

*mgr inż. Marcin A. Bugaj*  
*mgr inż. Łukasz Cieślakiewicz*  
*dr hab. inż. Tomasz S. Wiśniewski*  
Politechnika Warszawska

## **Badania materiałów odzieży ochronnej będącej w kontakcie z ciałami o podwyższonej temperaturze**

### **Abstrakt**

W artykule przedstawiono wyniki badań zestawów komponentów ubrań specjalnych na innowacyjnym stanowisku do badania materiałów ochron osobistych będących w kontakcie z ciałami o podwyższonej temperaturze, powstałym w trakcie realizacji projektu INNOOS. Autorzy przebadali 120 próbek materiałów ubrań strażackich pod kątem skuteczności ochrony przed oparzeniem II stopnia. Wykorzystano kryterium oparte o całość Henriquesa oraz zaproponowane przez wykonawców kryterium CHTI. Uzyskane wyniki podkreślają wagę kwestii doprecyzowania norm wykorzystywanych do oceny jakości specjalnych ubrań strażackich w Polsce.

**Słowa kluczowe:** ochrony osobiste, oparzenie, transport ciepła, ciepło kontaktowe

## **Investigation of protective clothing materials being in contact with hot bodies**

### **Abstract**

The paper presents the results of investigation of sets of protective clothing components sets, performed on innovative stand for testing personal protective materials being in contact with bodies at elevated temperature, that was built during the INNOOS project. The authors examined 120 samples of firefighting clothing materials, regarding their effectiveness in protection against second degree burn injuries. A criterion based on the Henriques integral and CHTI criterion proposed by authors was used. The results emphasize the importance of clarification of the standards for the evaluation of the quality of protective clothing for firefighters in Poland.

**Keywords:** protective clothing, burn injuries, heat transfer, contact heat

## 1. WSTĘP

Ubrania specjalne dla strażaków, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 469 [1], podlegają różnorodnym badaniom odporności na czynniki termiczne. Są to badania dotyczące:

- odporności na przenikanie ciepła od promieniowania,
- odporności na przenikanie ciepła od płomienia,
- rozprzestrzeniania płomienia,
- wytrzymałości na rozciąganie po ekspozycji na promieniowanie ciepłe,
- odporności na ciepło.

Opcjonalnie bada się kompletne ubranie na oprzyrządowanym manekinie. Badania odporności ochron na ciepło kontaktowe, zgodnie z metodą opisaną w normie PN-EN ISO 12127-1 [2], dokonuje się jedynie w odniesieniu do odzieży ochronnej odbijającej promieniowanie ciepłe, przeznaczonej do specjalnej akcji przeciwpożarowej, zgodnie z normą PN-EN 1486 [3]. W trakcie realizacji projektu INNOOS „Opracowanie innowacyjnego systemu stanowisk do badań ochron osobistych” opracowano innowacyjne stanowisko do badania materiałów ochron osobistych będących w kontakcie z ciałami o podwyższonej temperaturze. Proponuje się, aby tego typu badania wykonywać również w odniesieniu do ubrań specjalnych.

## 2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

### 2.1. *Badane zestawy komponentów*

Badania objęły czterowarstwowe zestawy komponentów tkanin odzieży ochronnej składające się z warstwy zewnętrznej, membrany, izolacji termicznej oraz podszewki. Zestawy te przeznaczone są do ubrań specjalnych zgodnych z normą PN-EN 469 [1] na poziomie ochrony x2. Norma ta nie przewiduje jednak badań pakietów ubrań w kontakcie z ciałem o podwyższonej temperaturze (ciepło kontaktowe). Aktualnie są one przewidziane tylko dla odzieży odbijającej promieniowanie ciepłe przeznaczonej do specjalnej akcji przeciwpożarowej (zgodnie z normą PN-EN 1486: 2009 [3]). Warstwę zewnętrzną wykonano z włókien aramidowych z domieszką włókien antystatycznych, natomiast paroprzepuszczalną membranę z włókien aramidowych oraz laminatu wykonanego z teflonu. Zarówno wkład termo-

izolacyjny, jak i zintegrowana z nim podszewka składają się z wiskozy oraz włókien aramidowych.

W przygotowanym przez autorów stanowisku badawczym wykorzystuje się zestawy komponentów o wymiarach 350×350 mm. Próbki tkanin są układane w ramach stalowych z zachowaniem konfiguracji zgodnej z zaleceniami producenta. Na etapie montażu w próbkach umieszcza się termopary płaszczowe typu K o zewnętrznej średnicy 0,25 mm i podwyższonym standardzie dokładności: (Special Limits of Error) większe z  $\pm 1,1K$  lub  $\pm 0,4\%$ . Czujniki montowane są przez ich przeplecenie przez materiał. Przewody na kolejnych warstwach prowadzi się w sposób uniemożliwiający powstanie mostków cieplnych. Końcowe odcinki o długości 5 mm są maksymalnie przesunięte w płaszczyźnie pionowej o 3 mm względem siebie.

Przed pomiarem gotowe próbki zestawów komponentów poddawane są kondycjonowaniu, zgodnie z normą PN-EN 15614 [5], w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej  $65 \pm 5\%$ .

W niniejszym artykule zaprezentowane są wyniki dla próbek nowych, nie poddanych praniu lub czyszczeniu przed wykonaniem pomiarów.

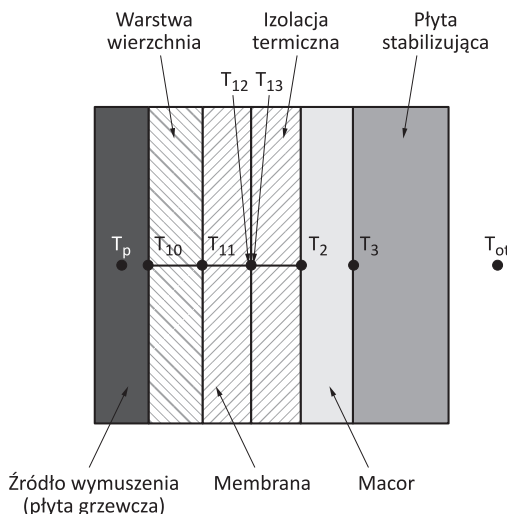
## 2.2. Stanowisko badawcze

W celu dokonania badań właściwości zestawów komponentów ubrań ochronnych będących w kontakcie z ciałem o podwyższonej temperaturze zaprojektowano i wykonano innowacyjne stanowisko badawcze do pomiarów ponadnormowych. Model ułożenia warstw zestawu komponentów wraz z elementami stanowiska został zaprezentowany na rys.1

Główną cechą stanowiska badawczego jest pionowe zamontowanie próbki, natomiast zakres temperatury płyty grzewczej mieści się w przedziale  $50\text{--}700^\circ\text{C}$ . Kolejnym elementem stanowiącym novum w stosunku do metody opisanej w normie PN-EN ISO 12127-1 [2], jest wykorzystanie płyty stabilizującej w miejsce kalorymetru aluminiowego. Wykonano ją ze stopu aluminium, a do jej stabilizacji wykorzystany został ultratermostat wodny.

