

BADANIA TERMOGRAFICZNE UŻYTKOWANYCH KAMIZELEK KUŁOODPORNÝCH

W artykule przedstawiono wyniki badań termograficznych w podczerwieni aramidowych wkładów balistycznych kamizelek kuloodpornych [1]. Omówiono metodykę badań i opracowane w tym celu stanowisko badawcze. Ustosunkowano się do możliwości oceny tą metodą stanu technicznego kamizelek użytkowanych w warunkach naturalnych.

1. Wstęp

Dysponowanie sprawdzonymi danymi o przebiegu zużywania się kamizelek kuloodpornych podczas użytkowania jest pilną potrzebą podyktowaną względami ekonomicznymi i bezpieczeństwa. Polska Norma PN-V-87000 [2] określa szczegółowo sposób postępowania z kamizelkami w zakresie sprawdzających okresowych badań niezawodnościowych. Posiadanie zweryfikowanych doświadczalnie informacji o przebiegu zużywania się kamizelek podczas użytkowania pozwala uniknąć niebezpieczeństwa związanego z ryzykiem nie kontrolowanego użytkowania w okresie ważności gwarancji producenta kamizelek nie spełniających wymagań w zakresie odporności balistycznej w wyniku wpływu warunków użytkowania. Jednocześnie pozwala uniknąć marnotrawstwa spowodowanego wycofywaniem z użytkowania dobrych jeszcze kamizelek, którym ten okres upłynął.

Dla sprawdzenia możliwości zastąpienia kosztownych niszczących badań balistycznych kamizelek badaniami nieniszczącymi, opartymi o termografię w podczerwieni i zastosowania tych ostatnich do oceny stanu technicznego, wykonano zarówno badania balistyczne, jak i termograficzne tych samych kamizelek. Analiza uzyskanych wyników umożliwiła sprawdzenie istnienia wzajemnej korelacji między obrazem termograficznym i kuloodpornością wkładów oraz warunkami użytkowania kamizelek. Ta metoda badawcza nie była dotychczas w kraju rozpatrywana i testowana w zastosowaniu do oceny stanu technicznego kamizelek kuloodpornych.

2. Przedmiot badań

Przy opracowaniu metodyki i programu badań wzięto pod uwagę czynniki najbardziej wpływające na właściwości balistyczne kamizelek i ich trwałość - czas, który upłynął od daty wyprodukowania oraz intensywność użytkowania. Założono przy tym, na podstawie posiadanych dotychczas informacji, że zarówno upływ czasu, jak i zwiększenie intensywności użytkowania wpływają na badane parametry niekorzystnie.

Dla umożliwienia zbadania wpływu czasu i warunków użytkowania kamizelek na odporność balistyczną i na obraz termalny wkładów aramidowych, przewidziano zbadanie kamizelek wyprodukowanych na przestrzeni lat, od początku uruchomienia krajowej produkcji, do czasu współczesnego. Jednocześnie zaplanowano użycie do badań kamizelek o odpowiednio zróżnicowanej intensywności (cztery stopnie) ich użytkowania w tym okresie:

- intensywnie,
- średnio intensywnie,
- mało intensywnie,
- nie użytkowanych (przechowywanych).

Ze względu na brak możliwości pozyskania używanych kamizelek wyprodukowanych w ściśle określonych latach, pochodzących z tych samych partii produkcyjnych i użytkowanych z różną intensywnością, przewidziano zgrupowanie lat produkcji na następujące trzy okresy:

- 1992÷1995,
- 1996÷1999,
- 2000÷2003.

Wykaz pozyskanych kamizelek i próbek przeznaczonych do badań przedstawiono w tabeli 1. W tabeli zamieszczono liczbowe oznaczenie identyfikacyjne kamizelki (Lp.) i numer rysunku (fotografii w publikacji).

