



Badania właściwości połączeń klejowych ceramiki z tkaninami antybalistycznymi

Jan GODZIMIRSKI^{1*}, Roman GIELETA², Marek ROŚKOWICZ¹

¹Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna,

²Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna,
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49

* autor korespondencyjny, e-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 13.01.2015. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 12.03.2015

DOI 10.5604/20815891.1195204

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań połączeń adhezyjnych stosowanych w procesie wytwarzania kamizelek kuloodpornych. Połączenia przygotowano na bazie tkanin polietylenowych i aramidowych oraz płytek ceramicznych typu SiC i Al₂O₃. Do łączenia materiałów wykorzystano kleje przeznaczone do łączenia tworzyw polimerowych: BONDICX 01 CX-80, POXIPOL 10 min, LOCTITE 3038, Scotch-Weld 8010, Professional Silikon Czarny i Terostat M9399. Stwierdzono, że tkaniny polietylenowe HB50 ROLL 401184C i HB26 ROLL 401400B, ze względu na ich niską wytrzymałość międzywarstwową oraz brak podatności do przesycania, nie nadają się do adhezyjnego łączenia ich z płytkami ceramicznymi. Na podstawie badań zaproponowano również rodzaj próbek, które w dobry sposób odwzorowują w kamizelkach obciążenie płytek ceramicznych przyklejonych do tkanin. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem takich próbek wykazały, że klej Bondicx 01 najbardziej nadaje się do takich zastosowań.

Słowa kluczowe: mechanika, wytrzymałość połączeń klejowych, kamizelki kuloodporne, tkaniny aramidowe i polimerowe, materiały ceramiczne

1. WSTĘP

Funkcjonariusze różnych formacji służb mundurowych narażeni są na wiele zagrożeń pojawiających się w czasie codziennej służby, takich jak: strzały z broni palnej, użycie broni miotającej lub siecznej, jak również ułkucie szpikulcem lub igłą (służba więzienna), które mogą skutkować poważnym zranieniem lub utratą życia. Współczesne kamizelki do ochrony indywidualnej powinny zapewnić właściwą ochronę przed wymienionymi zagrożeniami, to znaczy być kulo-, odłamko-, nożo-, szpikulco- i igłoodporne [1].

W chwili obecnej do osiągnięcia wyżej wymienionych efektów stosuje się struktury złożone z różnych materiałów. Wkłady balistyczne kamizelek mogą być wykonywane z płytek metalowych lub ceramicznych, wyrobów włókienniczych na bazie włókien aramidowych (np. wyroby firm DuPont i Teijin), cienkowarstwowych tworzyw z włókien polietylenowych (np. wyroby firmy DSM Dyneema) oraz niejednokrotnie z elementów dystansowych, które ograniczają efekt ugięcia dynamicznego. Zewnętrzna część, zwykle wysokowytrzymała i odpowiednio twarda (np. warstwa ceramiki) [2], powinna zatrzymać lub przynajmniej zniekształcić penetrator (pocisk, odłamek, ostrze noża lub szpikulca), co ułatwia jego „wychwycenie” i zapewnia ochronę przed dalszą perforacją wewnętrznej części kamizelki, najczęściej złożonej z warstw wyrobów na bazie włókien aramidowych lub polietylenowych [3].

Warstwy ceramiczne lekkich osłon balistycznych są zazwyczaj wykonywane z tlenku aluminium (Al_2O_3), węgliku krzemu (SiC) oraz węgliku boru (B_4C) [4, 5]. Istnieje także wiele przykładów badań nad zastosowaniem na lekkie osłony balistyczne azotku krzemu (Si_3N_4), borku tytanu (TiB_2), azotku aluminium (AlN), sialonów (SiAlON), szkieł [4, 6], a także kompozytów ceramicznych wzmocnianych fazami metalowymi lub międzymetalicznymi [7]. Warstwy ceramiczne najczęściej łączone są z kolejnymi warstwami absorbującymi energię metodą klejenia [8].

Celem prowadzonych badań było sprawdzenie możliwości łączenia metodą klejenia tkanin polietylenowych i aramidowych stosowanych do wytwarzania kamizelek kuloodpornych z ceramiką typu SiC i Al_2O_3 .