Powierzchnia czynna płyty ma wymiary 300×300 mm i jest dopasowana do wymiarów tkaniny wewnątrz ramki mocującej. Od strony zestawu komponentów umieszczona jest płyta z ceramiki MACOR zintegrowana z płytą stabilizującą. W celu poprawy absorpcji promieniowania elektromagnetycznego jej powierzchnię pokryto grafitem. Element ten charakteryzuje

się dyfuzyjnością zbliżoną do skóry ludzkiej. Zasadność zastosowania płyty wykonanej z MACOR-u potwierdzają także inne opracowania [7].



Rys. 1. Model zestawu komponentów wraz z płytą grzewczą i stabilizującą

W omawianym stanowisku ceramiczna płyta stanowi także bazę montażową dla pięciu termopar od strony próbki oraz trzech na powierzchni styku ceramiki z płytą aluminiową. Układ ten pozwala na stworzenie trzech ścianek pomocniczych umożliwiających określenie gęstości strumienia ciepła przepływającego przez badaną próbkę. Termopary płaszczowe o zewnętrznej średnicy 0,5 mm umieszczono w specjalnie wyfrezowanych rowkach.

Płyta stabilizująca znajduje się na wózku przesuwanym za pomocą mechanizmu śrubowego, z możliwością jego blokady. Do wózka przymocowany jest także czujnik siły zbudowany przy wykorzystaniu mostka tensometrycznego. Dzięki odpowiednio zaprojektowanemu mechanizmowi przeniesienia siły, czujnik ten pozwala na pomiar nacisku płyty grzewczej na próbkę.

Płytę grzewczą wykonano z mosiądzu, natomiast jej nagrzewanie odbywa się dzięki zastosowaniu siedmiu grzałek patronowych. Maksymalna temperatura, pozwalająca na stabilną pracę źródła wymuszenia, wynosi 700°C. Płyta grzewcza umieszczona jest na wózku z mechanizmem śrubowym pozwalającym na dosunięcie płyty z prędkością do 15 mm/s.

Pomiędzy płytą grzewczą a przewodnicami mocującymi ramę z próbką umieszczono kurtynę wykonaną z polerowanej stali. Element ten ma za zada-

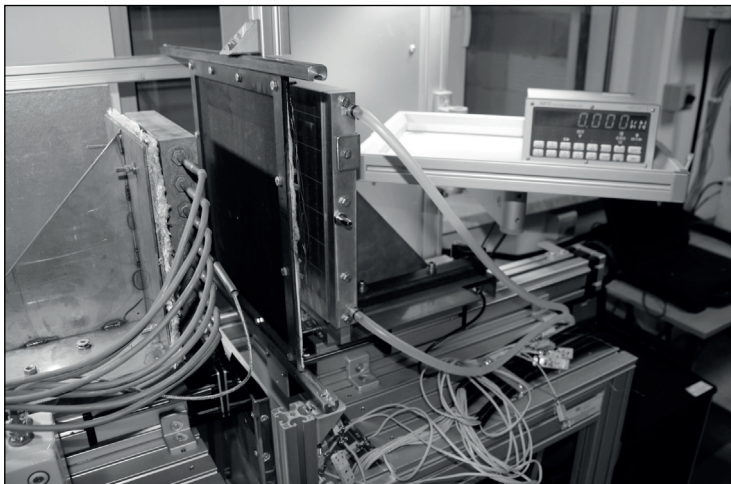
nie osłonić próbkę przed promieniowaniem cieplnym w czasie bezpośrednio przed pomiarem.

Ramę z próbką zestawu komponentów mocuje się w stanowisku badawczym przez jej wsunięcie w mosiężne prowadnice pozwalające na pozycjonowanie oraz wywarcie nacisku na badany materiał. Układ płyt, przewodnic i miernika siły nacisku ma możliwość regulacji i jest dostosowywany do grubości badanych pakietów wielowarstwowych.

Całe stanowisko wyposażone jest w dwa kontaktrony pozwalające na określenie istotnych, z punktu widzenia dokładności pomiaru chwil czasowych. Pierwszy wysyła sygnał do układu akwizycji danych w momencie opadnięcia kurtyny, w którym to próbka została wystawiona na ekspozycję promieniowania cieplnego z gorącej płyty. Natomiast drugi pozwala określić moment, w którym płyta grzewcza rzeczywiście dotknęła badanego zestawu komponentów.

Wszystkie dane z zainstalowanych czujników są zbierane przez układ akwizycji danych oparty na urządzeniach firmy National Instruments umożliwiających rejestrację sygnałów z częstotliwością 90Hz dla każdego z 32 kanałów pomiarowych. Dane są odczytywane i zapisywane za pomocą dedykowanego programu, który dodatkowo wykonuje, w czasie rzeczywistym, obliczenia pozwalające na określenie stopnia ochrony badanych materiałów.

Stół mocujący stanowiska został wykonany z profili aluminiowych skręcanych. Ze stołem zintegrowano także wyciąg okapowy oraz osłony termiczne. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widok stanowiska badawczego

### 2.3. Metodyka badawcza

Głównym celem prowadzonych pomiarów na omawianym stanowisku do badań ubrań specjalnych, będących w kontakcie z ciałem o podwyższonej temperaturze jest ocena ich skuteczności jako ochron osobistych. Podczas pomiarów dokonywana jest rejestracja przebiegów temperatury. Dokonuje się tego zarówno na poszczególnych warstwach próbki, jak i na płycie stabilizującej oraz grzewczej. Dane te pozwalają określić warunki termiczne, w jakich znajduje się ubranie ochronne oraz ciało strażaka podczas kontaktu z gorącym elementem otoczenia. Na ich podstawie można określić strumień ciepła przepływający przez próbkę, ilość energii zakumulowanej w próbce, opór cieplny oraz czas potrzebne do wystąpienia oparzenia II stopnia dla danego wymuszenia. Wszystkie te parametry umożliwiają ocenę i porównanie poszczególnych zestawów komponentów ubrań specjalnych. Ponadto, po zakończonym badaniu możliwa jest także wzrokowa ocena skutków działania wymuszenia oraz szczegółowe badania materiałowe.

W celu standaryzacji warunków pomiarowych przyjęto warunki kondycjonowania próbek opisane w podrozdziale 2.1. Czas od momentu wyciągnięcia ram z próbką z komory klimatycznej do opadnięcia kurtyny jest nie dłuższy niż 60 sek. Po wsunięciu próbki w prowadnice mocujące i dosunięciu płyty stabilizującej wraz z jej zablokowaniem oraz podpięciu termopar zamontowanych wewnątrz zestawu, włącza się rejestrację danych w programie do ich akwizycji. Następnie zwalnia się kurtynę, która swobodnie opadając, zamyka obwód kontaktronu w momencie znalezienia się w minimalnym położeniu. Operator stanowiska w tej samej chwili czasowej rozpoczyna dosuw płyty grzewczej do próbki z prędkością 10 mm/s. Początkowa odległość płyty mosiężnej od powierzchni próbki wynosi 50 mm. Moment zetknięcia się płyty grzewczej z próbką rejestrowany jest przez drugi kontaktron. Operator każdorazowo ustala nacisk na zestaw komponentów o sile  $1000 \pm 20$  N. Pomiar prowadzony jest do momentu wystąpienia oparzenia II stopnia wg obu przyjętych kryteriów opisanych w podrozdziale 2.4. Po tym momencie następuje odsunięcie płyty grzewczej oraz podniesienie kurtyny. Płyta stabilizująca zostaje pozostawiona dosunięta, do momentu ustabilizowania się wszystkich temperatur na poziomie sprzed rozpoczęcia pomiaru. Po tym czasie kończy się rejestrację danych i wyciąga próbkę. Jeżeli planuje się kolejne badanie na tej samej próbce w celu określenia zmiany skuteczności właściwości ochronnych

ze względu na wcześniejsze obciążenie cieplne, płyta stabilizująca pozostaje dosunięta, a cała procedura powtórzona. Po wyjęciu próbek z ramy zostaje ona opisana i przekazana do dalszych badań materiałowych.

