



**BADANIA USZKODZEŃ KOMPOZYTÓW STOSOWANYCH
W OSOBISTYCH OSŁONACH BALISTYCZNYCH
METODĄ TERMOGRAFII W PODCZERWIENI**
***INFRARED THERMOGRAPHY METHOD USED
TO INVESTIGATE COMPOSITES DESTRUCTION
IN PERSONAL BALLISTIC PROTECTIONS***

Monika PRACHT, Waldemar ŚWIDERSKI
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
Military Institute of Armament Technology

DOI 10.5604/01.3001.0010.5149

Streszczenie: W artykule przedstawiono problematykę związaną z określaniem strefy uszkodzenia materiału powstałej podczas badań niszczących wielowarstwowych kompozytów aramidowych, stosowanych w osłonach balistycznych. W celu oszacowania wielkości obszaru uszkodzenia kompozytu przeprowadzono badania, które polegały na rejestracji zmian pola temperatury na powierzchniach kompozytu podczas strzelania z użyciem dwóch kamer termowizyjnych. Strzelano standardowymi odłamkami i pociskami stosowanymi podczas badań osłon balistycznych. Na podstawie zarejestrowanych w trakcie strzelań termogramów opracowano wykresy przebiegów temperatury na powierzchniach przedniej i tylnej kompozytu wzdłuż uszkodzenia powstałego na skutek strzału. W oparciu o otrzymane wyniki oszacowano strefy zniszczeń wewnątrz kompozytu wokół punktów trafień pocisków, których wielkość może być znacznie większa niż widoczny okiem nieuzbrojonym ubytek materiału powstający w wyniku uderzenia pocisku. Dodatkowo stwierdzono, że strefa uszkodzeń materiału od strony wylotu pocisku jest większa od strefy uszkodzenia występującej po stronie uderzenia pocisku. Według dokumentów normatywnych punkty uderzeń pocisków nie powinny znajdować się w obszarach osłabienia materiału osłony spowodowanych poprzednimi strzałami.

Dlatego problem wymaga przeprowadzenia poszerzonych badań, które sprawdzałyby czy ustalone odległości między trafieniami powinny zostać zwiększone oraz czy jest to możliwe z uwagi na ograniczenia wymiarów i konstrukcji osłon.

Abstract: The paper presents problems related to determining the damage area of material caused during destructive tests of multi-layer aramid composites used in ballistic protection. In order to estimate the size of the composite damage area, tests were performed to record changes of the temperature fields on the composite surfaces by using two IR cameras during shooting. The standard fragments and bullets used during ballistic protection tests were used. On the basis of the thermograms recorded during the shooting, temperature graphs of the front and rear surfaces of the composite were prepared along the damage caused by the shot. Based on the results obtained, the damage areas within the composite around points of projectiles impact were estimated, that could be much larger than loss of material visible by unarmored eye. In addition, it was found that the material damage area at the back of the ballistic shield is larger than on the projectile impact side. According to national standards points of projectiles impact should not be located in material weakened areas caused by previous shots.

Hence, the problem in question requires extensive testing to find out if the established distance between hits should be increased and if it is possible due to the limitations of the dimensions and construction of the ballistic protection.

Słowa kluczowe: osłony balistyczne, termografia w podczerwieni, kompozyty

1. Wstęp

Lekkie osłony balistyczne tj. hełmy i kamizelki ochronne kulo- i odłamkoodporne podlegają badaniom w zakresie odporności na pociski wystrzeliwane z broni strzeleckiej oraz odłamki granatów i min przeciwpiechotnych z uwzględnieniem granicy ochrony balistycznej V_{50} . Metody badań kamizelek i hełmów ochronnych zostały określone w dokumentach normatywnych PN-V-87000:2011 [1] i PN-V-87001:2011 [2].

W przypadku badań kuloodporności kamizelek ochronnych, zgodnie z PN-V-87000:2011, wymaganie jest następujące: „...Miejsca kolejnych uderzeń pocisków powinny być oddalone od siebie o co najmniej 50 mm, a od brzegu wkładu balistycznego i od skraju podłoża o co najmniej 76 mm...”. Z kolei w przypadku badań odłamkoodporności hełmów ochronnych, zgodnie z pkt. 5.10.1.1 PN-V-87001:2011, punkty trafień „... Powinny być one odległe od siebie, od brzegu hełmu, punktów mocowania oraz otworów technologicznych, co najmniej o 30 mm. Punkty trafień powinny być rozmieszczone tak, aby obszary osłabienia materiału pochodzące od poprzednich strzałów nie pokrywały się”. Podobny zapis występuje w pkt. 5.10.2, ppkt. dotyczącym sprawdzenia kuloodporności hełmów. Zgodnie z ppkt. 5.10.2.3 podczas przygotowania hełmów do badań „...Punkty powinny być odległe od siebie, od brzegu hełmu, punktów mocowania oraz otworów technologicznych, co najmniej o 30 mm. Punkty uderzeń nie powinny znajdować się w obszarach osłabień materiału czerepu spowodowanych poprzednimi strzałami.”

W związku z powyższym, w celu zidentyfikowania obszarów osłabień materiału (strefy zniszczenia) osłony spowodowanych poprzednimi strzałami, wymagane jest użycie nieniszczących metod diagnostycznych. W ramach przeprowadzonych badań nad uszkodzeniami osobistych osłon balistycz-

Keywords: ballistic protection, infrared thermography, composite

1. Introduction

Light ballistic protections i.e. bullet- and fragment-proof helmets and jackets have to be tested on the resistance against bullets fired from the firearms and against fragments of grenades and anti-personnel mines for the ballistic protection limit V_{50} . Testing methods for jackets and helmets were specified in standardisation documents PN-V-87000:2011 [1] and PN-V-87001:2011 [2].

Following requirement has to be met according to PN-V-87000:2011 for testing the protecting jackets resistance against bullets: „...the places of consecutive impacts of bullets have to be separated at least by 50 mm, and from the edge of the ballistic insert and from the edge of the base material at least by 76 mm...”. And for testing the resistance of protecting helmets against fragments in accordance to clause 5.10.1.1 PN-V-87001:2011 the points of impact „... have to be separated between themselves, from the edge of helmet, fixing points and technological openings by at least 30 mm. Points of impacts have to be located in a way preventing any overlapping of areas for which the material was weakened by former impacts”. Similar wording is in clause 5.10.2, the sub-clause concerning the examination of resistance of helmets against bullets. According to sub-clause 5.10.2.3 when preparing the helmets for tests „...points have to be separated between themselves, from the edge of helmet, fixing points and technological openings by at least 30 mm. Points of impacts have not to be placed within the areas of any weaknesses of the shell material caused by former shootings.”

In reference to the above some non-destructive diagnostic methods have to be used to identify the areas of weaknesses (destruction zones) in protection material caused by former shootings. A method of infrared thermography [3, 4] was used to

nych zastosowano metodę termografii w podczerwieni [3, 4].

2. Określanie strefy zniszczeń próbek osobistych osłon balistycznych podczas badań kuloodporności

Strefę zniszczenia materiału osłony określano podczas badań kuloodporności za pomocą 2 kamer na podczerwień (fot. 1). Do próbki, w postaci kompozytu aramidowego o wymiarach (400x400) mm, strzelano nabojem 357 Magnum z pociskiem JSP (półpłaszczowy z rdzeniem ołowianym) o masie 10,2 g.

Podczas strzału prędkość pocisku (V_m) była mierzona za pomocą zestawu do pomiaru prędkości pocisków typ BP (bramek fotoelektrycznych) w odległości 2 m od badanego kompozytu i wyniosła 444 m/s. Próbka nie została przebita. Wyniki przedstawiono na fot. 2 i rys.1.

investigate destructions of personal ballistic protections.