2. MATERIAŁY WYKORZYSTYWANE W BADANIACH

W badaniach wykorzystano dwa rodzaje tkanin polietylenowych o oznaczeniach HB50 ROLL 401184C i HB26 ROLL 401400B oraz cztery rodzaje tkanin aramidowych o oznaczeniach: Microflex, CT 709, T 750 i XP S102. Ceramika występowała w postaci płytek o kształcie graniastosłupa prostego o podstawie sześciokąta foremnego (średnica okręgu wpisanego 20 mm, wysokość 4 mm – ceramika Al_2O_3 oraz średnica okręgu wpisanego 20,2 mm, wysokość 4,2 mm – ceramika SiC).

Uwzględniając to, że polietylen jako tworzywo termoplastyczne charakteryzuje ograniczona adhezja do klejów uniwersalnych, badaniom poddano kleje przeznaczone do łączenia tworzyw polimerowych: BONDICX 01 CX-80, POXIPOL 10 min, LOCTITE 3038, Scotch-Weld 8010, Professional Silikon Czarny i Terostat M9399.

3. METODYKA BADAŃ

W związku z brakiem norm dotyczących określania wytrzymałości połączeń klejowych materiałów będących obiektem badań, zaproponowano cztery rodzaje próbek i sprawdzono ich przydatność.

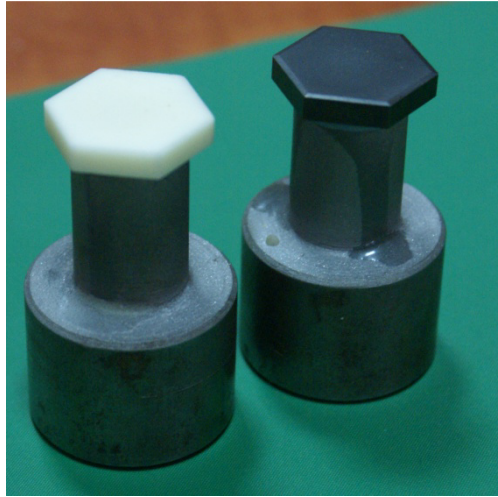
1. Do płytki ceramicznej przyklejano z dwóch stron paski wybranych tkanin o szerokości 20 mm i długości 70 mm. Końce tkanin mocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej i próbkę rozciągano. W badaniach stosowano rozstaw uchwytów 70 mm. Spoiny klejowe takich próbek były obciążone głównie na oddzieranie (por. rys. 5).
2. Walcowe próbki metalowe klejono czołowo poprzez warstwę badanej tkaniny i obciążono na odrywanie (rys. 1).



Rys. 1. Metalowe (mosiężne) elementy próbki przeznaczonej do obciążania na odrywanie

Fig. 1. Metal (brass) components of the specimen to prepare of butt joints

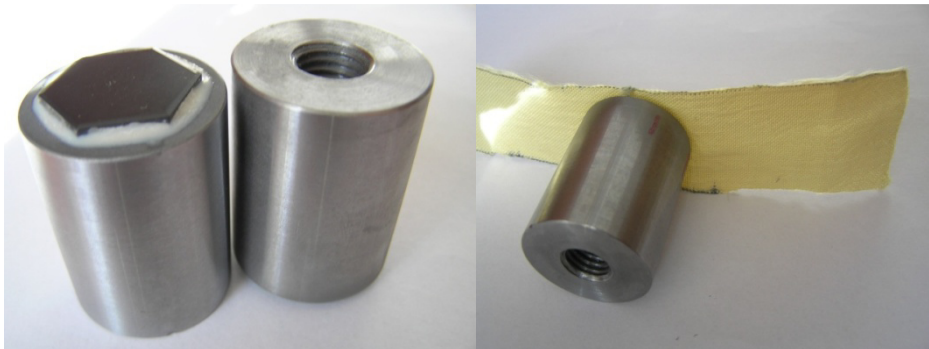
3. Do stalowych elementów walcowych przyklejono klejem epoksydowym – Epidianem 57/Z1 – płytki ceramiczne (rys. 2). Następnie elementy klejono czołowo poprzez warstwę tkaniny, tworząc w ten sposób próbki do badań, które obciążano na odrywanie.



