

PROBLEMY KLEJENIA KOMPONENTÓW Z LEKKICH KOMPOZYTÓW ODPORNICH NA PRZEBICIA

Problems bonding components of lightweight composites resistant to punctures

Jan GODZIMIRSKI, Sławomir TKACZUK

Streszczenie: Zbadano przydatność kilku klejów do łączenia ceramiki typu SiC i Al_2O_3 z tkaniną aramidową Mikroflex. Zaproponowano próbki do badania wytrzymałości połączeń klejowych tych materiałów na ścinanie i oddzieranie. Przeprowadzone badania wykazały gorsze właściwości adhezyjne ceramiki SiC. Jednak w badaniach wytrzymałościowych na oddzieranie stwierdzono kohezyjne zniszczenie spoin klejowych na powierzchni ceramiki SiC. Założono, że przyczyną takiego zniszczenia może być ukosowanie krawędzi płytek, wytworzonych z tego materiału. Potwierdziły to przeprowadzone obliczenia numeryczne. Wynika z tego, że charakter zniszczenia połączeń klejowych (adhezyjny lub kohezyjny) wynika nie tylko z właściwości adhezyjnych powierzchni łączonych materiałów i właściwości kleju, ale również zależy od kształtu i sposobu obciążenia połączenia klejowego, z których wynika rozkład naprężeń w spoinie klejowej.

Słowa kluczowe: ceramika, tkanina aramidowa, połączenia klejowe, wytrzymałość na ścinanie i odrywanie

Abstract: Examining the feasibility of a number of adhesives for bonding ceramic type SiC and Al_2O_3 with aramid fabric Mikroflex. Proposed sample for testing the strength of adhesive bonds these materials shear and peel strength. The study showed poorer adhesion properties of SiC ceramics. However, strength tests peel found cohesive destruction of the adhesive joints on the surface of SiC ceramics. It was assumed that the cause of such destruction can be scarfing tiles made from this material. This was confirmed by numerical calculations carried out. It follows that the failure mode of the bond (adhesive or cohesive) derives not only from the surface of the adhesive properties of the joined materials and adhesive properties, but also depends on the shape and method of loading of the glue joint, which shows the stress distribution in the adhesive joint.

Keywords: ceramics, aramid fabric, adhesive joints, shear and peel

Wprowadzenie

Struktury wielowarstwowe nazywane są często kompozytami strukturalnymi. Kamizelki ochronne są strukturami wielowarstwowymi złożonymi z różnych materiałów, najczęściej z tkanin aramidowych i ceramiki. Preferowaną metodą łączenia ceramiki z pierwszą warstwą tkaniny jest klejenie. Przeprowadzono badania w celu oceny wytrzymałości połączeń klejowych tkaniny aramidowej Mikroflex z ceramiką typu SiC i Al_2O_3 , łączonych różnymi klejami oraz wpływu kształtu ceramiki na wytrzymałość połączeń. Potwierdzono lepsze właściwości adhezyjne ceramiki Al_2O_3 w porównaniu z ceramiką SiC. Stwierdzono, że ukosowanie krawędzi ceramiki pozwala zwiększyć wytrzymałość na oddzieranie jej połączeń klejowych z tkaninami.

Funkcjonariusze służb mundurowych wyposażeni są w kamizelki ochronne. Kamizelki do ochrony indywidualnej powinny zapewnić właściwą ochronę przed zagrożeniami pojawiającymi się w czasie służby, takimi jak: strzały z broni palnej, użycie broni miotającej lub siecznej, zaatakowanie szpikulcem lub igłą (służba więzienna) [1]. Kamizelki ochronne są strukturami wielowarstwowymi, złożonymi z różnych materiałów. Zewnętrzna część, zwykle wysokowytrzymała i twarda (np. warstwa ceramiki) [2], powinna zatrzymać lub przynajmniej zniekształcić penetrator (pocisk, odłamek, ostrze noża lub szpikulca),

co ułatwia jego „wychwycenie” i ogranicza dalszą perforację wewnętrznej części kamizelki, najczęściej złożonej z warstw wyrobów na bazie włókien aramidowych lub polietylenowych [3]. Warstwy ceramiczne lekkich osłon balistycznych są zazwyczaj wykonane z tlenku aluminium (Al_2O_3), węgliku krzemu (SiC) lub węgliku boru (B_4C) [4, 5]. Preferowaną metodą łączenia ceramiki z pierwszą warstwą tkaniny jest klejenie [6].