Tabela 1. Program asortymentowy badań kamizelek i próbek

Sposób użytkowania kamizelek	Rok produkcji		
	1992÷1995	1996÷1999	2000÷2005
intensywny	Lp. 1 Lp. 2	Lp. 10	Lp. 15
średnio intensywny	Lp. 3, rys. 1 Lp. 4	Lp. 12, rys. 4	Lp. 11
mało intensywny	Lp. 5 Lp. 6, rys. 2	Lp. 13	-
nie użytkowane	Lp. 8 Lp. 9, rys. 3	Lp. 14, rys. 5	Lp. 16.1 Lp. 16.2

Na rys. 1÷5 pokazano kilka fotografii kamizelek w stanie wyjściowym oraz fotografii wkładów balistycznych wyjętych z pokrowców. Fotografie tego rodzaju ułatwiają analizę porównawczą rzeczywistego stanu kamizelek, wkładów i próbek z wynikami późniejszych badań termograficznych i badań odporności balistycznej.



Rys. 1. Kamizelka Lp. 3 oraz wkład balistyczny przedni



Rys. 2. Kamizelka Lp. 6 oraz wkład balistyczny przedni



Rys. 3. Kamizelka Lp. 9 oraz wkład balistyczny przedni



Rys. 4. Kamizelka Lp. 12 oraz wkład balistyczny przedni



Rys. 5. Kamizelka Lp. 14 oraz wkład balistyczny przedni

3. Badania termograficzne

a. Metodyka badań

Badania termograficzne w podczerwieni miały na celu sprawdzenie przydatności tej metody do oceny stanu technicznego wkładów aramidowych kamizelek oraz sprawdzenie istnienia wzajemnej zależności (korelacji) wyników tych badań z wynikami badań odporności balistycznej. W przypadku potwierdzenia przydatności metody, zamierzeniem autorów było także określenie założeń do opracowania w przyszłości systemu kontroli i oceny jakości kamizelek opartego o termografię oraz do prognozowania cyklu badań kontrolnych i podejmowania decyzji o wycofaniu lub przedłużeniu okresu gwarancyjnego kamizelek.

Te dwa cele i zamierzenia determinowały wybór przyjętego zakresu i metodyki badań. Przewidziano:

- Wykonanie obrazów termograficznych (termogramów) i obrazów w świetle widzialnym (fotografii) wkładów kamizelek użytkowanych w różnych warunkach i przechowywanych oraz próbek odniesieniowych (porównawczych). Ich wzajemna analiza, w połączeniu z oceną manualną i wzrokową wkładów, pozwoliła wnioskować o wierności i dokładności metody termograficznej. Brane były pod uwagę wady fizyczne wkładów - uszkodzenia mechaniczne, sfałdowania warstw tkaninowych, nieciągłości ściągów przeszyciowych, rzadzizny, międzywarstwowe pęcherze powietrzne itp.
- Zbadanie możliwości oceny stanu technicznego wkładów balistycznych metodą termograficzną poprzez analizę porównawczą zjawisk cieplnych i warunków użytkowania wkładów oraz próbek. Nastąpiło to na podstawie analizy dynamiki przenikania ciepła przez wkłady balistyczne z uwzględnieniem ich grubości i warunków użytkowania (spodziewany jest wpływ przepoceń, zawilgoceń, szoków cieplnych, zużycia mechanicznego, uszkodzeń itp. na szybkość przenikania ciepła). Dokonano tego w oparciu o wykresy przebiegów zmian temperatury powierzchni wkładów w funkcji czasu ich nagrzewania do określonej temperatury.
- Zbadanie istnienia wzajemnej korelacji wyników badań termograficznych i wyników badań balistycznych.

W przyjętej metodyce badań, do oceny stanu technicznego wkładów aramidowych oparto się na zasadzie wymiany ciepła przez przewodzenie. Wykorzystany został mechanizm „czystego przepływu ciepła” wynikający jedynie z różnicy temperatur między elementem grzewczym, a badaną próbką. Matematycznie mechanizm ten opisuje prawo Fouriera. Równanie różniczkowe transportu ciepła opisujące zastosowany w metodyce mechanizm ma postać [3]:

$$\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + q_V = c\rho \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

gdzie:

c – ciepło właściwe,

ρ – gęstość masy,

t – czas,

T – temperatura,

q_V - jednostkowy strumień energii generowanej w objętości kontrolowanej,

k – tensor przewodnictwa ciepła,

∇T – gradient temperatury,

∇ - wektor gradientu.

