

Robert Wolański^{a)*}, Anna Rabajczyk^{b)}

^{a)} *The Fire Service College of the State Fire Service in Cracow / Szkoła Aspirantów Państwowej Straży Pożarnej w Krakowie*

^{b)} *Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute / Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej – Państwowy Instytut Badawczy*

* *Corresponding author / Autor korespondencyjny: arabajczyk@cnbop.pl*

Selected Aspects of Transformation of Textile Elements of Firemen's Personal Protection

Wybrane aspekty transformacji tekstylnych elementów ochrony osobistych strażaków

ABSTRACT

Purpose: The purpose of the article is to present selected problems related to the directions of changes in the clothing that is the equipment of the rescuer firefighter and that is part of standard personal protective equipment.

Introduction: Development in technology and the economy is resulting in products with increasingly complex structures in our environment. In the event of a fire, substances can be emitted that threaten the health and life of the firefighter. Therefore, personal protective equipment used by firefighters (including clothing) must be constantly adapted to the changing environment. Both the fibres and the structure or layering of the garment are modified. Increasingly, users of these products expect adequate resistance to biological and chemical agents. This is a result of the increasing number of factors that pose a risk when firefighters are working. Despite the clothing modifications used to date, it is still not possible to exclude the risk of toxic substances, such as polyaromatic hydrocarbons, which are products of combustion in a fire environment, and acid gases penetrating the firefighter's skin. The simultaneous exposure to radiant heat in the fire environment and the physical work performed by the firefighter significantly intensify the heat and mass exchange in the personal protection. Therefore, the interaction of protective structures with the rescuer's body is playing an increasingly important role. Modifications based on nanotechnology are being used to make garments more resistant while maintaining or even reducing their weight. However, it should be pointed out that sometimes the changes concern one aspect, such as humidity, to the exclusion of other hazards arising from the physical and chemical characteristics of the substances emitted during the event.

Methodology: The article is based on a review of selected literature on the topic covered.

Conclusions: Modifications made to the fibres or to the structure and composition of the garment make it possible to obtain a product with improved performance in terms of protecting the firefighter. It is important to note, however, that they should consider all possible exposure pathways and not focus on one selected parameter. Therefore, further work is needed to adapt clothing to the emerging risks.

Keywords: innovations, firefighter's personal protective equipment, firefighter's special clothing

Type of article: review article

Received: 31.03.2023; **Reviewed:** 10.05.2023; **Accepted:** 13.06.2023;

Authors' ORCID IDs: R. Wolański – 0000-0002-5625-0936, A. Rabajczyk – 0000-0003-4476-8428;

The authors contributed equally to this article;

Please cite as: SFT Vol. 61 Issue 1, 2023, pp. 86–101, <https://doi.org/10.12845/sft.61.1.2023.5>;

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

ABSTRAKT

Cel: Celem artykułu jest przedstawienie wybranych problemów związanych z kierunkami zmian w ubraniach stanowiących wyposażenie strażaka-ratownika oraz będących częścią standardowych środków ochrony indywidualnej.

Wprowadzenie: Rozwój w technologii oraz gospodarce powoduje, że w naszym otoczeniu pojawiają się produkty o coraz bardziej złożonych strukturach. W przypadku pożaru mogą być emitowane substancje zagrażające zdrowiu i życiu strażaka. Środki ochrony indywidualnej stosowane przez straż pożarną (w tym także odzież) muszą być zatem stale dostosowywane do zmieniającego się środowiska. Modyfikacjom podlegają zarówno włókna, jak i struktura, czy warstwowość odzieży. Coraz częściej użytkownicy tych wyrobów oczekują odpowiedniej odporności na działanie czynników biologicznych i chemicznych. Jest to rezultat rosnącej liczby czynników stanowiących zagrożenie podczas pracy strażaków. Mimo zastosowanych dotychczas modyfikacji ubrań nadal nie można wykluczyć ryzyka przenikania do powierzchni skóry strażaka substancji toksycznych, np. węglowodorów poliaromatycznych, będących

produktami spalania w środowisku pożaru, oraz kwaśnych gazów. Równoczesne oddziaływanie promieniowania cieplnego w środowisku pożarowym oraz wykonywana przez strażaka praca fizyczna intensyfikują znacząco wymianę ciepła i masy w ochronach osobistych. Coraz większą rolę odgrywa zatem interakcja konstrukcji ochronnych z organizmem ratownika. W celu zwiększenia odporności odzieży przy jednoczesnym utrzymaniu bądź nawet zmniejszeniu jej wagi zastosowanie znajdują modyfikacje bazujące na nanotechnologii. Należy jednak zauważyć, iż niejednokrotnie zmiany dotyczą jednego aspektu, np. wilgotności, z pominięciem innych zagrożeń wynikających z charakterystyki fizyko-chemicznej substancji emitowanych podczas zdarzenia.

Metodologia: Artykuł został opracowany na podstawie przeglądu wybranej literatury z zakresu poruszanej tematyki.

Wnioski: Modyfikacje wprowadzane we włóknach czy też strukturze i składzie odzieży pozwalają na otrzymanie produktu charakteryzującego się lepszymi parametrami w zakresie ochrony strażaka. Należy jednak zauważyć, iż powinny one uwzględniać wszystkie możliwe drogi narażenia, a nie skupiać się na jednym, wybranym parametrze. Dlatego też niezbędne są dalsze prace nad dostosowaniem odzieży do pojawiających się zagrożeń.

Słowa kluczowe: innowacje, środki ochrony indywidualnej strażaka, ubrania specjalne straży pożarnej

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

Przyjęty: 31.03.2023; **Zrecenzowany:** 10.05.2023; **Zaakceptowany:** 13.06.2023;

Identyfikatory ORCID autorów: R. Wolański – 0000-0002-5625-0936, A. Rabajczyk – 0000-0003-4476-8428;

Autorzy wnieśli jednakowy wkład merytoryczny w opracowanie artykułu;

Proszę cytować: SFT Vol. 61 Issue 1, 2023, pp. 86–101, <https://doi.org/10.12845/sft.61.1.2023.5>;

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

Introduction

The work of firefighters is very often associated with the need to operate in difficult conditions. Consequently, they are exposed to a variety of external factors due to the specific nature of the incident, such as high temperatures or high concentrations of toxins produced during the fire. The destructive impact of external factors, resulting in a risk to health and life, is minimised through the use of appropriate measures, including, but not limited to, appropriate clothing.

The design of garments that are PPE is subject to constant modification. The first changes initiating the evolution of clothing involved impregnating natural fibre textiles to make them flame retardant. Subsequent work in this area has been carried out continuously, in line with developments in the economy and social needs. Recent developments have introduced synthetic fabric and laminate constructions. In all such technologies, a protection model based on the principle of insulating the body from the environment and – consequently – limiting and delaying the passage of heat flux and pollutants to the skin surface is adopted as the primary mechanism.

Fabrics and garments are also subject to constant modification due to the requirements introduced in the legal system – from the implementation of ASTM F1959 [1], the arc test section of ASTM F1506 [2] (resulting from research by Stoll & Chianta [3]), or the introduction of a criterion to protect the rescuer firefighter from the risk of a second-degree burn [4–5]. There is also a fabric construction model based on metallised outer layers, included in PN-EN-1486:2009 [6]. However, it is used sporadically due to the technical characteristics of this model, i.e. weight, low resistance of the reflective layers, ergonomic limitations. Furthermore – as emphasized marketing-wise – its high level of heat flux reflectivity is temporary. This is due to the rapid heating of the

Wprowadzenie

Praca strażaków związana jest bardzo często z koniecznością funkcjonowania w trudnych warunkach. W konsekwencji narażeni są oni na różnorodne czynniki zewnętrzne wynikające ze specyfiki zdarzenia, jak np. wysoka temperatura czy duże stężenie toksyn powstałych podczas pożaru. Destrukcyjny wpływ czynników zewnętrznych, powodujący zagrożenie zdrowia i życia, minimalizowany jest poprzez zastosowanie odpowiednich środków, w tym m.in. odpowiednią odzież.

Konstrukcje ubrań będących środkami ochrony indywidualnej podlegają stałym modyfikacjom. Pierwsze zmiany inicjujące ewolucję ubrań polegały na impregnowaniu tekstyliów z włókien naturalnych w celu uzyskania ich uniepalnienia. Kolejne prace w tym obszarze prowadzone były w sposób ciągły, adekwatnie do rozwoju gospodarki i potrzeb społecznych. Najnowsze rozwiązania wprowadziły syntetyczne konstrukcje tkanin i laminatów. We wszystkich tego rodzaju technologiach jako podstawowy mechanizm przyjęto model ochrony oparty na zasadzie izolowania ciała od środowiska i – w konsekwencji – ograniczenia i opóźnienia przejścia strumienia cieplnego i zanieczyszczeń do powierzchni skóry.

Tkaniny i odzież podlegają stałym modyfikacjom także ze względu na wymagania wprowadzane w systemie prawnym – od momentu wdrożenia normy ASTM F1959 [1], części dotyczącej testu łukowego w normie ASTM F1506 [2] (będącego rezultatem badań Stoll & Chianta [3]), czy też wprowadzenia kryterium ochrony strażaka-ratownika przed zagrożeniem powstania II stopnia oparzenia [4–5].

Istnieje również model konstrukcji tkanin oparty na metalizowanych zewnętrznych warstwach, ujęty w PN-EN-1486:2009 [6]. Stosowany jest jednak sporadycznie ze względu na właściwości techniczne tego modelu, tj. ciężar, niską odporność warstw refleksyjnych, ograniczenia ergonomiczne. Ponadto jego – podkreślany

metallic layer, which is mostly made up of aluminium, the conduction path and the significant lifting of subsequent layers (adhesive, support fabric). The effect is separation of the metal foil sheets from the support fabric due to loss of cohesion.

An increasing expectation of users is the resistance of clothing to biological and chemical agents. This is a result of the expanding range of hazard factors possible during rescue operations, including for hot microclimates. The risk of toxic substances (such as polyaromatic hydrocarbons) or acid gases penetrating the firefighter's skin cannot be ruled out – even with all the innovations to date. The simultaneous interaction of heat fluxes formed in the fire environment and the physical work performed by the firefighter significantly intensify the heat and mass exchange in the personal protection. The interaction of protective structures with the rescuer's body is therefore playing an increasingly important role.

Material modifications

The outer shells, the outermost layer of the material, are directly exposed to the outside world. Its primary role is therefore to provide cover against exposures associated with the microclimate environment during the rescue operations. It is the one which in most cases of exposure takes the main destructive impulse. In a fire environment, it is also intended to provide a barrier against heat fluxes.

