

**Marek SZUDROWICZ\***  
**Waldemar ŚWIDERSKI\*\***

## **IDYNTYFIKACJA USZKODZEŃ I NAPRAWA PANCERZY KOMPOZYTOWYCH W WARUNKACH POŁOWYCH**

*Zaproponowano metodę termografii do identyfikacji wielkości uszkodzeń pancerzy kompozytowych. Przeprowadzono analizę metod regeneracji uszkodzonych kompozytów. Przedstawiono sposób regeneracji laminatu poliestrowo - szklanego po uderzeniu pocisku z rdzeniem miękkim.*

***Słowa kluczowe:** pancerze kompozytowe, uszkodzenia, metody regeneracji kompozytów, metoda termografii w podczerwieni*

### **WSTĘP**

W ostatnich latach, ze względu na stale rosnący poziom zagrożenia załóg pojazdów wojskowych, rozpoczęto modernizację pojazdów głównie uczestniczących w misjach zagranicznych. W zakresie opancerzenia pojazdów modernizacja prowadzona była poprzez: dopancerzanie istniejących pojazdów (podwyższanie ich poziomu ochrony) oraz pozyskiwanie nowych pojazdów opancerzonych (o określonym poziomie ochrony). Z jednej strony ze względu na wysokie wymagania co do odporności balistycznej, z drugiej jednak na ograniczoną ładowność pojazdów część sprzętu wyposażona została w pancerze kompozytowe (rys. 1), przede wszystkim występujące w formie dodatkowych płyt.

Największym atutem pancerzy kompozytowych jest ich wysoka wartość efektywności masowej, w stosunku do pancerzy stalowych. Jednak ich produkcja i eksploatacja jest bardziej kosztowna niż pancerzy metalowych. Wynika to z faktu, że do dnia dzisiejszego, uszkodzone panele pancerzy kompozytowych podlegają wymianie, bez podjęcia próby ich naprawy.

---

\* dr inż. Marek SZUDROWICZ – Wojskowy Instytut Techniki Pancерnej i Samochodowej

\*\* dr inż. Waldemar ŚWIDERSKI – Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia



Rys. 1. HMMWV w wersjach 1043 (pancerz stalowo – laminatowy) i 1151 (pancerz wielowarstwowy) – przykład modernizacji i rozwoju konstrukcji podyktowany potrzebą podwyższenia poziomu ochrony załóg

*Źródło: Opracowanie własne*

Konstrukcja obecnie eksploatowanych panczerzy, w zależności od wymaganego poziomu ochrony i miejsca ich zamontowania, to nadal głównie układ do trzech warstw różnych materiałów. Dla niższych poziomów ochrony występują głównie laminaty wykonane z włókien szklanych i aramidowych, rzadziej polietylenowych, oraz stopy aluminium i stali jakościowych. Dla wyższych poziomów ochrony do wymienionych materiałów dodać należy ceramikę, która stanowi przeważnie pierwszą warstwę w panczerzu. Materiały te mogą być łączone z sobą żywicami lub klejami, głównie elastomerowymi. W zależności od funkcji, którą mają spełniać, tzn. panczerze kuloodporne i odłamkoodporne lub osłony odporne na wybuch min, udział materiałów polimerowych i ceramiki jest zróżnicowany.

W przypadku laminatów z włókien wysokowytrzymałych, czy panczerzy warstwowych z udziałem ceramiki i laminatów, strefa zniszczenia wewnątrz kompozytu, wokół miejsca uderzenia np. trafienia pociskiem, może być nawet kilka razy większa, niż powstający w wyniku uderzenia pocisku, widoczny okiem nieuzbrojonym, ubytek materiału.

Decyzja o ewentualnej naprawie panczerza powinna być podjęta na podstawie wyników badań z zastosowaniem nieniszczących metod diagnostycznych (rys. 2).