W zastosowanej metodzie wykorzystano również koncepcję termografii dynamicznej, opierającej się na akwizycji termogramów w czasie trwania procesów przejściowych wywołanych pobudzeniem cieplnym badanego obiektu. Celem takiego badania jest określenie właściwości obiektu w czasie trwania procesów przejściowych, takich jak grzanie lub chłodzenie. Formą odpowiedzi obiektu na pobudzenie cieplne jest zmiana pola temperatur na powierzchni badanej próbki, a szybkość tych zmian oraz niejednorodności pola zawierają informację diagnostyczną o wartościach pojemności i przewodności cieplnej, charakteryzujących strukturę wewnętrzną badanego obiektu.

Badane próbki poddano nagrzewaniu falą cieplną generowaną przez grzejnik powierzchniowy (masywną płytę miedzianą), będący w stanie ustalonym cieplnie, o stabilizowanej temperaturze i rozmiarze zbliżonym do rozmiaru badanych próbek. Wartość temperatury płyty określono w trakcie badań wstępnych. Odpowiedź obiektu badania na nagrzewanie była rejestrowana za pomocą systemu termowizyjnego AGEMA 900 LW. Badane wkłady aramidowe były układane kolejno na płycie i poddawane nagrzewaniu przez 10 minut każdy. Rejestrowano sekwencje termogramów w trakcie całego procesu nagrzewania próbek. Częstotliwość rejestracji kolejnych termogramów wynosiła 10 sekund. Zarejestrowane sekwencje termogramów z badania każdej próbki opracowano w postaci wykresów i poddano szczegółowej analizie.

b. Stanowisko badawcze

Do przeprowadzenia badań wykonano stanowisko badawcze pokazane na rys. 6. Jako jednorodne źródło ciepła zastosowano wykonaną w tym celu masywną płytę miedzianą; opracowano i wykonano nowoczesny układ pomiaru i regulacji temperatury oraz zasilania, a także system osłon termicznych i maskowania cieplnego i optycznego badanych wkładów.



Rys. 6. Stanowisko do badań termograficznych



Rys. 7. Fotografia zespołu pomiarowo-regulacyjnego i zasilającego do badań termograficznych

Urządzenie sterujące procesem grzania i stabilizacji temperatury płyty, którego zespół pomiarowo-regulacyjny przedstawiony jest na rys. 7, zawiera następujące bloki:

- bloki pomiaru i regulacji temperatury,
- bloki modułów wyjściowych mocy,
- bloki zabezpieczenia nadprądowego z sygnalizacją załączenia.

Układ pomiaru i regulacji temperatury płyty jest oparty o mikroprocesorowe regulatory o wskazaniach cyfrowych, przeznaczone do stałowartościowej regulacji temperatury. Umożliwiają one pomiar i wyświetlenie temperatury rzeczywistej oraz wartości zadanej. Regulatory są programowalne w zakresie dostosowania wejścia pomiarowego oraz w realizacji parametrów pracy. Zastosowany algorytm PID – Fuzzy Logic zapewnia zoptymalizowanie przebiegów wielkości regulowanej temperatury, osiągnięcie wartości zadanej w najkrótszym czasie i przy minimalnych przeregulowaniach. Metoda Fuzzy Logic zapewnia przebieg procesów grzewczych zgodnie z doświadczeniem nabytym wcześniej przez układ podczas przeprowadzonego wstępnego cyklu programującego. Moduł Fuzzy Logic ma za zadanie dobranie nastaw PID w celu szybkiego zaadaptowania sygnału wyjściowego do parametrów obiektu.

Jako czujniki temperatury zastosowano rezystancyjne czujniki PT typu CT 5381 o zakresie pomiarowym $-200 \div 550$ °C i błędzie pomiaru $\pm 0,4$ °C. Dwa czujniki zostały przykręcone do płyty miedzianej w strefie nagrzewania realizowanego przez dwie niezależnie sterowane sekcje grzejników elektrycznych o mocy po 2 200 W każda.

Elementem wykonawczym w obwodzie zasilania grzejników są dwa przekaźniki półprzewodnikowe jednofazowe, umożliwiające regulację mocy dostarczanej ze źródła napięcia przemiennego do dwóch sekcji rezystancyjnych grzejników. Przekaźniki mogą pracować w układach regulacji we współpracy z regulatorami z wyjściem nieciągłym lub ciągłym. W zależności od rodzaju sygnału sterującego możliwa jest regulacja dwupołożeniowa „załączony – wyłączony” lub ciągła z możliwością zadawania sygnału sterującego z potencjometru.