Przeprowadzone badania wykazały, że nie wszystkie absorbujące energię wyroby na bazie włókien można łączyć metodą klejenia [7]. Nie nadają się do tego wyroby o strukturze mat, ze względu na ich niewielką wytrzymałość w kierunku prostopadłym do ułożenia włókien. Wydaje się, że warstwa, do której ma być przyklejona ceramika, powinna mieć strukturę cienkiego płótna, co umożliwia jej przesylenie klejem o małej lepkości i uzyskanie zadawalającej adhezji mechanicznej. Wyrobem takim jest np. tkanina aramidowa Mikroflex. Możliwości aktywacji powierzchni ceramik w celu zwieszenia ich adhezji specyficznej są ograniczone – twardość ceramik wyklucza możliwość stosowania obróbek mechanicznych. W związku z tym ich przygotowanie do klejenia polega na dokładnym myciu ich powierzchni.

Celem prowadzonych badań było ocenienie wytrzymałości połączeń klejowych tkaniny aramidowej Mikroflex z ceramiką typu SiC i Al_2O_3 , łączonych różnymi klejami oraz wpływu kształtu ceramiki na wytrzymałość połączeń.



Rys. 1. Próbką zakładkowa
Fig. 1. Lap joint specimen



Rys. 2. Próbkę z wklejoną ceramiką i przyklejonym paskiem tkaniny
Fig. 2. Ceramics adhesively bound to socket of specimen and strips of fabric adhesively bound to ceramics

Materiały wykorzystywane w badaniach

Microflex jest tkaniną antybalistyczną o splocie płóciennym i gramaturze ok. 220 g/m². Ceramika występowała w postaci płytek o kształcie graniastosłupa prostego, o podstawie sześciokąta foremnego (średnica okręgu wpisanego 20 mm, wysokość 4 mm – ceramika Al₂O₃ oraz średnica okręgu wpisanego 20,2 mm, wysokość 4,2 mm – ceramika SiC). Krawędzie ceramiki Al₂O₃ były ostre, a ceramiki SiC ukosowane. W badaniach wykorzystano kleje: cjanoakrylowy klej błyskawiczny firmy Dragon, epoksydowy klej Poxipol przezroczysty, epoksydowy kit klejowy Raychem S1125, klej epoksydowy Epidian 57 utwardzany utwardzaczem Z1 oraz rozpuszczalnikowy klej Butapren firmy Dorex.

Metodyka badań

Uwzględniając sposób obciążenia płytek ceramicznych, przyklejonych do kamizelki ochronnej w warunkach noszenia jej przez osobę chronioną, badania realizowano stosując dwa rodzaje próbek.

1. Do płytek ceramicznych przyklejano z dwóch stron paski tkaniny Microflex o szerokości 30 mm i długości 100 mm (rys. 1). Płytki ceramiczne przemywano alkoholem izopropylenowym i przecierano tkaniną bawełnianą, aż do momentu braku śladów zanieczyszczeń na czystej tkaninie. Dokładniejszego przemywania wymagała ceramika tlenkowa typu Al₂O₃ pokryta różowym nalotem. Po utwardzeniu spoin klejowych końce tkanin mocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej i próbkę rozciągano. Badania prowadzono w maszynie

wytrzymałościowej Hung Ta HT-2402 przy prędkości przemieszczania trawersy maszyny 5 mm/min. Każdorazowo określano wytrzymałość pięciu próbek. Rejestrowano maksymalną siłę niszczenia każdej próbki i obliczano średnią wartość sił.

2. W czołowe gniazda stalowych próbek walcowych wklejano ceramikę (rys. 2) za pomocą kleju Epidian 57/Z1. Gwintowany otwór wykonany w próbce umożliwiał mocowanie jej w uchwycie maszyny wytrzymałościowej przez wkręcany w nią pręt z naciętym gwintem. Do ceramiki przyklejano paski tkaniny o wymiarach 30 × 150 mm (2).