#### 2.4. Kryteria oceny skuteczności ochrony

Jakość ochrony zestawów komponentów ubrań strażackich przed obciążeniami cieplnymi typu oddziaływanie płomienia czy też promieniowania jest definiowana przy użyciu współczynników HTI (ang. *Heat Transfer Index*) oraz RHTI (ang. *Radiation Heat Transfer Index*). W przypadku płomienia HTI jest określany jako czas potrzebny do przyrostu temperatury kalorymetru miedzianego o 24 K przy wymuszeniu na poziomie  $80 \pm 4 \text{ kW/m}^2$ . Kalorymetr, według normy PN-EN 367 [4], stanowi okrągłą płytkę miedzianą o czystości co najmniej 99%. Płytkę ma średnicę 40 mm, grubość 1,6 mm, masę około 18 g oraz ciepło właściwe –  $0,385 \text{ kJ/(kgK)}$ . W załączniku D przytoczonego dokumentu znajduje się także opis wskaźnika przenikania ciepła, według którego, by osiągnąć zakładany przyrost temperatury, należy dostarczyć do kalorymetru za próbką ilość ciepła równą  $132,3 \pm 1,1 \text{ kJ/m}^2$ . RHTI określane jest dla wymuszenia radiacyjnego na poziomie 20 lub  $40 \text{ kW/m}^2$  i przy wykorzystaniu analogicznego kalorymetru.

Kryterium HTI przy wymuszeniu  $84 \text{ kW/m}^2$  zostało opracowane na podstawie standardowej krzywej oparzenia przedstawionej przez Derksena i in.(1961) [6].

Do oceny jakości badanych zestawów komponentów Autorzy przyjęli dwa kryteria. Pierwsze, określone jako wskaźnik CHTI (ang. *Conduction Heat Transfer Index*). Opiera się on na konstrukcji HTI i został wprowadzony przez Autorów niniejszej publikacji. Natomiast drugie kryterium, oznaczone literą „H” wykorzystuje bezpośrednio całą Henriquesa. Należy podkreślić, iż jedynie kryterium Henriquesa określa dokładny czas osiągnięcia oparzenia II stopnia. CHTI jest jedynie kryterium porównawczym, umożliwia ono ocenę poszczególnych zestawów komponentów.

W omawianym stanowisku badawczym z płytą stabilizującą symulującą ciało strażaka pomiar ilości energii przekazanej w czasie przez zestaw komponentów dokonuje się przy pomocy ścianki pomocniczej wykonanej z płyty MACOR. Wskaźnik CHTI określa się dla każdej temperatury wymuszenia i jest on wyrażony w czasie potrzebnym do przekazania  $132,3 \pm 1,1 \text{ kJ/m}^2$  przez badany

zestaw komponentów. Wartość wymuszenia zapisuje się w indeksie dolnym, np.:  $\text{CHTI}_{300}$  odpowiada wymuszeniu od gorącej płyty na poziomie 300°C.

Drugie kryterium wykorzystuje całkę Henriquesa. Równanie to pozwala w sposób ilościowy określić stopień oparzenia skóry w zależności od tempa zachodzenia procesów chemicznych i temperatury na zadanej głębokości skóry.

$$\Omega = \int_0^t P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) dt \quad (1)$$

gdzie:  $P$  [1/s] jest współczynnikiem zależnym od głębokości,  $T$  [K] jest temperaturą warstwy podstawnej naskórka dla oparzenia I i II stopnia bądź temperaturą pomiędzy skórą właściwą i warstwą podskórną dla oparzenia III stopnia,  $\Delta E$  [J/kmol] jest energią aktywacji,  $R$  [J/kmol·K] to stała gazowa. Wartości współczynnika  $P$  oraz ilorazu wartości energii aktywacji i stałej gazowej  $\Delta E/R$  zostały przedstawione w tabeli 1. [8]

**Tabela 1.** Współczynniki dla całki Henriquesa; \*Weaver i Stoll'a [9], \*\*stałe Henriquesa [10]

Współczynniki użyte przy obliczaniu całki Henriquesa		
Zakres temperatury	$P$	$\Delta E/R$
	[1/s]	--
44°C < T < 50°C*	2,185×10 <sup>124</sup>	93534,9
50°C < T*	1,823×10 <sup>51</sup>	39109,8
--**	3,1×10 <sup>98</sup>	75000

Stopień oparzenia określa się na podstawie wartości, jaką przyjmuje parametr stopnia oparzenia  $\Omega$ . Dla warstwy podstawnej naskórka o temperaturze  $T > 317,15$  K oparzenie I stopnia występuje przy wartości  $\Omega = 0,53$ . Oparzenie II dla tych samych warunków występuje przy  $\Omega = 1$ . Natomiast oparzenie III stopnia występuje przy  $\Omega = 1$  dla warstwy pomiędzy skórą właściwą oraz warstwą podskórną.

Przedstawione w tym artykule wartości czasów odpowiadających osiągnięciu wskaźników  $\text{CHTI}$  i Henriquesa są określane na podstawie pomiaru temperatury przez środkową ściankę pomocniczą. Ścianka pomocnicza pozwala wyznaczyć strumień ciepła przy pomocy równania Fouriera, dwóch



termopar umieszczonych po obu stronach materiału o znanej grubości i znanym współczynniku przewodzenia ciepła. Termopara na powierzchni ścianki pomocniczej od strony próbki służy do wyznaczania wartości całki Henriquesa dla oparzenia II stopnia. Jest ona umieszczona na głębokości  $75 \times 10^{-6}$  m odpowiadającej min. grubości naskórka [7].

### 3. WYNIKI I ANALIZA

W ramach przeprowadzonych badań autorzy wykonali 120 pomiarów. Uzyskane rezultaty z nowo powstałego stanowiska pozwalają na poznanie charakteru zjawisk zachodzących w zestawie komponentów podczas poddania go wymuszeniu od docięniętego ciała o podwyższonej temperaturze (płyty grzewczej).