Bloki zabezpieczenia chronią moduły wyjściowe mocy przed przepięciami i nagłym wzrostem prądu zasilania w przypadku uszkodzeń w zespole grzewczym.

Strefa nagrzewania wkładów balistycznych poddawanych badaniom termograficznym (rys. 8) jest izolowana od wpływów zewnętrznych osłonami z blachy aluminiowej, wyścielonej od wewnątrz filcem. Miedziana płyta grzejna i grzejniki są po bokach zaizolowane dodatkowo pasami wełny mineralnej. Wykonany termogram płyty wskazuje na bardzo korzystny, jednorodny rozkład temperatury. W strefie środkowej, wykorzystywanej do nagrzewania wkładów, różnica temperatury nie przekracza $1,8$ °C.

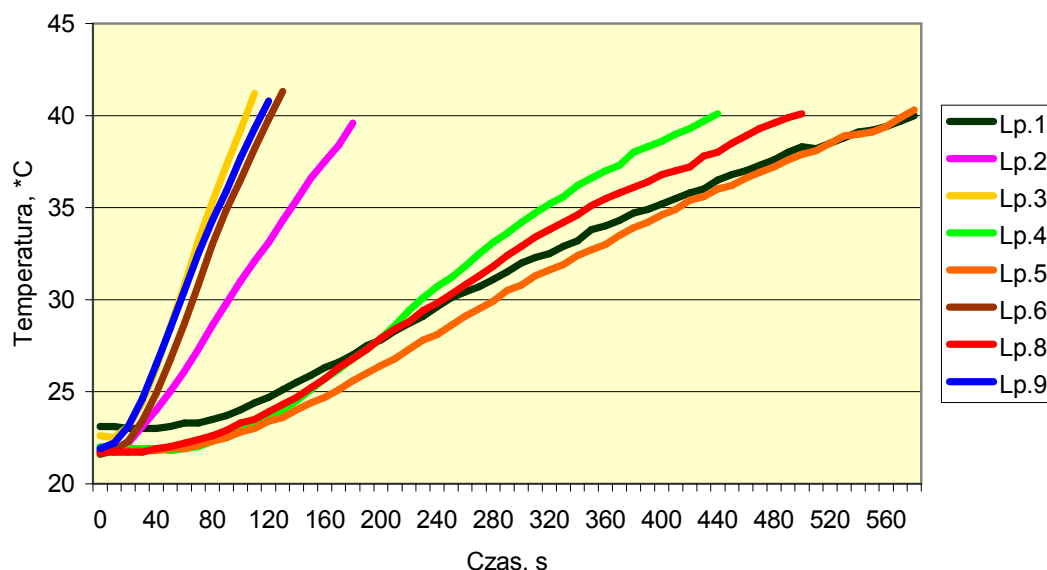


Rys. 8. Strefa nagrzewania wkładów przy badaniach termograficznych

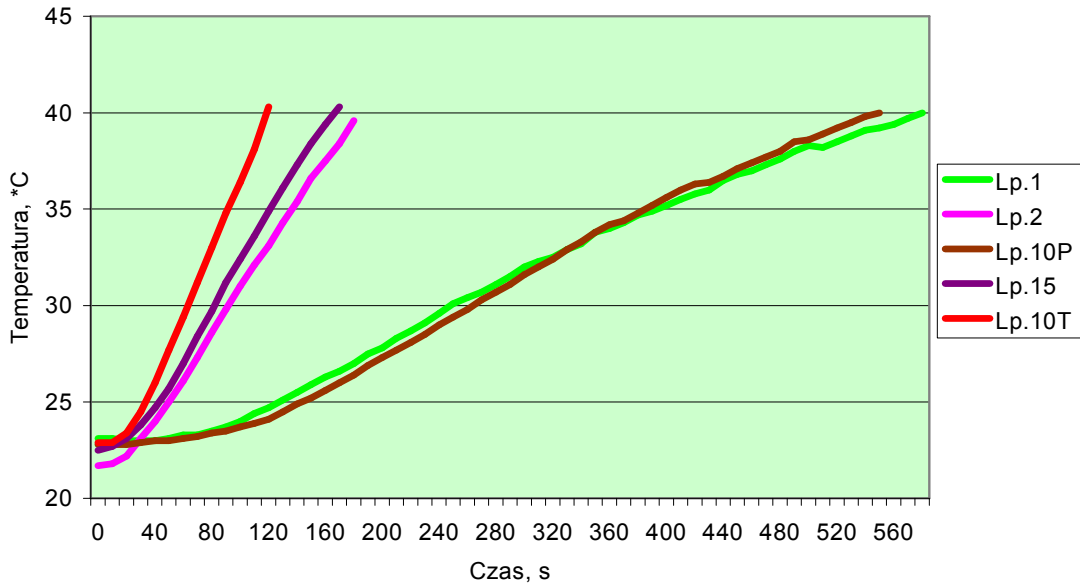
4. Wyniki badań

W celu zbadania możliwości oceny stanu technicznego wkładów balistycznych metodą termograficzną dokonano analizy dynamiki przenikania ciepła przez wkłady balistyczne z uwzględnieniem ich grubości i warunków użytkowania. Wykonano wykresy