The outer layer is a fabric with a surface density of up to 210 g/m². The first special clothing designs were dominated by fabric solutions based on NOMEX (poly(isophthalate-1,3-phenylenediamide)) and KERMEL (polyamide-imide) fibres. In recent years, with the emergence of new fibre designs, PBO (poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole)) and PBI (polybenzimidazole) fibres have begun to be introduced. They are most often combined with KEVLAR (poly(paraphenylene terephthalamide)) fibres. PBO fibres are characterised by a significantly higher – compared to KEVLAR – tensile strength. They burn at oxygen contents above 68% and undergo thermal decomposition at temperatures above 650°C. They also show high chemical resistance and dimensional stability. They have a low moisture absorption coefficient of approximately 0.6% [7].

The aim of the applied modifications is to achieve above 21% a parameter called the limiting oxygen index (LOI), which indicates the minimum percentage of oxygen required for combustion [8–9]. Table 1 shows a selection of fibre materials used in the construction of outdoor fabrics in relation to the limiting oxygen index (LOI).

marketingowo – wysoki poziom zdolności odbijania strumieni ciepłych ma charakter chwilowy. Wynika to z szybkiego nagrzewania się warstwy metalicznej, zbudowanej przeważnie z aluminium, drogę przewodzenia oraz znaczące podniesienie kolejnych warstw (klej, tkanina nośna). Efektem jest oddzielanie się płatów folii metalowej od tkaniny nośnej na skutek utraty spójności.

Coraz częstszym oczekiwaniem użytkowników jest odporność odzieży na działanie czynników biologicznych i chemicznych. Jest to rezultat rozszerzenia się wachlarza czynników zagrożeń możliwych do wystąpienia w trakcie działań ratowniczych, w tym dla gorącego mikroklimate. Ryzyka tego, że do powierzchni skóry strażaka przenikną substancje toksyczne (takie jak węglowodory poliaromatyczne) czy kwaśne gazy, wykluczyć nie można – nawet przy zastosowaniu wszystkich dotychczasowych innowacji. Równoczesne oddziaływanie strumieni ciepłych tworzących się w środowisku pożaru oraz wykonywana przez strażaka praca fizyczna znacząco intensyfikują wymianę ciepła i masy w ochronach osobistych. Coraz większą rolę odgrywa zatem interakcja konstrukcji ochronnych z organizmem ratownika.

Modyfikacje materiałowe

Warstwa zewnętrzna (ang. *outer shells*), czyli najbardziej zewnętrzna warstwa materiału, jest narażona bezpośrednio na oddziaływanie czynników zewnętrznych. Jej podstawową rolą jest zatem zapewnienie osłony przed narażeniami związanymi ze środowiskiem mikroklimate podczas działań ratowniczych. To ona w większości przypadków ekspozycji przyjmuje główny impuls destrukcyjny. W środowisku pożaru stanowić ma także barierę przed działaniem strumieni ciepłych.

Warstwę zewnętrzną stanowi tkanina o gęstości powierzchniowej dochodzącej do 210 g/m². W pierwszych konstrukcjach ubrań specjalnych dominowały rozwiązania tkanin opartych na włóknach NOMEX (poli(izoftalano-1,3-fenyloamid)) oraz KERMEL (poliamidoimidy). W ostatnich latach, wraz z pojawieniem się nowych konstrukcji włókien, zaczęto wprowadzać włókna PBO (poli(p-fenyleno-2,6-benzobisoksazol)) i PBI (polibenimidazol). Najczęściej łączone są one z włóknami KEVLAR (poly(paraphenylene terephthalamide)). Włókna PBO charakteryzują się znacznie większą – w porównaniu do KEVLARU – wytrzymałością na rozciąganie. Palą się w warunkach zawartości tlenu powyżej 68%, a rozpadowi termicznemu ulegają w temperaturach powyżej 650°C. Wykazują także wysoką odporność chemiczną i stabilność wymiarów. Mają niski współczynnik pochłaniania wilgoci – na poziomie ok. 0,6% [7].

Celem stosowanych modyfikacji jest osiągnięcie powyżej 21% parametru zwanego wskaźnikiem indeksu tlenowego (ang. *limiting oxygen index*, LOI), który wskazuje na minimalną zawartość procentową tlenu, wymaganą do spalania [8–9]. W tabeli 1 przedstawiono wybrane materiały włókien stosowanych do konstrukcji tkanin zewnętrznych w odniesieniu do wskaźnika indeksu tlenowego (LOI).

Table 1. Examples of fibres used in the outer layer**Tabela 1.** Przykłady włókien stosowanych w warstwie zewnętrznej

Fibre / Włókno	Manufacturer / Producent	LOI [%]	Fatigue strength [GPa]
NOMEX	Du Pont	29	0.67
CONEX	Conex	29	0.61
KERMEL	Rhone-Poulenc	31	0.53
PBI	Hoechst-Celanese	41	0.39
PANOX	RK Textiles	55	0.25

Source / Źródło: D. Miedzińska, R. Wolański, *Review of fibers and fabrics used for special services protective clothing in terms of their mechanical and thermal properties* [10].

The most important expected property of the material is the relatively low thermal conductivity compared to other fibre compositions. This property is particularly desirable when confronted with the materials used for membranes, as it is able to ensure that the heat flow towards the body surface is delayed sufficiently so that the membrane does not overheat too quickly, putting it out of service. Table 2 shows a comparison of fabrics with PBO and PBI progressive fibre content [11].

Najważniejszą oczekiwaną właściwością materiału jest relatywnie niska przewodność cieplna w porównaniu z innymi kompozycjami włókien. Ta właściwość jest szczególnie pożądana w konfrontacji z materiałami stosowanymi do produkcji membran, gdyż jest w stanie zapewnić opóźnienie przepływu ciepła w kierunku powierzchni ciała na tyle, by nie nastąpiło zbyt szybkie przegrzanie membrany, wyłączające ją z eksploatacji. W tabeli 2 przedstawiono porównanie tkanin z zawartością progresywnych włókien PBO i PBI [11].

Table 2. Comparison of properties of selected fibres used in fabric compositions for outer layers of special clothing**Tabela 2.** Porównanie właściwości wybranych włókien stosowanych w kompozycjach tkanin na warstwy zewnętrzne ubrań specjalnych

Fibre name/ Manufacturer / Nazwa włókna/ Producent	Density [g/cm ³] / Gęstość [g/cm ³]	Tensile resistance [GPa] / Wytrzymałość na rozciąganie [GPa]	Tensile modulus of elasticity [GPa] / Moduł sprężystości przy rozciąganiu [GPa]	Elongation at break [%] / Wydłużenie przy zerwaniu [%]	Decomposition temperature [°C] / Temperatura rozkładu [°C]	Water absorption [%] / Absorpcja wody [%]	Limiting Oxygen Index [LOI] / Wskaźnik (ograniczonego) indeksu tlenowego [LOI]
Aramid fibres / Włókna aramidowe							
Nomex (m-aramid)/ DuPont	1.38	0.59–0.86	7.9–12.1	20–45	400–430	5.2	29
Kevlar (p-aramid)/ DuPont	1.44	2.9–3.0	70–112	2.4–3.6	520–540	3.9	29
Twaron/ Teijin Aramid	1.45	2.4–3.6	60–120	2.2–4.4	500	3.5–5.0	29
Technora/ Teijin Aramid	1.39	3.4	72	4.6	500	4	25
PBO fibres / Włókna PBO							
ZYLON AS/ Toyobo Corporation	1.54	5.8	180	3.5	650	2	68
Toyobo Corpo- ration	1.56	5.8	270	2.5	650	0.6	68
Others / Inne							
PBI Performance Producers	1.4	0.4	5.6	30	550	15	41
Poliester	1.38	1.1	15	25	260	0.4	17

Source / Źródło: D. Czerwieńko, K. Lemańska, Ł. Pastuszka, *Technologia materiałów na ubrania strażackie* [11].

Among a number of important requirements for the resistance of protective (special) clothing to external agents, resistance to water and aggressive chemical agents plays an important role. Taking into account the operation of the garments in an environment with a strong expansion of a wide range of combustion products and environmental aggression, fibre-protective impregnations were introduced into the outer layers. Most current fabrics use fluorocarbons (FCs), e.g. perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA). They are intended to protect not only against water penetration towards the thermal insulation layer and the membrane, but also any solutions. However, due to the carcinogenic nature of these compounds, their use is restricted by the European legislation.

Of the fibres that do not contain FCs, PBI fibres in combination with KEVLAR fibres in a ratio of 40/58% are used for the composition, along with the addition of other fibres, such as electrostatic fibres at 2% (see Figure 1). In this combination, they are characterised by high resistance to heat fluxes while maintaining mechanical and strength properties and retaining elasticity.

Spółród szeregu istotnych wymagań wobec odporności ubrań ochronnych (specjalnych) na działanie czynników zewnętrznych istotną rolę odgrywa odporność na działanie wody i agresywnych czynników chemicznych. Uwzględniając eksploatację ubrań w środowisku o silnej ekspansji szerokiej gamy produktów spalania i agresji środowiska, w warstwy zewnętrzne wprowadzono impregnaty zabezpieczające włókna. W większości obecnie stosowanych tkanin wykorzystuje się fluorowęglowodory (ang. *fluorocarbons*, FCs), np. kwas perfluorooktanosulfonowy (ang. *perfluorooctanesulfonic acid*, PFOS) i kwas perfluorooktanowy (ang. *perfluorooctanoic acid*, PFOA). Mają one chronić nie tylko przed przenikaniem wody w kierunku warstwy termoizolacyjnej i membrany, ale również wszelkich roztworów. Jednakże ze względu na rakotwórczy charakter tych związków, ich stosowanie jest ograniczane przez prawodawstwo europejskie.

Spółród włókien niezawierających FCs wykorzystywane są do kompozycji włókna PBI w połączeniu z włóknami KEVLAR w stosunku 40/58% wraz z dodatkiem innych włókien, np. elektrostatycznych w ilości 2% (zob. ryc. 1). W takim zestawieniu charakteryzują się one wysoką odpornością na działanie strumieni ciepłych przy jednoczesnym utrzymaniu właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych oraz zachowaniu elastyczności.

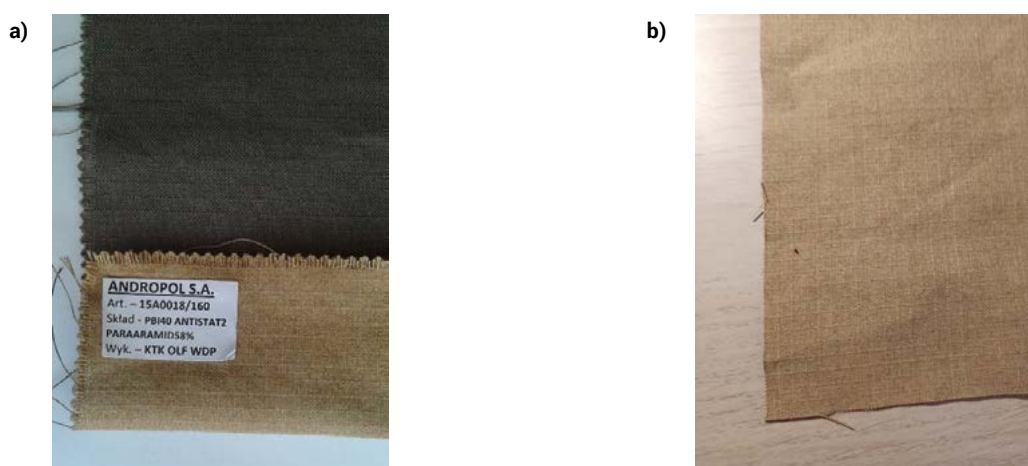


Figure 1. Material for the PROTON outer layer with the following fibre content: a) PBI – 40%, Paraaramid – 58%, Antistatic – 2%; b) PBI – 40%, Paraaramid – 58%, Antistatic – 2%

Rycina 1. Materiał na warstwę zewnętrzną PROTON z zawartością włókien: a) PBI – 40%, Paraaramid – 58%, Antistatic – 2%; b) PBI – 40%, Paraaramid – 58%, Antistatic – 2%

Source / Źródło: R. Wolański.

