyjnych pianek polimerowych stosowanych w krajowej produkcji hełmów strażackich

Studies on Absorptive Properties of Polymer Foams Used for Manufacturing of Firefighter Helmets in Poland

Исследование абсорбционных свойств полимерных пен, используемых в производстве противопожарных шлемов в Польше

ABSTRAKT

Cel: Celem niniejszego artykułu jest analiza porównawcza właściwości mechanicznych pianek polimerowych stosowanych jako absorberzy energii uderzenia w krajowej produkcji hełmów strażackich. Tym samym celem artykułu jest ocena właściwości nowych materiałów pod kątem bezpieczeństwa oraz komfortu pracy użytkowników hełmów.

Metody: W badaniach wykorzystano wkład z polistyrenu ekspandowanego oraz absorberzy z poliuretanu pochodzące z krajowych hełmów strażackich produkowanych w różnych latach. Przeprowadzono próby wytrzymałości na ściskanie w warunkach obciążenia quasi-statycznego oraz w zakresie odkształceń sprężystych. Warunki te odpowiadają anormalnym oraz normalnym warunkom eksploatacji materiałów absorpcyjnych wykorzystywanych w konstrukcji hełmów strażackich. Komfort użytkowania oceniono na podstawie wartości modułu Younga.

Wyniki: Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie materiałów absorpcyjnych wskazują na znaczące różnice między analizowanymi absorberami na poziomie obciążeń występujących zarówno w normalnych warunkach eksploatacji, jak i w warunkach nadzwyczajnych. Pianki z polistyrenu ekspandowanego oraz z hełmu AK-06 z 2012 roku charakteryzują się dobrą wytrzymałością, zdolnością do absorpcji energii oraz dużą sztywnością. Absorberzy z hełmu AK-06 z 2007 roku cechują się najgorszymi spośród badanych materiałów właściwościami konstrukcyjnymi. Materiał z 2015 roku charakteryzuje się stosunkowo dobrą wytrzymałością, zdolnością do absorpcji energii oraz niedużą sztywnością.

Wnioski: W budowie hełmów strażackich wykorzystywane są różne materiały absorpcyjne, które charakteryzują się niejednakowymi właściwościami mechanicznymi. Wybór optymalnego rozwiązania możliwy jest dzięki badaniom laboratoryjnym. W konstrukcji badanych hełmów materiały absorpcyjne z polistyrenu ekspandowanego zastąpiono poliuretanem. Pianki poliuretanowe stosowane w hełmach produkowanych w 2007 roku charakteryzują się mniejszą sztywnością, lecz gorszymi właściwościami niż wkładki z polistyrenu ekspandowanego. Właściwości tych materiałów poprawiono, uzyskano to jednak dzięki znaczącemu zwiększeniu sztywności w zakresie odkształceń sprężystych. Wydaje się, że spośród badanych absorberów optymalnymi właściwościami cechuje się najnowszy materiał, stosowany w hełmach Calisia Vulcan CV 102 z 2015 roku.

Słowa kluczowe: hełm strażacki, pianki polimerowe, absorber energii, właściwości mechaniczne

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Przyjęty: 20.04.2018; Zrecenzowany: 27.06.2018; Zatwierdzony: 05.07.2018;

Procentowy wkład merytoryczny: A. Walczak – 18%; I. Naworol – 18%, D. Pieniak – 18%, P. Chudy – 18%, M. Sutula – 10%;

Identyfikatory ORCID autorów: A. Walczak – 0000-0002-0303-1748; I. Naworol – 0000-0002-8536-4238; D. Pieniak – 0000-0001-7807-3515;

P. Chudy – 0000-0001-8861-1233; M. Sutula – 0000-0001-5038-3386;

Proszę cytować: BITP Vol. 50 Issue 2, 2018, pp. 64–73, doi: 10.12845/bitp.50.2.2018.5;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

ABSTRACT

Objective: The objective of the study was a comparative analysis of the mechanical properties of polymer foams used as impact energy absorbers, a component of firefighter helmets manufactured in Poland. The study aimed at evaluating the influence of the properties of new materials on the working safety and comfort of helmet users.

Methods: The study utilised an expanded polystyrene insert and polyurethane absorbers obtained from Polish firefighter helmets that were manufactured in various years. Compressive strength tests under quasi-static load and at dynamic conditions with regard to elastic deformations were carried out. They reflected both abnormal and normal operational loads. Comfort of use was evaluated indirectly based on Young's modulus value.

Results: Compressive strength test results for absorptive materials indicated significant differences between studied absorbers both at normal load conditions and in extraordinary situations. Expanded polystyrene foams and foam from AK-06 helmet from 2012 demonstrated a good strength, high energy absorption capacity and high stiffness. The foam from AK-06 helmet from 2007 was observed to have the worst mechanical properties among the studied materials. The material from 2015 indicated a relatively good strength, energy absorption properties and moderate stiffness.

Conclusions: A variety of absorptive materials with different mechanical properties are used in the structure of firefighter helmets. Laboratory studies allow the selection of the most optimum solution. In the studied firefighter helmets, expanded polystyrene absorptive materials had been replaced by polyurethane. The polyurethane foams applied in helmets manufactured in 2007 were characterized by lower stiffness and inferior properties as compared to inserts made of expanded polystyrene. Later the properties of materials have been improved. However, it was achieved through a significant increase in stiffness with regard to elastic deformations. It seems that the optimum properties among the studied absorbers were achieved by the newest material, which was used in Calisia Vulcan CV 102 helmets from 2015.

Keywords: firefighter helmet, polymer foams, energy absorber, mechanical properties

Type of article: original scientific article

Received: 25.06.2017; Reviewed: 27.06.2018; Approved: 05.07.2018;

Percentage contribution: A. Walczak – 18%; I. Naworol – 18%, D. Pieniak – 18%, P. Chudy – 18%, M. Sutuła – 10%;

Authors' ORCID IDs: A. Walczak – 0000-0002-0303-1748; I. Naworol – 0000-0002-8536-4238; D. Pieniak – 0000-0001-7807-3515;

P. Chudy – 0000-0001-8861-1233; M. Sutuła – 0000-0001-5038-3386;

Please cite as: BiTP Vol. 50 Issue 2, 2018, pp. 64–73, doi: 10.12845/bitp.50.2.2018.5;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

АННОТАЦИЯ

Цель: Целью настоящей статьи является сравнительный анализ механических свойств полимерных пен, используемых в качестве амортизаторов ударной энергии в производстве пожарных шлемов в Польше. Целью этой статьи является оценка свойств новых материалов с точки зрения безопасности и комфорта пользователей шлемов.