## 1. IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ

Przy klasyfikacji rodzaju uszkodzeń panczerza, po ustalonym okresie eksploatacji, czy też po ostrzale, metoda identyfikacji powinna umożliwić podjęcie decyzji, czy pancierz nadaje się nadal do eksploatacji lub jaki jego fragment należy naprawić poprzez np. wymianę lub dodatkowe wzmocnienie.

Do identyfikacji uszkodzeń w kompozytach wykorzystuje się przede wszystkim:

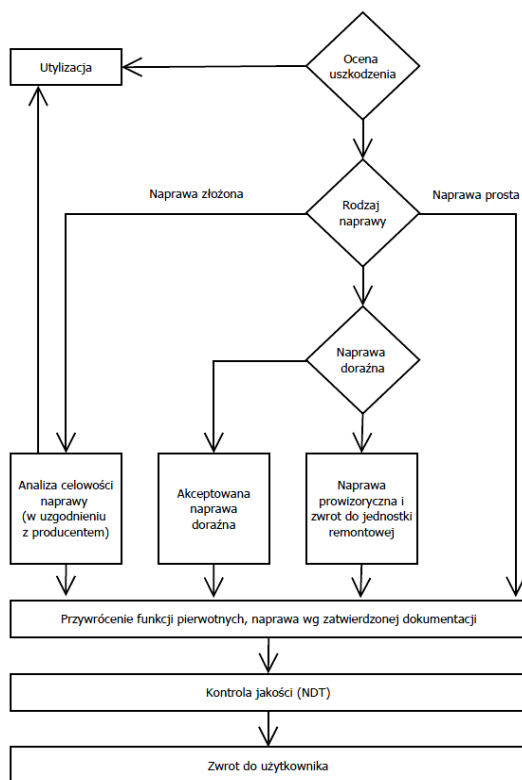
- tap test;
- metody ultradźwiękowe;
- radiografię;
- termografię.

Przy wyborze metody do identyfikacji uszkodzeń w warunkach polowych przyjęto kilka założeń. Były nimi:

- możliwość wykonywania szybkiej analizy dużej powierzchni panczerza;

- wykonywania oceny w miejscu użytkowania sprzętu;
  - prostota metody, łatwość wykonywania badań;
- niskie koszty oprzyrządowania.

Spośród wymienionych metod do analizy przydatności do identyfikacji uszkodzeń w warunkach polowych wybrano termografię.



Rys. 2. Algorytm naprawy kompozytów wg Hexcel Composites [7]

Ogólnie celem badań nieniszczących z zastosowaniem termografii w podczerwieni jest określenie właściwości obiektu w czasie pobudzenia cieplnego, w czasie trwania procesów przejściowych, takich jak grzanie i chłodzenie. Formą odpowiedzi na pobudzenie cieplne jest zmiana temperatury, a szybkość zmian temperatury zawiera informację o wartościach pojemności i przewodności cieplnej, charakteryzujących strukturę wewnętrzną badanego obiektu. Podstawowym założeniem metod badań nieniszczących techniką termografii w podczerwieni jest fakt, że każda klasa badanych obiektów reaguje na pobudzenie w specyficzny sposób.