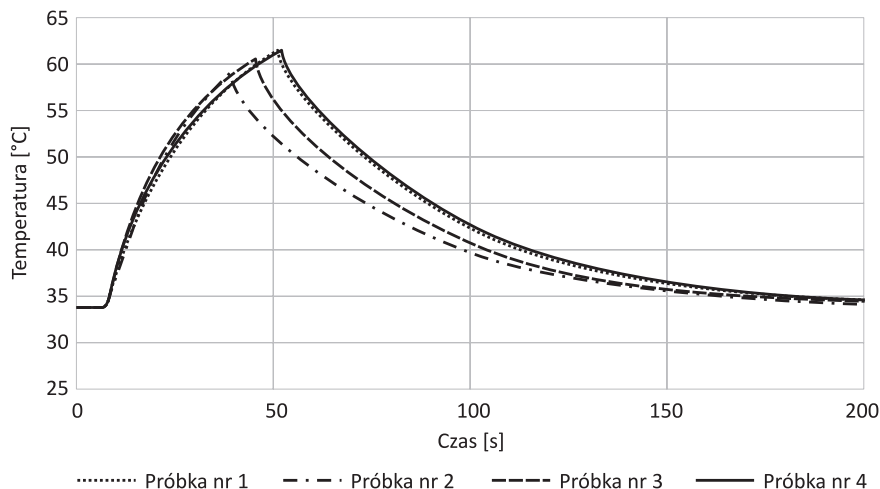
Przeprowadzono badania na próbkach nowych, które zostały następnie poddane kolejnym obciążeniom cieplnym. Uzyskano w ten sposób dane na temat powtarzalności otrzymywanych rezultatów. Ponadto pozwoliły one także na ocenę jakości ochrony ciała strażaka przez zestaw komponentów po ekspozycji na działanie ciała o podwyższonej temperaturze. Wyniki pozwoliły na ocenę przydatności obu użytych kryteriów.

#### 3.1. *Efekt docisku gorącej płyty*

Na zbudowanym stanowisku badane próbki poddawane są naciskowi od gorącej płyty rzędu 20 kPa. Odpowiada to ciśnieniu wywieranemu przez 100-kilogramowego strażaka znajdującego się w pozycji siedzącej. W niniejszym artykule przedstawione zostaną głównie wyniki dla obciążenia cieplnego od ciała o temperaturze 300°C.

Najistotniejszym parametrem z punktu widzenia oceny jakości ochronnej zestawów, uzyskiwanym z pojedynczego badania jest temperatura na powierzchni płyty stabilizującej. Na rys. 3. przedstawiono przykładowy przebieg temperatury dla nowej próbki z termopary nr 2 znajdującej się na głębokości  $75 \times 10^{-6}$  m w płycie z ceramiki MACOR.

Widoczne na przebiegach temperatury maksima odpowiadają momentom odsunięcia gorącej płyty od próbki i są one zależne od czasów osiągnięcia obu kryteriów oparzenia II stopnia. Wszystkie wartości maksymalnych temperatur oraz strumieni, jakie zostaną podane w tej publikacji odniesione są do momentu wystąpienia oparzenia III stopnia według kryterium Henriquesa.



Rys. 3. Przebieg temperatury na powierzchni płyty stabilizującej

Można zauważyć, iż krzywe narastania temperatury na powierzchni płyty stabilizującej dla kolejnych próbek nakładają się na siebie. Krzywe ochładzania przybierają zbliżony charakter.

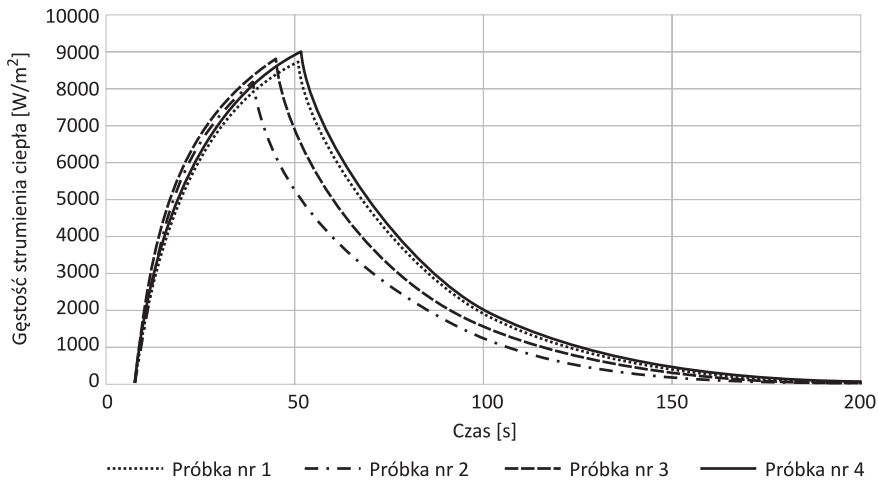
Maksymalne wartości temperatury na płycie stabilizującej dla wszystkich próbek wynoszą  $58 \pm 0,1^\circ\text{C}$ .

Widoczny na rys. 4. wykres przebiegu zmiany gęstości strumienia ciepła mierzonego na płycie stabilizującej przybiera analogiczny charakter do omówionej wcześniej temperatury. Przy wymuszeniu cieplnym od ciała o temperaturze na poziomie  $300^\circ\text{C}$  i nacisku rzędu 20 kPa gęstość strumienia ciepła mierzona na płycie symulującej ciało strażaka osiąga  $8085,15 \text{ W/m}^2 \pm 1,15\%$ .

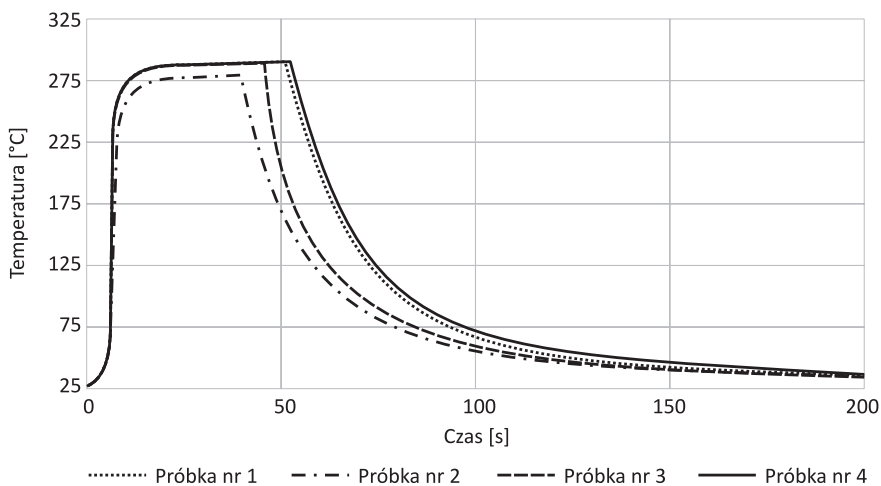
Na kolejnych wykresach (rys. 5–8) przedstawiono wyniki pomiarów temperatury na poszczególnych warstwach zestawu komponentów. Cztery termopary mierzyły wartości odpowiednio: na powierzchni warstwy zewnętrznej od strony płyty grzewczej, na powierzchni membrany od strony tej płyty, na powierzchni membrany od strony stabilizacji oraz na powierzchni warstwy izolacji termicznej od strony płyty grzewczej.