przebiegów zmian średniej temperatury powierzchni wkładów w funkcji czasu ich nagrzewania do temperatury o określonej stałej wartości. Przyjęto, że będzie to temperatura 40 °C, co odpowiada, określonemu w trakcie badań wstępnych, czasowi nagrzewania nie przekraczającemu 10 minut. Przesłanką do wykonania badania był spodziewany wpływ przepoceń, zawilgoceń, szoków cieplnych, zużycia i uszkodzeń mechanicznych itp., oddziałujących na kamizelki podczas użytkowania, na szybkość przewodzenia ciepła wzdłuż grubości wkładów.

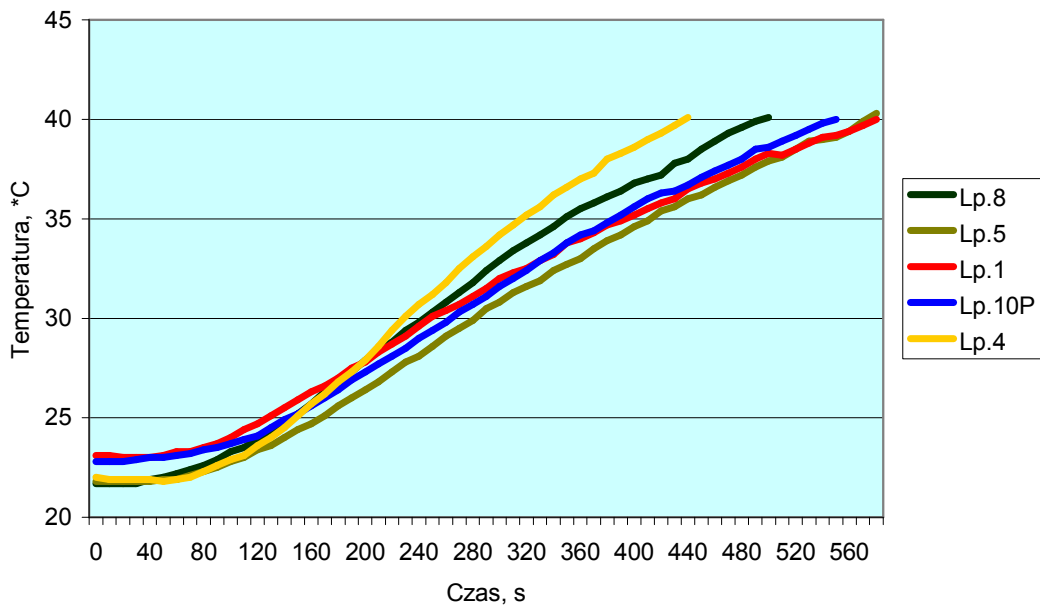
Dla ułatwienia analizy wyników, wykresy przebiegów zmian temperatury w funkcji czasu nagrzewania opracowano w dwóch grupach charakteryzujących warunki użytkowania: czas i intensywność. Przykładowe uzyskane wyniki przedstawione są na wykresach rys. 9 i 10. Na każdym wykresie zamieszczono przebiegi dla kamizelek użytkowanych, odpowiednio, z różną intensywnością i w różnym czasie. Dodatkowo opracowano przebiegi tych zmian w zależności od grubości wkładów kamizelek (rys. 11).