2. Determination of Destruction Zone for Samples of Personal Ballistic Protections at Bullet Resistance Tests

A destruction zone for protecting material was determined during bullet resistance tests by using 2 infrared cameras (Photo 1). The shot was fired to the sample of (400x400) mm size aramid composite with 10.2 g weight JSP bullet (half-jacketed with the lead core) of 357 Magnum cartridges.

The velocity of the bullet (V_m) at firing measured by a BP system (photoelectric barriers) located 2 m before the tested composite was equal to 444 m/s. The sample has not been penetrated. The results are presented in photo 2 and fig. 1.



Fot. 1. Stanowisko do rejestracji zmian pola temperatury na powierzchniach (przedniej i tylnej) próbki kompozytu podczas badań kuloodporności

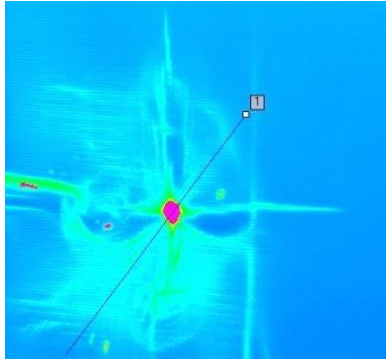
Photo 1. A setup recording the changes of temperature distribution on the surfaces (front and rear) of a composite sample at bullet resistance tests

Na podstawie analizy otrzymanych podczas badań termogramów, stwierdzono, że temperatura na przedniej powierzchni kompozytu (wzdłuż linii przedstawionej na termogramie fot. 2) w punkcie trafienia osiąga wartość ok. 50°C, a poza punktem trafienia wynosi poniżej 20°C.

Wykresy temperatury na tylnej powierzchni kompozytu (rys. 2) (wzdłuż linii przedstawionej na termogramach fot. 3) są bardziej spłaszczone niż na przedniej powierzchni kompozytu.

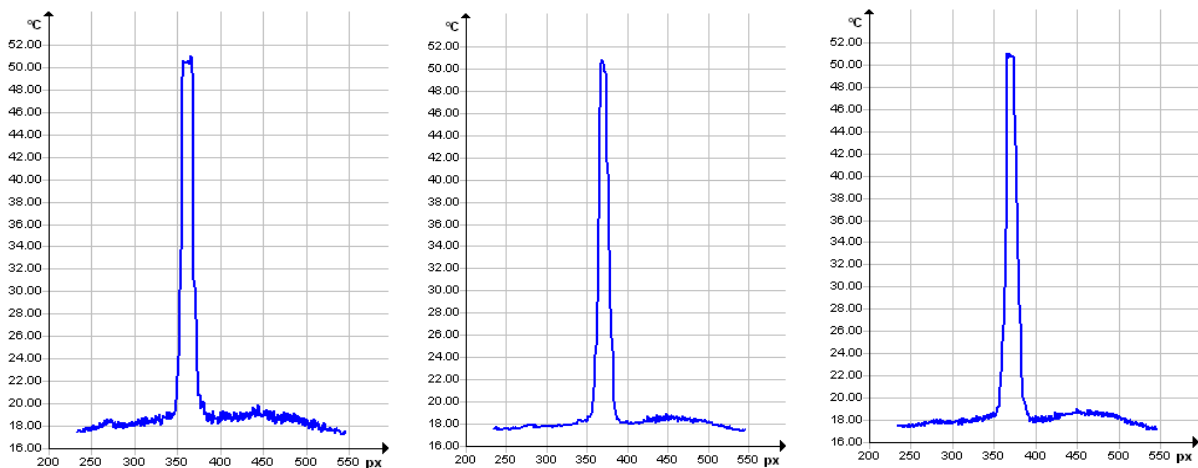
The analysis of received thermograms shows that the temperature on the composite front surface (along the line shown on thermogram in photo 2) reaches ca. 50°C in the point of impact whereas beyond the point it is below 20°C.

The graphs of temperature on the composite rear surface (Fig. 2) (along the line shown in thermograms in photo 3) are more flat than for the front surface.



Fot. 2. Termogram powierzchni przedniej kompozytu podczas strzału (nb. 357 Magnum z pociskiem JSP o masie 10,2 g, z prędkością 444 m/s) w czasie 0 s

Photo 2. Thermogram of composite frontal surface during the shooting (cartridge 357 Magnum with bullet JSP of 10.2 g weight, velocity 444 m/s) for the time 0 s

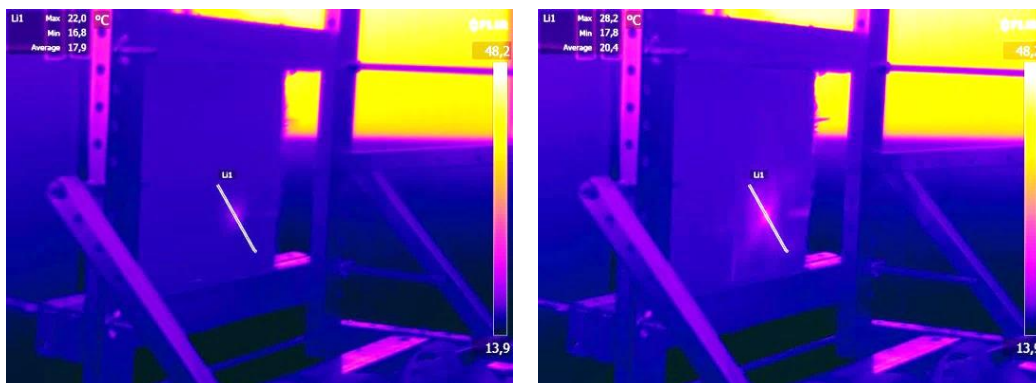


Rys. 1. Wykresy temperatury na powierzchni przedniej kompozytu wzdłuż uszkodzenia powstałego na skutek strzału nb. 357 Magnum z poc. JSP w czasie (od lewej): 0 s, 0,5 s i 1 s

Fig. 1. Graphs of composite front surface temperature along the damage caused by the shot of JSP bullet with 357 Magnum cartridge in times (from the left): 0 s, 0.5 s and 1.0 s