The techniques used to produce chemically modified flame-retardant fibres depend primarily on the type of combustible fibre that forms the substrate in the modification process. Both synthetic fibres (polyester, nylon and acrylic) and natural fibres (wool, cotton and viscose) are used [12–14]. Flame retardants for synthetic fibres include halogens, nitrogen, silicon and phosphorus. These substances are incorporated into the polymerisation process during melt spinning or doped into the spinning bath during the production of solution-spun fibres. When fibres modified in this manner are exposed to high temperatures and

Techniki stosowane w celu wytworzenia chemicznie modyfikowanych włókien ognioodpornych zależą przede wszystkim od rodzaju palnych włókien stanowiących podłoże w procesie modyfikacji. Stosowane są tu zarówno włókna syntetyczne (poliester, nylon i akryl), jak i włókna naturalne (wełna, bawełna i wiskoza) [12–14]. Substancjami zmniejszającymi palność w przypadku włókien syntetycznych są m.in. halogeny, azot, krzem i fosfor. Substancje te są włączane do procesu polimeryzacji podczas przędzenia ze stopu lub domieszkowane do kąpieli przędzalniczej podczas wytwarzania włókien przędzonych z roztworu. Gdy tak zmodyfikowane włókna

thermal hazards, they form a vapour-gas phase (non-volatile ester compound) or a solid condensed phase (carbon charred compound). This reduces their flammability. Thus, the isolation of other materials lying under the fibre takes place and the integrity of the firefighters' protective clothing is maintained.

Non-woven aerogel

One method used in polymer modification uses aerogels, which are synthesised using sol-gel processing and supercritical drying at ambient pressure. The substances obtained in this way have an extremely fine and highly porous structure (with pores only a few nanometres in size), while containing 99.8% air. Non-woven materials modified in this way have a higher heat transfer coefficient and thus better insulation [15]. It should be noted that the use of aerogel in heat protective clothing is very complex, as it requires a balance of comfort and protection [16].

Shaid et al. [16] investigated the protective properties of aerogel fleece in heat protective clothing, including firefighter's protective clothing (FPC). A 100% woven Nomex face fabric, a non-woven fabric and a commercial moisture barrier from Bruck Textile of Australia were used as the thermal liner. The non-woven aerogel was based on silica aerogel in a flexible form with a thermal conductivity of approximately $23 \text{ mW/m} \times \text{K}$ and a fabric weight of 285 g/m^2 . The reinforcing material was plastic from the Australian company MFB (Metropolitan Fire Brigade). The results show that aerogel non-woven can provide eight times the thermal resistance of commercial reinforcement and thermal material. The use of a layer of non-woven aerogel as a thermal liner resulted in a fivefold increase in heat resistance compared to using only a thermal liner and three times the resistance of the combined properties of the existing thermal liner and moisture barrier. The possibility of burns occurring under a compressive load of 49 N on a surface heated to 200°C was also tested. It was found that if only commercial reinforcing material was used in the garment, the firefighter wearing it, under the conditions indicated above, would suffer an immediate burn (within 30 seconds). In contrast, if only the non-woven aerogel is used, it will take 86 seconds before the firefighter feels pain, 107 seconds before they suffer a first-degree burn and 2.5 minutes before they are second-degree burn. The use of non-woven aerogel means that the firefighter has more than a minute of additional time to withdraw from the emergency. It has also been found that the use of aerogel reinforcement can significantly increase the protective properties of FPC [16].

Modification of the crystalline structure of fibres at a specific transformation temperature is the basis of shape memory materials (SMMs), which are able to change their current shape to a specific shape of the crystalline structure. Under the influence of heat, the shape memory material in the fireproof garment is activated. The air gaps that exist between adjacent layers of clothing widen, providing better insulation [17]. In case of polymers, the shape memory effect is observed when a plastic adapting to one shape returns to its previously adopted shape

narażane są na wysokie temperatury i zagrożenie termiczne, tworzą fazę gazowo-parową (nieletny związek estrowy) lub fazę skondensowaną w stanie stałym (węglowy związek zwęglony). W ten sposób zmniejszana jest ich palność. Tym samym następuje izolacja innych materiałów leżących pod włóknem i zachowana pozostaje integralność odzieży ochronnej strażaków.

Włóknina aerożelowa

Jedną z metod stosowanych w modyfikacji polimerów wykorzystuje aerożele, które są syntetyzowane przy użyciu przetwarzania zol-żel i suszenia w stanie nadkrytycznym pod ciśnieniem otoczenia. Tak otrzymane substancje mają niezwykle drobną i bardzo porowatą strukturę (z porami o wielkości zaledwie kilku nanometrów), zawierają przy tym 99,8% powietrza. Zmodyfikowane w ten sposób materiały włókninowe charakteryzują się większym współczynnikiem przenikania ciepła i tym samym lepszą izolacją [15]. Należy zwrócić uwagę, że stosowanie aerożelu w odzieży chroniącej przed wysoką temperaturą jest bardzo złożone, ponieważ wymaga zrównoważenia komfortu i ochrony [16].

Shaid i in. [16] zbadali właściwości ochronne włókniny aerożelowej w odzieży chroniącej przed wysoką temperaturą, w tym ubraniach ochronnych strażaka (ang. *firefighter's protective clothing*, FPC). Jako wyściółkę termiczną zastosowano w 100% tkaniny materiał wierzchni Nomex, włókninę i komercyjną barierę dla wilgoci firmy Bruck Textile z Australii. Włóknina aerożelowa bazowała na aerożelu krzemionkowym w elastycznej formie o przewodności cieplnej ok. $23 \text{ mW/m} \times \text{K}$ i gramaturze tkaniny 285 g/m^2 . Materiałem wzmacniającym było tworzywo australijskiej firmy MFB (Metropolitan Fire Brigade). Wyniki badań wskazują, że włóknina aerożelowa może zapewnić ośmiokrotnie większą odporność termiczną niż komercyjny materiał wzmacniający i materiał termiczny. Zastosowanie warstwy włókniny aerożelowej jako wyściółki termicznej spowodowało pięciokrotny wzrost odporności na ciepło w porównaniu do zastosowania jedynie wyściółki termicznej i trzykrotnie większą odporność niż połączone właściwości istniejącej wyściółki termicznej i bariery dla wilgoci. Badaniom poddano także możliwość wystąpienia oparzenia pod obciążeniem ściskającym 49 N na powierzchni ogrzanej do 200°C . Stwierdzono, że jeśli w ubraniu użyje się tylko komercyjnego materiału wzmacniającego, to noszący je strażak, we wskazanych wyżej warunkach, dozna natychmiastowego oparzenia (w ciągu 30 sekund). Natomiast w przypadku zastosowania wyłącznie włókniny aerożelowej minie 86 sekund zanim strażak odczuje ból, 107 sekund zanim dozna oparzenia pierwszego stopnia i 2,5 minuty przed oparzeniem drugiego stopnia. Zastosowanie włókniny aerożelowej powoduje, że strażak ma dodatkowo ponad minutę czasu na wycofanie się z sytuacji zagrożenia. Stwierdzono także, że zastosowanie zbrojenia aerożelowego może znacząco zwiększyć właściwości ochronne FPC [16].

Modyfikacje struktury krystalicznej włókien w określonej temperaturze transformacji jest podstawą materiałów z pamięcią kształtu (ang. *shape memory materials*, SMM), które są w stanie zmienić swój aktualny kształt na określony kształt struktury krystalicznej. Pod wpływem ciepła następuje aktywacja materiału

at a certain temperature. Phase-change materials (SMM) are also used in firefighters' protective clothing to increase thermal protection. Based on the results developed from the theoretical model, it was concluded that the incorporation of PCM into firefighter clothing would provide equivalent thermal protection with reduced garment thickness [15].

Nanofibers

The nanofibers have a large specific surface area. The non-woven mesh makes the materials 'breathable' and thermally insulating. A common method of applying nanofibers to protective clothing is coating [18]. While traditional textiles used in thermal protective clothing rely on a passive insulation mechanism, "smart" clothing can provide active protection. In this case, liquid water is injected into the outer layer of the garment through a capillary mesh, and the injection process is activated by a temperature sensor embedded in the outer layer of the fabric [19]. There is a high absorption of heat and – consequently – a slowing of the temperature rise in the outer layer, which provides active protection against exposure to flash fires [15].

Comparative studies of single- and multi-layered fabrics developed using conventional and/or state-of-the-art technology, i.e. nanofibers, were carried out by Mandal et al. [20]. The analysed materials contained nanofibers and were classified in the group of multilayer fabrics. One fabric contained layers consisting of different systems, including: a meta-aramid yarn based on Filament Twill technology and a fabric made of para-aramid fibre yarn, a fabric with a composition of meta-aramid (93%), para-aramid (5%) and anti-static fibre (2%), a PTFE-coated membrane on aramid non-woven fabric, a meta-aramid non-woven fabric, and a meta-aramid nano-woven fabric. The second fabric consisted of a nonwoven fabric made of meta-aramid (75%), para-aramid (23%) and antistatic nonwoven (2%), as well as a PTFE-coated membrane on aramid nonwoven, meta-aramid nonwoven, meta-aramid nanofiber and a fabric made of: meta-aramid (93%), para-aramid (5%) and antistatic fibre (2%) [21]. The basic properties of these fabrics were measured, such as weight, thickness, thermal resistance, air permeability, resistance to evaporation and water distribution speed. Standard ISO and American Association of Textile Chemists and Colorists (AATCC) test methods were used for this, with thermal protection performance measured under exposure to flame and radiant heat of varying intensities. Based on the obtained results, the weight and thickness of the fabrics containing the nanofiber classified these materials in the group of the three thinnest and five lightest fabrics [21–22].