Rys. 9. Wykres zależności temperatury w funkcji czasu nagrzewania wkładów balistycznych kamizelek o różnej intensywności użytkowania. Oznaczenie kamizelek Lp.: 1, 2 - użytkowane intensywnie; 3, 4 - użytkowane średnio intensywnie; 5, 6 - użytkowane mało intensywnie; 8, 9 - nie użytkowane (przechowywane). Kamizelki 5 i 8 wyprodukowano w roku 1985, pozostałe - w latach 1992÷1995



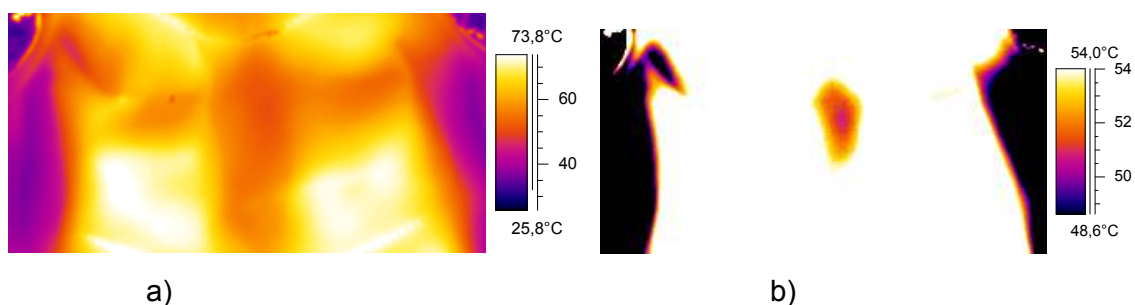
Rys. 10. Wykres zależności temperatury w funkcji czasu nagrzewania wkładów balistycznych kamizelek o różnym czasie użytkowania. Oznaczenie kamizelek Lp.: 1 - 13 lat; 2 - 12 lat; 10P, 10T - 7 lat; 15 - 4 lata. Kamizelki użytkowane intensywnie.



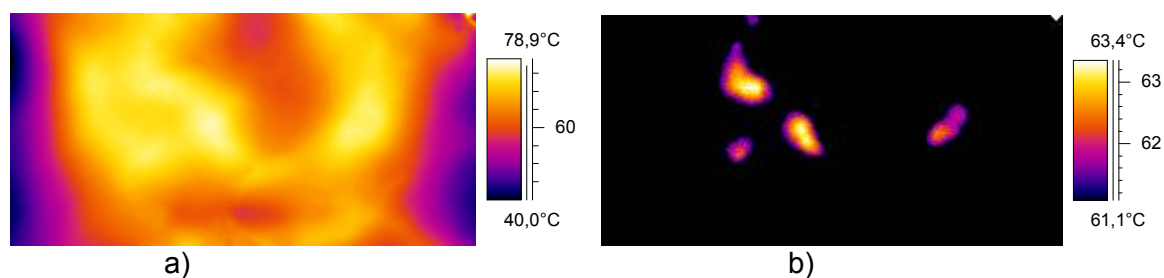
Rys. 11. Wykres zależności temperatury w funkcji czasu nagrzewania wkładów balistycznych kamizelek o różnych grubościach. Oznaczenie kamizelek Lp.: 1, 4, 5, 8, 10P - grubość 7,7÷9,0 mm

Szczegółowa analiza wykonanych termogramów wkładów balistycznych pozwala w kilku przypadkach na wyodrębnienie obszarów, na których występują niejednorodności pola temperatur na powierzchni badanego wkładu. Świadczy to o zmianach w strukturze wewnętrznej tego fragmentu wkładu, co miało wpływ na zmianę wartości pojemności i przewodności cieplnej w tym obszarze. W badanych wkładach można znaleźć zarówno przykłady wzrostu jak i obniżenia tych wartości. Przykładami, w których można było wyodrębnić niejednorodności pola temperatur o niższej wartości są