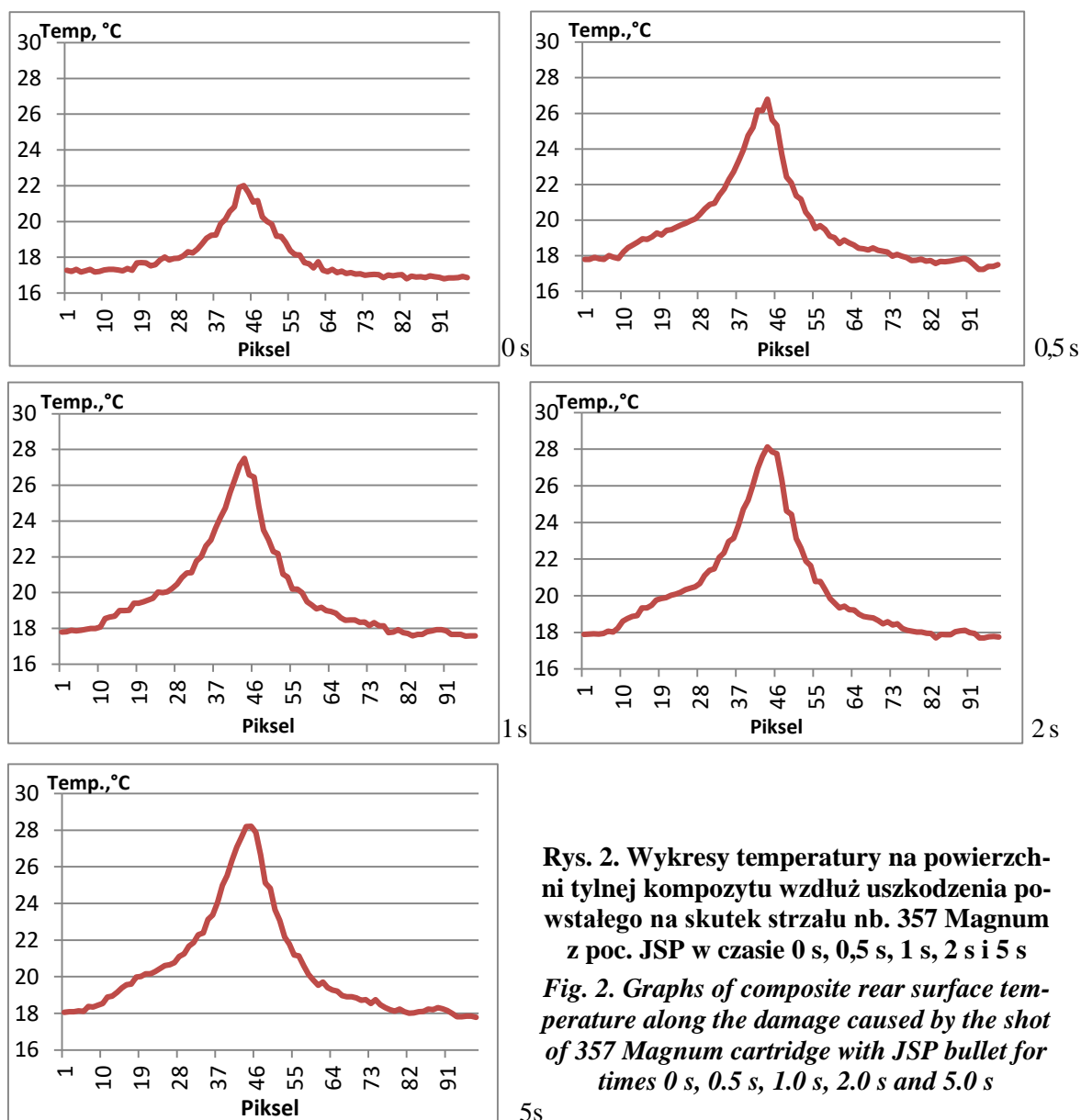
Ekstremum funkcji na powierzchni tylnej (ok. 28°C) znajduje się poniżej ekstremum funkcji na powierzchni przedniej (ok. 51°C).

Extreme value of the function on the rear surface (ca. 28°C) is below front surface function extreme value (ca. 51°C).



Fot. 3. Termogramy powierzchni tylnej kompozytu podczas strzału (nb. 357 Magnum z poc. JSP o masie 10,2 g, z prędkością 444 m/s) w czasie (od lewej): 0 s i 5 s

Photo 3. Thermograms of composite rear surface at shooting (cartridge 357 Magnum with JSP bullet of 10.2 g weight and 444 m/s velocity) in times (from the left): 0 s and 5 s



Rys. 2. Wykresy temperatury na powierzchni tylnej kompozytu wzdłuż uszkodzenia powstałego na skutek strzału nb. 357 Magnum z poc. JSP w czasie 0 s, 0,5 s, 1 s, 2 s i 5 s
Fig. 2. Graphs of composite rear surface temperature along the damage caused by the shot of 357 Magnum cartridge with JSP bullet for times 0 s, 0.5 s, 1.0 s, 2.0 s and 5.0 s

Na podstawie przeprowadzonych badań z użyciem naboju 357 Magnum z poc. JSP, pole temperatury na przedniej powierzchni kompozytu przedstawia niewielką strefę zniszczeń wokół miejsca trafienia (niższe wartości temperatury) oraz duże zniszczenie w punkcie trafienia (wysokie wartości temperatury). Natomiast na tylnej powierzchni kompozytu w pobliżu punktu trafienia występują większe wartości temperatury, które wskazują na występowanie większej strefy zniszczeń wewnątrz kompozytu, niż widoczne okiem nieuzbrojonym zniszczenie występujące na przedniej powierzchni kompozytu. Jest to obserwacja bardzo istotna, gdyż w przypadku badań strzelaniem wyznaczanie kolejnych punktów trafień wykonywane

On the basis of tests carried out with the use of cartridge 357 Magnum with JSP bullet the field of temperature on the frontal surface of the composite represents a small area of destruction around the area of impact (lower values of temperature) and large destruction in the hitting point (high values of temperature). On the rear surface of the composite there are higher values of temperature near the point of hitting which indicate that a larger area of destruction exists inside the composite than the damage on the frontal side visible by an unarmed eye. It is a significant fact as at firing tests the consecutive points of impact are determined basing on the evalua-

jest na podstawie oceny zniszczenia, które widoczne jest na przedniej powierzchni osłony.

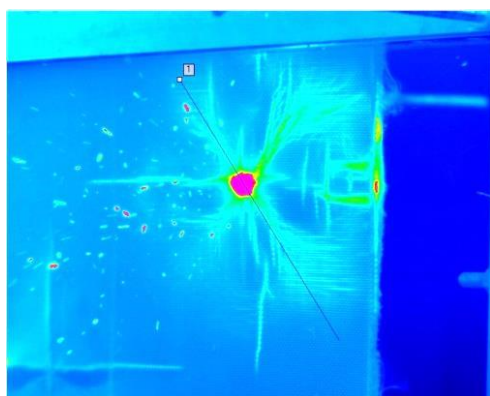
Dążąc do uzyskania przebicia całkowitego kolejne strzały oddawano nabojami o zwiększonej prędkości (9x19 mm) oraz stosowano nabój specjalny 357 Magnum FJCBSC o zwiększonej przebijalności.

Kolejny strzał został oddany nabojem 9x19 mm z pociskiem FMJ (pełnopłaszczowym z płaszczem wykonanym ze stopu miedzi) o masie 8,0 g. Podczas strzału prędkość pocisku (mierzona 2 m przed celem) wyniosła 552 m/s. Próbką nie została przebita. Wyniki przedstawiono na fot. 4.

tion of destructions visible on the frontal surface of the protection.

Trying to get a complete penetration the next shots were fired with cartridges of increased velocity (9x19 mm) and by applying the special cartridge 357 Magnum FJCBSC with increased penetration.

The next shot was fired by using the cartridge 9x19 mm with FMJ bullet (full metal jacket from copper alloy) having the mass of 8.0 g. The velocity of fired bullet (measured 2 m in front of the target) was 552 m/s. The sample was not penetrated. The results are presented in photo 4.



Fot. 4 Termogram powierzchni przedniej kompozytu podczas strzału (nb. 9x19 mm z poc. FMJ o masie 8,0 g, z prędkością 552 m/s) w czasie 0 s

Photo 4. Thermogram of composite front surface at shooting (cartridge 9x19 mm with FMJ bullet of 8.0 g weight and 552 m/s velocity) for the time 0 s

Na podstawie analizy otrzymanych podczas badań termogramów stwierdzono, że temperatura na przedniej powierzchni kompozytu (wzdłuż linii przedstawionej na termogramie fot. 4) w punkcie trafienia osiąga wartość ok. 48°C, natomiast poza punktem trafienia wynosi poniżej 21°C.

After the analysis of thermograms received during the tests it was stated that the temperature reaches ca. 48°C in the point of impact and below 21°C beyond the point of impact on the composite front surface (along the line shown in thermogram in photo 4).