Rys. 2. Elementy stalowe z przyklejonymi płytkami ceramicznymi

Fig. 2. Steel elements with bonded ceramic tiles

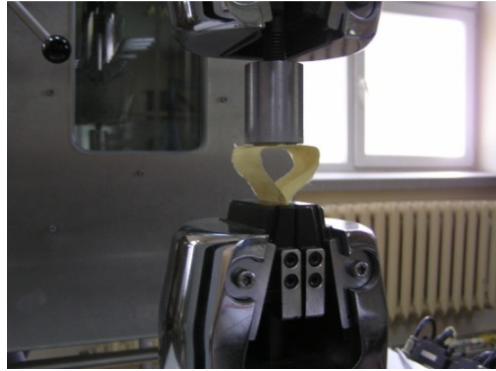
4. W czołowe gniazda stalowych próbek walcowych wklejano ceramikę (rys. 3) za pomocą kleju Epidian 57/Z1. Gwintowany otwór wykonany w próbce umożliwił mocowanie jej w uchwycie maszyny wytrzymałościowej poprzez wkręcany w nią pręt z naciętym gwintem. Do ceramiki przyklejano paski tkaniny o wymiarach 30×1500 mm (3).



Rys. 3. Próbkki z wklejoną ceramiką i przyklejonym paskiem tkaniny

Fig. 3. Specimens with bonded ceramic tile and fabric strip

Próbki mocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej (rys. 4) i obciążano z prędkością 10 mm/min. Taki sposób obciążenia powodował oddzieranie tkaniny od ceramiki.



Rys. 4. Próbkę zamocowaną w uchwytach maszyny wytrzymałościowej

Fig. 4. The specimen fixed in the grips of the testing machine

Płytki ceramiczne w procesie klejenia przemywano alkoholem izopropylenowym i przecierano tkaniną bawełnianą, aż do momentu braku śladów zanieczyszczeń na czystej tkaninie. Dokładniejszego przemywania wymagała ceramika tlenkowa typu Al_2O_3 pokryta różowym nalotem. Ze względu na twardość klejonej ceramiki nie było możliwości schropowacania klejonych powierzchni. Powierzchnie tkanin przed klejeniem również przecierano tkaniną bawełnianą przesączoną alkoholem. Wytrzymałość próbek pierwszego rodzaju (1) badano w maszynie wytrzymałościowej Louis Shopper, o dwóch zakresach pomiarowych 20 lub 100 kG, przeznaczonej do badania tkanin. Wytrzymałość pozostałych próbek badano w maszynie wytrzymałościowej Hung Ta HT-2402. W przypadku dostatecznej powtarzalności wyników eksperymentu opracowywano je statystycznie, obliczając przedział ufności dla poziomu istotności $\alpha = 0,95$.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Wyniki badania próbek nr 1

Wyniki badania próbek nr 1 zamieszczono w tabelach 1 i 2. Przeprowadzone badania wykazały, że zniszczenie połączeń polegało we wszystkich przypadkach na oderwaniu cienkiej warstwy tkaniny (rozwarstwieniu i rozerwaniu cienkiej warstwy przylegającej do ceramiki) – rysunek 5. Wynika z tego, że tkaniny te nie są przeznaczone do łączenia adhezyjnego, gdyż ich wytrzymałość na rozciąganie w kierunku prostopadłym do ułożenia włókien jest niewielka. Ponadto tkaniny te nie dają się przesycić nawet tak rzadkopląnnymi klejami, jak Bondicx 01 CX80.

Większa wytrzymałość próbek przygotowanych na bazie tkaniny HB26 ROLL 401400B wynikała wyłącznie z większej wytrzymałości międzywarstwowej samej tkaniny, a nie z jej lepszych właściwości adhezyjnych.

Tabela 1. Wyniki badań klejenia tkanin polietylenowych z ceramiką klejem Bondicx 01 CX80

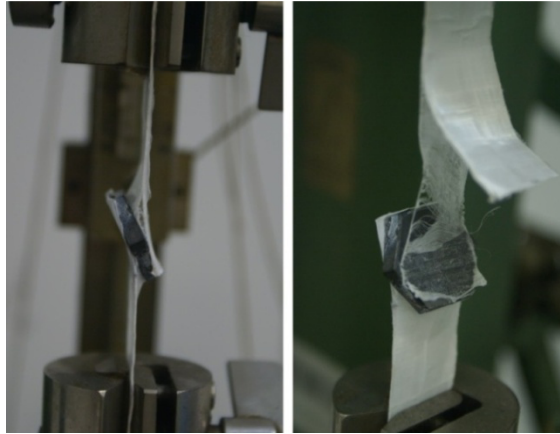
Table 1. The bonding results of polyethylene fabrics and ceramic with using Bondicx 01 CX80 adhesive