Parameters such as thermal resistance ($K \cdot m^2/W \cdot 10^{-3}$), air-permeability ($cm^3/cm^2/s$) and water/sweat spreading speed (mm/s) were also analysed. The fabrics included in the study

z pamięcią kształtu w odzieży ognioodpornej. Poszerzają się szczeliny powietrzne występujące między sąsiednimi warstwami odzieży, co zapewnia lepszą izolację [17]. W przypadku polimerów efekt pamięci kształtu obserwuje się, gdy tworzywo przystosowujące się do jednego kształtu powraca w określonej temperaturze do wcześniej przyjętego kształtu. Materiały zmiennofazowe (ang. *phase-change materials*, SMM) stosowane są także w strażackiej odzieży ochronnej celem zwiększenia ochrony termicznej. Bazując na wynikach opracowanych na podstawie modelu teoretycznego, stwierdzono, że włączenie PCM do odzieży strażackiej zapewni równoważną ochronę termiczną przy zmniejszonej grubości odzieży [15].

Nanowłókna

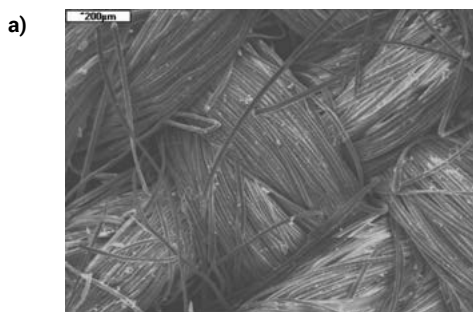
Nanowłókna mają dużą powierzchnię właściwą. Siatka włókninowa sprawia, że materiały są „oddychające” i izolujące termicznie. Powszechną metodą nakładania nanowłókien na odzież ochronną jest powlekanie [18]. Podczas gdy tradycyjne materiały tekstylne stosowane w odzieży termoochronnej opierają się na mechanizmie pasywnej izolacji, odzież „inteligentna” może zapewnić ochronę aktywną. W jej przypadku płynna woda jest wstrzykiwana do zewnętrznej warstwy odzieży przez siateczkę kapilarną, a proces wstrzykiwania jest aktywowany przez czujnik temperatury osadzony w zewnętrznej warstwie tkaniny [19]. Następuje duża absorpcja ciepła i – w konsekwencji – spowolnienie wzrostu temperatury w warstwie zewnętrznej, co zapewnia aktywną ochronę przed narażeniem na ogień błyskawiczny [15].

Badania porównawcze tkanin jedno- i wielowarstwowych, opracowanych przy użyciu konwencjonalnej i/lub najnowszej technologii, tj. nanowłókniny, przeprowadzili m.in. Mandal i in. [20]. Materiały poddane analizie zawierały nanowłókniny i były klasyfikowane w grupie tkanin wielowarstwowych. Jedna tkanina zawierała warstwy, na które składały się różne układy, w tym: przędza meta-aramidowa oparta na technologii Filament Twill i tkanina z przędzy z włókna para-aramidowego, tkanina o składzie: meta-aramid (93%), para-aramid (5%) i włókno antystatyczne (2%), membrana powlekana PTFE na włókninie aramidowej, włóknina meta-aramidowa, nanowłóknina meta-aramidowa. Druga tkanina składała się z włókniny wytworzonej z meta-aramidu (75%), para-aramidu (23%) i antystatycznej włókniny (2%), a także z membrany powlekanej PTFE na włókninie aramidowej, włókniny meta-aramidowej, nanowłókniny meta-aramidowej oraz tkaniny zbudowanej z: meta-aramidu (93%), para-aramidu (5%) i włókna antystatycznego (2%) [21]. Zmierzono podstawowe właściwości tych tkanin, takie jak: waga, grubość, odporność termiczna, przepuszczalność powietrza, odporność na parowanie i prędkość rozprowadzania wody. Wykorzystano do tego standardowe metody testowe ISO oraz Amerykańskiego Stowarzyszenia Chemików i Kolorystów Tekstyliów (ang. *American Association of Textile Chemists and Colorists*, AATCC), przy czym skuteczność ochrony termicznej została zmierzona w warunkach narażenia na działanie płomienia i ciepła promieniowania o różnym natężeniu. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że masa oraz grubość tkanin zawierających nanowłókninę klasyfikowały te materiały w grupie trzech najcieńszych i pięciu najlżejszych tkanin [21–22].

were among the five best performing, with the worst performance in the parameter relating to evaporative resistance ($\text{m}^2 \cdot \text{Pa}/\text{W}$). The range of values for this parameter for the ply fabric group was 9.4–25.4, while values in the range of 14.2–13.0 were obtained for the fabrics analysed. The thermoprotective and thermophysiological properties of fabrics containing nanofiber indicate that these fabrics meet the requirements in the areas studied [21].

Modifications with metal and non-metal nanoparticles

The structure of an aramid fabric is characterised by the 'microdistribution' of fibres in a slice of the fabric surface (see Figure 2). Therefore, the essence of all fabric weave design solutions is to ensure that the individual fibres subjected to heat transfer work together properly. In particular, when they are heated, they swell, so that the pores tighten and the outer layer is 'sealed', which triggers the thermal insulation mechanism of the layer.



Analizie poddano także wartości takich parametrów jak odporność termiczna (ang. *thermal resistance*, $\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W} \cdot 10^{-3}$), przepuszczalność powietrza (ang. *air-permeability*, $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$) oraz szybkość rozprzestrzeniania wody (potu) (ang. *water/sweat spreading speed*, mm/s). Tkaniny objęte badaniami należały do grupy pięciu o najlepszych parametrach, przy czym najslabiej tkaniny te wypadły w przypadku parametru odnoszącego się do odporności na parowanie (ang. *evaporative resistance*, $\text{m}^2 \cdot \text{Pa}/\text{W}$). Zakres wartości tego parametru dla grupy tkanin wielowarstwowych wynosił 9,4–25,4, podczas gdy dla analizowanych tkanin otrzymano wartości w granicach 14,2–13,0. Właściwości termochronne i termofizjologiczne tkanin zawierających nanowłókninę wskazują, że tkaniny te spełniają wymagania w badanych obszarach [21].

Modyfikacje za pomocą nanocząstek metali i niemetalu

Struktura tkaniny aramidowej charakteryzuje się „mikrorozmieszczeniem” włókien w wycinku powierzchni tkaniny (zob. ryc. 2). Dlatego też istotą wszystkich rozwiązań konstrukcyjnych splotów tkanin jest zapewnienie właściwej współpracy poszczególnych włókien poddanych działaniu wymiany ciepła. W szczególności podczas nagrzewania następuje ich spęcznienie, przez co zacieśniają się pory i następuje „uszczelnienie” warstwy zewnętrznej, co uruchamia mechanizm izolowania termicznego warstwy.

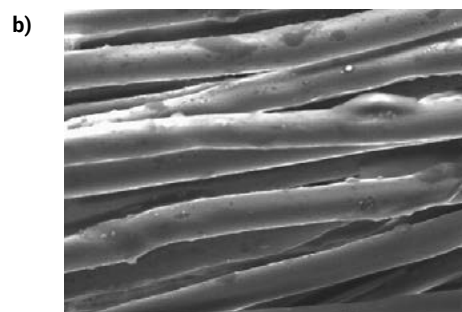


Figure 2. Images from scanning electron microscope SEM of the structure of the fabric: a) aramid; b) coated with ceramic nanocomposite nc-TiN/a-Si₃N₄

Rycina 2. Zdjęcia z elektronowego mikroskopu skanningowego SEM struktury tkaniny: a) aramidowej; b) pokrytej nanokompozytem ceramicznym nc-TiN/a-Si₃N₄

Source / Źródło: R. Wolański.

In 2006, a technological solution was developed in which an nc-TiN/a-Si₃N₄ ceramic nanolayer was applied to each fibre (see Figure 2), complementing the existing protective insulating mechanism with a reflective effect. This solution significantly increases the thermal efficiency of protection in hot microclimate environments [23].

One of the more progressive material solutions is the modification of fibres using physical vapour deposition (PVD) methods [14, 23–26]. Different variants of vacuum technology, including vacuum deposition, arc and magnetron vacuum deposition [27], and different materials – such as metals or ceramic materials

W 2006 r. opracowano rozwiązanie technologiczne, w którym naniesiono na każde z włókien nanowarstwę ceramiczną nc-TiN/Si₃N₄ (zob. ryc. 2), uzupełniając dotychczasowy ochronny mechanizm izolujący o działanie refleksyjne. Rozwiązanie to znacząco podnosi skuteczność termiczną ochrony w warunkach środowiska mikroklimatu gorącego [23].

Jednym z bardziej progresywnych rozwiązań materiałowych jest modyfikacja włókien z zastosowaniem metod PVD (ang. *physical vapour deposition*) [14, 23–26]. W badaniach i toku konstrukcyjnym brano pod uwagę różne warianty technologii próżniowych, w tym naparowanie próżniowe, łukową i magnetronowego

– were considered in the testing and design process. Due to the specificity of substrates such as synthetic NOMEX, KEVLAR and other fibres, the focus was primarily on low-temperature plasma technologies. The results of the conducted tests led to the conclusion that the most optimal material that can be applied to standard textile outer layers of special clothing is TiN/a-Si₃N₄. This is evidenced, among other things, by the temperature variations on the inside of the face fabric, metal-coated fabrics and nc-TiN/Si₃N₄ nanocomposite (see Figure 3).

napyłania próżniowego [27], oraz różne materiały, takie jak metale czy materiały ceramiczne. Ze względu na specyfikę podłoży, jakimi są syntetyczne włókna NOMEX, KEVLAR i inne, skupiono się przede wszystkim na technologiach plazmy niskotemperaturowej. Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły stwierdzić, że najbardziej optymalnym materiałem, który może być naniesiony na standardowe materiały tekstylne zewnętrznych warstw ubrań specjalnych, jest TiN/Si₃N₄. Świadczą o tym m.in. przebiegi zmian temperatury po wewnętrznej stronie tkaniny wierzchniej, tkanin pokrytych metalami oraz nanokompozytem nc-TiN/Si₃N₄ (zob. ryc. 3).

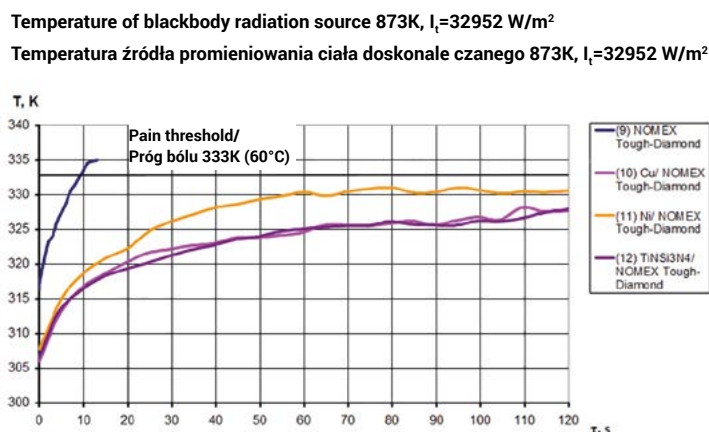


Figure 3. The course of temperature changes on the inner side of the surface fabric coated with metallic (Cu, Ni) and ceramic nc-TiN/Si₃N₄
Rycina 3. Przebieg zmian temperatury po wewnętrznej stronie tkaniny wierzchniej pokrytej warstwami metalicznymi (Cu, Ni) oraz ceramiczną nc-TiN/Si₃N₄

Source / Źródło: R. Wolański, *Technologia i materiały do produkcji ochron termicznych przed promieniowaniem podczerwonym i mikrofalowym* [23].