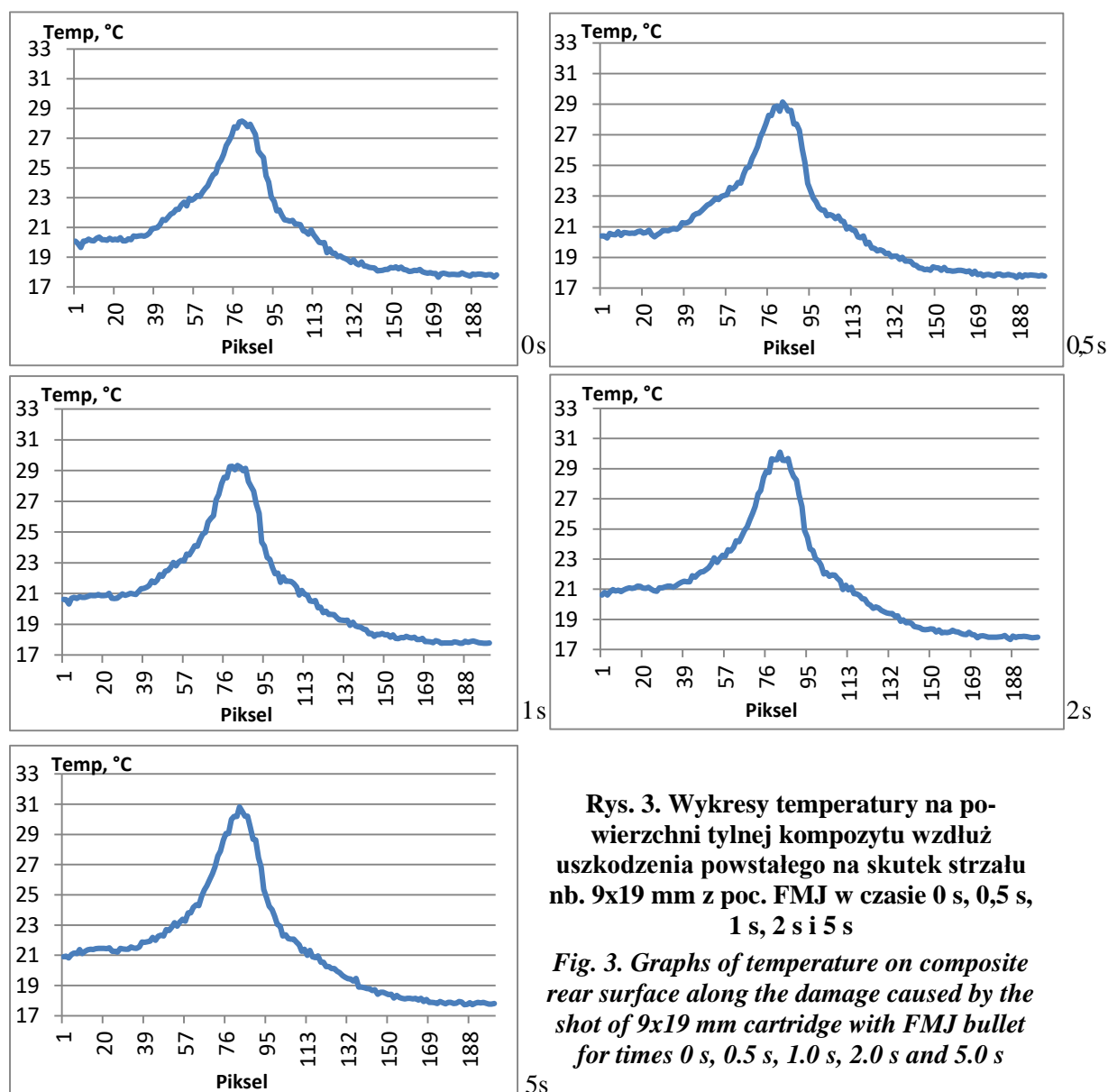


Fot. 5. Termogramy powierzchni tylnej kompozytu podczas strzału (nb. 9x19 mm z poc. FMJ o masie 8,0 g z prędkością 552 m/s) w czasie: 0 s i 5 s

Photo 5. Thermogram of composite rear surface at shooting (cartridge 9x19 mm with FMJ bullet of 8.0 g weight and 552 m/s velocity) for the times 0 s and 5.0 s

Wykresy temperatury na tylnej powierzchni kompozytu (rys. 3) (wzdłuż linii przedstawionej na termogramach fot. 5) są bardziej spłaszczone niż wykresy temperatury na przedniej powierzchni kompozytu. Maksimum funkcji na powierzchni tylnej (ok. 31°C) znajduje się poniżej maksimum funkcji występującej na przedniej powierzchni (ok. 48°C).

Graphs of temperature on the composite rear surface (Fig. 3) (along the line shown on thermograms of photo 5) are more flat than the temperature graphs on the composite front surface. Maximum of the function on the rear surface (ca. 31°C) is below the function maximum on the front surface (ca. 48°C).



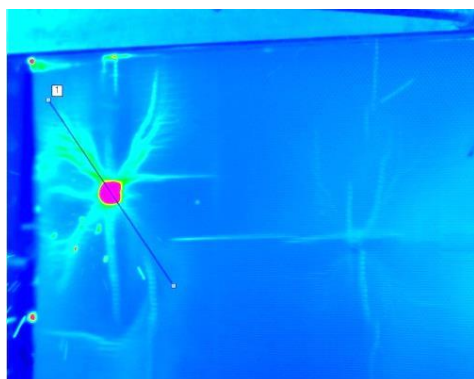
Rys. 3. Wykresy temperatury na powierzchni tylnej kompozytu wzdłuż uszkodzenia powstałego na skutek strzału nb. 9x19 mm z poc. FMJ w czasie 0 s, 0,5 s, 1 s, 2 s i 5 s

Fig. 3. Graphs of temperature on composite rear surface along the damage caused by the shot of 9x19 mm cartridge with FMJ bullet for times 0 s, 0.5 s, 1.0 s, 2.0 s and 5.0 s

Trzeci i czwarty strzał został oddany nabojem 357 Magnum z pociskiem FJCBSC (pocisk stożkowy z pełnym płaszczem stalowym z rdzeniem ołowianym) o masie 10,24 g. Podczas strzałów prędkość pocisku (mierzona 2 m przed celem) wyniosła odpowiednio 463 m/s i 472 m/s. Próbkę nie została przebita.

Third and fourth shots were fired by 357 Magnum cartridge with FJCBSC bullet (full steel jacket conical bullet with lead core) having the mass of 10.24 g. During the shots the velocity of the bullet (measured 2 m before the target) was respectively 463 m/s and 472 m/s. The sample was

Uzyskane wyniki w postaci termogramu powierzchni przedniej kompozytu podczas strzału przedstawiono na fot. 6.



Fot. 6. Termogram powierzchni przedniej kompozytu podczas strzału (nb. 357 Magnum z poc. FJCBSC) w czasie 0 s

Photo 6. Thermogram of composite front surface at firing (357 Magnum round with FJCBSC bullet) for the time 0 s

Temperatura na przedniej powierzchni kompozytu (wzdłuż linii przedstawionej na termogramie fot. 6) w punkcie trafienia osiąga wartość ok. 51°C, natomiast poza punktem trafienia wynosi poniżej 24°C.

Również jak w poprzednio rozpatrywanych przypadkach, wykresy temperatury na tylnej powierzchni kompozytu (rys. 4) (wzdłuż linii przedstawionej na termogramach fot. 7) są bardziej spłaszczone w porównaniu do wykresów temperatury na przedniej powierzchni kompozytu. Na powierzchni tylnej funkcja osiągnęła największą wartość 27°C, która jest poniżej największej wartości funkcji na powierzchni przedniej (51°C). Na fot. 8 przedstawiono kompozyt po badaniach kuloodporności.