Temperatura na powierzchni warstwy zewnętrznej dla wszystkich czterech przedstawionych przypadków osiągała  $282,65 \pm 6,55^\circ\text{C}$ . Jak widać na rys. 5 jej przebieg po natychmiastowym przyroście (ok.  $160^\circ\text{C/s}$ ) stabilizuje się i przyjmuje charakter nieznacznego wzrostu (ok.  $6^\circ\text{C/s}$ ). Charakter ten moż-

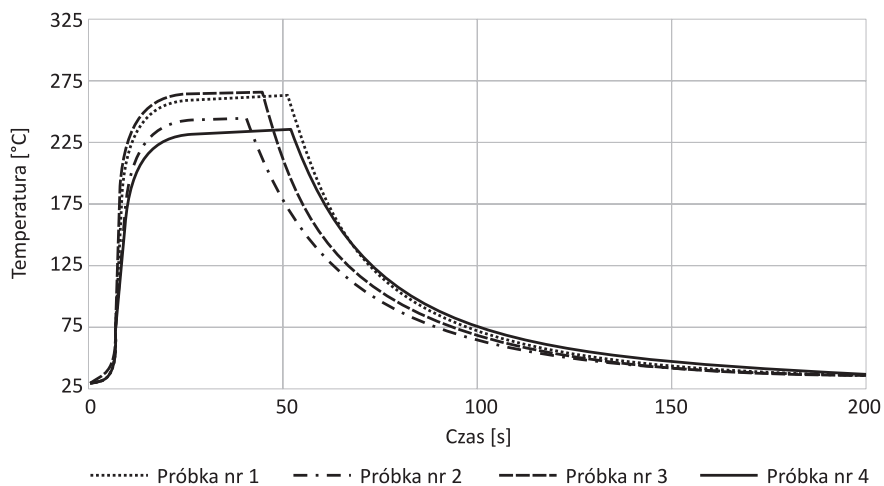
na odnotować dla przebiegów temperatury na wszystkich powierzchniach komponentów. Powtarzalność osiągniętych poziomów temperatur jest różna, jednakże odchylenia od średniej dla czterech pakietów nie przekraczają 10%. Przebieg temperatury na warstwie termoizolacyjnej od strony wymuszenia dla próbki nr 1 jest niemiarodajny z powodu zagłębienia końcówki termopary w materiale izolacji.



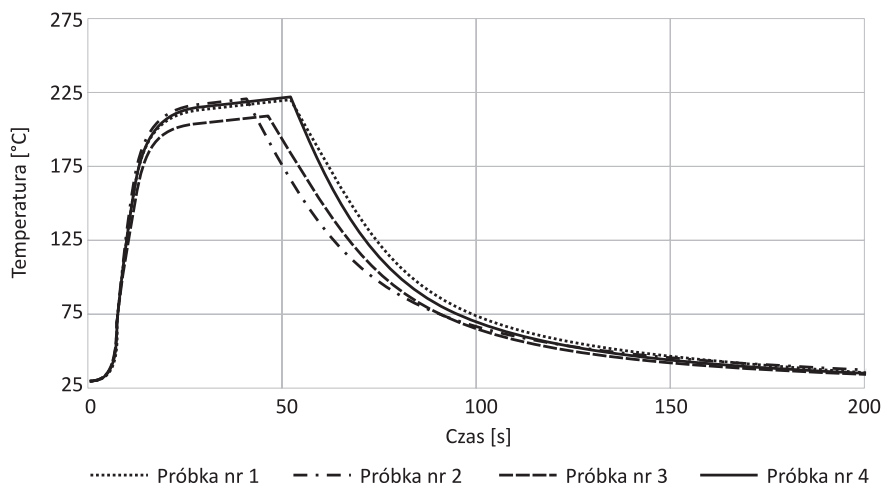
Rys. 4. Gęstość strumienia ciepła przenikającego przez zestaw komponentów



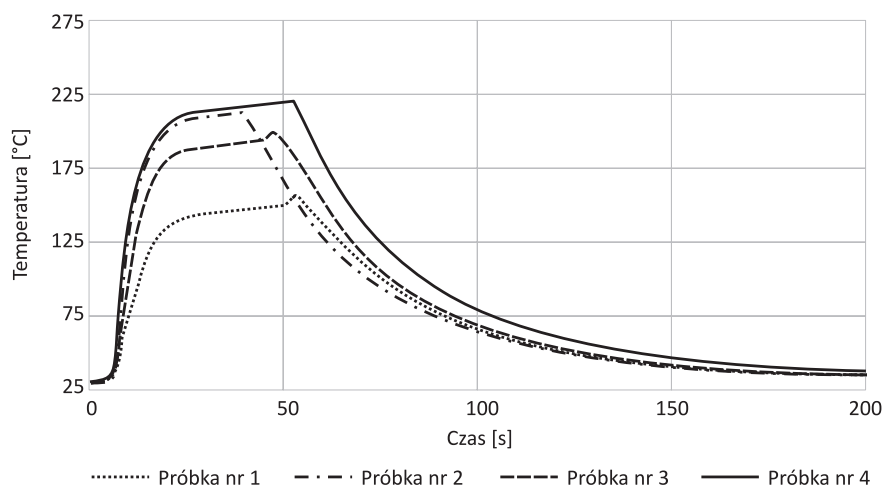
Rys. 5. Przebieg temperatury na powierzchni zewnętrznej zestawu komponentów



Rys. 6. Przebieg temperatury na powierzchni membrany od strony wymuszenia



Rys. 7. Przebieg temperatury na powierzchni membrany od strony płyty stabilizującej



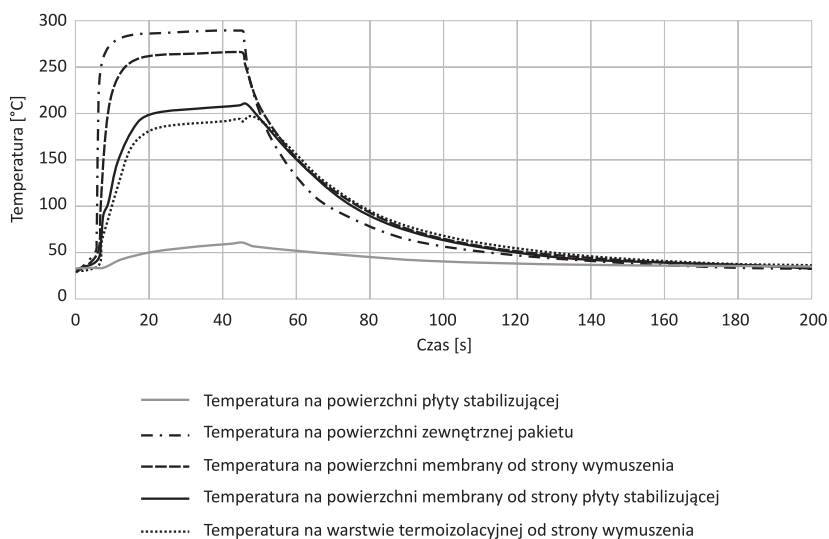
Rys. 8. Przebieg temperatury na powierzchni warstwy termoizolacyjnej od strony wymuszenia