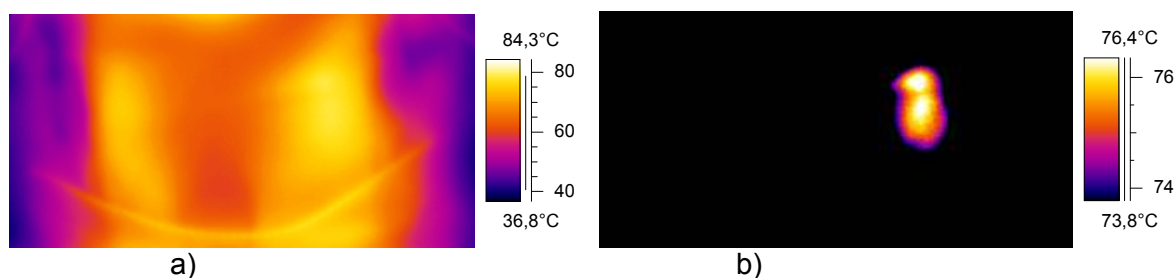
termogramy wykonane podczas badania próbek Lp. 3 i 14 a o wartości wyższej termogramy z badania próbek Lp. 6, 9 i 12. Obniżenie temperatury na przedstawionych powierzchniach (rys. 12 i 13) spowodowane jest spadkiem wartości przewodności cieplnej wewnętrznej struktury materiału pod tymi fragmentami powierzchni. Na skutek rozwarstwień i powstania bardzo cienkich warstw powietrza między warstwami materiału aramidowego lub krystalizacji soli na powierzchni tkaniny powstały warstwy utrudniające przepływ ciepła. Porównując obrazy ze zdjęciami wkładów można jednoznacznie stwierdzić, że występujące anomalie nie są spowodowane występowaniem pęcherzy powietrznych. Niejednorodności pola temperaturowego w postaci fragmentów powierzchni o wyższej temperaturze wyeksponowane na rys. 14, 15 i 16 świadczą o tym, że występuje tutaj szybszy przepływ ciepła. Spowodowane jest to prawdopodobnie większym sprasowaniem materiału w tych fragmentach wkładów balistycznych w wyniku długotrwałego jego użytkowania.



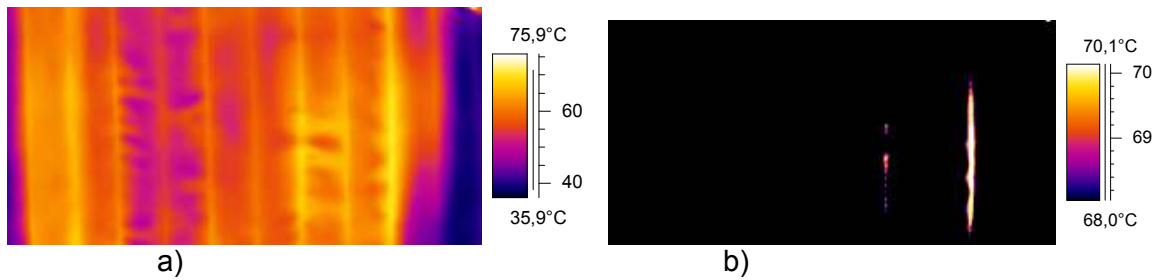
Rys. 12. Termogramy wkładu aramidowego Lp.3. a) termogram po nagrzewaniu wkładu, b) termogram po analizie i wyodrębnieniu fragmentu o innych parametrach cieplnych.



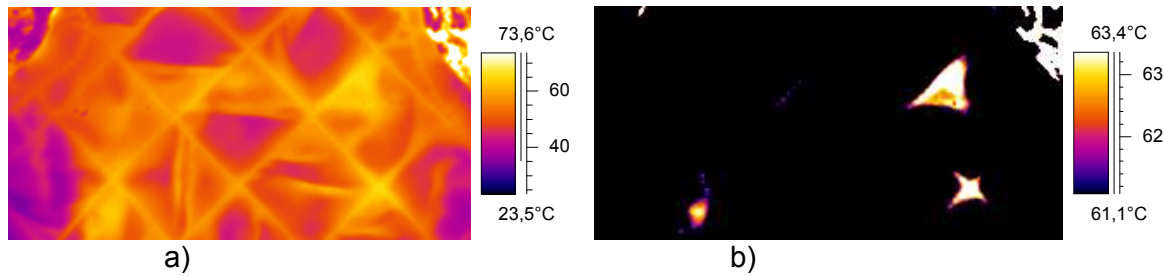
Rys.13. Termogramy wkładu aramidowego Lp.14. a) termogram po nagrzewaniu wkładu, b) termogram po analizie i wyodrębnieniu fragmentu o innych parametrach cieplnych.