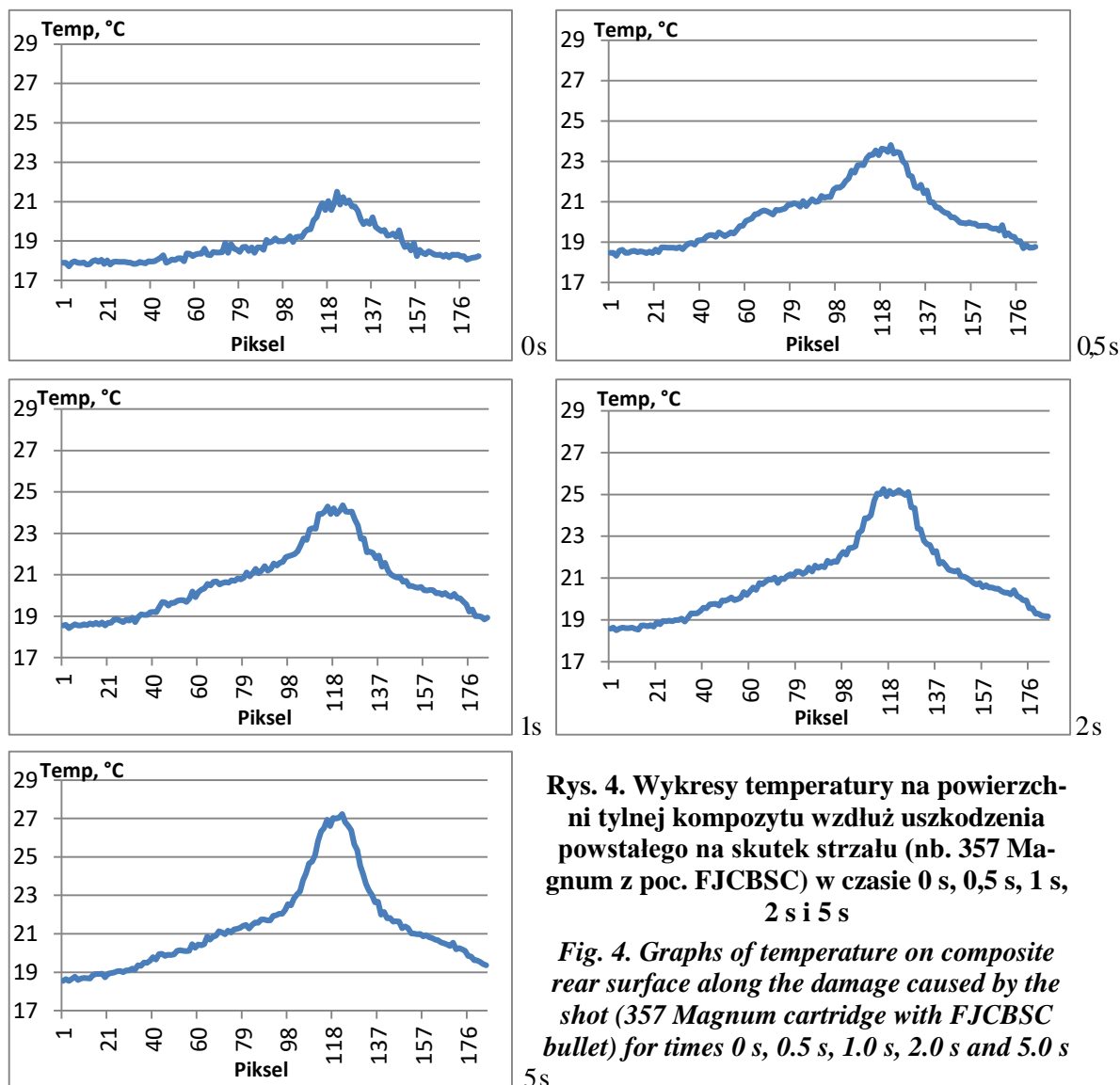
Temperature on the composite front surface (along the line shown on thermogram in photo 6) reached ca. 51°C in the point of impact and beyond the point of impact it was below 24°C.

Similarly as in the former cases the graphs of temperature on the composite rear surface (Fig. 4) (along the line shown on thermograms in photo 7) are flatter than the graphs of temperature on the composite front surface. The highest value of the function on the rear surface was 27°C which is below the highest value of the front surface (51°C). Photo 8 shows the composite after bullet resistance tests.



Fot. 7. Termogramy powierzchni tylnej kompozytu podczas strzału (nb. 357 Magnum z poc. FJCBSC) w czasie: 0 s i 5 s

Photo 7. Thermograms of composite rear surface at firing (357 Magnum round with FJCBSC bullet) for the time 0 s and 5.0 s



Fot. 8 Kompozyt po strzeleniu nabojami: 1) 357 Magnum poc. JSP, 2) 9x19 mm z poc. FMJ, 3) 357 Magnum z poc. FJCBSC

Photo 8. Composite after firing with rounds: 1) 357 Magnum bullet JSP, 2) 9x19 mm bullet FMJ, 3) 357 Magnum bullet FJCBSC

3. Określanie strefy zniszczeń próbek osobistych osłon balistycznych podczas badań odłamkoodporności

Strefę zniszczenia materiału osłony określano podczas badań odłamkoodporności za pomocą 2 kamer na podczerwień (fot. 9, 10). Do próbki, w postaci kompozytu aramidowego o wymiarach (410x410) mm, strzelano odłamkiem standardowym o masie 1,1 g. Podczas strzału prędkość odłamka (V_m) była mierzona za pomocą zestawu do pomiaru prędkości typ BP (bramek fotoelektrycznych) w odległości 2 m od badanego kompozytu. Podczas badań określono wartość granicy ochrony balistycznej V_{50} kompozytu, która wyniosła 774 m/s, przy $\Delta V=35$ m/s.

3. Destruction Zone Identification for Personal Ballistic Protection Samples at Fragment Resistance Tests

The zone of protection material destruction was identified during tests of the resistance against fragments by using 2 infrared cameras (photo 9, 10). Shots of standard fragments and mass of 1.1 g were fired to the sample of aramid composite with the size (410x410) mm. Velocity of the fired fragment (V_m) was measured 2 m in front of tested composite by using BP system (photoelectric barriers). During the tests the value of the composite ballistic protection limit V_{50} was determined as equal to 774 m/s at $\Delta V=35$ m/s.



Fot. 9. Stanowisko do rejestracji zmian pola temperatury na powierzchniach (przedniej i tylnej) próbki kompozytu podczas badań odłamkoodporności

Photo 9. Setup for recording the changes of temperature distribution on the surfaces (front and rear) of composite samples during the resistance tests against fragments



Fot. 10. Próbką kompozytu po badaniach odłamkoodporności od lewej: przód, tył próbki podczas badań odłamkoodporności

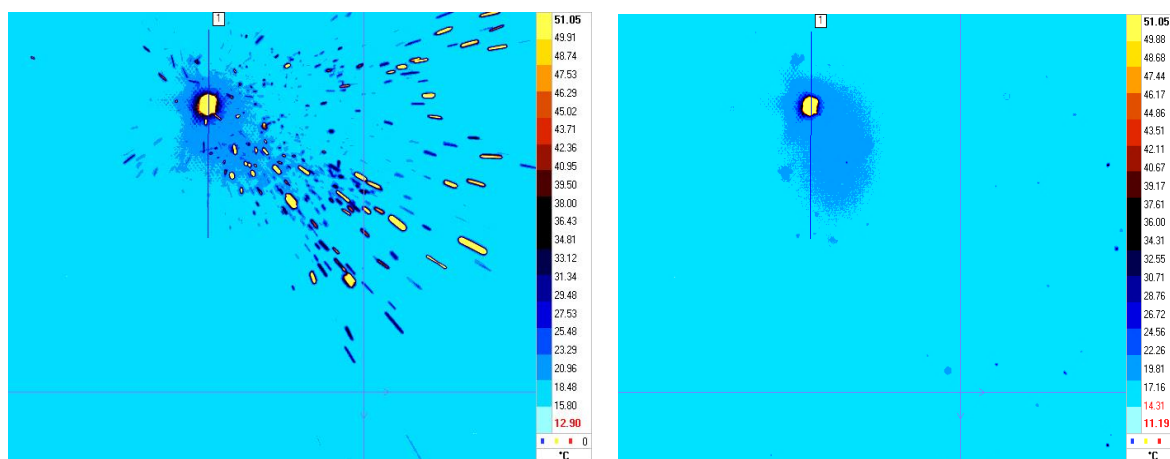
Photo 10. A sample of the composite after fragment resistance tests from the left: front and back of the sample during the fragment resistance tests

Podczas badań odłamkoodporności oddano dodatkowe strzały, których punkty trafień zostały wyznaczone na granicy wymaganych minimalnych odległości zgodnie z normą PN-V-87001:2011.