### 3.2. Efekt pierwszego obciążenia cieplnego

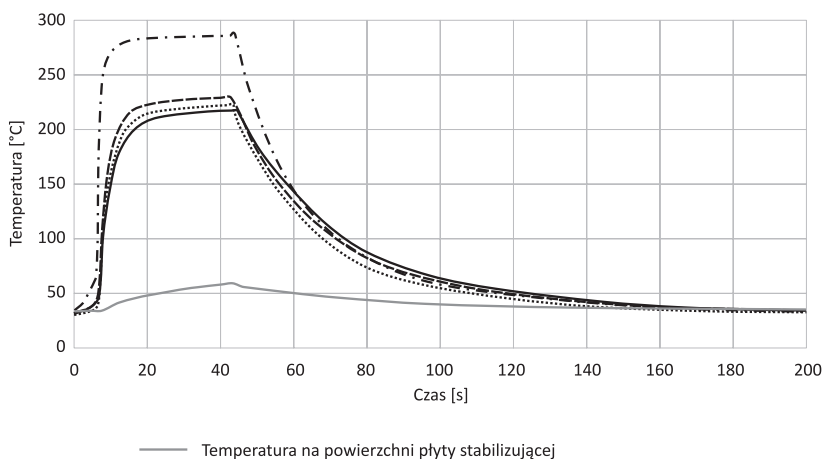
Z dotychczasowych doświadczeń badawczych Autorów z zakresu wpływu oddziaływania promieniowania, płomienia oraz ciał o podwyższonej temperaturze na wielowarstwowe zestawy komponentów wynika, iż membrana jest najwrażliwszym elementem pakietu. Jest to istotne o tyle, że potrafi ona ulec zniszczeniu i integracji z izolacją termiczną bez widocznych zmian na warstwie zewnętrznej oraz podszewce. W zależności od temperatury płyty grzewczej użytkownik może stwierdzić zmianę sztywności ubioru w danej jego części poddanej wymuszeniu. Doświadczenia Autorów pokazują także, iż element ten w skrajnych przypadkach potrafi ulec reakcji egzotermicznej przy stosunkowo niskich temperaturach, rzędu 90°C.

Na rys. 9 oraz rys. 10 widać przykładowe przebiegi temperatur dla próbki nowej w pierwszym badaniu oraz dla tej samej próbki po wcześniejszym kontakcie z gorącą płytą, tj. w drugim badaniu. Pierwszą zauważalną różnicą jest nałożenie się na siebie przebiegów temperatury na warstwach membrany oraz izolacji termicznej na wykresie dla próbki po drugim badaniu. Poziom temperatury dla powierzchni membrany od strony stabilizacji oraz izolacji od strony gorącej płyty jest także wyższy o ok. 12%. Jednocześnie wskazywana przez termoparę

na powierzchni membrany od strony gorącej płyty temperatura spadła również o ok. 12% w stosunku do swojej poprzedniej wartości. Fakty te wynikają ze zniszczenia membrany. W wyniku uszkodzenia jej właściwości termoizolacyjne uległy pogorszeniu, natomiast same termopary zostały wtopione w jej strukturę.



Rys. 9. Przykładowy przebieg temperatury na poszczególnych warstwach zestawu komponentów dla próbki nowej



Rys. 10. Przykładowy przebieg temperatury na poszczególnych warstwach zestawu komponentów dla próbki po pierwszej ekspozycji

W tabelach 2 i 3 przedstawiono wyniki zmiany temperatury i gęstości strumienia ciepła dla czterech przykładowych próbek w dwóch przypadkach: po jednokrotnym i dwukrotnym obciążeniu cieplnym. W przypadku temperatury na powierzchni płyty stabilizującej, jak i gęstości strumienia ciepła widać, iż wartości osiągnięte przy drugim obciążeniu cieplnym są wyższe w momencie osiągnięcia kryterium oparzenia II stopnia wg Henriquesa. W tabeli 4 przedstawiono natomiast wartości tych samych parametrów dla wybranej próbki przy kolejnych wymuszeniach. Tutaj w przypadku gęstości strumienia ciepła można zauważyć wyraźny przyrost osiąganych wartości.

Należy podkreślić, iż największa różnica osiąganych parametrów występuje pomiędzy pierwszymi dwoma badaniami. Po zniszczeniu i integracji membrany z warstwą termoizolacyjną, zarówno temperatury, gęstość strumienia ciepła, jak i czas potrzebny do osiągnięcia oparzenia II stopnia są zbliżone. Ostatni parametr zostanie dokładnie omówiony w kolejnym podrozdziale niniejszej publikacji.

**Tabela 2.** Temperatura na powierzchni płyty stabilizującej

Temperatura na powierzchni płyty stabilizującej w momencie osiągnięcia kryterium Henriquesa		
Numer Próbkki	Próbka po pierwszym obciążeniu cieplnym	Próbka po drugim obciążeniu cieplnym
	°C	°C
1	58,1	58,2
2	58,1	58,4
3	58,0	58,3
4	57,9	58,1

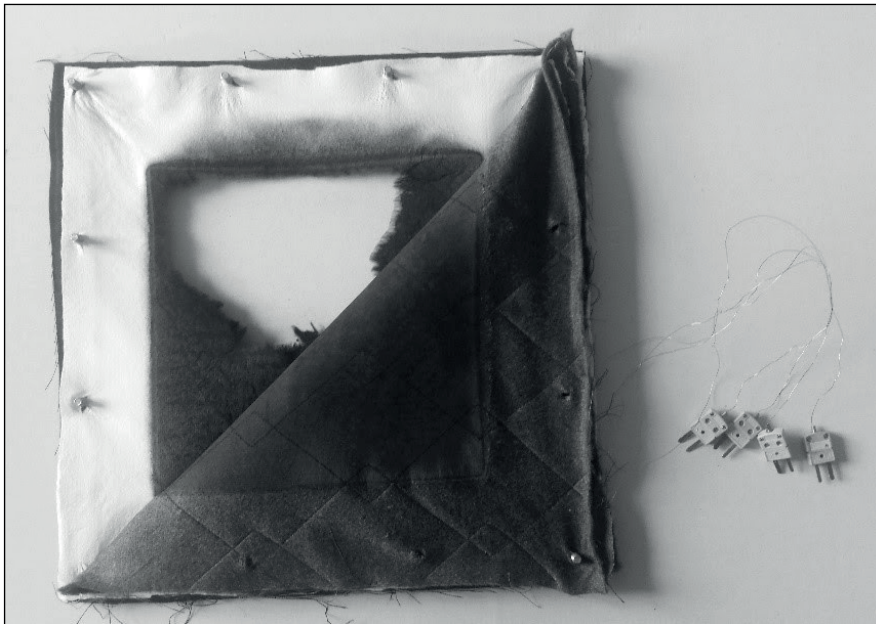
**Tabela 3.** Gęstość strumienia ciepła przenikającego przez zestaw komponentów

Gęstość strumienia ciepła przenikającego przez próbkę w momencie osiągnięcia kryterium Henriquesa		
Numer Próbkki	Próbka po pierwszym obciążeniu cieplnym	Próbka po drugim obciążeniu cieplnym
	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
1	7992,5	8067,8
2	8099,4	8297,8
3	8177,8	8356,6
4	8089,7	8274,6

Tabela 4. Temperatura i gęstość strumienia ciepła na płycie stabilizującej przy kolejnych obciążeniach cieplnych dla pojedynczej próbki

Liczba wcześniejszych ekspozycji	Temperatura na powierzchni płyty stabilizującej w momencie osiągnięcia kryterium Henriquesa	Gęstość strumienia ciepła przenikającego przez próbkę w momencie osiągnięcia kryterium Henriquesa
	°C	W/m <sup>2</sup>
0	57,9	8089,7
1	58,1	8251,3
2	58,1	8264,7
3	58,2	8359,1

Jak wynika z przedstawionych danych kolejne ekspozycje tego samego zestawu komponentów pogarszają jakość ochrony zestawów komponentów ubrań strażackich. Na rys. 11 przedstawiono efekt jednokrotnego badania w kontakcie z płytą grzewczą o temperaturze 500°C. Jak widać na rys. 11, membrana została stopiona wraz z termoizolacją, natomiast na warstwie zewnętrznej nie widać żadnych wyraźnych zmian pozwalających stwierdzić taki stan rzeczy.