Rys. 14. Termogramy wkładu aramidowego Lp.6. a) termogram po nagrzewaniu wkładu, b) termogram po analizie i wyodrębnieniu fragmentu o innych parametrach cieplnych.



Rys.15. Termogramy wkładu aramidowego Lp.9. a) termogram po nagrzewaniu wkładu, b) termogram po analizie i wyodrębnieniu fragmentu o innych parametrach cieplnych.



Rys.16. Termogramy wkładu aramidowego Lp.12. a) termogram po nagrzewaniu wkładu, b) termogram po analizie i wyodrębnieniu fragmentu o innych parametrach cieplnych.

5. Wnioski

1. Badania przedstawione w artykule były pierwszą próbą zastosowania termografii w podczerwieni do oceny stanu technicznego użytkowanych kamizelek kuloodpornych.
2. W trakcie badań stwierdzono, że obrazy termograficzne (termogramy) doskonale odwzorowują stan fizyczny wkładów aramidowych i można wykryć wady ułożenia warstw tkaninowych, ściągów przeszyciowych, sztywne sfałdowania skrośne (reliefy) powstałe w wyniku intensywnego użytkowania kamizelek w warunkach naturalnych oraz pęcherze powietrzne istniejące pomiędzy warstwami tkaniny.
3. Analiza termogramów badanych wkładów umożliwia wyodrębnienie obszarów, na których występują niejednorodności pola temperatur na badanej powierzchni, świadczące o zmianach w strukturze wewnętrznej materiału aramidowego, wpływających na przewodność i pojemność cieplną materiału w tych obszarach.
4. Stwierdzono, że czas i intensywność użytkowania kamizelek wykazują wpływ na przewodność cieplną wkładów aramidowych. Przewodność cieplna zwiększa się przy wyższej intensywności oraz dłuższym czasie użytkowania kamizelki. Mają na to wpływ czynniki mechaniczne i chemiczne oddziałujące na kamizelki w trakcie ich użytkowania.
5. Jednoznaczna ocena stanu technicznego kamizelek w dostępnej badanej populacji próbek nie jest możliwa ze względu na duże zróżnicowanie zastosowanych rodzajów tkanin aramidowych oraz zróżnicowaną grubość wkładów.

6. W badanych kamizelkach nie stwierdzono wkładów aramidowych z obszarami uszkodzeń wewnętrznych, które mogłyby w znacznym stopniu obniżać ich kuloodporność. Potwierdziły to również badania balistyczne.
7. Zastąpienie okresowych balistycznych badań niezawodnościowych kamizelek badaniami nieniszczącymi opartymi o termografię w podczerwieni (ściślej - o zależność dynamiki przepływu ciepła przez wkład aramidowy od warunków użytkowania) jest możliwe. Wymaga to jednak przeprowadzenia badań wkładów aramidowych z fabrycznie wprowadzonymi celowo uszkodzeniami wewnętrznymi oraz szerokich badań porównawczych, z zastosowaniem termografii w podczerwieni i badań balistycznych w pełnym zakresie warunków środowiskowych, dużego asortymentu użytkowanych kamizelek.

Literatura

1. Zubik T. i wsp.: Badania dynamiki zmian odporności balistycznej wkładów aramidowych do kamizelek kuloodpornych użytkowanych w ekstremalnych warunkach i przechowywanych. Sprawozdanie z projektu badawczego własnego nr 0 T00C 002 25. WITU. 2003-2005. Nie publikowane.
2. Polska Norma PN-V-87000. 1999. Osłony balistyczne lekkie. Kamizelki kulo - i odłamkoodporne . Wymagania ogólne i badania.
3. Incropera F.P., De Witt D.P.: Fundamentals of Heat Transfer. John Wiley & Sons. NY.1981.

Publikacja powstała w ramach projektu badawczego własnego nr 0 T00C 002 25 finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Informatyzacji w latach 2003-2005.