Temperatura na przedniej powierzchni kompozytu (rys. 5) (wzdłuż linii przedstawionej na termogramach fot. 11) w punkcie trafienia osiąga wartość ok. 78°C, a poza punktem trafienia wynosi poniżej 25°C.

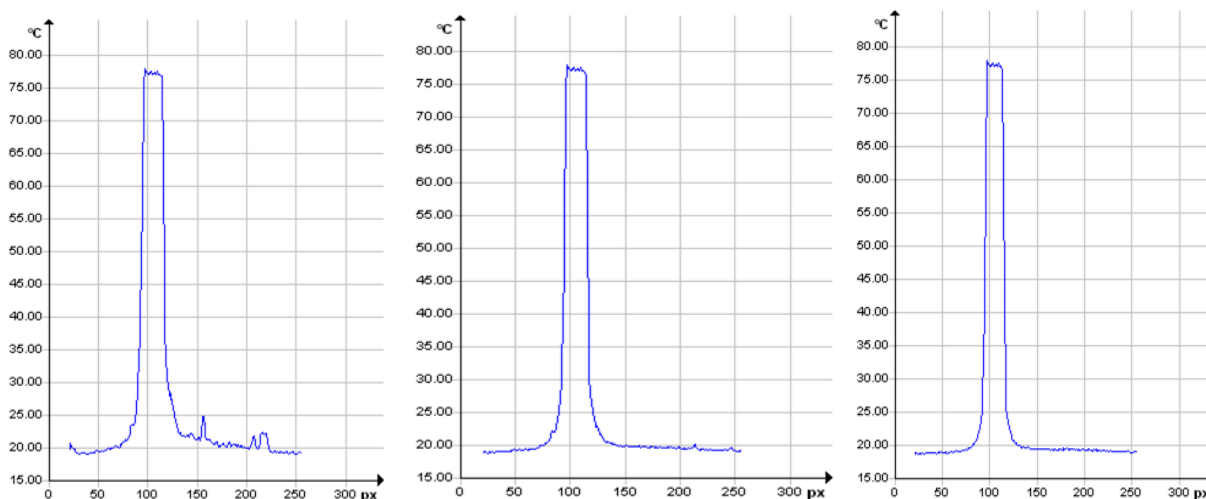
During the fragment resistance tests some additional shots were fired and their points of hitting were determined on the borders of minimal distances required by the standard PN-V-87001:2011.

Temperature on the composite front surface (Fig. 5) (along the line shown on thermograms of photo 11) reaches the value ca. 78°C in the point of impact and beyond this point it is below 25°C.



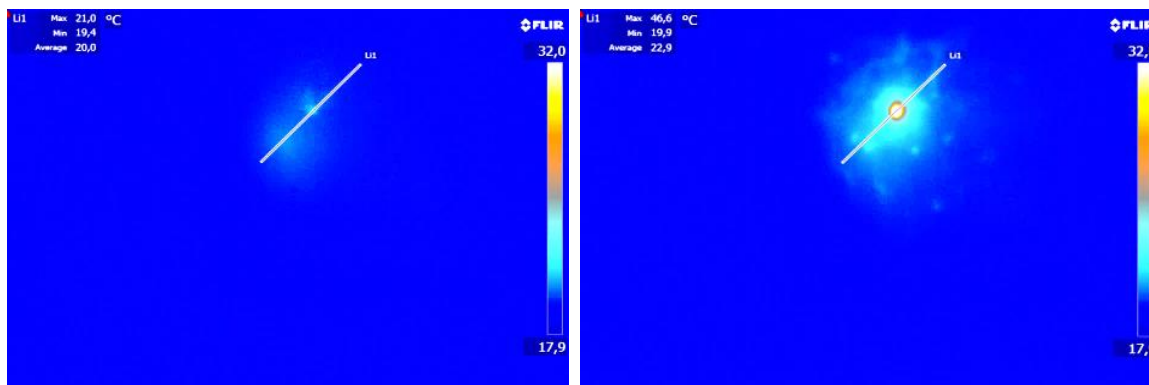
Fot. 11. Termogramy powierzchni przedniej kompozytu podczas strzału odłamkiem standardowym (o masie 1,1 g, z prędkością 772 m/s) w czasie 0 s i 0,2 s

Photo 11. Thermograms of composite front surface at firing with a standard fragment (mass 1.1 g, velocity 772 m/s) for times 0 s and 0.2 s



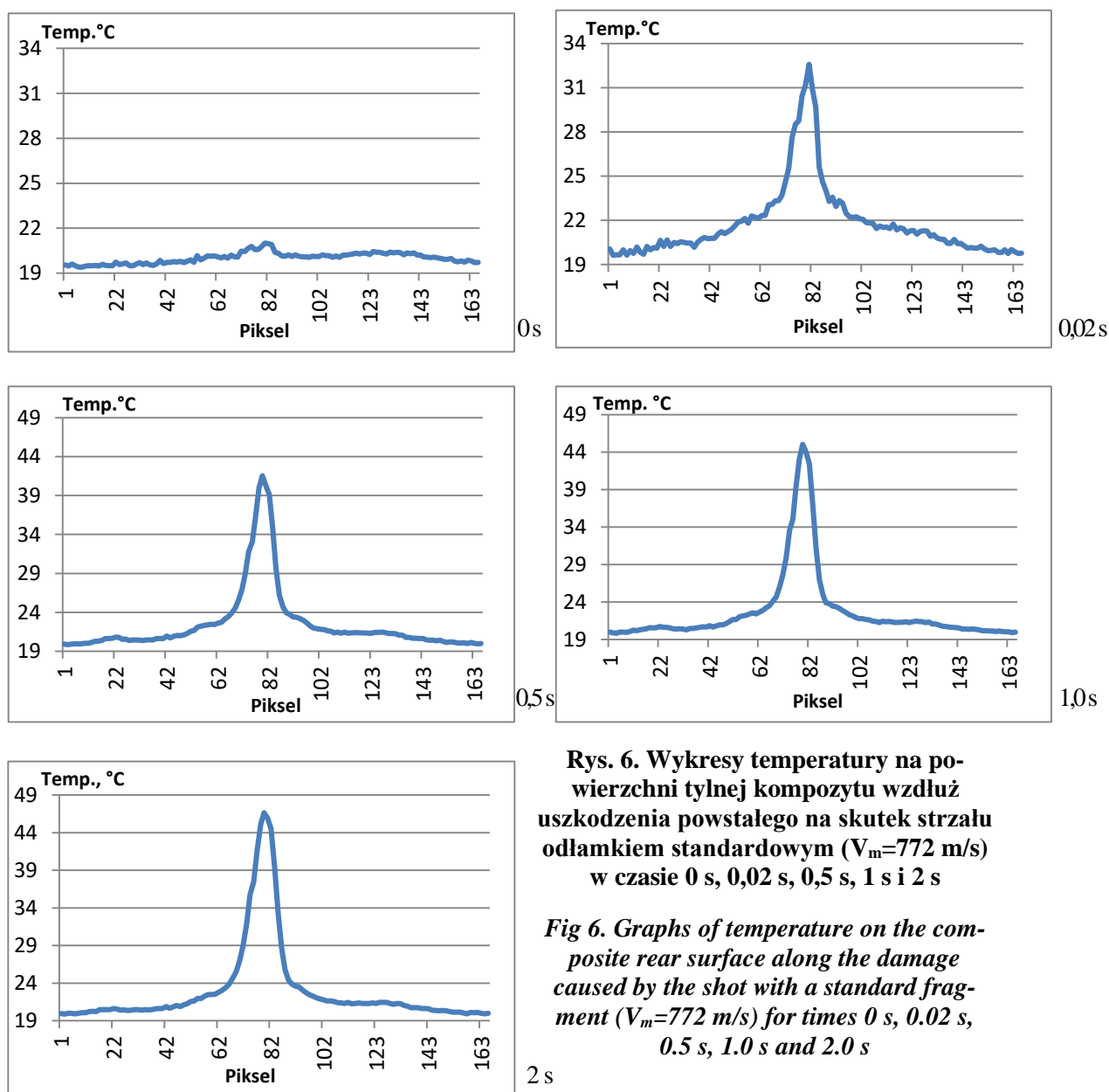
Rys. 5. Wykresy temperatury na powierzchni przedniej kompozytu wzdłuż uszkodzenia powstałego na skutek strzału (odłamkiem standardowym o masie 1,1 g, prędkość 772 m/s, przebicie częściowe) w czasie 0 s, 0,01 s i 0,2 s