As part of the work carried out during the project No. DOB-BIO 6/04/104/2014 “State-of-the-art technologies for nanocomposite reflective material layers of firefighter protective clothing” [28], material modification tests were carried out. Their aim was to increase surface hardness, wear resistance or thermal resistance – so that it not only protects the life and health of the rescuer, but also ensures freedom and comfort. State-of-the-art nanocomposite reflective layers were used, applied to the fabric using magnetron sputtering and the application of suitable coatings with optimal chemical composition, structure and physical properties. Tests were also carried out to investigate the possibility of incorporating an energy-absorbing auxetic fabric into a layered protective structure. This solution was designed to increase resistance to explosion (e.g. gas) due to the energy dissipation properties of the explosion and the special arrangement of the fabric fibres [29]. Auxetic materials are characterised by a negative Poisson’s ratio, which means that under tension they increase their dimension in the direction perpendicular to the direction of the tensile force, while when compression occurs, their dimension decreases in at least one of the directions perpendicular to the compressive force [30].

Studies have shown that the use of polymer nanoparticles to produce nanocomposites improves the mechanical, thermal and

W ramach prac prowadzonych podczas realizacji projektu nr DOB-BIO 6/04/104/2014 „Nowoczesne technologie nanokompozytowych, refleksyjnych warstw materiałów strażackich ubrań ochronnych” [28] zrealizowano badania w zakresie modyfikacji materiału. Ich celem było zwiększenie powierzchniowej twardości, odporności na zużycie czy odporności termicznej – tak aby nie tylko chronił życie i zdrowie ratownika, ale także zapewnił mu swobodę i komfort pracy. Zastosowano nowoczesne, nanokompozytowe warstwy refleksyjne, nanoszone na tkaninę za pomocą magnetronowego rozpyłania oraz nakładania odpowiednich powłok o optymalnym składzie chemicznym, strukturze i właściwościach fizycznych. Przeprowadzono także badania nad możliwością wprowadzenia do warstwowej konstrukcji ochronnej energochłonnej tkaniny auksetycznej. Takie rozwiązanie miało na celu zwiększenie odporności na wybuch (np. gazu) dzięki właściwościom rozpraszania energii wybuchu i specjalnemu układowi włókien tkaniny [29]. Materiały auksetyczne charakteryzują się ujemnym współczynnikiem Poissona, co oznacza, że pod wpływem rozciągania powiększają swoje wymiary w kierunku prostopadłym do kierunku działania siły rozciągającej, natomiast w sytuacji, kiedy dochodzi do ściskania, ich wymiar zmniejsza się w co najmniej jednym z kierunków prostopadłych do działania siły ściskającej [30].

electrical properties of fabrics [31–33] and reduces their flammability. At the same time, it has been indicated that nanoparticles should be combined with other flame retardants [34–35]. Nanoparticles reduce heat release and improve certain anti-drip properties of thermoplastics, and when combined with a flame retardant, their effect is intensified. The mechanism for reducing heat release provided by polymer nanocomposite technology ultimately involves reducing polymer weight loss, which in turn reduces heat (fuel) release. In doing so, it should be noted that nanoparticles may cause some processing difficulties during the manufacture of PMCs. Nanoparticles almost always make the polymer more viscous, and this can create challenges in the manufacture of PMCs. Often, the high viscosity of the resin prevents the polymer from completely wetting the fibre, leading to voids and 'dry' spots in the PMC that contribute to mechanical damage. Therefore, with the presence of nanoparticles in the fabric that increase the viscosity of the resin, it can be very difficult to obtain a material with suitable parameters [35].

Aluminosilicate nanofillers, including montmorillonite, Hectorite, bentonite and saponite, are becoming increasingly popular and, when dispersed appropriately, allow for improved mechanical properties of polymeric materials, increased ignition resistance and barrier properties to chemicals [36]. The use of layered nanofillers makes it possible to obtain polymeric intercalation nanocomposites and exfoliation nanocomposites. In the first case, the nanofiller platelets are separated by individual polymer chains and retain their layered structure, while in the second case the nanofiller is distributed uniformly in the polymer matrix [36].

The demand for functional and cost-effective flame-resistant textiles (FRTs) is increasing, so Nie et al. [37] investigated the development of a simple casting method to produce flame-resistant hydrogel/textiles (FR-GT) composite materials based on acrylamide (AAM) and SiO₂. The obtained results showed that the active diffusion of an aqueous AAM/SiO₂ pre-gel solution into the textile structure enabled the formation of strong interfacial adhesion between the hydrogel and the textiles. The presence of the chemical crosslinking agent PEGDA (polyethylene glycol diacrylate) and the physical crosslinking agent SiO₂ limited the expansion of the hydrogel volume during swelling. In addition, the PAAM/SiO₂ nanocomposite hydrogel layer prevented scorching in high-temperature environments (i.e. > 100°C) by dissipating heat from the water during evaporation. The produced hybrid hydrogel-textile composites have applications in the production of fireproof materials, including fireproof gloves [37], life-saving materials such as fire blankets [38].

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie nanocząstek polimerowych do wytwarzania nanokompozytów poprawia właściwości mechaniczne, termiczne i elektryczne tkanin [31–33] oraz zmniejsza ich palność. Jednocześnie wskazano, że nanocząstki powinny być połączone z innymi środkami zmniejszającymi palność [34–35]. Nanocząstki zmniejszają wydzielanie ciepła i poprawiają pewne właściwości zapobiegające kapaniu tworzyw termoplastycznych, a w połączeniu z niepalniaczem, ich działanie jest zintensyfikowane. Mechanizm redukcji wydzielania ciepła zapewniany przez technologię nanokompozytów polimerowych polega ostatecznie na zmniejszeniu utraty masy polimeru, co z kolei ogranicza wydzielanie ciepła (paliwa). Należy przy tym zauważyć, że nanocząstki mogą powodować pewne trudności w przetwarzaniu podczas wytwarzania PMC. Nanocząstki prawie zawsze sprawiają, że polimer staje bardziej lepki, a to z kolei może stwarzać wyzwania w wytwarzaniu PMC. Często wysoka lepkość żywicy uniemożliwia polimerowi całkowite zwilżenie włókna, co prowadzi do pustych przestrzeni i „suchych” miejsc w PMC, które przyczyniają się do powstawania uszkodzeń mechanicznych. Dlatego też przy obecności w tkaninie nanocząstek zwiększających lepkość żywicy uzyskanie materiału o odpowiednich parametrach może być bardzo trudne [35].

Coraz większą popularność zyskują nanonapełniacze glinokrzemianowe, w tym montmorylonit, hektoryt, bentonit i saponit, które przy odpowiedniej dyspersji pozwalają na poprawę właściwości mechanicznych materiałów polimerowych, zwiększenie odporności na zapalenie i barierowości w stosunku do substancji chemicznych [36]. Zastosowanie nanonapełniaczy warstwowych umożliwia otrzymanie polimerowych nanokompozytów interkalacyjnych oraz nanokompozytów eksfoliacyjnych. W pierwszym przypadku płytki nanonapełniacza są rozdzielone pojedynczymi łańcuchami polimeru i zachowują swoją strukturę warstwową, w drugim natomiast nanonapełniacz rozmieszczony jest równomiernie w osnowie polimeru [36].

Zapotrzebowanie na funkcjonalne i odpalne tkaniny trudnopalne (ang. *flame-resistant textiles*, FRT) jest coraz większe, dlatego też Nie i in. [37] przeprowadzili badania w zakresie opracowania prostego sposobu odlewania do wytwarzania trudnopalnych materiałów kompozytowych hydrożel/tekstyna z hydrożelem (ang. *flame-resistant gel/textiles*, FR-GT) opartego o akrylamid (AAM) i SiO₂. Otrzymane wyniki wykazały, że aktywna dyfuzja wodnego roztworu pre-żelu AAM/SiO₂ do struktury tekstylnej umożliwiła powstanie silnej adhezji międzyfazowej między hydrożelem a tekstyliami. Obecność chemicznego środka sieciującego PEGDA (ang. *polyethylene glycol diacrylate*) oraz fizycznego, jakim jest SiO₂, ograniczała rozszerzanie się objętości hydrożelu podczas pęcznienia. Dodatkowo warstwa hydrożelu nanokompozytowego PAAM/SiO₂ zapobiegała przypalaniu w środowiskach o wysokiej temperaturze (tj. > 100°C), dzięki odprowadzaniu ciepła z wody podczas parowania. Wytworzone hybrydowe kompozyty hydrożelowo-tekstylne mają zastosowanie w produkcji materiałów ognioodpornych, w tym rękawic ognioodpornych [37], materiałach ratujących życie, takich jak koce gaśnicze [38].

Innovations in performance evaluation

Methods of assessing the effectiveness of textile elements in personal protective equipment or entire protective equipment are also being innovated, as is the case with clothing – both light and heavy. The material systems themselves are subject to testing similar to the standard tests, with their criteria. In addition, technological developments in instrumentation and measurement methods are creating the conditions for more effective optimisation of design solutions for protective measures.

For many years, methods have been used to measure the temperature between the individual layers of materials included in the layout sets specific to special clothing [39]. These measurements lead to characteristics of the course of temperature change under the influence of heat flux, such as:

- system based on NFPA 1971 – 2000 (National Fire Protection Association) in the context of ASTM 4108 reference (according to TPP – *thermal protective performances*),
- measurement method based on the radiant protective performances (RPP) indicator,
- TPTF (*thermal properties test fixture*) method for evaluating the materials of protective clothing samples.

The TPTF method uses a MACOR ceramic material that simulates the behaviour of human skin and 122 temperature sensors (sensors). This allows the effectiveness of protective clothing against hot environments to be assessed, taking into account radiation, flame action and inward heat transfer. Another solution referring to the response of human skin to heat fluxes in firefighters' personal protection was used, among others, in tests by the teams of Rezwan et al. [40] and Bogusławska-Bączek and Hes [41].

In addition to the classic solution with multi-channel measurement using temperature sensors in the form of thermocouples, solutions using infrared radiation measurement, i.e. using thermal imaging cameras, are increasingly being used. There are also solutions where the measurement is dual-track, both thermographic and thermocouple. The temperature waveforms obtained from the measurements allow the data to be verified.

In the THERMOTEX project (No. DOB-BIO6/04/104/2014 “State-of-the-art technologies for nanocomposite reflective material layers of firefighter protective clothing”) [28], several progressive methods were used to study the performance of fabrics and their kits dedicated to special clothing. Test stands were developed with the ability to measure heat fluxes passing through fabric layers with simultaneous wetting of the samples. Moreover, the possibility of simultaneous measurement with thermocouples and, on the protected side of the shield, a thermal imaging camera has been introduced. Heat fluxes can be generated either from electric radiant heaters, a burner (flame interaction test) or a metal component (hot contact test) [41].