Rys. 11. Efekt pojedynczej ekspozycji przy temperaturze 500°C



### 3.3. Porównanie kryteriów *CHTI* i *H*

Do określenia stopnia ochrony badanych zestawów komponentów ubiorów ochronnych wykorzystano zarówno kryterium oparte o całą Henriquesa, liczoną dla oparzenia II stopnia, jak i wprowadzony przez Autorów wskaźnik *CHTI* omówiony w rozdziale 2 niniejszej publikacji. Oba kryteria przyjmują odmienny charakter w zależności od liczby obciążeń cieplnych oraz od zmiany wartości temperatury gorącej płyty.

Efekt pierwszego wymuszenia cieplnego opisany w podrozdziale 2.2. jest także widoczny w otrzymanych wynikach czasów osiągnięcia obu kryteriów oceny jakości ochrony danego zestawu komponentów.

W tabeli 5 oraz tabeli 6 przedstawiono zestawienie wyników dla czterech wybranych próbek po pierwszej oraz po drugiej ekspozycji.

Zarówno dla kryterium *H*, jak i *CHTI* widoczny jest spadek uzyskiwanych czasów. W przypadku kryterium Henriquesa jest to aż 8,80% w stosunku do średniej wartości dla czasów po pierwszym wymuszeniu cieplnym. Natomiast dla kryterium *CHTI* spadek ten wynosi jedynie 3,26%.

Jeżeli chodzi o różnice w czasach dla pojedynczych próbek zestawów komponentów, to stosunki wartości odpowiednich kryteriów zostały przedstawione w tabeli 7. Można zauważyć, iż różnice dla obu kryteriów zmniejszają się w przypadku kolejnego wymuszenia. Jest to spowodowane większym spadkiem czasów kryterium *H*. Przyczyną tego stanu rzeczy jest zmniejszenie oporu kontaktowego na poszczególnych warstwach w wyniku ich zespolenia oraz mniejsza akumulacja ciepła w warstwie termoizolacyjnej.

Tabela 5. Kryterium Henriquesa

Czas od początku obciążenia cieplnego do osiągnięcia kryterium Henriquesa		
Numer Próbk	Próbka po pierwszym wymuszeniu	Próbka po drugim wymuszeniu
	s	s
1	33,9	29,7
2	30,7	28,2
3	31,3	29,2
4	33,6	31,0

**Tabela 6.** Kryterium CHTI

Czas od obciążenia cieplnego do osiągnięcia kryterium CHTI		
Numer Próbkki	Próbka po pierwszym obciążeniu cieplnym	Próbka po drugim obciążeniu cieplnym
	s	s
1	28,6	27,1
2	27,5	26,3
3	26,7	26,6
4	27,7	26,9

**Tabela 7.** Relacja między kryteriami H i CHTI

Relacja między kryterium Henriquesa, a CHTI		
Numer Próbkki	Próbka po pierwszym obciążeniu cieplnym	Próbka po drugim obciążeniu cieplnym
	-	-
1	0,85	0,91
2	0,90	0,93
3	0,86	0,91
4	0,83	0,87

Efekt pierwszej próbki widoczny jest także na zestawieniu danych z kolejnych obciążeń cieplnych dla pojedynczej próbki. Spadki pomiędzy trzema ostatnimi przypadkami są stosunkowo niewielkie w porównaniu do próbek nowych.

**Tabela 8.** Porównanie kryteriów H i CHTI

Liczba wcześniejszych ekspozycji	Czas od obciążenia cieplnego do osiągnięcia kryterium Henriquesa	Czas od obciążenia cieplnego do osiągnięcia kryterium CHTI
	s	s
0	33,6	27,7
1	31,0	26,9
2	30,3	26,7
3	29,2	26,1

Otrzymane wartości pokazują, iż dla danego zestawu komponentów ubrań ochronnych strażak musiałby dotykać gorącego elementu ok. 30 s. by wystąpiło oparzenie II stopnia wg kryterium Henriquesa. Jeżeli kontakt następuje w wyniku upadku bądź przygniecenia jest to stosunkowo niedługi czas.

W tabeli 9 i tabeli 10 przedstawiono czasy dla poszczególnych kryteriów w zależności od temperatury płyty grzejnej. W przypadku wymuszenia cieplnego od ciała o podwyższonej temperaturze na poziomie 150°C czas potrzebny do osiągnięcia kryterium Henriquesa przekraczał 10 min. Natomiast dla kryterium CHTI osiągnięte wartości w zakresie od 150°C do 600°C nie przekraczały 1 min.

Należy zauważyć, iż wartości dla obu kryteriów zbiegają się przy temperaturze wymuszenia na poziomie 300°C. Dla wyższych temperatur czasy potrzebne do osiągnięcia oparzenia II stopnia według Henriquesa są krótsze niż dla CHTI.

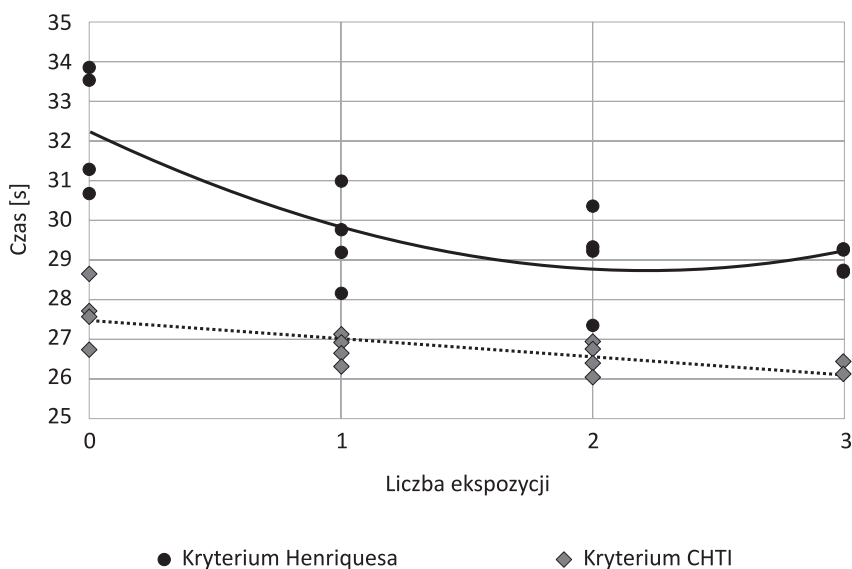
**Tabela 9.** Kryterium H w zależności od temperatury wymuszenia

Czas osiągnięcia kryterium Henriquesa [s]				
Liczba ekspozycji	Temperatura gorącej płyty [°C]			
	150	200	300	600
0	n.o.	431,1	32,4	8,8
1	n.o.	328,1	29,5	
2	n.o.	328,4	29,1	
3	n.o.	269,0	29,0	

**Tabela 10.** Kryterium CHTI w zależności od temperatury wymuszenia

Czas osiągnięcia kryterium CHTI [s]				
Liczba ekspozycji	Temperatura gorącej płyty [°C]			
	150	200	300	600
0	57,3	43,7	27,6	13,8
1	56,3	43,6	26,8	
2	54,7	43,2	26,5	
3	54,1	42,2	26,3	

Kryterium Henriquesa jest znacznie wrażliwsze na warunki geometryczne pakietów. W przypadku tego kryterium istotny jest opór kontaktowy i ilość akumulowanej energii. Na rys. 12 przedstawiono wartości osiągniętych czasów dla poszczególnych kryteriów dla czterech kolejnych wymuszeń cieplnych. Przebadano cztery próbki dla każdego wymuszenia. Jak można zauważyć zmiana wartości osiągniętych wyników dla kryterium Henriquesa przyjmuje charakter wielomianu, natomiast dla CHTI zmiana ta jest liniowa. Ponadto, powtarzalność wyników dla CHTI jest istotnie większa niż dla kryterium Henriquesa.