Fig 5. Graphs of temperature on the composite front surface along the damage caused by the shot (a standard fragment having the mass 1.1 g, velocity 772 m/s, partial penetration) for times 0 s, 0.01 s and 0.2 s



Fot. 12. Termogramy powierzchni tylnej kompozytu podczas strzału odłamkiem standardowym (o masie 1,1 g, z prędkością 772 m/s) w czasie (od lewej): 0 s i 2 s

Photo 12. Thermograms of composite rear surface at firing with a standard fragment (mass 1.1 g, velocity 772 m/s) for times (from the left) 0 s and 2.0 s



Rys. 6. Wykresy temperatury na powierzchni tylnej kompozytu wzdłuż uszkodzenia powstałego na skutek strzału odłamkiem standardowym ($V_m=772$ m/s) w czasie 0 s, 0,02 s, 0,5 s, 1 s i 2 s

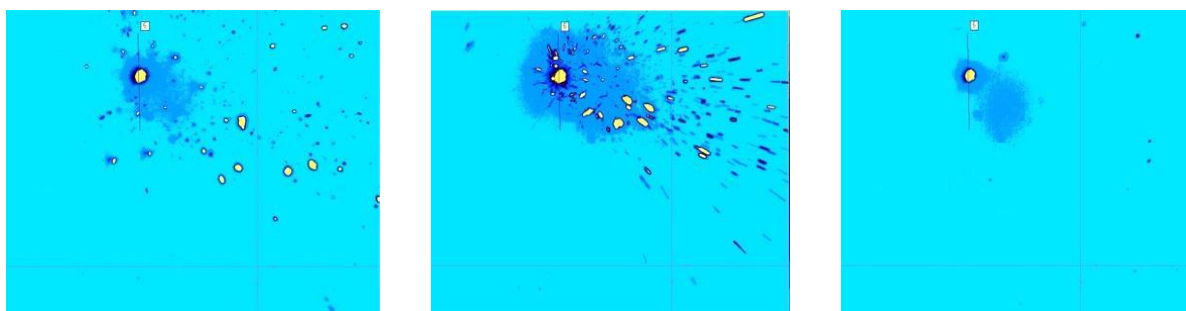
Fig 6. Graphs of temperature on the composite rear surface along the damage caused by the shot with a standard fragment ($V_m=772$ m/s) for times 0 s, 0.02 s, 0.5 s, 1.0 s and 2.0 s

Wykresy temperatury na tylnej powierzchni kompozytu (rys. 6) (wzdłuż linii przedstawionej na termogramach fot. 12), podobnie jak w poprzednio analizowanych przypadkach są bardziej spłaszczone w porównaniu do wykresów temperatury na przedniej powierzchni kompozytu. Ekstremum funkcji na powierzchni tylnej (ok. 47°C) znajduje się również poniżej ekstremum funkcji występującej na przedniej powierzchni i wynosi 78°C.

Podczas kolejnego strzału przy prędkości odłamka wynoszącej 785 m/s, temperatura na przedniej powierzchni kompozytu (wzdłuż linii przedstawionej na termogramach fot. 13) w punkcie trafienia osiąga wartość ok. 77°C, poza punktem trafienia wynosi poniżej 20°C.

Temperature graphs of the composite rear surface similarly as in former cases (Fig. 6) (along the line shown on thermograms of photo 12) are flatter than temperature graphs of the composite front surface. Extreme value of function for the rear surface (ca. 47°C) is also below the extreme value of function for the front surface which equals to 78°C.

During the next shot when the velocity of the fragment reached 785 m/s the temperature on the composite front surface (along the line shown on thermograms in photo 13) was ca. 77°C in the hitting point and below 20°C beyond that point.

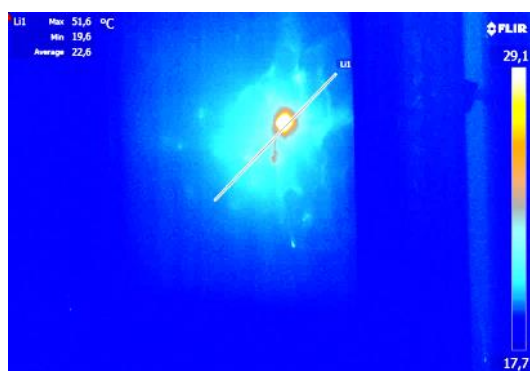


Fot. 13. Termogramy powierzchni przedniej kompozytu podczas strzału odłamkiem standardowym (1,1 g, $V_m = 785$ m/s, przebicie całkowite) w czasie 0 s, 0,02 s i 0,5 s

Photo 13. Thermograms of composite front surface at firing with a standard fragment (mass 1.1 g, velocity 785 m/s, complete penetration) for times 0 s, 0.02 s and 0.5 s

Termogram powierzchni tylnej kompozytu przedstawiono na fot. 14.

Thermogram of the composite rear surface is presented in photo 14.

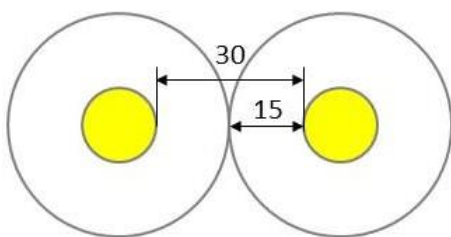


Fot.14. Termogram powierzchni tylnej kompozytu podczas strzału odłamkiem standardowym (1,1 g, $V_m = 785$ m/s) w czasie 0 s

Photo 14. Thermogram of composite rear surface at firing with a standard fragment (mass 1.1 g, velocity 785 m/s) for time 0 s