Innovations are also being carried out in the use of digital modelling of risk factors and the introduction of computer simulations [42–45]. Methods based on physical simulations using mannequins are gaining great recognition in the operating environment [46]. The level of construction of these stands makes it possible to reproduce real situations more and more faithfully.

Innowacje w zakresie oceny skuteczności

Innowacjom podlegają również metody oceny skuteczności elementów tekstylnych w środkach ochrony osobistej czy całych ochron, jak ma to miejsce w przypadku ubrań – zarówno lekkich, jak i ciężkich. Same układy materiałów podlegają badaniu analogicznemu do badań normowych, z zachowaniem ich kryteriów. Ponadto rozwój technologiczny oprzyrządowania i metod pomiarowych stwarza warunki do efektywniejszej optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych środków ochrony.

Od wielu lat stosuje się metody pomiaru temperatury pomiędzy poszczególnymi warstwami materiałów wchodzącymi w skład zestawów układu właściwych dla ubrań specjalnych [39]. Pomiaru te prowadzą do uzyskania charakterystyk przebiegu zmian temperatury pod wpływem strumienia cieplnego, jak np.:

- system oparty na standardzie NFPA 1971 – 2000 (National Fire Protection Association) w kontekście odniesienia do normy ASTM 4108 (wg wskaźnika TPP – ang. *thermal protective performances*),
- metoda pomiaru oparta na odniesieniu do wskaźnika RPP (ang. *radiant protective performances*),
- metoda oceny materiałów próbek odzieży ochronnej TPTF (ang. *hermal properties test fixture*).

W metodzie TPTF stosuje się ceramiczny materiał MACOR symulujący zachowanie skóry ludzkiej oraz 122 czujniki (sensory) temperatury. Pozwala to na ocenę skuteczności odzieży ochronnej na działanie środowiska gorącego z uwzględnieniem promieniowania, działania płomienia oraz przenikania ciepła do wewnątrz. Inne rozwiązanie nawiązujące do reakcji skóry ludzkiej na strumienie ciepła w ochronach osobistych strażaków zastosowano m.in. w badaniach zespołów Rezwan i in. [40] oraz Bogusławska-Bączek i Hes [41].

Poza zastosowaniem klasycznego rozwiązania z pomiarem wielokanałowym przy użyciu czujników temperatury w postaci termopar coraz częściej stosowane są rozwiązania z użyciem pomiaru promieniowania podczerwonego, tj. z wykorzystaniem kamer termowizyjnych. Istnieją też rozwiązania, w których pomiar jest dwutorowy, zarówno termograficzny, jak i w postaci termopar. Otrzymane w wyniku pomiarów przebiegi wykresów temperatur pozwalają na weryfikację danych.

W projekcie THERMOTEX (nr DOB-BIO6/04/104/2014 „Nowoczesne technologie nanokompozytowych, refleksyjnych warstw materiałów strażackich ubrań ochronnych”) [28], w badaniu skuteczności tkanin i ich zestawów dedykowanych do ubrań specjalnych, zastosowano kilka progresywnych metod. Opracowano stanowiska z możliwością pomiaru strumieni ciepłych przechodzących przez warstwy tkanin z równoczesnym zawilgoceniem próbek. Ponadto wprowadzono możliwość jednoczesnego pomiaru z zastawianiem termopar oraz od strony chronionej osłony, kamery termowizyjnej. Strumienie ciepłe mogą być generowane zarówno od promienników elektrycznych, palnika (badanie oddziaływania płomienia), jak i elementu metalowego (badanie gorącego kontaktu) [41].

Innowacje prowadzone są również w zakresie zastosowania modelowania cyfrowego czynników zagrożeń i wprowadzenie symulacji komputerowych [42–45]. Duże uznanie

The test stands or climate chambers themselves, with their ability to precisely programme simulated conditions via digital control, are one of the conditions for reproducing real-life situations. The second is the ability to measure with a high degree of accuracy and the video recording of the trial as part of the developed test.

Examples of references to the fire environment are the PYROMAN tests [47] (Centre for Research on Protection and Comfort, North Carolina), THERMOMAN (DU PONT), Ralph (BTTG, see Figure 4) [46] or the use of a mannequin developed by the University of Alberta 'Harry Burns' (University of Alberta) [48].

w środowisku eksploatacji zyskują metody oparte na symulacjach fizycznych z wykorzystaniem manekinów [46]. Poziom konstrukcji tych stanowisk pozwala coraz wierniej odtwarzać rzeczywiste sytuacje. Same stanowiska czy komory klimatyczne z możliwościami precyzyjnego programowania symulowanych warunków poprzez cyfrowe sterowanie to jeden z warunków odtwarzania realnych sytuacji. Drugi natomiast to możliwości pomiaru z dużą dokładnością oraz rejestracja wizyjna przebiegu próby w ramach opracowanego testu.

Przykładami odniesień do środowiska pożaru są testy PYROMAN [47] (Center for Research on Protection and Comfort, North Carolina), THERMOMAN (DU PONT), Ralph (BTTG, zob. ryc. 4) [46] czy też zastosowanie manekinu opracowanego przez Uniwersytet Alberta „Harry Burns” (Uniwersytet Alberta) [48].

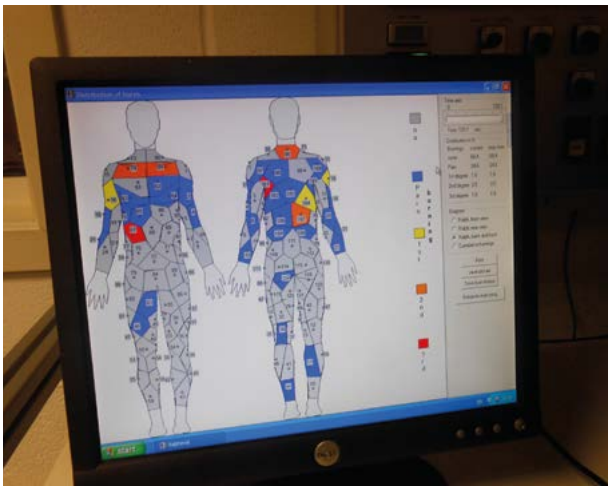


Figure 4. Execution of the fire test using the RALPH mannequin in the BTTG Manchester laboratory
Rycina 4. Realizacja testu ogniowego z wykorzystaniem manekina RALPH w laboratorium BTTG Manchester
Source / Źródło: R. Wolański.

In all cases – in addition to obtaining measurements of the temperature reached in specific units of time on the surface of the mannequin – it is also possible to observe the behaviour of the protective clothing. The use of thermal mannequins makes it possible to test the thermal insulation of clothing [49]. The results obtained by this method allow for constructive evaluation and conclusions and provide an important impetus for any modernisation and development.

Another important function from the point of view of potential users is to obtain information about the possible risk of defined levels of burn degrees. Therefore, tests using mannequins, such as THERMOMAN [50] (see Figure 5), are also carried out on the effect of heat fluxes – also in the context of workload and the associated heat and moisture exchange in clothing. With the use of mannequins, the water vapour resistance of clothing sets (Thermal Evaporative Resistance, RET) can also be determined with reference to ASTM F2370-10 [51]. This standard provides a description, requirements and a method for implementing the tests.

We wszystkich przypadkach – poza uzyskaniem wyników pomiarów temperatury osiąganą w określonych jednostkach czasu na powierzchni manekina – możliwa jest także obserwacja zachowania ubrań ochronnych. Zastosowanie manekinów termicznych umożliwia badania izolacyjności cieplnej odzieży [49]. Wyniki otrzymane tą metodą pozwalają na konstruktywne ocenę i wnioski oraz stanowią istotny impuls do wszelkich modernizacji i rozwoju.

Inną istotną funkcją z punktu widzenia potencjalnych użytkowników jest uzyskanie informacji o możliwym zagrożeniu zdefiniowanych poziomów stopni oparzeń. Dlatego też badania z wykorzystaniem manekinów, jak np. THERMOMAN [50] (zob. ryc. 5), prowadzone są także w zakresie wpływu strumieni cieplnych – również w kontekście obciążenia pracą i związanymi z nią wymianą ciepła i wilgoci w ubraniach. Dzięki zastosowaniu manekinów można wyznaczać także opór pary wodnej zestawów odzieżowych (ang. *Thermal Evaporative Resistance*, RET) w nawiązaniu do normy ASTM F2370-10 [51]. Norma ta zawiera opis, wymagania i metodę realizacji badań.

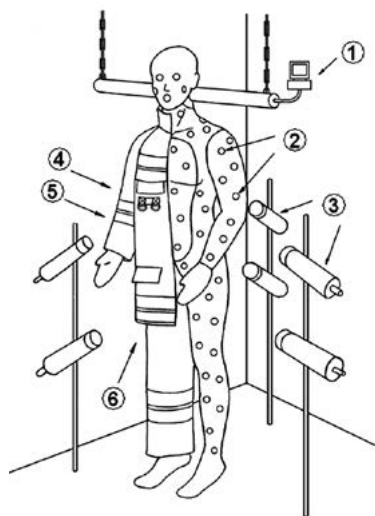


Figure 5. Diagram of the thermal test stand with THERMOMAN mannequin [46] (where: 1. a system that records the temperature changes given by the sensors and prepares a prediction of possible burns using the garment under test. 2. Temperature sensors distributed over the surface of the mannequin (122 pieces). The temperature is not recorded in the areas covered by the firepit, helmet, gloves and boots. 3. 8 gas burners arranged around the mannequin. 4. Sample of clothing under test. 5. Jacket. 6. Trousers)

Rycina 5. Schemat stanowiska do badań termicznych z manekinem THERMOMAN [46] (gdzie: 1. System rejestrujący zmiany temperatury podawane przez czujniki i przygotowujący prognozę możliwych poparzeń przy użyciu badanego ubrania. 2. Czujniki temperatury rozmieszczone na powierzchni manekina (122 sztuki). Nie rejestruje się temperatury w miejscach przykrywanych przez kominarkę, hełm, rękawice i buty. 3. Palniki gazowe w ilości 8 sztuk rozmieszczone wokół manekina. 4. Próbką badanego ubrania. 5. Kurtka. 6. Spodnie)

Source / Źródło: R. Wolański R., J Giełżecki, B. Brzychczyk, *Badanie ubrań specjalnych przy użyciu manekina Ralph* [46, s. 65–70].

Other examples include research conducted at the Technical University of Łódź [52] using the Newton mannequin and at the Central Institute for Labour Protection – National Research Institute [53]. The structure of the NEWTON mannequin is made of copper. The silhouette is covered with an epoxy laminate with carbon fibre reinforcement. It is suitable for physical workloads in an ambient temperature range of -20–50°C. It is worth noting that mannequins designed for ergonomic testing are often constructed with gender specificity and requirements in mind, with the female equivalent of the Newton mannequin being the DIANA mannequin [53].