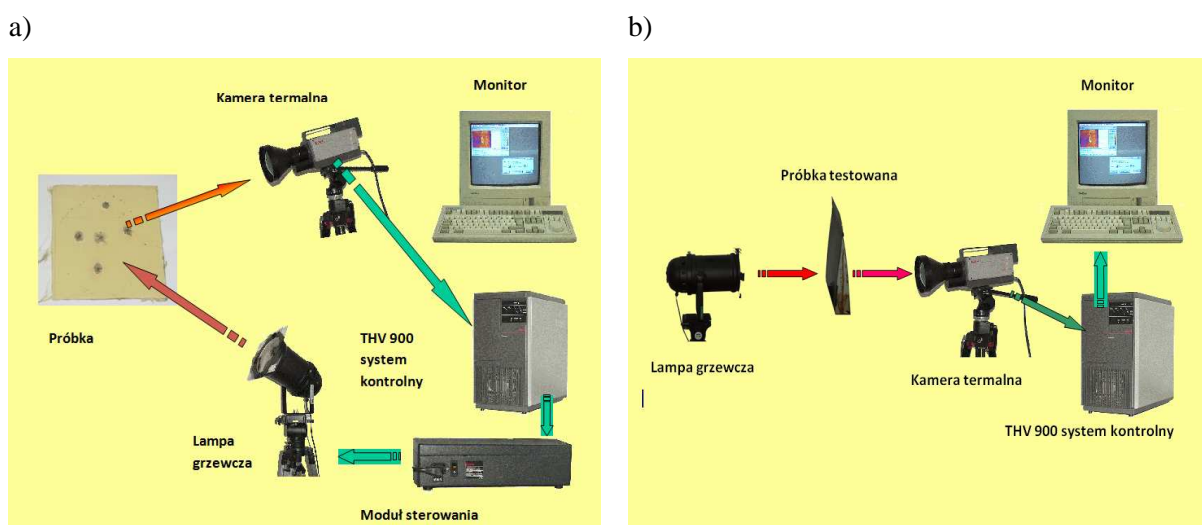
Znanych jest kilka odmian badań z zastosowaniem termografii. Na uwagę zasługują metody Lock-in i transmisyjna.

W metodzie Lock-in fala cieplna ma kształt sinusoidalny. Natrafiając na obszary o innych parametrach propagacji ciepła, zostaje odbita. Powoduje to odzworowanie obszarów, które mają pod powierzchnią inne parametry cieplne np. defekty. System kontrolny zbiera serię obrazów i porównuje ich temperatury, oblicza amplitudę i kąt fazowy odzworowania fali cieplnej w każdym punkcie obrazu. Obrazy amplitudowy i fazowy są niezakłócone przez promieniowanie odbite od powierzchni badanego obiektu. Fazo-

wy obraz jest niezakłócony przez różnice w emisyjności powierzchni i nierównomierny rozkład ogrzewania emitowanego przez źródło.

Metoda ta służy do identyfikacji uszkodzeń znajdujących się również w głębi materiału. Jednak w przypadku uszkodzeń występujących blisko powierzchni można ich obecność identyfikować prostym systemem (źródło ciepła – kamera termalna), bez obróbki cyfrowej otrzymanych obrazów.

W metodzie transmisyjnej źródła ciepła nagrzewające badaną próbkę i kamera termalna znajdują się po przeciwnych stronach badanej próbki materiału. Otrzymujemy sumaryczny obraz zmian występujących wewnątrz kompozytu. Schematy stanowisk pomiarowych przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego do badań nieniszczących z zastosowaniem termografii w podczerwieni metodą: a) Lock-in, b) transmisyjną

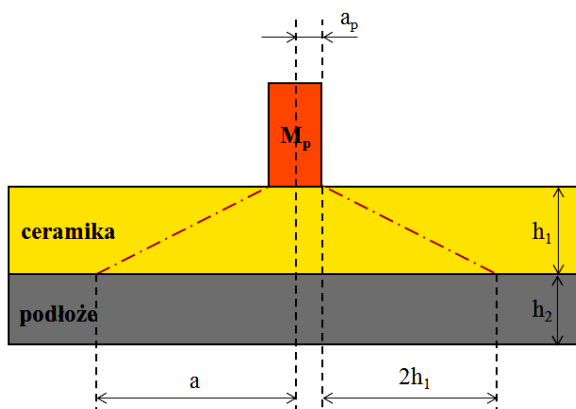
Źródło: Opracowanie własne

Metoda Lock-in jest metodą pozwalającą analizować strukturę obiektu i fakt występowania wewnętrznych uszkodzeń. Do tego wymagana jest, oprócz kamery i dedykowanego oprogramowania, specjalistyczna wiedza i przeszkolenie osoby wykonującej badania. Z tego powodu jest to raczej metoda laboratoryjna.

Uszkodzenie pancerzy kompozytowych po uderzeniu pociskiem, zwłaszcza w układach warstwowych ceramika – podłoże lub laminaty z tkanin szklanych i aramidowych, przyjmuje najczęściej kształt stożka (rys. 4).