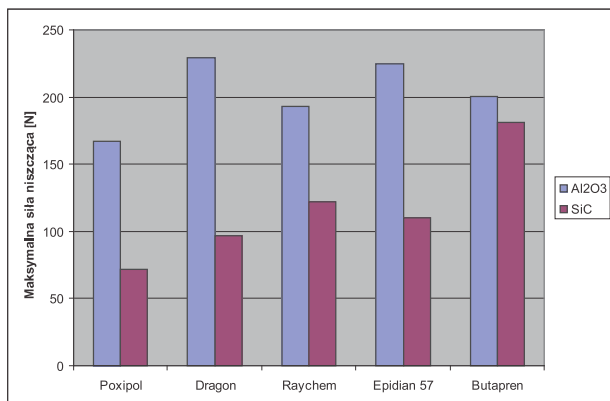


Rys. 3. Próbkę zamocowaną w uchwytach maszyny wytrzymałościowej
Fig. 3. The sample mounted in the grips of the testing machine

Próbki mocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej (rys. 3) i obciążano z prędkością 10 mm/min, co powodowało oddzieranie tkaniny od ceramiki.

Wyniki badań eksperymentalnych i ich ocena

Wyniki badań próbek zakładkowych obciążonych na ścinanie pokazano na wykresie na rys. 4.

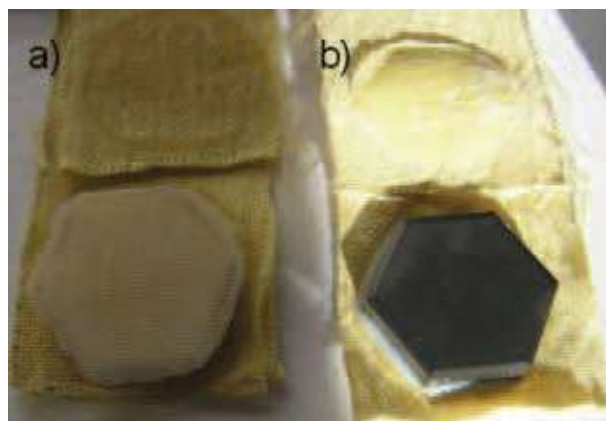


Rys. 4. Porównanie wytrzymałości próbek zakładkowych ceramika-tkanina, łączonych różnymi klejami

Fig. 4. Strength comparison between the ceramic – fabric lap joint specimens bound with different adhesives

We wszystkich badanych przypadkach próbki z ceramiką Al₂O₃ cechowała większa wytrzymałość, co może wynikać z gorszych właściwości adhezyjnych ceramiki SiC w porównaniu z Al₂O₃. Kohezyjne zniszczenie spoin wystąpiło jedynie przy klejeniu ceramiki Al₂O₃ klejami Poxipol, Dragon i Epidian 57. W pozostałych przypadkach zniszczenie miało charakter adhezyjny (rys. 5). Najmniejsze różnice wytrzymałości uzyskano klejąc różną ceramikę klejem Butapren.

W celu porównania właściwości adhezyjnych badanych ceramik przeprowadzono próby odrywania



Rys. 5. Charakter zniszczenia połączenia: a) kohezyjny (ceramika Al₂O₃ – tkanina), b) adhezyjny (ceramika SiC – tkanina)

Fig. 5. The nature of the destruction of the adhesive joints: a) cohesive (Al₂O₃ ceramics – fabric) b) adhesive (SiC ceramics – fabric)

cylicydrycznych próbek metalowych od płytek ceramicznych, przyklejonych klejem Dragon i Poxipol (rys. 6).

Dla obu badanych klejów przy klejeniu ceramiki Al₂O₃ na granicy ceramika-klej występowało zniszczenie kohezyjne, a w przypadku ceramiki SiC adhezyjne (rys. 7), co może świadczyć o jej gorszych właściwościach adhezyjnych. Klejąc różną ceramikę z metalem klejem Dragon, stwierdzono wytrzymałość na odrywanie na poziomie 12 MPa niezależnie od rodzaju ceramiki i charakteru zniszczenia. Przy klejeniu klejem Poxipol kohezyjna wytrzymałość na odrywanie dla ceramiki Al₂O₃ wynosiła ok. 20 MPa i była dwukrotnie wyższa od adhezyjnej wytrzymałości na odrywanie ceramiki SiC.

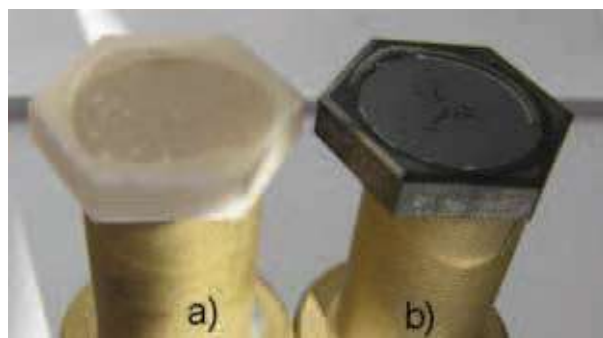
Wyniki badań na oddzieranie (rys. 3) uzyskiwano w postaci zmiany siły w funkcji przemieszczenia (rys. 8 i 9).