Методы: Исследование включало использование вставки из пенополистирола и амортизатора из полиуретана, взятых из польских пожарных шлемов, изготовленных в разные годы. Испытания на прочность при сжатии, которые проводились в условиях квазистатической нагрузки в области упругой деформации. Эти условия соответствуют аномальным и нормальным условиям использования амортизирующих материалов, используемых при производстве противопожарных шлемов. Комфорт использования был оценен на основе модуля Юнга.

Результаты: Результаты испытаний на прочность при сжатии амортизирующих материалов показывают значительные различия между анализируемыми амортизаторами при нагрузках, происходящих как при нормальных условиях эксплуатации, так и в исключительных условиях. Пена из вспененного полистирола шлема АК-06 с 2012 года характеризуется хорошей прочностью, способностью поглощать энергию и значительной жесткостью. Амортизирующие материалы из шлема АК-06 с 2007 года характеризуются худшими структурными свойствами в сравнении с другими испытываемыми материалами. Материал с 2015 года характеризуется относительно хорошей прочностью, способностью поглощать энергию и незначительной жесткостью.

Выводы: При изготовлении противопожарных шлемов используются различные амортизирующие материалы, которые характеризуются различными механическими свойствами. Выбор оптимального решения возможен благодаря лабораторным испытаниям. В конструкции испытанных шлемов амортизирующие материалы из пенополистирола были заменены полиуретаном. Полиуретановые пены, используемые в шлемах, изготовленных в 2007 году, характеризуются более низкой жесткостью, но худшими свойствами, чем полимерные вставки из полистирола. Свойства этих материалов были улучшены, но это было достигнуто благодаря значительному увеличению жесткости в области упругой деформации. Похоже, что среди проверенных амортизирующих материалов самый новый материал, используемый в шлемах Calisia Vulcan CV 102 с 2015 года, является наиболее оптимальным.

Ключевые слова: пожарный шлем, полимерные пены, поглотитель энергии, механические свойства

Вид статьи: оригинальная научная статья

Принята: 20.04.2018; Рецензирована: 27.06.2018; Одобрена: 05.07.2018;

Процентное соотношение участия в статье: A. Walczak – 18%; I. Naworol – 18%, D. Pieniak – 18%, P. Chudy – 18%, M. Sutuła – 10%;

Идентификаторы ORCID авторов: A. Walczak – 0000-0002-0303-1748; I. Naworol – 0000-0002-8536-4238; D. Pieniak – 0000-0001-7807-3515;

P. Chudy – 0000-0001-8861-1233; M. Sutuła – 0000-0001-5038-3386;

Просим ссылаться на статью следующим образом: BiTP Vol. 50 Issue 2, 2018, pp. 64–73, doi: 10.12845/bitp.50.2.2018.5;

Настоящая статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Wstęp

Według raportu polskiego Głównego Urzędu Statystycznego dotyczącego wypadków przy pracy, do których doszło w 2016 roku urazy głowy, szyi oraz kręgosłupa szyjnego stanowiły 12% wszystkich urazów ciała powstałych przy pracy [1]. Oznacza to, że urazom tym uległo ponad 10,5 tys. osób w ciągu roku. Indywidualne środki ochrony osobistej, w tym środki ochrony głowy, są istotnym elementem stosowanym w celu zapewnienia bezpieczeństwa przy pracy.

Introduction

According to a Statistics Poland (GUS) report on accidents at work in 2016, injuries to the head, neck and cervical spine accounted for 12% of all bodily injuries at work [1]. This means that over a period of one year such injuries were sustained by more than 10.5 thousand people. Personal protective equipment, including head protection equipment, is an important measure used to ensure safety at work.

Jedno z poważniejszych zagrożeń, na które narażony jest strażak, to doznanie urazu mechanicznego głowy i kręgosłupa szyjnego. Zagrożenie to jest często zależne od charakteru zdarzenia, w którym uczestniczą strażacy. Występuje ono m.in. podczas pożarów i katastrof budowlanych w wyniku osunięć i zarwań elementów konstrukcyjnych obiektu budowlanego. Przed takim zagrożeniem zabezpiecza hełm strażacki, którego zadaniem jest ochrona głowy przed bezpośrednimi urazami oraz amortyzowanie sił przenoszonych na głowę i kręgosłup w czasie uderzenia. Ponadto hełm chroni głowę przed innymi negatywnymi czynnikami, na które narażony jest ratownik, tj. przed: promieniowaniem termicznym, płomieniami, iskrami, czynnikami chemicznymi i biologicznymi oraz prądem elektrycznym. Wielofunkcyjność ochronna hełmów strażackich została znormalizowana, a wymagania w tym zakresie zostały sparametryzowane. Zawarto je w normach: PN-EN 443:2008 *Hełmy strażackie* oraz PN-EN 166:2005 *Ochrona indywidualna oczu* [2, 3].

Ochronę przed działaniem obciążenia mechanicznego w kierunku głowy i kręgosłupa ratownika zapewnia skorupa hełmu oraz wkład amortyzujący. Skorupa jest pierwszym elementem przyjmującym i częściowo rozpraszającym energię obciążenia. Ponadto chroni głowę przed ostrymi przedmiotami. Konstrukcja i kształt tego elementu oraz materiały, z których się go wykonuje, ciągle się zmieniają. W latach wcześniejszych do produkcji skorup stosowano kompozyty strukturalne z laminatów tkanin włókien szklanych i polimerowych typu Kevlar. Rodzaj splotu włókien zależał od producenta i roku produkcji hełmu. Obecnie skorupy wytwarzane są głównie w technologii wtrysku, w ich konstrukcji często wykorzystywane są polimery termoplastyczne wzmocnione ciętym włóknem szklanym.