Z tego powodu uzasadnione jest analizowanie tylnej powierzchni pancerza w celu określenia maksymalnego obszaru zniszczeń. Do tego w warunkach polowych wykorzystać można metodę termografii, o konfiguracji jak w metodzie Lock-in, ale bez systemu obróbki cyfrowej kolejnych obrazów, pozwalającą identyfikować uszkodzenia podpowierzchniowe. Kamera i źródło ciepła znajdują się po tej samej stronie badanej powierzchni. Poniżej przedstawiono kilka przykładów badań pancerzy wykonanych z różnych materiałów.

### MODEL FLORENCE



Powierzchnia podłoża na którą przekazywana jest energia uderzenia jest równa polu powierzchni podstawy stożka powstałego w wyniku pęknięcia ceramiki

$$d=2a$$

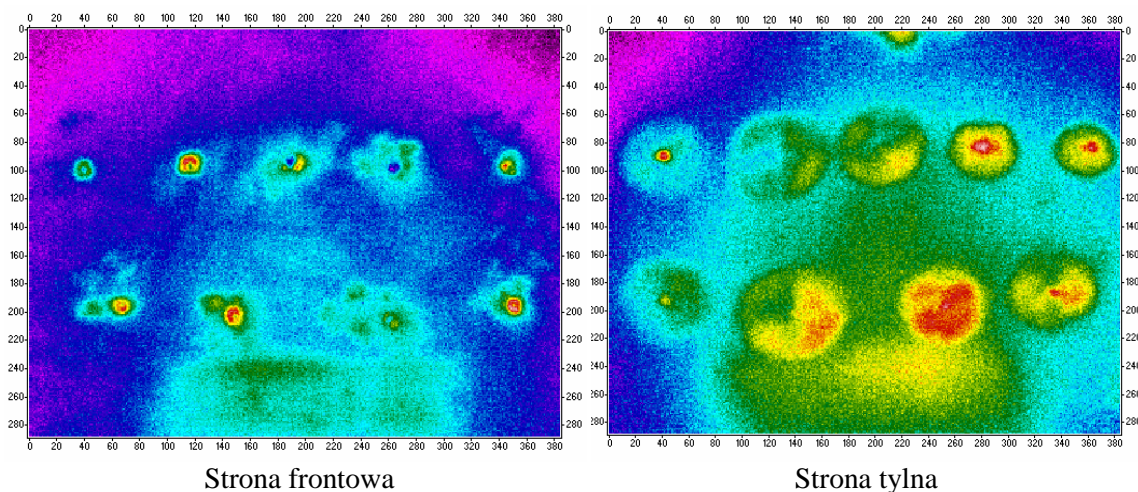
Promień podstawy tego stożka jest równy sumie promienia pocisku i podwójnej grubości ceramiki