Różny charakter krzywych siła-przemieszczenie wynikał z tego, że przy łączeniu elementów próbek klejem Raychem o konsystencji pasty, powstawała wypływka kleju na krawędziach, której zniszczeniu odpowiadał pik siły na początku wykresu. Wypływka taka nie występowała przy klejeniu rzadkopląnym klejem Dragon. W związku z tym początek wykresu związany z niszczeniem wypływki należy pominąć w analizie wytrzymałości na oddzieranie. Wzrost sił wraz ze wzrostem przemieszczenia wynika z wydłużania się krawędzi oddzieranej spoiny



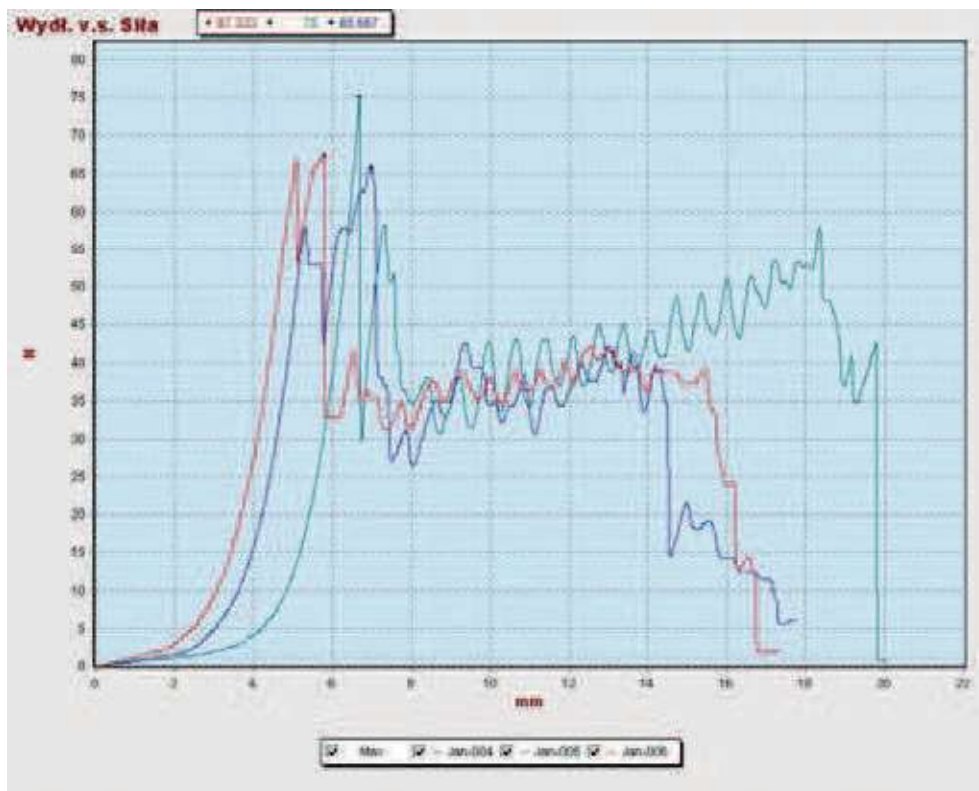
Rys. 6. Próbką stosowaną w badaniach właściwości adhezyjnych ceramik w próbie odrywania

Fig. 6. Specimen used in the adhesive properties testing of the ceramics subjected to stretching