Conclusion

Technological change, which encompasses virtually all areas of modern human activity, from work to leisure, is also taking place in the design and development of personal protective equipment. They are the result of both social conditions and the transformation of risk factors in particular areas of life. The human-technology-environment system, despite its seemingly well-established framework, is also evolving. Meeting environmental and technical risks is at the same time protecting people in the microclimates of their activities. Special clothing is one of the core elements of primary protection and should reactively keep up with threats. Textile material solutions play a key role in their protective mechanism, hence the importance of upgrading and modifying them for the safety of the firefighter. However, both the legal requirements for safety and the nature of the environment of a fire or other incident resulting in the emission of various hazards must be taken into account. Therefore, the further

Innym przykładem są badania prowadzone na Politechnice Łódzkiej [52] z zastosowaniem manekina Newton oraz w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym [53]. Konstrukcja manekina NEWTON wykonana jest z miedzi. Sylwetka pokryta jest laminatem epoksydowym o wzmocnieniu z włókien węglowych. Dostosowany jest do obciążeń pracą fizyczną w zakresie temperatur otoczenia -20–50°C. Warto zaznaczyć, iż manekiny przeznaczone do badań ergonomicznych często konstruowane są z uwzględnieniem specyfiki i wymagań ze względu na płeć, a odpowiednikiem żeńskim manekina Newton jest manekin DIANA [53].

Podsumowanie

Przemiany technologiczne obejmujące swą dynamiką praktycznie wszystkie obszary działalności współczesnego człowieka, od pracy po rekreację, również mają miejsce w konstrukcji i rozwoju środków ochrony indywidualnej. Są rezultatem zarówno uwarunkowań społecznych, jak i transformacji czynników zagrożeń w poszczególnych dziedzinach życia. Układ człowiek – technika – środowisko, mimo pozornie ugruntowanych ram, również ulega ewolucjom. Wychodzenie naprzeciw zagrożeniom środowiska i techniki to zarazem ochrona człowieka w mikroklimatach jego aktywności. Ubrania specjalne należą do podstawowych elementów ochrony głównej i powinny reaktywnie nadążać za zagrożeniami. Kluczową rolę w ich mechanizmie ochronnym odgrywają tekstylne rozwiązania materiałowe, stąd istotne znaczenie ma ich modernizacja i modyfikacja pod kątem bezpieczeństwa strażaka. Należy jednak uwzględnić zarówno wymagania prawne w zakresie bezpieczeństwa, jak i charakter środowiska pożaru

direction and type of changes and modifications made should take into account the broad spectrum of hazards present at the site, rather than focusing only on selected parameters.

być innych zdarzeń, których konsekwencją jest emisja różnego rodzaju zagrożeń. Dlatego też dalszy kierunek oraz rodzaj wprowadzanych zmian i modyfikacji powinien uwzględniać szerokie spektrum zagrożeń występujących w miejscu zdarzenia, a nie skupiać się jedynie na wybranych parametrach.

Literature / Literatura

- [1] ASTM F1959. Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing. 2017, pp. 14, https://doi.org/10.1520/F1959_F1959M-14E01.
- [2] ASTM F1506-22. Standard Performance Specification for Flame Resistant and Electric Arc Rated Protective Clothing Worn by Workers Exposed to Flames and Electric Arcs. 2022, pp. 12, <https://doi.org/10.1520/F1506-22>.
- [3] Stoll A.M., Chianta M.A., *Burn Protection and Prevention in Convective and Radiant Heat Transfer*, "Aerospace Medicine" 1968, 39, 1097–1100.
- [4] Song G., Wang F., *Firefighters' Clothing and Equipment: Performance, Protection, and Comfort*, CRC Press Taylor & Francis Group. 2019, <https://doi.org/10.1201/9780429444876>.
- [5] Wiśniewski T.S., *Wymiana ciepła w ochronach osobistych strażaków*, Wyd. Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska, Warszawa 2016.
- [6] PN-EN-1486:2009 Odzież ochronna. Metody badania i wymagania dla odzieży odbijającej napromieniowanie cieplne przeznaczonej do specjalnej akcji przeciwpożarowej.
- [7] Wesołowska M., Delczyk-Olejniczak B., *Włókna w balistyce – dziś i jutro*, „Techniczne Wyroby Włókiennicze” 2011, 1/2, 41–50.
- [8] Mandal S., Camenzind M., Annaheim S., Rossi R.M., *Firefighters' Protective Clothing and Equipment*, w: Song G., Wang F., *Firefighters' Clothing and Equipment: Performance, Protection, and Comfort*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2019, Ch. 2, 35.
- [9] Bourbigot S., *Flame retardancy of textiles: New approaches* [w] Horrocks A.R., Price D. (eds), *Advances in Fire Retardant Materials*. United Kingdom, Woodhead Publishing Limited, 2008, 9–40.
- [10] Miedzińska D., Wolański R., *Review of fibers and fabrics used for special services protective clothing in terms of their mechanical and thermal properties*, "Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej" 2022, 71(1), 15–34, <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.1379>.
- [11] Czerwieńko D., Lemańska K., Pastuszka Ł., *Technologia materiałów na ubrania strażackie*, BITP Vol. 28 Issue 4, 2012, pp. 119–129.
- [12] Samanta A.K., Baghchi A., Biswas S.K., *Fire retardant finishing of jute fabric and its thermal behaviour using phosphorous and nitrogen based compound*, "Journal of Polymer Materials" 2011, 28(2), 149–169.
- [13] Tasukada M., Khan M.M.R., Tanaka T., Morikawa H., *Thermal characteristics and physical properties of silk fabrics grafted with phosphorous flame retardant agents*, "Textile Research Journal" 2011, 81(15), 1541–1548, <https://doi.org/10.1177/0040517511407376>.
- [14] Gielżecki J., Mania R., Marszałek, Wolański R., *Deposition of Thin (Ti,Si)N Reflective Layers on Textiles Substrates*, "Przegląd Elektrotechniczny" 2022, 98(9), 235–238, <https://doi.org/10.15199/48.2022.09.55>.
- [15] Song G., Lu Y., *Flame resistant textiles for structural and proximity firefighting* [w] Kilinc F.S., *Handbook of fire resistant textiles*, Woodhead Publishing Limited, 2013. Ch. 19, 520–548, <https://doi.org/10.1533/9780857098931.4.520>.
- [16] Shaid A., Wang L., Padhye R., Bhuyian M.A.R., *Aerogel non-woven as reinforcement and batting material for firefighter's protective clothing: a comparative study*, "Journal of Sol-Gel Science and technology" 2018, 87(1), 95–104, <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4689-8>.
- [17] Liu X.X., Lin L.T., Wang X.D., Zheng H.Q., *Study on temperature response and thermal protection of shape memory combination fabrics*, w: *Textile Bioengineering and Informatics Symposium Proceedings*, Y. Li, X.N. Luo, Y.F. Liu (red.), Textile Bioengineering and Informatics Society, Beijing, China: 2011, 230–236.
- [18] Dadi H.H., *Literature Overview of Smart Textiles*, Swedish School of Textiles, Master of Textile Technology, University of Borås, Sweden 2010.
- [19] Chitphiromsri P., Kuznetsov A.V., Song G., Barker R.L., *Investigation of feasibility of developing intelligent firefighter-protective garments based on the utilization of a water-injection system*, "Numerical Heat Transfer Applications" 2006, 49, 427–450, <https://doi.org/10.1080/10407780500359869>.
- [20] Mandal S., Annaheim S., Greve J., Camenzind M., Rossi R.M., *Modeling for predicting the thermal protective and thermo-physiological comfort performance of fabrics used in firefighters' clothing* "Textile Research Journal" 2018, 89(14), 2836–2849, <https://doi.org/10.1177/0040517518803779>.
- [21] Lessan F., Montazer M., Moghadam M., *A novel durable flame-retardant cotton fabric using sodium hypophosphite, nano TiO₂ and maleic acid*, "Thermochim. Acta" 2011, 520, Issue 1–2, 48–54, <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.012>.
- [22] Rabajczyk A., Zielecka M., Popielarczyk T., Sowa T., *Nano-technology in Fire Protection – Application and Requirements*, "Materials" 2021, 14(24), 7849, <https://doi.org/10.3390/ma14247849>.
- [23] Wolański R., *Technologia i materiały do produkcji ochron termicznych przed promieniowaniem podczerwonym i mikrofalowym*, rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydz. Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Kraków 2008.
- [24] Mania R., Godlewska E., Mars K., Morgiel J., Wolański R., *Metoda otrzymywania cienkich warstw ceramicznych na tkaninach*, Patent PL, (2014), 215960 B1.