$$a=a_p+2h_1$$

Rys. 4. Model uszkodzenia pancerza kompozytowego po uderzeniu pociskiem

*Źródło: Opracowanie własne*

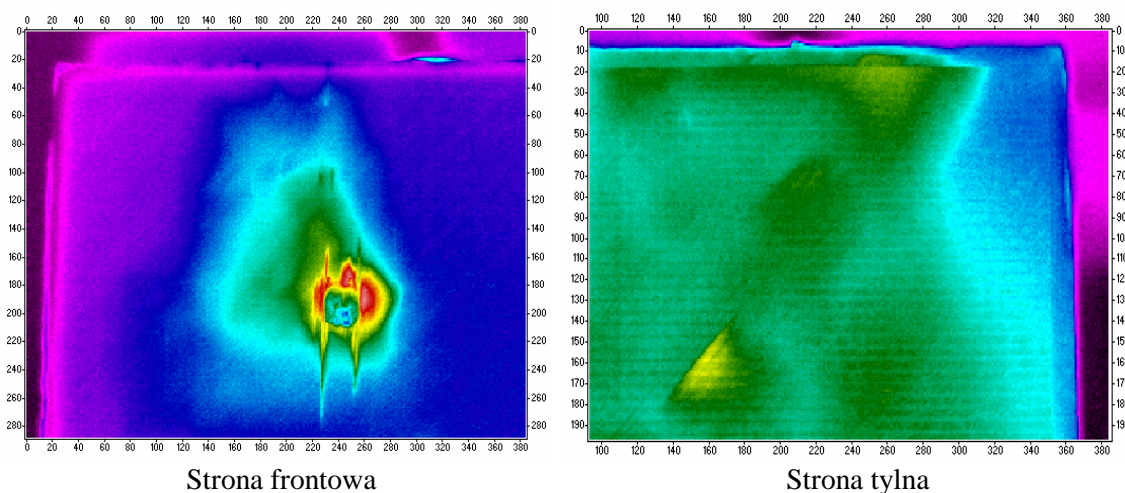
Ograniczeniem tej metody jest konieczność demontażu płyt pancerza kompozytowego z pojazdu oraz, w przypadku grubych osłon i uderzeń o małej energii, spadek wykrywalności uszkodzeń.



Rys. 5. Laminat szklany, wykorzystywany jako spall-liner wewnątrz pojazdów lub dodatkowa osłona dna pojazdów chroniąca przed uderzeniem odłamków. Próbką po badaniach granicy balistycznej V50 odłamkiem FSP 1,1g

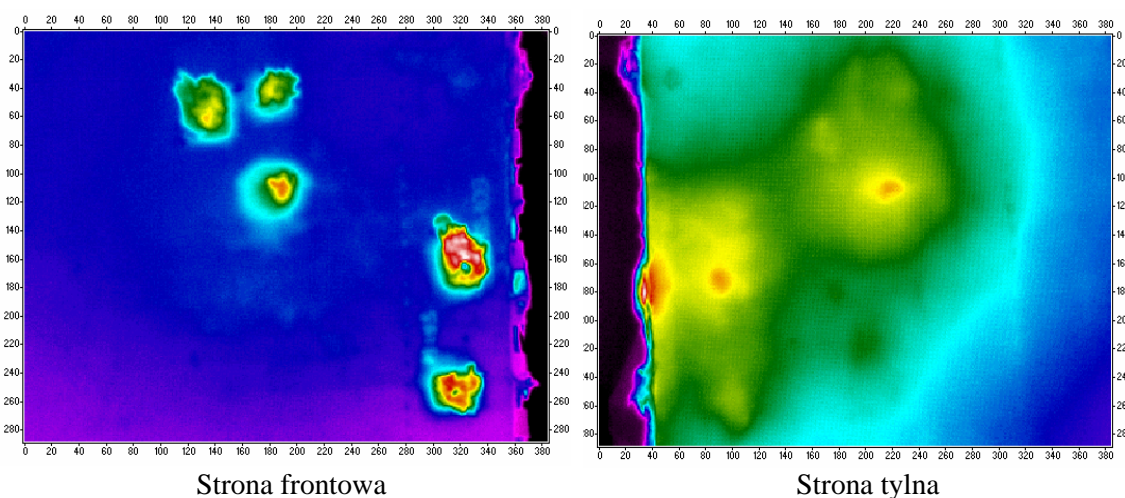
*Źródło: Opracowanie własne*





Rys. 6. Podłoże kompozytowe pod dodatkową, zewnętrzną płytą ceramiczną. Układ z ceramiką ostrzelany pociskami przeciwpancernymi 7,62 x39 BZ