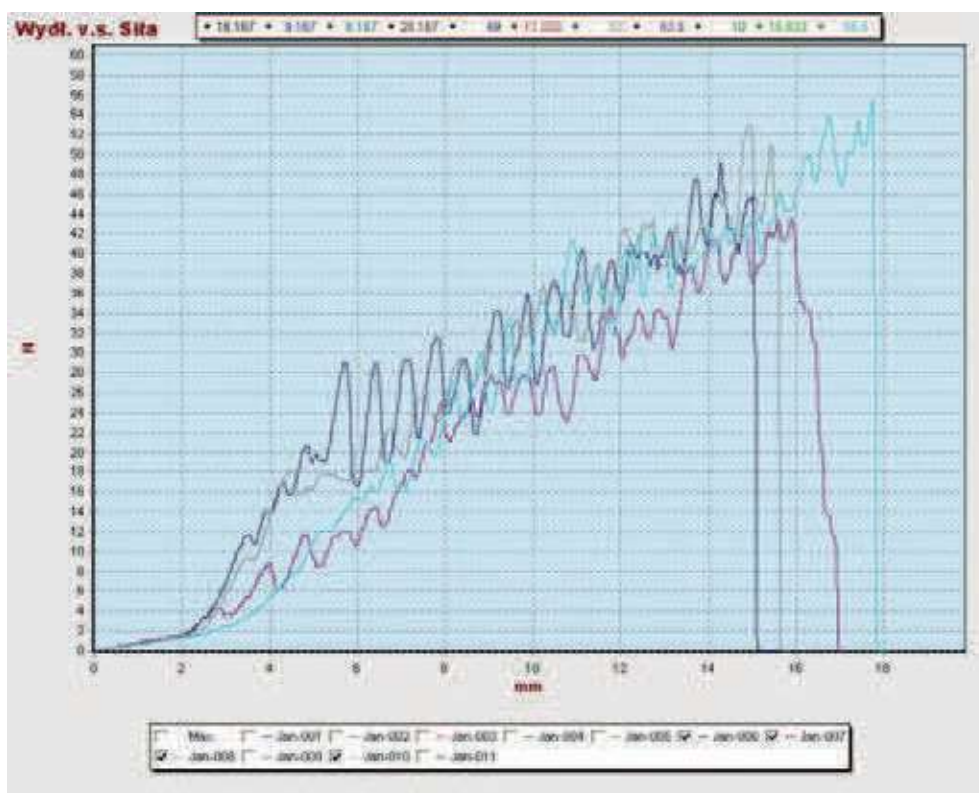


Rys. 7. Charakter zniszczenia połączenia: a) kohezyjny (ceramika Al₂O₃ – metal), b) adhezyjny ceramika SiC – metal

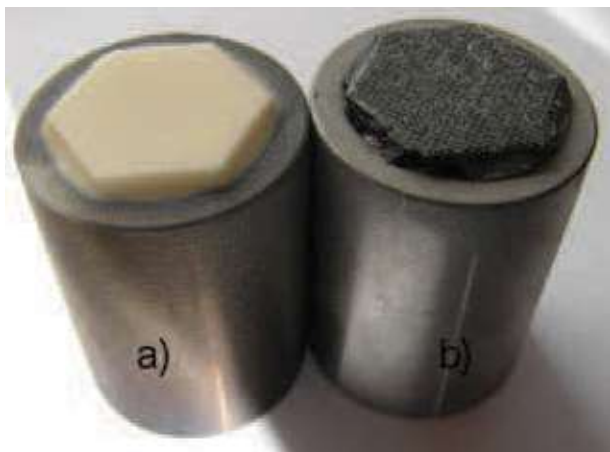
Fig. 7. The nature of the destruction of adhesive layers: a) cohesive (Al₂O₃ ceramic – metal) b) adhesive SiC ceramics – metal



Rys. 8. Wyniki próby oddzierania tkaniny od ceramiki SiC (klej Raychem)
 Fig. 8. Results of the SiC ceramic – fabric peel strength test (with the Raychem adhesive)



Rys. 9. Wyniki próby oddzierania tkaniny od ceramiki SiC (klej Dragon)
 Fig. 9. Results of the SiC ceramic – fabric peel strength test (with the Dragon adhesive)



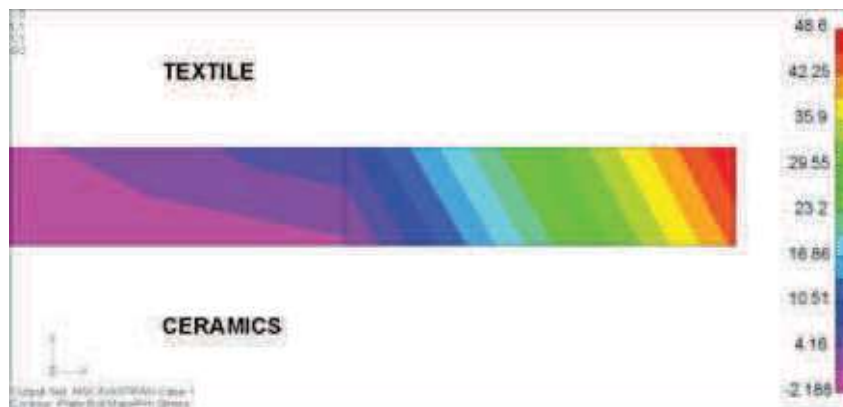
Rys. 10. Występujący w próbie oddzierania charakter zniszczenia połączenia: a) adhezyjny (ceramika Al_2O_3 – tkanina), b) kohezyjny (ceramika SiC – tkanina)
 Fig. 10. Adhesive destruction of the Al_2O_3 ceramics – fabric binding and cohesive destruction of the SiC ceramic – fabric binding during the peel strength test