Wkładka polimerowa jest drugim elementem, po skorupie, absorbującym energię uderzenia. Zwykle wykonana jest ona ze sztywnych materiałów porowatych – pianek polimerów. W starszych konstrukcjach, często nadal użytkowanych, wykonywano wkłady z polistyrenu ekspandowanego, w obecnie wytwarzanych hełmach przeważnie wykorzystuje się pianki poliuretanowe o niższej sztywności. Zadaniem materiału amortyzującego jest pochłanianie energii uderzenia, które zostało przyjęte przez skorupę hełmu. Proces ten polega na zamianie energii kinetycznej na inną postać energii w stabilny i kontrolowany sposób [4]. Materiał wkładki pochłania większą część energii udaru mechanicznego niż skorupa, głównie dzięki powolnej, stosunkowo długo trwającej deformacji [5]. Ze względu na mechanizm działania absorber zastosowany w hełmie strażackim jest pasywnym absorberem wielokrotnego działania, jeżeli energia kolejnego wymuszenia nie osiąga wartości krytycznych. Konstrukcja nowszych hełmów sprawia, że głowa ratownika ma bezpośredni kontakt z wkładką. W związku z tym funkcją absorbera ma być nie tylko dyssypacja energii uderzenia, lecz także częściowe przenoszenie normalnych obciążeń eksploatacyjnych.

Pianki polimerowe wykorzystywane są m.in. w transporcie oraz przemyśle morskim, lotniczym i kosmonautycznym [6]. Stosowanie tych pianek wynika z ich dobrych właściwości, w tym z niewielkiej masy właściwej oraz zdolności pochłaniania energii, w szczególności w warunkach obciążenia udarowego [7]. Zdolność pochłaniania energii przez pianki zależy od wielu czynników,

One of the most serious threats for firefighters are mechanical injuries to the head and cervical spine. This threat often depends on the nature of the event involving firefighters. It is present, inter alia, during fires and building collapses resulting from landslides and collapses of structural elements of buildings. A firefighter helmet protects the firefighter against such threats. Its purpose is to protect the head against direct trauma and absorption of the loads transmitted to the head and spine at impact. In addition, the helmet protects the head from exposure to other adverse factors during a firefighting action, such as thermal radiation, flames, sparks, chemical and biological agents and electric shocks. The multifunctional protection afforded by firefighter helmets has been normalised and parameters have been specified for the requirements in this respect. These are included in the following standards: PN-EN 443:2008 *Firefighter helmets* and PN-EN 166:2005 *Personal eye protection* [2, 3].

The helmet's shell and absorption insert protect the firefighter against mechanical loads directed towards the head and spine. The shell is the first component absorbing and partly dispersing the load energy. It also protects the head from sharp objects. The structure and shape of this component and the materials it is made of are constantly changing. In previous years, shells were manufactured of structural composites from fibreglass and Kevlar polymer laminates. The weave type depended on the manufacturer and production year of the helmet. Currently, most shells are manufactured by injection moulding, often using glass fibre-reinforced thermoplastic polymers.

The polymer insert is the second component that absorbs impact energy after the shell. It is usually made of rigid porous materials – polymer foams. In older structures, which are still widely used, inserts were made of expanded polystyrene. Currently, polyurethane foams with lower stiffness are used. The task of the absorption material is to absorb the energy of impact sustained by the helmet's shell. This process involves the conversion of kinetic energy into a different form of energy in a stable and controlled way [4]. The material of the insert absorbs more energy of the mechanical shock than the shell, primarily due to slow, relatively long-lasting deformation [5]. Due to the mechanism of action, the absorber used in the firefighter helmet is a reusable passive absorber, if the energy of another force does not reach the critical values. The structure of more recent helmets is such that the firefighter's head is in direct contact with the insert. Due to this, the absorber function is not only to dissipate the impact energy, but also to partly transmit the normal operational loads.

Polymer foams are used, inter alia, in transport and maritime & aerospace industries [6]. These foams are used due to their advantageous properties, including small proper mass and the ability to absorb energy, especially under shock loads [7]. The foam's ability to absorb energy depends on numerous factors, such as the properties of the polymer used, foam density, the shape and geometry of its cells and the value of the load applied. Due to this, laboratory tests are performed nowadays to determine the absorption capabilities of foams [6, 8].

m.in. od: właściwości wykorzystanego polimeru, gęstości pianki, kształtu i geometrii jej komórek oraz wartości przyłożonego obciążenia. W związku z tym obecnie, w celu określenia zdolności absorpcyjnych pianek, wykonywane są badania laboratoryjne [6, 8].

Rozwój technologii materiałowych daje nowe możliwości w dziedzinie bezpieczeństwa działań ratowniczych. Dzięki nowym technologiom można wprowadzić rozwiązania techniczne zwiększające funkcjonalność stosowanych środków ochronnych, a przede wszystkim zmniejszające ryzyko wystąpienia urazów u ratowników. Nie bez znaczenia jest również to, że zwiększyły się możliwości badawcze. Nowoczesne metody i precyzyjne urządzenia badawcze pozwalają na zweryfikowanie istniejących, a także na wprowadzenie nowych, lepszych rozwiązań.

Wykorzystanie nowych technologii w konstrukcjach środków ochrony indywidualnej, w tym w budowie hełmów strażackich, leżało u podstaw podjęcia badań prezentowanych w niniejszej pracy. Wydaje się, że ewolucja konstrukcji w zakresie użytych materiałów absorbera wpływa na ogólne właściwości ochronne hełmu. Postępujące zmiany materiałowo-konstrukcyjne powinny zwiększać bezpieczeństwo oraz komfort pracy. W związku z powyższym celem badań jest analiza porównawcza właściwości mechanicznych materiałów stosowanych do wytwarzania absorberów energii uderzenia wykorzystanych w kolejnych modelach krajowych hełmów strażackich. Tym samym celem badań jest ocena właściwości nowych materiałów pod kątem bezpieczeństwa oraz komfortu pracy użytkowników hełmów.

Materiał i metoda badań

Próbki do badań wykonano z wkładek absorpcyjnych montowanych w hełmach strażackich, produkowanych przez krajową firmę na potrzeby Państwowej Straży Pożarnej. Wykorzystano wkłady z następujących modeli i lat produkcji hełmów: ZS-03 (2003), Calisia AK-06 (2007), Calisia AK-06 (2012) oraz Calisia Vulcan CV 102 (2015). Wycięte próbki miały kształt prostopadłościanów o wymiarach 16x10x10 mm.