- [25] Marszałek K., Morgiel J., Wolański R., *Warstwy $TiN-Si_3N_4$ nanoszone tkaniny ochronne techniką magnetronową*, „Elektronika” 2014, 55(2), 19–22.
- [26] Miedzińska D., Giełżecki J., Mania R., Marszałek K., Wolański R., *Experimental study on thermal loads of fabrics used the construction of firefighters' protective clothing covered with reflective composite nanolayers Ti, Si and $Ti, Si/(Ti, Si)N$* , “Materials” 2021, 14, 3493, <https://doi.org/10.3390/ma14133493>.
- [27] Leja E., Precht E., Wolański R., *Metody nanoszenia powłok na ochrony osobiste służb ratowniczych, Materiały konferencyjne: Tendencje rozwojowe w technikach ratowniczych i wyposażeniu technicznym*, Kraków 2007, 62–70.
- [28] Projekt THERMOTEX, nr DOB–BIO 6/04/104/2014 „Nowoczesne technologie nanokompozytowych, refleksyjnych warstw materiałów strażackich ubrań ochronnych”, <https://thermotex.wat.edu.pl/> [dostęp: 20.02.2023].
- [29] *Nowoczesne technologie nanokompozytowe w ubraniach strażackich*, portalmundurowy.pl [dostęp: 20.02.2023].
- [30] Idczak E., Stręk T., *Badania dynamiczne struktur kompozytowych z rdzeniem o właściwościach auksetycznych*, XIV Konferencja Naukowo-Techniczna Techniki Komputerowe w Inżynierii, 2016, https://tki.wat.edu.pl/2016/streszczenia_TKI_pdf/109_idczak.pdf [dostęp: 20.02.2023].
- [31] Kim H., Abdala A.A., Macosko C.W., *Graphene/polymer nanocomposites*, “Macromolecules” 2010, 43, 6515–6530, <https://doi.org/10.1021/ma100572e>.
- [32] Byrne M.T., Gun'ko Y.K., *Recent advances in research on carbon nanotube-polymer composites*, “Advanced Materials” 2010, 22, 1672–1688, <https://doi.org/10.1002/adma.200901545>.
- [33] Paul D.R., Robeson L.M., *Polymer nanotechnology: nanocomposites*, “Polymer” 2008, 49, 3187–3204, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.04.017>.
- [34] Ray S.S., Okamoto M., *Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing*, “Progress in Polymer Science” 2003, 28, 1539–1641, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002>.
- [35] Morgan A.B., *Flame retarded polymer layered silicate nanocomposites: a review of commercial and open literature systems*, “Polymers for Advanced Technologies” 2006, 17, 206–217, <https://doi.org/10.1002/pat.685>.
- [36] Krzemińska S., Hrynyk R., Pietrowski P., *Possible application of nanomaterials in personal protective equipment*, “Work Safety: Science and Practice” 2009, 5, 7–9.
- [37] Nie Y., Mugaanire I.T., Guo Y., Wang R., Hou K., Zhu M., *A hybrid hydrogel/textile composite as flame-resistant dress*, “Progress in Natural Science: Materials International” 2021, 31, 33–40, <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.11.009>.
- [38] Illeperuma W.R.K., Rothmund P., Suo Z., Vlassak J.J., *Fire-Resistant Hydrogel-Fabric Laminates: A Simple Concept That May Save Lives*, “ACS Applied Materials & Interfaces” 2016, 8, 2071–2077, <https://doi.org/10.1021/acsami.5b10538>.
- [39] Mell W.E., Lawson R.J., *A Heat Transfer Model for Firefighters' Protective Clothing*, “Fire Technology” 2010, 46(4), 833–841, <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0139-z>.
- [40] Rezwan A.A., Hossain S., Islam M.A., *Study of thermal response of skin symulant material with a protective fabric under a hot air jest*, 5th BSME International Conference on Thermal Engineering, Dhaka, 21–23.12.2012.
- [41] Bogusławska-Bączek M., Hes L., *Effective Water Vapour Permeability of Wet Wool Fabric and Blended Fabrics*, “Fibres & Textiles. Eastern Europe” 2013, 21, 1(97), 67–71.
- [42] Łapka P., Furmański P., *Evaluation of a human skin surface temperature for the protective clothing – Skin system based on the protective clothing–skin imitating material results*, “International Journal Of HEAT and Mass Transfer” 2017, 114, 1331–1340, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatm.2017.06.033>.
- [43] Łapka P., Furmański P., *Zastosowanie dwurównaniowego modelu transportu ciepła w skórze do oceny charakterystyk cieplnych ubrań ochronnych*, „Przemysł Chemiczny” 2017, 96(2), 343–347, <https://doi.org/10.15199/62.2017.2.13>.
- [44] Wiśniewski T., Furmański P., Łapka P., *Problemy związane z oceną ochron osobistych poddanych obciążeniu ciepłemu*, w: *Problemy monitoringu eksploatacji sprzętu i wyposażenia straży pożarnej*, J. Roguski J. (red.), Wydawnictwo CNBOP-PIB, 85-106, <https://doi.org/10.17381/2015.2>.
- [45] Łapka P., Furmański P., *Modeling and analysis of the influence of the protective garment movement on the skin temperature and burn degree*, “Fire Safety Journal” 2020, 111, 102916, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102916>.
- [46] Wolański R., Giełżecki J., Brzychczyk B., *Badanie ubrań specjalnych przy użyciu manekina Ralph*, w: Ziółko M. (red.), *Tendencje rozwojowe w zwalczaniu pożarów*, Wyd. AGH, Kraków 2017, 65–70.
- [47] <https://textiles.ncsu.edu/tpacc/heat-and-flame-protection/pyroman> [dostęp: 20.02.2023].
- [48] Udayraj, Talukdar P., Das A., Alagirusamy R., *Heat and mass transfer through thermal protective clothing – A review* “International Journal of Thermal Sciences” 2016, 106, 32–56, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.006>.
- [49] Krucińska I., Korycki R., Skrzetuska E., Kowalski K., Puszkasz A., *Wybrane zagadnienia z metrologii użytkowej odzieży funkcjonalnej*, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2016.
- [50] Szutczyńska D., Roguski J., *Complex Approach to Thermal Testing of Firefighters' Protective Clothing*, SFT Vol. 58 Issue 2, 2021, pp. 154–16, <https://doi.org/10.12845/sft.58.2.2021.9>.
- [51] ASTM F2370-10 Standard Test Method for Measuring the Evaporative Resistance of Clothing Using a Sweating Manikin, 2015, 6, <https://doi.org/10.1520/F2370-10>.
- [52] Krucińska I., Skrzetuska E., *Badania ergonomiczne odzieży ochronnej z zastosowaniem manekina typu NEWTON*, w: *Problemy monitoringu eksploatacji sprzętu i wyposażenia straży pożarnej*, J. Roguski (red.), Wydawnictwo CNBOP-PIB, 107–116, <https://doi.org/10.17381/2015.2>.
- [53] Młynarczyk M., *Manekiny termiczne jako narzędzie oraz oporu pary wodnej zestawów odzieży*, „Bezpieczeństwo Pracy” 2015, 1/15, 18–20.

PROF. ANNA RABAJCZYK, D.SC. – graduate of the Institute of Chemistry at the Higher School of Pedagogy in Kielce (now: Jan Kochanowski University in Kielce). She received her PhD in chemistry from the Department of Chemistry at the University of Opole in 2000 and her habilitation degree from the Wrocław University of Technology in 2011. She was awarded a professorship in 2022 in the area of environmental engineering, mining and energy. She specialises in environmental engineering. Expert in carbon and water footprint calculations. Ecomediator on sustainability. Research interests are related to the areas of environmental chemistry, nanotechnology, biotechnology and their application in environmental engineering, including neutralisation and removal of pollutants, clean-up of contaminated areas. Manager and member of teams implementing projects and grants funded from national (NCN, NCBR, MNiSW) and foreign (USA, EU) sources, both scientific, implementation, teaching and investment. She has received foreign scholarships (USA, Norway, Ireland). She has been and is a member of expert panels, organising committees and scientific committees of national and international conferences and congresses. The results of the research have been published in more than eighty publications (mostly in journals on the Philadelphia List) and monographs, studies commissioned by external bodies, and presented in lectures at many national and international conferences and seminars conducted by invitation.

SEN. BRIG. (RETD.) ROBERT WOLAŃSKI, PH.D. ENG. – employee of the Fire Service College of the State Fire Service in Cracow, Department of Civil and Cultural Protection Training Centre. Graduate of the AGH University of Science and Technology in Kraków, officer studies at the Main School of Fire Service, postgraduate studies in the area of wheeled vehicle operation (Higher Officers' Car School in Piła) and road accident expertise (Cracow University of Technology with the Institute of Forensic Expertise). He defended his doctoral thesis on infrared and microwave thermal protection technologies and materials at the Faculty of Materials Engineering and Ceramics of the AGH University of Science and Technology. Parallel to his teaching activities he carries out scientific work within the scope of projects and individual research. He cooperates with research teams from both universities and recognised institutes. He focuses on safety engineering issues with a particular emphasis on rescuer safety. He is the author of a number of publications and a reviewer for recognised publications. In innovation activities, he is the co-author of the patent "Method of manufacturing ceramic layers on fabric". He has initiated the organisation of a number of conferences and seminars aimed at presenting and exchanging scientific and technical ideas in the area of progressive structures, technologies and organisational solutions for reducing the risk of rescue operations. Currently, as a member of staff at the Centre for Education in the Protection of People and Cultural Property at SAPSP Krakow, he continues to promote, educate and develop initiatives in the area of protection of cultural heritage.

PROF. DR HAB. ANNA RABAJCZYK – absolwentka Instytutu Chemii Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Kielcach (obecnie: Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach). W 2000 r. uzyskała stopień doktora nauk chemicznych na Wydziale Chemii Uniwersytetu Opolskiego, a w 2011 r. stopień doktora habilitowanego na Politechnice Wrocławskiej. W 2022 r. otrzymała tytuł profesora w dziedzinie: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Specjalność – inżynieria środowiska. Ekspert w zakresie kalkulacji śladu węglowego i wodnego. Ekomediator w zakresie zrównoważonego rozwoju. Zainteresowania badawcze związane są z obszarem chemii środowiska, nanotechnologii, biotechnologii i ich zastosowania w inżynierii środowiska, w tym neutralizacji i usuwaniu zanieczyszczeń, oczyszczaniu obszarów skażonych. Kierownik oraz członek zespołów realizujących projekty i granty finansowane ze źródeł krajowych (NCN, NCBR, MNiSW) i zagranicznych (USA, EU), zarówno naukowych, wdrożeniowych, dydaktycznych, jak i inwestycyjnych. Otrzymała stypendia zagraniczne (USA, Norwegia, Irlandia). Była i jest członkiem zespołów eksperckich, komitetów organizacyjnych oraz komitetów naukowych konferencji i kongresów krajowych i zagranicznych. Wyniki badań zostały opublikowane w ponad osiemdziesięciu publikacjach (w większości w czasopiśmie z Listy Filadelfijskiej) i monografiach, opracowaniach przygotowywanych na zlecenie jednostek zewnętrznych, i prezentowane podczas wystąpień na wielu konferencyjnych krajowych i zagranicznych oraz seminariach prowadzonych na zaproszenie.

ST. BRYG. W ST. SP. DR INŻ. ROBERT MARCIN WOLAŃSKI – pracownik Szkoły Aspirantów Państwowej Straży Pożarnej w Krakowie, Wydziału Centrum Szkolenia Ochrony Ludności i Dóbr Kultury. Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, studium oficerskiego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej, studiów podyplomowych z zakresu eksploatacji pojazdów kołowych (Wyższa Oficerska Szkoła Samochodowa w Pile) oraz ekspertyz wypadku drogowego (Politechnika Krakowska z Instytutem Ekspertyz Sądowych). Obronił pracę doktorską z zakresu technologii i materiałów do produkcji ochron termicznych przed promieniowaniem podczerwonym i mikrofalowym na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo-Hutniczej. Prowadzi równoległe z działalnością dydaktyczną prace naukowe w ramach projektów i badań indywidualnych. Współpracuje z zespołami badawczymi zarówno uczelni wyższych, jak i uznanych instytutów. Koncentruje się na zagadnieniach inżynierii bezpieczeństwa ze szczególnym uwzględnieniem bezpieczeństwa ratowników. Jest autorem szeregu publikacji i recenzentem uznanych wydawnictw. W działalności innowacyjnej jest współautorem patentu „Sposób wytwarzania ceramicznych warstw na tkaninie”. Jest inicjatorem organizacji szeregu konferencji i seminariów ukierunkowanych na prezentację i wymianę myśli naukowo-technicznej w obszarze progresywnych konstrukcji, technologii i rozwiązań organizacyjnych w zakresie ograniczenia ryzyka prowadzenia działań ratowniczych. Obecnie jako pracownik Centrum Kształcenia Ochrony Ludności i Dóbr Kultury w SAPSP Kraków kontynuuje swoją działalność promowania, edukacji i rozwoju inicjatyw w zakresie ochrony dziedzictwa kulturowego.