klejowej, co związane jest z kształtem płytek ceramicznych. Nie stwierdzono korelacji między wytrzymałością badanych próbek na odzieranie i ścinanie. Co dziwniejsze – odwrotnie niż w próbie ścinania kohezyjne zniszczenie wystąpiło przy klejeniu klejem Dragon ceramiki SiC , a adhezyjne w czterech z pięciu próbek z ceramiką Al_2O_3 łączoną z tkaniną tym klejem (rys. 10).

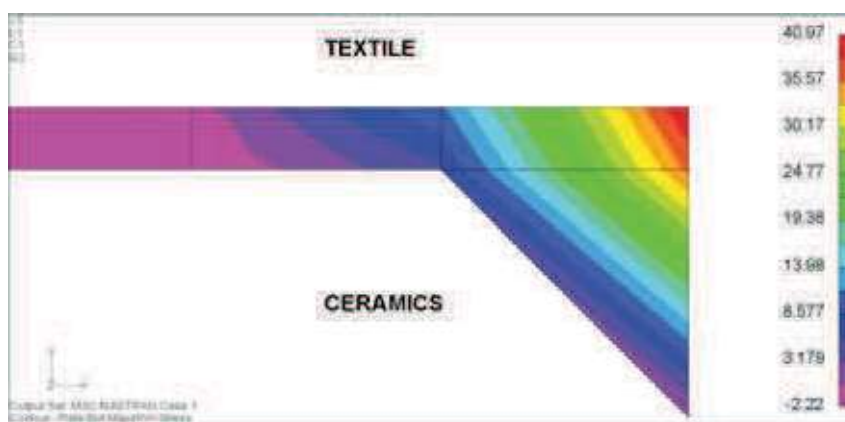
Założono, że sposób zniszczenia (adhezyjny lub kohezyjny) może być związany z kształtem krawędzi płytek ceramicznych. W celu sprawdzenia słuszności tego założenia przeprowadzono obliczenia numeryczne.

Analiza numeryczna

Analizę prowadzono z wykorzystaniem programu Nastran for Windows. Zbudowano płaskie modele badanych eksperymentalnie próbek. Spoiny klejowe modelowano jedną warstwą elementów prostokątnych. W wypadku analizowania płytek ceramicznych SiC z ukosowanymi krawędziami założono, że krawędzie te



Rys. 11. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych w krawędziowej części spoiny połączenia zakładkowego – ceramika z ostrymi krawędziami (maksymalne naprężenia w narożniku przylegającym do tkaniny)
 Fig. 11. Distribution of the maximal principal stress on the edges of the lap joint adhesive layer (ceramics with sharp edges, the maximal stress in the corner adjoining the fabric)



Rys. 12. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych w krawędziowej części spoiny połączenia zakładkowego – ceramika z ukosowanymi krawędziami (maksymalne naprężenia w narożniku przylegającym do tkaniny)
 Fig. 12. Distribution of the maximal principal stress on the edges of the lap joint adhesive layer (ceramics with chamfered edges, the maximal stress in the corner adjoining the fabric)



Rys. 13. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych w krawędziowej części spoiny połączenia obciążonego na oddzieranie – ceramika z ostrymi krawędziami (maksymalne naprężenia w narożniku przylegającym do ceramiki)

Fig. 13. Distribution of the maximal principal stress on the edges of the adhesive layer of joint subjected to peeling (ceramics with sharp edges, the maximal stress in the corner adjoining the ceramics)



Rys. 14. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych w krawędziowej części spoiny połączenia obciążonego na oddzieranie – ceramika z ukosowanymi krawędziami (maksymalne naprężenia w narożniku przylegającym do tkaniny)