Próbie wytrzymałości na ściskanie w warunkach obciążenia quasi-statycznego przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100 (ryc. 1). Wykorzystano głowicę siły o zakresie nominalnym 500 N. Badanie przeprowadzono z prędkością 5 mm/min. W każdej grupie było 5 próbek. Próbie obciążenia w zakresie odkształcenia sprężystego zrealizowano na tym samym stanowisku badawczym. Obciążenie progowe ustalono na 20 N, prędkość – na 10 mm/min. W każdej grupie była 1 próbka. Na podstawie otrzymanych histerez obliczono wartości energii mechanicznej (odkształcenia) rozproszonej w cyklu. Zależność uzyskuje się za pomocą całkowania numerycznego pola pod wykresem w części „obciążenia” – W_{lob} , „odciążenia” – W_{lod} i pola powierzchni pętli histerezy – ΔW_i (energia dyssypacji).

W badaniach mikroskopowych wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy Phenom G2 Pro. Wykonano zdjęcia próbek pianek polimerowych niepoddanych i poddanych próbie ściskania w warunkach obciążenia quasi-statycznego.

The development of material technologies opens up new possibilities for improving the safety of rescue actions. Thanks to new technologies, technical solutions are available to increase the functionality of the protective equipment used and, most of all, reduce the risk of injury among rescue personnel. The expanded research capabilities are also a significant factor in these developments. Modern methods and precision test instruments facilitate the verification of current solutions, and also the introduction of new and better ones.

The use of new technologies in the structures of items of personal protective equipment, including firefighter helmets, formed the basis for the research presented in this paper. It seems that the evolution of the structure in terms of the absorber materials used has affected the general protective properties of the helmet. The progressive changes to the materials and structure of helmets should be reflected in increased safety and comfort at work. Responding to this, the objective of the study is to perform a comparative analysis of the mechanical properties used for the manufacturing of impact energy absorbers used in successive models of firefighter helmets produced in Poland. This involves the assessment of the properties of new materials in terms of the working safety and comfort of their users.

Material and method

Test samples were made of absorption inserts installed in firefighter helmets produced by a Polish company for the purposes of the State Fire Service. Inserts from the following models and years of production of helmets were used: ZS-03 (2003), Calisia AK-06 (2007), Calisia AK-06 (2012) and Calisia Vulcan CV 102 (2015). The cut-out samples were box-shaped with the dimensions of 16x10x10 mm.

Compressive strength tests under quasi-static load were performed using the Zwick/Roell Z100 universal materials testing machine (Fig. 1). A load cell with the nominal force of 500 N was used. The test was performed at the speed of 5 mm/min. Each group contained 5 samples. An elastic deformation test was performed in the same test environment. The load threshold was set at 20 N, the speed at 10 mm/min. Each group contained 1 sample. The hystereses obtained allowed the calculation of the value of mechanical energy (deformation) dissipated in the cycle. This correlation is obtained by the numerical integration of the field under the curve in the “loading” – W_{lob} , “unloading” – W_{lod} and the surface area of the hysteresis loop – ΔW_i (dissipation energy).

Microscopic studies used a Phenom G2 PPro scanning electron microscope. Photographs were taken of polymer foam samples subjected and not subjected to compressive strength testing under quasi-static load.



Rycina 1. Próba wytrzymałości na ściskanie

Figure 1. Compressive strength test

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Wyniki badań

W tabeli 1 przedstawiono statystyki opisowe wyników próby ściskania materiałów absorpcyjnych w warunkach obciążenia quasi-statycznego. Uwzględniono: σ_{\max} – naprężenie maksymalne, W_{\max} – pracę maksymalną, E – moduł Younga. Na ryc. 2 zilustrowano przebieg wybranych, reprezentatywnych krzywych uzyskanych w badaniu.

Tabela 1. Statystyki opisowe wyników próby ściskania pianek absorpcyjnych

Table 1. Descriptive statistics of compressive strength results of absorption foams

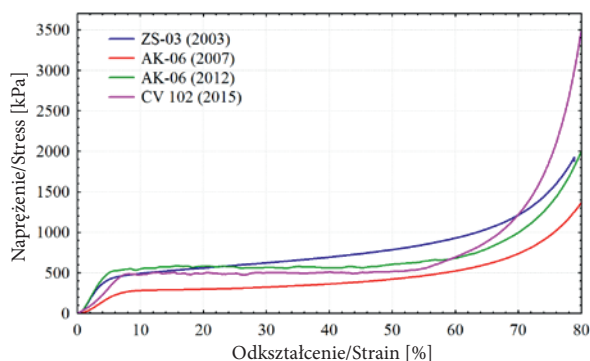
Material absorbera/ Absorber material	Średnia/Average	Wartość minimalna/ Minimum value	Wartość maksymalna/ Maximum value	Odchylenie standardowe/ Standard deviation	Współczynnik zmienności [%]/ Coefficient of variation [%]
σ_{\max} [kPa]					
ZS-03 (2003)	2080,03	1538,93	2689,56	425,10	20,44
AK-06 (2007)	1352,34	1238,90	1426,52	68,78	5,09
AK-06 (2012)	1807,88	1298,97	2095,51	309,47	17,12
CV 102 (2015)	3458,85	3015,05	3895,82	323,68	9,36
W_{\max} [mJ]					
ZS-03 (2003)	1024,56	924,08	1130,48	73,32	7,16
AK-06 (2007)	581,03	530,51	617,89	31,72	5,46
AK-06 (2012)	837,55	715,35	944,29	88,54	10,57
CV 102 (2015)	976,75	919,86	1053,98	64,41	6,59
E [kPa]					
ZS-03 (2003)	10958,56	5793,36	12894,72	2992,98	27,31
AK-06 (2007)	4869,27	4133,22	5898,00	675,24	13,87
AK-06 (2012)	11142,60	10114,31	11844,41	775,82	6,96
CV 102 (2015)	5455,29	5074,29	5880,39	337,08	6,18

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Test results

Table 1 presents the descriptive statistics of the results of the compressive strength test of absorptive materials under quasi-static load. The following factors were taken into account: σ_{\max} – maximum stress, W_{\max} – maximum work, E – Young's modulus. Fig. 2 illustrates the course of the selected representative curves obtained in the test.



Rycina 2. Reprezentatywne charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe (σ - ϵ) absorberów uzyskane w próbie ściskania

Figure 2. Representative compressive stress-strain characteristics (σ - ϵ) of studied absorbers

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

W tabeli 2 zaprezentowano wyniki jednocyklowego obciążenia i odciążenia w zakresie odkształceń sprężystych (obciążenie: 20 N, odciążenie: 0 N). Uwzględniono: $\sigma_{maks.}$ – naprężenie maksymalne, $W_{iob.}$ – pracę odkształcenia przy obciążeniu, $W_{iod.}$ – pracę odkształcenia przy odciążeniu, ΔW_i – różnicę pracy odkształcenia (przy obciążeniu i odciążeniu), $dL(\sigma_{maks.})$ – skrócenie przy naprężeniu maksymalnym, $t_{bad.}$ – czas trwania badania.