Rys. 12. Porównanie kryterium H i CHTI

### 3.4. Dalsze badania

Zaprezentowane wyniki stanowią jedynie część rezultatów otrzymanych z badań przeprowadzonych na opisanym stanowisku. Dalsze publikacje przedstawią wyniki charakteryzujące jakość zestawów komponentów ubrań ochronnych dla przypadków próbek zawilgoconych powierzchniowo oraz objętościowo. Zostaną przedstawione informacje dotyczące wpływu zastosowania impregnatu w poszczególnych tkaninach zestawów oraz czasy osiągnięcia oparzenia II stopnia w funkcji siły nacisku.

#### 4. PODSUMOWANIE

Autorzy niniejszej publikacji przedstawili wyniki otrzymane z badań przeprowadzonych na innowacyjnym stanowisku opracowanym i skonstruowanym w ramach projektu INNOOS „Opracowanie innowacyjnego systemu stanowisk do badań ochron osobistych” nr O ROB 0011/03/001, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Stanowisko do oceny jakości ochrony zestawów komponentów ubrań strażackich umożliwia określenie czasu potrzebnego do wystąpienia oparzenia II stopnia w sytuacji kontaktu ciała z obiektem o podwyższonej temperaturze. Wartość ta może zostać przedstawiona w postaci funkcji nacisku wywieranego na próbkę danego zestawu. Stanowisko umożliwia badanie próbek zarówno suchych, jak i wilgotnych objętościowo czy też powierzchniowo. Rozbudowany układ akwizycji danych pozwala określić wartości progowe wystąpienia istotnych z punktu widzenia procesu zdarzeń, określić wartości temperatury dla 25 punktów pomiarowych z częstotliwością 90 Hz oraz regulować siłę nacisku wywieraną na badaną próbkę zestawu komponentów ubrania.

Fakt, iż całość stanowiska została wykonana jako kompleksowy projekt, zarówno od strony konstrukcyjnej, metodycznej, jak i układu akwizycji danych wraz z dedykowanym oprogramowaniem, pozwala na osiągnięcie wysokiej funkcjonalności i powtarzalności pomiarów. Metodyka badawcza umożliwia określenie wartości, takich jak rozkład temperatury w próbce w dwóch wymiarach, gęstość strumienia ciepła za próbką, opór cieplny zestawu, czas potrzebny do wystąpienia oparzenia II stopnia, ilość energii zakumulowanej i jej wpływ na wystąpienie oparzenia w czasie po ekspozycji.

Otrzymane rezultaty pozwalają przedstawić złożoność zagadnienia, jakim jest określenie jakości ochrony zestawów komponentów ubrań strażackich. Liczne zmienne, jak kondycja próbki czy liczba oraz charakter wcześniejszych wymuszeń cieplnych, powodują mnogość możliwości konfiguracji czynników, które w ostateczności mają wpływ na bezpieczeństwo strażaka.

Przyjęte kryterium Henriquesa wraz z zastosowaniem innowacyjnych rozwiązań, jakimi są płyta stabilizacyjna oraz nakładka z ceramiki MACOR, pozwalają na precyzyjną ocenę indywidualnej próbki zestawu komponentów. Podczas akcji gaśniczej ułożenie poszczególnych warstw zestawu, opór kontaktowy pomiędzy tkaninami, stopień ich zużycia, zawilgocenia itp. dają widoczne różnice w wartości czasu potrzebnego do osiągnięcia oparzenia

II stopnia. Opierając się na kryterium Henriquesa możliwym jest wychwylenie tychże różnic podczas badań na omawianym stanowisku.

Przeprowadzone badania utwierdzają Autorów w przekonaniu, iż problem jakości ochrony ubrań strażackich w sytuacji wymuszenia w wyniku kontaktu z ciałem o podwyższonej temperaturze jest istotnym zagadnieniem nie tylko badawczym, ale także aplikacyjnym. Brak szczegółowych kryteriów w normie PN-EN 12127-1 [2] określających graniczne czasy wystąpienia oparzenia II stopnia dla omawianego przypadku powodują, iż Autorzy podejmą dalsze wysiłki badawcze w celu głębszego doprecyzowania wymagań co do jakości zestawów komponentów ubrań strażackich.

*Praca została wykonana w ramach realizacji projektu badawczego INNOOS „Opracowanie innowacyjnego systemu stanowisk do badań ochron osobistych” nr O ROB 0011/03/001, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.*

#### LITERATURA

- [1] PN-EN 469: 2014 – wersja angielska, Odzież ochronna dla strażaków. Wymagania użytkowe dotyczące odzieży ochronnej przeznaczonej do akcji przeciwpożarowej.
- [2] PN-EN ISO 12127-1: 2016 – wersja angielska, Odzież chroniąca przed ciepłem i płomieniem – Wyznaczanie przenikania ciepła kontaktowego przez odzież ochronną lub materiały na nią przeznaczone – Część 1: Ciepło kontaktowe wytwarzane przez cylinder grzejny.
- [3] PN-EN 1486: 2009, Odzież ochronna dla strażaków. Metody badania i wymagania dla odzieży odbijającej promieniowanie ciepłne przeznaczonej do specjalnej akcji przeciwpożarowej.
- [4] PN-EN 367: 1992, Ochrona przed ciepłem i płomieniem. Metoda wyznaczania przenikania ciepła przy działaniu płomienia.
- [5] PN-EN 15614: 2009, Odzież ochronna dla strażaków. Metoda badań laboratoryjnych oraz wymagania dla odzieży ochronnej używanej przy pożarach w przestrzeni otwartej.

- [6] Krasny J., Some characteristics of fabrics for heat protective garments, w Baker R. L., Colletta G. C. (eds.), *Performance of Protective Clothing*, ASTM Special Technical Publication 900, pp. 463–474, 1986.
- [7] Gagon B. D., *Evaluation of New Test Methods for Fire Fighting Clothing*, Worcester Polytechnic Institute 2000.
- [8] Udayraj, Talukdar P., Das A., Alagirusamy R., Heat and mass transfer through thermal protective clothing a review, *International Journal of Thermal Sciences*, volume 106, pp. 32–56, 2016.
- [9] Weaver JA, Stoll AM. Mathematical model of skin exposed to thermal radiation. Report, Aerospace Medical Research Department, Naval Air Systems Command, NADC – MR – 6708. 1967.
- [10] Henriques Jr FC. Studies of thermal injuries V: the predictability and the significance of thermally induced rate processes leading to irreversible epidermal injury. *Archiv. Pathol.* 1947; 43:489e502.