Fig. 14. Distribution of the maximal principal stress on the edges of the adhesive of joint subjected to peeling (ceramics with chamfered edges, the maximal stress in the corner adjoining the fabric)

zostaną wypełnione klejem, co modelowano jednym dodatkowym elementem trójkątnym. Obliczenia prowadzono w zakresie liniowym, przyjmując dla kleju wartość modułu sprężystości wzdłużnej $E = 1000 \text{ MPa}$ i współczynnika Poissona $\nu = 0,35$. Oceniano w którym punkcie spoiny klejowej występują maksymalne wartości naprężeń, które inicjują zniszczenie spoin, w związku z czym wartości obciążeń próbek w obliczeniach numerycznych nie miały istotnego znaczenia. Na rys. 11–14 przedstawiono obliczone rozkłady naprężeń w krawędziowych końcach spoin.

Obliczenia numeryczne wykazały, że ukosowanie krawędzi ceramiki ma niewielki wpływ na rozkład i wartość naprężeń w obciążonych na ścinanie połączeniach zakładkowych ceramiki z tkaninami, a istotny w wypadku połączeń obciążonych na odrywanie. W przypadku odrywania występowanie ostrych krawędzi płytek ceramicznych powoduje, że zniszczenie spoiny rozpoczyna się przy powierzchni ceramiki, gdzie występują największe

wartości naprężeń. Ukosowanie krawędzi powoduje zmianę położenia miejsca występowania maksymalnych naprężeń i może spowodować, że zniszczenie spoiny rozpocznie się przy tkaninie. Jest to istotne ze względu na to, że modyfikowanie właściwości adhezyjnych powierzchni wyrobów ceramicznych jest ograniczone.

Wnioski

W celu zwiększenia wytrzymałości na oddzieranie połączeń klejowych płytek ceramicznych z tkaninami kamizelek ochronnych, krawędzie płytek przylegające do tkanin powinny być ukosowane.

Charakter zniszczenia połączeń klejowych (adhezyjny lub kohezyjny) wynika nie tylko z właściwości adhezyjnych powierzchni łączonych materiałów i właściwości kleju, ale również zależy od kształtu i sposobu obciążenia połączenia klejowego, z których wynika rozkład naprężeń w spoinie klejowej. Zniszczenie spoin klejowych

spowodowane oddzieraniem, może mieć charakter kohezyjny jeśli maksymalne naprężenia zostaną odsunięte od powierzchni klejonego elementu o gorszych właściwościach adhezyjnych w głąb spoiny – w kierunku powierzchni elementu o lepszych właściwościach adhezyjnych.

LITERATURA

- [1] Cegła M., W. Habaj, P. Podgórzak. 2014. „Development of Lightweight Bulletproof Vest Inserts with Increased Protection Capability”. *Problemy Mechatroniki* (5): 23–33.
- [2] Godzimirski J., M. Rośkowicz, R. Gieleta. 2016. „Badania właściwości połączeń klejowych ceramiki z tkaninami antybalistycznymi”. *Problemy Mechatroniki* (23): 97–112.
- [3] Gonçalves D.P., F.C.L. de Melo, A.N. Klein, H.A. Al-Qureshi. 2004. “Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal, composite armour”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (44): 307–316.
- [4] Grabowska G., J. Błaszczuk, I. Kucinska. 2009. “Resistance to Bullets, Knives, Stabs and Needles

According to Current Standards, Procedures and Users' Expectations”. *Techniczne Wyroby Włókiennicze* (2-3): 90–95.

- [5] Hazell P.J. 2006. “Ceramic Armour: Design and Defeat Mechanisms”. *Argos Press*.
- [6] Juskowiak E., R. Rybczyński, J. Kurowski, K. Jamroziak. 2012. „Koncepcja osobistej osłony balistycznej z wykorzystaniem tkanin aramidowych i węglików spiekanych”. *Przetwórstwo Tworzyw* (3): 217–221.
- [7] Senderski J., B. Płonka, A. Wiśniewski, Z. Witkowski. 2011. „Wielowarstwowe metalowo-ceramiczne pasywne pancerze dla helikopterów i pojazdów specjalnych”. *Problemy Techniki Uzbrojenia* (40): 57–64.

Prof. dr hab. inż. Jan Godzimirski – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl

Dr inż. Sławomir Tkaczuk – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: slawomir.tkaczuk@wat.edu.pl