Table 2 presents the results of single-cycle loading and unloading in the form of elastic deformations (loading: 20 N, unloading: 0 N). The following were taken into account: $\sigma_{max.}$ – maximum stress, $W_{iob.}$ – deformation work under load, $W_{iod.}$ – deformation work under unloading, ΔW_i – deformation work difference (under load and unloading), $dL(\sigma_{max.})$ – shortening at maximum stress, $t_{bad.}$ – test duration.

Tabela 2. Wyniki badań z próby jednocyklowego obciążenia i odciążenia pianek absorpcyjnych

Table 2. The results of single-cycle loading and unloading of absorption foams

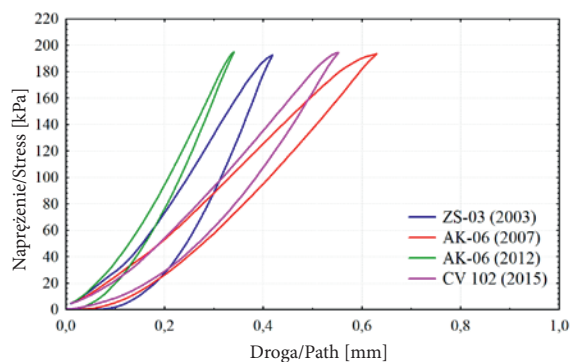
Material absorbera/ Absorber material	$\sigma_{maks.}$ [kPa]	$W_{iob.}$ [Nmm]	$W_{iod.}$ [Nmm]	ΔW_i [Nmm]	$dL(\sigma_{maks.})$ [mm]	$t_{bad.}$ [s]
ZS-03 (2003)	193	3,76	2,42	1,34	0,4	4,16
AK-06 (2007)	194	6,24	4,77	1,47	0,6	5,07
AK-06 (2012)	195	2,93	2,46	0,46	0,3	3,71
CV 102 (2015)	194	5,03	3,87	1,15	0,6	4,48

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Na ryc. 3 przedstawiono pętle histerezy otrzymane w badaniu. Na ryc. 4 zestawiono obrazy SEM struktury wybranych materiałów absorpcyjnych niepoddanych i poddanych próbie ściskania.

Fig. 3 shows the hysteresis loop obtained in the test. Fig. 4 compares the SEM images of the structure of selected absorptive materials which were either subjected or not subjected to the compressive strength test.

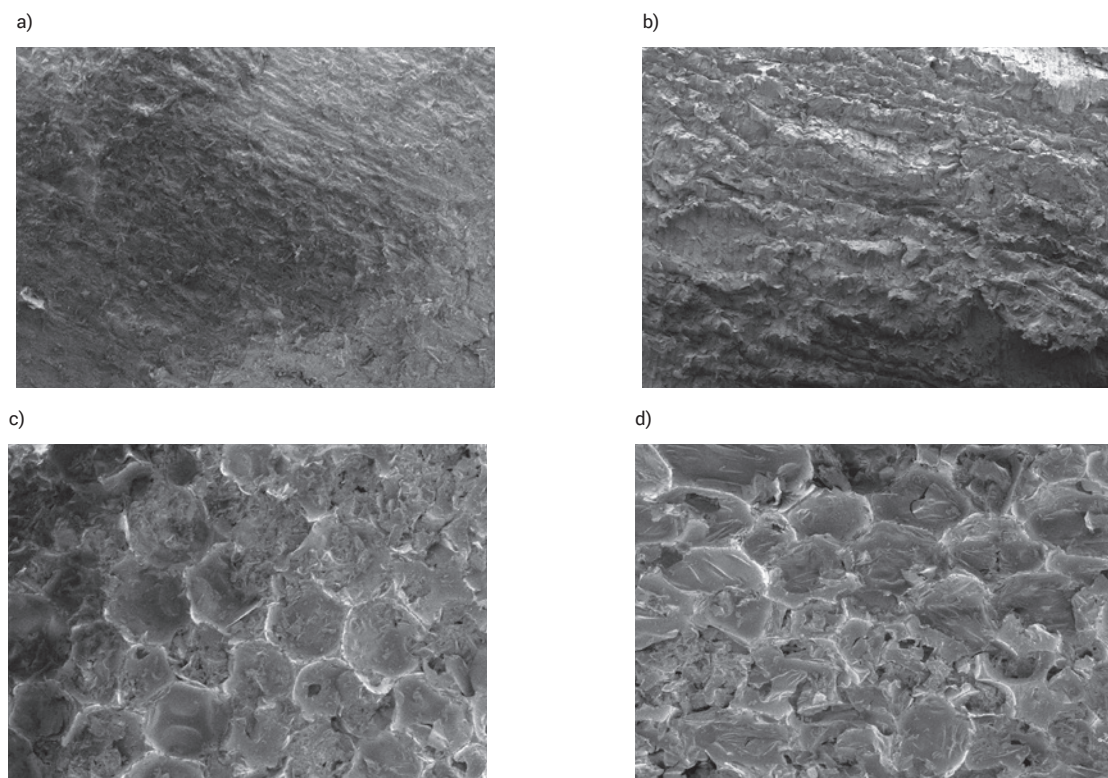


Rycina 3. Pętle histerezy otrzymane przy jednocyklowym obciążeniu w zakresie odkształceń sprężystych

Figure 3. Hysteresis loops obtained from single-cycle loading in elastic strain field

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Rycina 4. Struktura materiałów wykorzystywanych w hełmach ZS-03 i AK-06 z 2007 roku przed przeprowadzeniem próby ściskania (a, c) oraz po przeprowadzeniu próby ściskania (b, d)

Figure 4. Structure of materials before compressive strength test used in helmets: a) ZS-03, c) AK-06 (2007), and after compressive strength test used in helmets: b) ZS-03, d) AK-06 (2007)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Omówienie wyników badań