*Źródło: Opracowanie własne*



Rys. 7. Pancierz ceramiczno – aramidowy po ostrzale pociskami 7,62x39 BZ

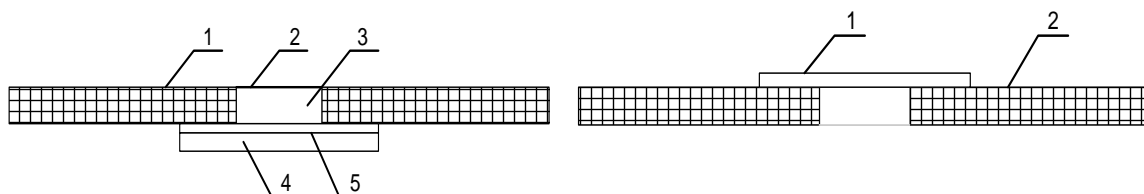
*Źródło: Opracowanie własne*

## 2. NAPRAWA USZKODZEŃ W KOMPOZYTACH

Generalnie naprawa kompozytów sprowadza się do usunięcia zniszczonych obszarów i zastąpienia ich wzmocnieniem głównie w postaci łat i wkładek. Zastąpienie uszkodzeń nowymi elementami musi przywrócić je do stanu pierwotnego nie tylko pod względem odporności na uderzenia, ale także innych czynników negatywnie wpływających na eksploatację kompozytów (np. wilgoć). Metody napraw dzieli się na:

- metody mechaniczne (śruby, spawy, nity);
- metody z użyciem klejów, żywic;
- metody, w których kompozyty termoplastyczne naprawiane są z użyciem obróbki cieplnej.

Metody mechaniczne odnoszą się do napraw z wykorzystaniem łąt i wkładek wykonanych głównie z metali. Uszkodzony fragment kompozytu zostaje usunięty i zastąpiony metalową wkładką, która jest przyśrubowana do zewnętrznej łąty. Wkładka dodatkowo pokryta jest warstwą wypełniacza. Uproszczoną metodą regeneracji jest przynitowanie lub przykręcenie łąty do kompozytu (rys. 8).



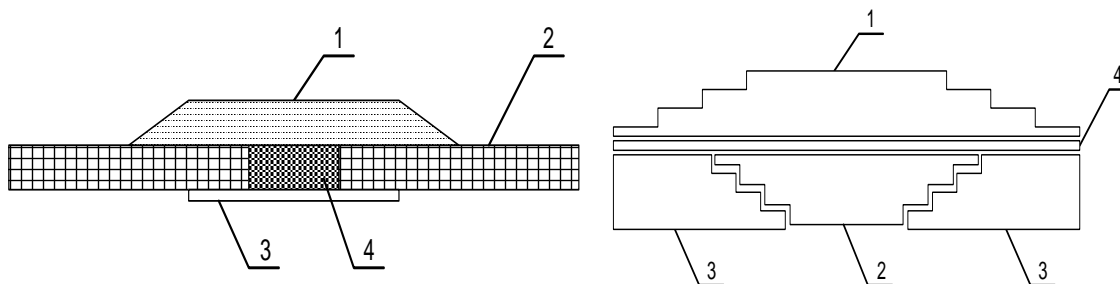
Typowa naprawa z przymocowaną łątą za pomocą śrub:  
1) kompozyt, 2) wypełniacz, 3) wkładka, 4) łąta, 5) uszczelnienie

Uprozczone wiązanie łąty:  
1) łąta metalowa, 2) kompozyt

Rys. 8. Uproszczona metoda regeneracji poprzez przynitowanie lub przykręcenie łąty do kompozytu

Źródło: Opracowanie własne

Metody naprawy kompozytów przy użyciu połączeń klejonych sprowadza się do zastosowania kompozytowego wkładu i łąty zewnętrznej. Dla grubszych kompozytów stosuje się zewnętrzną łątę w postaci stożka ściętego, w celu obniżenia naprężeń i ich koncentracji. Jeśli kompozyt wykonany jest tylko z kilku warstw tkaniny, stosowanie łąty zewnętrznej w kształcie stożka nie jest konieczne. Chcąc podwyższyć dopuszczalny poziom obciążeń połączenia klejowego, stosuje się łączenia naprzemiennie. Zastosowanie takiego rozwiązania redukuje koncentrację naprężeń ściskających i naprężeń ścinających pomiędzy wkładem, a powierzchnią zewnętrzną poprzez stopniowe zwiększanie grubości łąty (rys. 9).