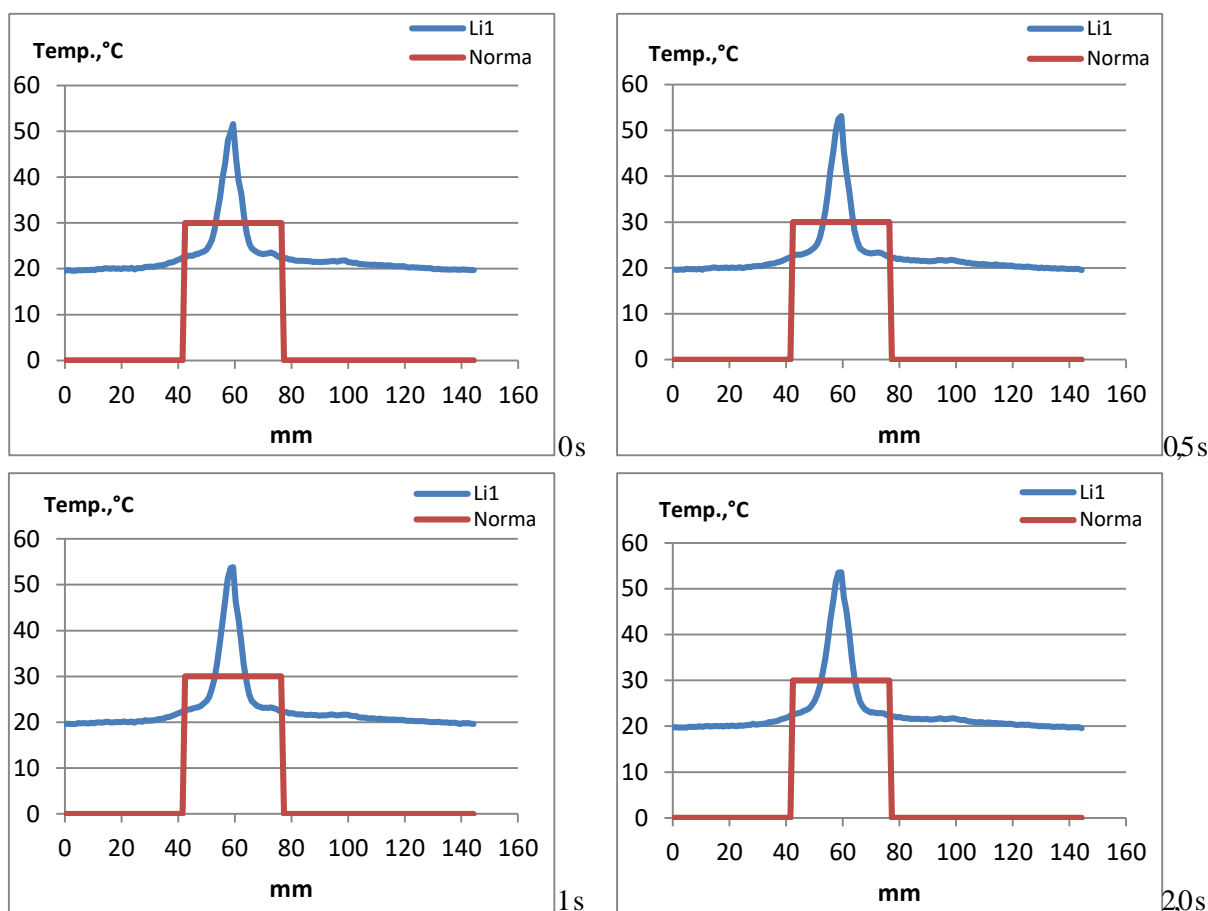
Zgodnie z zapisem normy PN-V-87001:2011 „Punkty trafień powinny być rozmieszczone tak, aby obszary osłabienia materiału pochodzące od poprzednich strzałów nie pokrywały się.” (rys. 7).

According with the text of standard PN-V-87001:2011 „Points of impact have to be located in a way preventing any overlapping of material weakened areas caused by previous shots.” (Fig. 7).



Rys. 7. Punkty trafień odległe od siebie co najmniej o 30 mm (zgodnie z PN-V-87001:2011)

Fig. 7. Points of impact with mutual separation of at least 30 mm (according to PN-V-87001:2011)



Rys. 8. Wykresy temperatury na powierzchni tylnej kompozytu wzdłuż uszkodzenia powstałego na skutek strzału (odłamkiem standardowym, $V_m=785$ m/s) w czasie (od lewej) 0 s, 0,5 s, 1 s, 2 s

Fig. 8. Graphs of temperature on the composite rear surface along the damage caused by the shot (standard fragment, $V_m=785$ m/s) for the times (from the left) 0 s, 0.5 s, 1.0 s, 2.0 s

Wykresy temperatury na tylnej powierzchni kompozytu (rys. 8) (wzdłuż linii przedstawionej na termogramie fot. 14), tak jak w wyżej przedstawionych przypadkach, są bardziej spłaszczone w porównaniu do wykresów temperatury na przedniej powierzchni kompozytu. Ekstremum funkcji na powierzchni tylnej wynosi ok. 54°C , natomiast na powierzchni przedniej wynosi ok. 77°C . Na wykresie (rys. 8) naniesiono kolorem czerwonym minimalną odległość zgodnie z normą PN-V-87001:2011

Graphs of temperature on the composite rear surface (Fig. 8) (along the line shown in thermogram in photo 14) similarly to the cases presented earlier are flatter than the temperature graphs on the composite front surface. The extreme value of the function on the rear surface is ca. 54°C whereas on the front surface it is ca. 77°C . On the chart (Fig. 8) the minimal distance is marked in red colour according with the standard PN-V-87001:2011 (30 mm, 15 mm for each

(30 mm, po 15 mm (plus promień przestrzeleny) z obu stron ekstremum).

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że zachowanie, wymaganych zgodnie z normą PN-V-87001:2011, odległości między punktami trafień może być niewystarczające i może skutkować przebiciem osłony w wyniku oddania strzału w miejsce osłabienia materiału. Odpowiednie rozmieszczenie punktów trafień pocisków i odłamków na powierzchni badanej próbki osłony balistycznej jest bardzo istotne, ponieważ wpływa na wynik odporności balistycznej danej osłony.

Oddanie strzału w strefie zniszczenia może spowodować przebicie osłony. Jednakże, aby potwierdzić powyższe stwierdzenie należy przeprowadzić dodatkowe badania. Badania te powinny polegać na analizie stref uszkodzenia osłon balistycznych w postaci wyrobów gotowych tj. kamizelek i hełmów złożonych z różnych materiałów (aramid, polietylen).

Podczas przeprowadzonych badań stwierdzono, że strefa podpowierzchniowych uszkodzeń materiału od strony uderzenia przez pocisk jest większa od kalibru pocisku i znacznie większa po stronie tylnej kompozytu aramidowego.

Kamery na podczerwień mogą stanowić uzupełnienie aparatury badawczej stosowanej podczas badań niszczących osłon balistycznych, umożliwiając określenie strefy zniszczeń osłony, która nie jest widoczna okiem nieuzbrojonym. Odpowiednie określenie strefy zniszczeń materiału osłony jest niezbędne do wyznaczenia kolejnych punktów trafień osłony w miejsce, które nie zostało uszkodzone w wyniku poprzednich strzałów. Wiedza na temat strefy zniszczenia materiału, które wystąpiło wewnątrz osłony może być wykorzystana podczas opracowywania nowych osłon balistycznych w zakresie wprowadzania zmian w konstrukcji próbek (zmniejszenia masy, zastosowania innych materiałów, innej struktury) z zachowaniem wymaganej odporności balistycznej.

side of the extreme value (plus the radius of the hole)).

4. Summary

On the grounds of performed experiments and analyses of received results it may be stated that using the distances between the points of impact according with the standard PN-V-87001:2011 may be insufficient and may cause the penetration of the protection in effect of hitting a place where the material is weakened. Suitable distribution of hitting points for bullets and fragments on the surface of tested sample of ballistic protection is extremely significant as it influences into the result of the ballistic resistance for the specific protection.

Firing a shot within a zone of destruction may cause the penetration of the protection. But the confirmation of the above statement needs to be done by additional tests. These investigations have to be based on the analysis of destruction zones for articles being in the use i.e. jackets and helmets consisting of various materials (aramid, polyethylene).

During the performed tests it was noticed that the zone of material subsurface destruction on the side of hitting is greater than the calibre of bullet and it is much greater on the rear side of aramid composite.

Infrared cameras may supplement the testing equipment used at destructive tests of ballistic protections to identify the destruction zone for the protection material which is invisible by an unarmed eye. A proper identification of protecting material destruction zone is necessary to select the next points of impact into the protection which were not damaged by previous shots. The knowledge on material destruction zone which occurred inside the protection may be used at developing the new ballistic protections and introducing the changes into the designs (decreasing the mass, application of new materials and different structures) and preserving in the same time the required level of ballistic protection.

Literatura / Literature

- [1] PN-V-87000:2011 „Osłony balistyczne lekkie. Kamizelki kulo- i odłamkoodporne. Wymagania i badania.
- [2] PN-V-87001:2011 „Osłony balistyczne lekkie. Hełmy ochronne odłamko- i kuloodporne. Wymagania i badania.
- [3] Świdorski W., Vavilov V., „Metody termograficzne w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych”, WITU, Zielonka, 2010.
- [4] Świdorski W., Metody i techniki termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych, Biuletyn PTU, Zeszyt 112, nr 4, s. 75-92, 2009