Analizując przebiegi charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych absorberów, można wyróżnić trzy zakresy. W pierwszym – sprężystym wraz ze wzrostem naprężenia wzrasta liniowo odkształcenie, powstające na skutek zginania krawędzi lub deformacji ścian komórek pianki [8]. W tym zakresie energia jest pochłaniana w niewielkim stopniu, pozostała część energii przekazywana jest w kierunku głowy. W drugim zakresie, zwanym *plateau*, następuje wzrost odkształcenia (do ok. 60-70%) przy niewielkim wzroście wartości naprężenia. Dochodzi do znacznego odkształcenia. Na końcu tego etapu dochodzi do pęknięć oraz zetknięcia się ścianek części komórek. W tym zakresie w dużym stopniu pochłaniana jest energia [9]. Znaczący udział *plateau* w charakterystyce ściskania świadczy o dobrej zdolności pochłaniania energii mechanicznej. W trzecim zakresie dochodzi do znacznego wzrostu naprężenia przy niewielkim wzroście odkształcenia, ostatecznego zniszczenia większości komórek oraz zetknięcia się ścianek – zgęszczenia pianki. Energia jest tu pochłaniana w niewielkim stopniu. W badaniach mikroskopowych wykonanych w ramach tej pracy zaobserwowano różnice w mechanizmie niszczenia, w szczególności między materiałem wkładki z polistyrenu ekspandowanego a piankami poliuretanowymi. Wynikają one z odmiennych struktur absorberów (ryc. 4a i 4c). Największe różnice występują w zakresie drugim – *plateau* i trzecim

Results and discussion

Three regions can be distinguished in an analysis of the stress-strain curves of absorbers. The first is the elastic region where an increase in stress is followed by a linear increase in strain, caused by the bending of the edge or deformation of foam cell walls [8]. In this region energy absorption is low and the remaining energy is transmitted towards the head. The second region, known as the *plateau*, features an increase in strain (to approx. 60-70%) with only a small increase in stress values. Significant strain is present. At the end of this stage fracturing occurs and walls of some cells come into contact with each other. Energy absorption is high in this region [9]. A significant role of the *plateau* in compressive characteristics is proof of a good ability to absorb mechanical energy. The third region involves a considerable increase in stress with only a small increase in strain, the complete destruction of most cells and collision of walls – causing foam density to go up. Energy absorption is low. In microscopic tests conducted in this study differences were observed in the destruction mechanism, especially between the material of the expanded polystyrene insert and the polyurethane foams. They are caused by the structural differences between these absorbers (Fig. 4a and 4c). The biggest differences are present in the second (*plateau*) and third (foam

– zagęszczenia pianki. Materiały z polistyrenu pod wpływem obciążenia ulegały zmiażdżeniu (ryc. 4b), proces niszczenia nie był tożsamy z wyżej opisanym. Natomiast w przypadku pianek poliuretanowych dochodziło do deformacji ścian komórek i zatknięcia się ścianek – zagęszczenia (ryc. 4d). Mechanizm niszczenia był zgodny z przewidywanym dla takich struktur.

Stwierdzenie, jak absorbery stosowane w konstrukcjach hełmów strażackich zachowują się pod obciążeniem mechanicznym, jest istotna na poziomie obciążeń występujących zarówno w normalnych warunkach eksploatacji, jak i w warunkach nadzwyczajnych. Stykający się z głową obszar wkładki w czasie normalnego użytkowania hełmu nie powinien ulegać odkształceniu trwałemu, czyli deformacji. W założeniu powinny występować jedynie nietrwale – sprężyste odkształcenia materiału absorbera. W przypadku zachowania sprężystego pętla histerezy (ryc. 3) powinny się zamykać po odciążeniu, a przebieg krzywych obciążania i odciążania powinien być zbliżony. Lokalne występowanie stref trwałej deformacji, np. w miejscu kontaktu z głową ratownika, wiąże się z zagęszczeniem pianki w tych miejscach. Deformacja może wpływać negatywnie na zdolność absorpcji i dyssypacji energii uderzenia. Natomiast w sytuacji nadzwyczajnej, np. w przypadku uderzenia w hełm ratownika, ważna jest maksymalna absorpcja energii – praca absorbera wyrażona jako pole pod krzywą naprężeniowo-odkształceniową.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wskazują na znaczące różnice między analizowanymi materiałami. Absorber wykorzystywany w hełmie ZS-03 charakteryzuje się stosunkowo dobrą wytrzymałością oraz wysoką wartością pracy potrzebnej do zniszczenia. Wysoka wartość modułu Younga wskazuje na dużą sztywność. Związana jest ona ze strukturą materiału, która jest inna niż w pozostałych wkładkach. Stykanie się tej wkładki z głową ratownika będzie mało komfortowe. Ponadto pod działaniem obciążenia powyżej zakresu sprężystego dochodzi do kumulacji zmian w strukturze – widać wyraźne nachylenie wykresu w zakresie *plateau*, co może świadczyć o gorszej zdolności pochłaniania energii mechanicznej.

W charakterystyce naprężeniowo-odkształceniowej pianki absorpcyjnej stosowanej w hełmach AK-06 z 2007 roku, tak jak w przypadku wkładki z polistyrenu, widoczny jest wzrost naprężenia w zakresie *plateau*. Ponadto spośród badanych wkładek właśnie ten materiał cechuje się najmniejszą wytrzymałością, najniższą wartością pracy potrzebnej do zniszczenia oraz najniższą wartością modułem Younga. Pianka wykorzystywana w hełmie AK-06 z 2012 roku charakteryzuje się dużo większą wytrzymałością oraz wyższą wartością pracy potrzebnej do zniszczenia niż wkładka z 2007 roku. W zakresie *plateau* nie dochodziło do stopniowego wzrostu naprężenia, kumulacji zmian strukturalnych. Właściwości te zostały jednak uzyskane łącznie ze znaczącym zwiększeniem się sztywności pianki poliuretanowej. W przypadku tego materiału wartość modułu Younga była wyższa niż w przypadku polistyrenu ekspandowanego. Materiał absorpcyjny stosowany w hełmach CV 102 cechuje się stosunkowo dobrą wytrzymałością oraz wysoką wartością pracy potrzebnej do zniszczenia. Nie jest on sztywnym, ma dobre właściwości relaksacyjne. Ponadto w tym materiale w zakresie odkształceń od ok. 8 do ok. 55% nie dochodzi do istotnych zmian w strukturze (deformacji, pęknięcia ścian komórek).