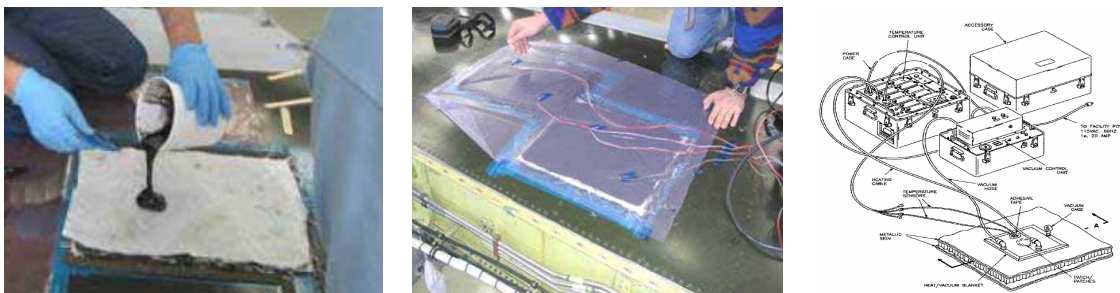
Naprawa klejowa kompozytu z wykorzystaniem łąty:  
1) łąta zewnętrzna, 2) kompozyt, 3) płytka uszczelniająca, 4) wkładka kompozytowa

Schodkowy układ napraw klejowych:  
1) łąta zewnętrzna, 2) łąta wewnętrzna, 3) kompozyt, 4) warstwa kleju

Rys. 9. Przykłady połączeń naprzemiennych

Źródło: Opracowanie własne

Wymienione metody napraw można stosować lokalnie na naprawianym elemencie lub obiekcie np. wykonywanie napraw kompozytów metodą worka próżniowego z użyciem przenośnego zestawu naprawczego (rys. 10).



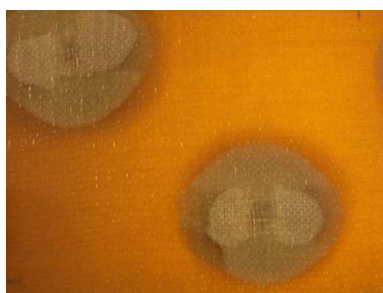
Rys. 10. Naprawa kompozytów metodą worka próżniowego z użyciem przenośnego zestawu naprawczego

*Źródło: Opracowanie własne*

Sprawdzono odporność laminatu poliestrowo - szklanego na przebicie pociskami, po naprawie z użyciem łąty wewnętrznej. Do badań wybrano laminat uszkodzony pociskami 9x19mm (rys. 11). Wycięto zdelaminowany obszar, wykonując schodek szerokości 2cm. Przygotowaną wkładkę wklejono przy użyciu żywicy poliestrowej (rys. 12). Przeprowadzono badania odporności na przebicie pociskami 9x19mm. Oddano dwa strzały w krawędzie wkładki (rys. 13).