Wyniki badań w zakresie sprężystym wskazują na duże różnice między badanymi materiałami (ryc. 3). Pianka wykorzystywana w hełmie AK-06 z 2012 roku charakteryzuje się najniższą wartością

density increase) regions. Polystyrene materials were crushed under load (Fig. 4b), the failure process was not similar to the one described above. In the case of polyurethane foams, cell walls were deformed and came into contact, increasing the density (Fig. 4d). The failure mechanism was as expected for similar structures.

Determining how absorbers used in the structures of firefighter helmets behave under mechanical load is important both under normal operational loads and in extraordinary situations. The area of the insert in direct contact with the head should not be subject to deformation in normal use. It is assumed that only temporary elastic deformations of the absorber material are allowed. In the case of elasticity, the hysteresis loops (Fig. 3) should be closed after unloading and the course of the loading and unloading curves should be similar. The local appearance of permanent deformation zones, for example at the site of contact with the firefighter's head, involves local increases in the density of the foam. Deformation may adversely affect the absorption and impact energy dissipation capabilities. In extraordinary situations, such as when a firefighter helmet sustains impact, maximum energy absorption, or the work of the absorber expressed as the region below the stress-strain curve, is important.

The results of compressive strength tests indicate significant differences between the analysed materials. The absorber used in the ZS-03 helmet is characterised by a relatively good strength and high value of work needed for failure to occur. A high value of Young's modulus indicates high stiffness. It is connected with the material's structure, which is different than in other inserts. When the insert comes into contact with the firefighter's head, the feeling is rather uncomfortable. In addition, changes in the structure accumulate under loads exceeding the yield point – the curve clearly inclines in the plateau region, which might indicate lower mechanical energy absorption capacity.

The stress-strain curve of the absorption foam used in the AK-06 helmets from 2007, just as in the case of a polystyrene insert, shows an increase in the stress in the plateau region. Furthermore, of all the tested inserts, this material has the lowest strength, the lowest value of work needed for failure to occur and the lowest Young's modulus value. The foam used in the AK-06 helmet from 2012 is characterised by much higher strength and higher value of work needed for failure to occur than the insert from 2007. In the *plateau* region, there was a gradual increase in stress and an accumulation of structural changes. However, these properties were obtained in combination with a significant increase in polyurethane foam stiffness. For this material, Young's modulus value was higher than for expanded polystyrene. The absorptive material used in the CV-102 helmet is characterised by a relatively good strength and high value of work needed for failure to occur. It is not stiff and offers good relaxation properties. Moreover, in the deformation region, from approx. 8% to approx. 55% there are not significant changes to the structure (deformation, fracture of cell walls).

The test results below the yield point indicate high differences between the studied materials (Fig. 3). The foam used in the AK-06 helmet from 2012 is characterised by the lowest

pracy przy obciążeniu i odciążeniu oraz najmniejszym odkształceniem przy zadanym obciążeniu (tab. 2). Sztywność tego materiału jest największa. Zbliżonymi właściwościami cechował się wkład z polistyrenu ekspandowanego. Materiał ten odkształcił się w większym zakresie oraz wykonał większą pracę odkształcenia pod obciążeniem. Materiały poliuretanowe stosowane w hełmach z 2007 i 2015 roku mają podobne właściwości w zakresie sprężystym. Z tym że spośród badanych wkładek pianka z 2007 roku charakteryzuje się najwyższą wartością energii dyssypacji. Oznacza to, że absorber ten ma najgorsze właściwości konstrukcyjne w porównaniu z innymi badanymi absorberami. Materiał jest jednak najmniej sztywny, dlatego komfort jego użytkowania w przypadku oddziaływania małych obciążeń eksploatacyjnych będzie prawdopodobnie największy ze względu na jego dużą podatność.

Wnioski

1. Materiały absorpcyjne charakteryzują się różnymi właściwościami mechanicznymi. Wybór optymalnego rozwiązania jest możliwy dzięki badaniom laboratoryjnym.
2. Materiały z polistyrenu ekspandowanego charakteryzują się dobrą wytrzymałością. Wysoka wartość modułu Younga wskazuje na mały komfort ich użytkowania. Ponadto w materiałach tych, w zakresie *plateau*, dochodzi do kumulacji zmian w strukturze, co zmniejsza właściwości ochronne absorbera.
3. Pianki poliuretanowe stosowane w hełmach AK-06 z 2007 roku cechują się najgorszymi właściwościami konstrukcyjnymi, w tym najmniejszą zdolnością do absorpcji energii, spośród badanych materiałów. Są one jednak najmniej sztywne, co wpływa na komfort ich użytkowania.
4. Materiały wykorzystywane w hełmach AK-06 z 2012 roku cechują się stosunkowo dobrą wytrzymałością oraz zdolnością do absorpcji energii. Ich sztywność jest dużą, zbliżoną do sztywności pianek z polistyrenu ekspandowanego.
5. Wśród badanych pianek poliuretanowych najlepszymi właściwościami charakteryzuje się materiał stosowany w hełmach CV 102 z 2015 roku. Ma on zdolność do absorpcji w podobnym stopniu co polistyren ekspandowany. Użytkowanie tych pianek jest komfortowe ze względu na ich mniejszą sztywność. Ponadto w piankach, po przekroczeniu fazy sprężystej, nie dochodzi do kumulacji zmian strukturalnych w zakresie *plateau*.

Literatura/Literature

- [1] <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rynek-pracy/warunki-pracy-wypadki-przy-pracy/wypadki-przy-pracy-w-2016-r-,3,26.html> [dostęp: 20.11.2017 r.].
- [2] PN-EN 443:2008 Hełmy strażackie.
- [3] PN-EN 166:2005 Ochrona indywidualna oczu.
- [4] Pieniak D., Walczak A. *Wstępne badania degradacji mechanicznej materiałów wkładek absorbujących energię*, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2017, 61, 121–135.
- [5] 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, 10, 581–591.

value of work at loading and unloading and the lowest deformation under the set load (Table 2). This material has the highest stiffness. Similar properties were observed for the expanded polystyrene insert. The deformation of this material was higher and more work was needed under load. Polyurethane materials used in the helmets from 2007 and 2015 had similar properties below they yield point. However, of the tested inserts, the foam from 2007 offers the highest dissipation energy value. This means that this absorber has the worst structural properties in comparison to the other tested absorbers. At the same time, this material has the lowest stiffness, which is why its user comfort under small operational load will probably be the highest due to its high susceptibility.

Conclusions

1. Absorptive materials are characterised by different mechanical properties. Laboratory tests facilitate the selection of the optimum solution.
2. Expanded polystyrene materials have good strength. A high value of Young's modulus indicates low user comfort. In addition, there is an accumulation of structural changes in the *plateau* region, which reduces the protective properties of the absorber.
3. Polyurethane foams used in AK-06 helmets from 2007 have the worst structural properties, including the lowest energy absorption capacity of all the tested materials. However, they have the lowest stiffness, which improves user comfort.
4. The materials used in AK-06 helmets from 2012 are characterised by a relatively low strength and energy absorption capacity. Their stiffness is high, similar to the stiffness of expanded polystyrene foams.
5. Of the studied polyurethane foams, the material used in CV 102 helmets from 2015 was found to have the best properties. It has energy absorption capacity similar to that of expanded polystyrene. These foams offer good user comfort due to lower stiffness. In addition, after the yield point is exceeded, foams are not subject to structural changes in the *plateau* region.

- [6] Saha M.C., Mahfuz H., Chakravarty U.K., Uddin M., Kabir Md.E. Jee-lani S., *Effect of density, microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams*, „Materials Science and Engineering A” 2005, 406, 328–336.
- [7] Shuaeib F.M., *Motorcycle helmet: part II. Materials and design issues*, „Journal of Materials Processing Technology” 2002, 123, 422–431.
- [8] Brid E.T., Bowden A.E., Seeley M.K., Fullwood D.T. *Materials selection of flexible open-cell foams in energy absorption applications*, „Materials and Design” 2018, 137, 414–421.
- [9] Radziszewski L., *Kaski rowerowe. Konstrukcja, technologie, użytkowanie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Kielce 2015.

ST. KPT. DR INŻ. AGATA WALCZAK – ukończyła Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. W 2017 roku w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych uzyskała stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie: budowa i eksploatacja maszyn. Jest adiunktem w Zakładzie Sprzętu Ratowniczo-Gaśniczego Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego w Szkole Głównej Służby Pożarniczej.

DR INŻ. DANIEL PIENIAK – ukończył Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej. W tej samej jednostce w 2010 roku uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie: budowa i eksploatacja maszyn. Od 2006 do 2017 roku był pracownikiem Zakładu Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Obecnie pracuje w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów i Mechaniki Uszkodzeń Środków Transportu w Wyższej Szkole Ekonomii i Innowacji w Lublinie. Prowadzi badania eksploatacyjne, wytrzymałości i mechanizmów uszkodzeń materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych oraz komponentów sprzętu pożarniczego i ochron osobistych w warunkach narażeń termicznych i mechanicznych.

ST. BRYG. DR INŻ. IRENEUSZ NAWOROL – ukończył Wydział Ochrony Przeciwpożarowej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie w zakresie specjalności technicznej. W 2007 roku na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w zakresie inżynierii środowiska. Od 2013 roku pełni funkcję kierownika Zakładu Sprzętu Ratowniczo-Gaśniczego w Katedrze Techniki Pożarniczej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej.

KPT. MGR INŻ. WIKTOR WĄSIK – ukończył Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. W latach 2007-2011 był pracownikiem Zespołu Laboratoriów Technicznego Wyposażenia Straży Pożarnej i Technicznych Zabezpieczeń Przeciwpożarowych w CNPOB-PIB. Od 2011 roku pracuje jako asystent w Zakładzie Sprzętu Ratowniczo-Gaśniczego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Jest autorem publikacji z zakresu sprzętu ratowniczo-gaśniczego. Swoje zainteresowania zawodowe skupia na zagadnieniach związanych z: pompami pożarniczymi, pojazdami pożarniczymi, sprzętem do wytwarzania pian gaśniczych, stałymi urządzeniami gaśniczymi oraz ratownictwem chemicznym i ekologicznym.

BRYG. MGR INŻ. PIOTR CHUDY – ukończył Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Jest wieloletnim, doświadczonym pracownikiem dydaktycznym w Zakładzie Sprzętu Ratowniczo-Gaśniczego Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego w Szkole Głównej Służby Pożarniczej.

KPT. MGR INŻ. MONIKA SUTUŁA – ukończyła Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Od 2011 roku jest asystentem w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego w Szkole Głównej Służby Pożarniczej.

SENIOR CAPTAIN, AGATA WALCZAK, PH.D. ENG. – graduated from the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service in Warsaw. In 2017 she received a Ph.D. Eng. degree in the construction and operation of machines at the Air Force Institute of Technology. She is an assistant professor at the Institute of Rescue and Firefighting Equipment of the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service in Warsaw.

DANIEL PIENIAK, PH.D. ENG. – graduated from the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology. In 2010 he received a Ph.D. Eng. degree in the construction and operation of machines at the same Faculty. Between 2006 and 2017 he was employed in the Institute of Applied Mechanics of the Main School of Fire Service in Warsaw. He is currently employed at the Laboratory of Materials Strength Testing and Failure Mechanics of Modes of Transport at the University of Economics and Innovation in Lublin (WSEI). He conducts in-service examination, tests of strength and failure of structural and functional materials and components of firefighting and personal protection equipment when exposed to thermal and mechanical factors.

SENIOR BRIG. IRENEUSZ NAWOROL, PH.D. ENG. – graduated from the Faculty of Fire Protection at the Main School of Fire Service in Warsaw in a technical specialisation. In 2007 he received a Ph.D. Eng. in Environmental Engineering at the Faculty of Environmental Engineering of the Warsaw University of Technology. Since 2013 he has been the Head of the Institute of Rescue and Firefighting Equipment at the Chair of Firefighting Techniques at the Main School of Fire Service.

CAPTAIN WIKTOR WĄSIK, M.ENG. – graduated from the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service in Warsaw. In 2007-2011 he was employed at the the Laboratory of Technical Equipment of Fire Protection Units at the Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute. Since 2011 he has been an assistant at the Institute of Rescue and Firefighting Equipment at the Main School of Fire Service. He has authored several publications in the field of rescue and firefighting equipment. His professional interests focus on issues connected with fire pumps, fire vehicles, foam equipment, fixed firefighting equipment and chemical and ecological rescue.

BRIGADIER PIOTR CHUDY, M.ENG. – graduated from the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service in Warsaw. He is an experienced faculty member at the Institute of Applied Mechanics of the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service in Warsaw.

CAPTAIN MONIKA SUTUŁA, M.ENG. – graduated from the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service in Warsaw. Since 2011 she has been an assistant at the Institute of Applied Mechanics of the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service in Warsaw.