Strona frontowa



Strona tylna

Rys. 11. Uszkodzenia laminatu pociskami 9x19mm

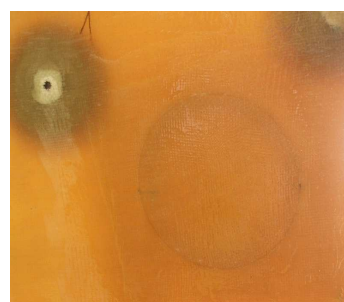
*Źródło: Opracowanie własne*



Laminat przygotowany do wklejenia wkładki



Wkładka



Laminat po naprawie

Rys. 12. Naprawa wkładki przy użyciu żywicy poliestrowej

*Źródło: Opracowanie własne*





Laminat po badaniach balistycznych.  
Strona frontowa

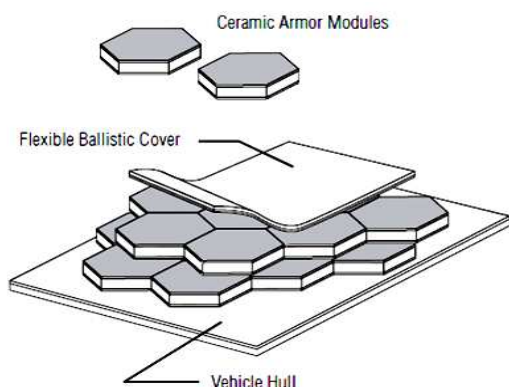


Laminat po badaniach balistycznych.  
Strona tylna

Rys. 13. Badania odporności na przebicie pociskami 9x19mm. Oddano dwa strzały w krawędzie wkładki

*Źródło: Opracowanie własne*

W przypadku pancerzy z warstwą ceramiczną, po naprawie podłoża można czasowo przykleić płytki ceramiczne z wykorzystaniem klejów do klejenia na zimno lub, tak jak w systemie firmy Last Armor, specjalnie przygotowanych płytek z warstwą klejącą (rys. 14).



Rys. 14. Naprawa pancerzy z warstwą ceramiczną

*Źródło: Opracowanie własne*

## WNIOSKI

Przeprowadzone badania nieniszczące z zastosowaniem termografii w podczerwieni wykazały, że za pomocą tej techniki możliwe jest określenie obszaru wewnętrznych uszkodzeń pancerzy kompozytowych. Metoda lock-in jest bardziej skuteczna niż metoda transmisyjna. Ograniczeniem skuteczności metod termografii w podczerwieni do badań osłon balistycznych jest ich grubość.

Zaprezentowaną metodę naprawy pancerzy kompozytowych można stosować w laminatach, które pełnią funkcję osłon i nie stanowią elementów konstrukcyjnych.

Dalsze badania powinny być ukierunkowane na zbadanie wpływu zaproponowanego sposobu naprawy na wytrzymałość mechaniczną płyty i jej zdolność do przenoszenia obciążeń.

## LITERATURA

- [1] Szudrowicz M., *Układy warstwowe zwiększające odporność samochodów na atak od dołu, przy użyciu min przeciwpiechotnych, granatów ręcznych i improwizowanych ładunków wybuchowych*, [w:] „Zeszyty Naukowe WITPiS”, 2/2008.
- [2] Szudrowicz M., Jamroziak K., Rutyna K., *Ostony balistyczne – laminaty na bazie tkanin aramidowych*, [w:] XIV Konferencja Naukowo-Techniczna Uzbrojenie’2005.
- [3] Abrate S., *Impact on composite structures*, Cambridge University Press 1998. s. 228 - 238
- [4] Świdorski W., Szaba D., Szudrowicz M., *Badania nieniszczące osłon balistycznych metodami aktywnej termografii w podczerwieni*, [w:] Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia i Bezpieczeństwa, Międzynarodowa Konferencja UZBROJENIE’ 2008, Biuletyn WAT vol. LVII nr 3 (651).
- [5] Jamroziak K., Szudrowicz M., *Naprawa struktur kompozytowych w zastosowaniach ochrony balistycznej*, [w:] III Sympozjum Naukowo Techniczne, EKSPLOLOG 2008.
- [6] Tomblin J., *Bonded Repair of Aircraft Composite Sandwich Structures*, Report DOT/FAA/AR-03/74
- [7] *Hexcel Composites, Composite Repair*, Report No. UTC 102, April 1999

## DAMAGE IDENTIFICATION AND REPAIR OF COMPOSITE ARMOUR

### Summary

*Composite armour is a preferred solution against military and paramilitary threats at present. Composite armour has to be resistant against impacts of fragments and bullets as well as mines and grenades. Except visible external damage of composite armour, its internal damage is equally essential. An IR thermography non-destructive testing method was used to identify delamination areas in composite armour. The results of these tests are presented in the paper. The authors also discuss the possibilities of composite armour repair methods.*

**Key words:** *composite armour, damage, composite armour repair methods, IR thermography method*

*Artykuł recenzował: prof. dr hab. inż. Dionizy DUDEK*