Klej Bondicx 01 CX80		
Tkanina HB50 ROLL 401184C	Tkanina HB26 ROLL 401400B	
SiC	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Siła [kG]		
2,15	2,75	6,80
1,80	3,5	6,42
1,95	2,55	5,81
2,05	3,10	6,64
1,85	2,90	5,63
Średnia siła niszcząca [kG]		
1,96 ± 0,18	2,96 ± 0,45	6,26 ± 0,60
Średnia siła niszcząca [N]		
19,2 ± 1,8	29 ± 4,4	61,4 ± 5,9

Tabela 2. Wyniki badań klejenia tkanin polietylenowych z ceramiką klejem Poxipol

Table 2. The bonding results of polyethylene fabrics and ceramic with using Poxipol adhesive

Klej Poxipol	
Tkanina HB50 ROLL 401184C	Tkanina HB26 ROLL 401400B
Al ₂ O ₃	
Siła [kG]	
2,75	5,2
1,85	4,8
2,40	4,5
2,5	5,0
2,1	4,6
Średnia siła niszcząca [kG]	
2,3 ± 0,44	4,8 ± 0,36
Średnia siła niszcząca [N]	
22,6 ± 4,3	47,1 ± 3,5



Rys. 5. Sposób niszczenia próbek nr 1

Fig. 5. A method of specimen's failure (number 1)

4.2. Wyniki badań próbek nr 2

Metalowe powierzchnie próbek przygotowywano do klejenia przez piaskowanie elektrokorundem i przemywanie benzyną ekstrakcyjną. Między czołowymi powierzchniami próbek o średnicy 16 mm umieszczano tkaniny polietylenowe w postaci wycinanych kwadratów o boku 20 mm. Wytrzymałości tak sklejonych próbek klejem Bondicx 01 CX80 nie dało się określić, gdyż uległy zniszczeniu poprzez warstwę tkaniny przy próbach zamocowania ich w maszynie wytrzymałościowej przy siłach rzędu 3,5 N – rysunek 6.



Rys. 6. Przykład rozwarstwienia tkaniny podczas próby montażu próbki w uchwytach maszyny wytrzymałościowej

Fig. 6. Example delamination of fabric while trying to fix the specimen in the grips of the testing machine

W związku z tym zrezygnowano z klejenia tkanin polietylenowych i w badanych połączeniach czołowych stosowano przekładki z folii polietylenowej o grubości ~0,2 mm. Folię tę lekko szorstkowano papierem ściernym nr 320 i przemyto alkoholem. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wytrzymałość na odrywanie różnych tworzyw adhezyjnych od polietylenu

Table 3. The pull-off strength of different adhesives from polyethylene

Tworzywo adhezyjne						
Bondicx 01	Poxipol	Loctite30 38	Scotch-Weld 8010	Silikon czarny	Terostat M9399	Bondicx 01 (płótno bawełniane)
Średnia siła niszcząca [N]						
657	945 ± 49	830 ± 153	1190 ± 184	124 ± 21	208 ± 17	1795 ± 91
Napężenia [MPa]						
3,285	4,725 ± 0,245	4,15 ± 0,765	5,95 ± 0,92	0,62 ± 0,105	1,04 ± 0,085	8,975 ± 0,455

Na podstawie badań stwierdzono, że polietylen jako tworzywo termoplastyczne cechują niskie właściwości adhezyjne (wykorzystanie np. w badaniach zamiast polietylenu tkaniny bawełnianej spowodowało, że wytrzymałość próbek tworzonych na bazie kleju Bondicx 01 wzrosła ponad 2,5-krotnie). W związku z tym połączenia klejowe polietylenu wykazują stosunkowo niską wytrzymałość, a zniszczenie takich połączeń ma charakter typowo adhezyjny. Taki rodzaj zniszczenia wystąpił we wszystkich przypadkach klejenia próbek czołowych z przekładkami polietylenowymi. Z badanych klejów najlepszą przydatność do klejenia polietylenu wykazał klej Scotch-Weld 8010.

Próby klejenia tkanin aramidowych: XP S102; T750; Microflex oraz CT709 poprzedzono wstępnym eksperymentem, który polegał na nałożeniu na małe wycinki tkanin masy klejowej Epidian 57/Z1 w celu sprawdzenia, czy tkaniny ulegają przesyleniu i czy syciwo wykazuje dobrą adhezję do tkanin.

Z badanych tkanin, tylko tkanina Microflex uległa przesyleniu na wskroś. Tkaninę T 750 charakteryzowały najgorsze właściwości adhezyjne – utwardzony klej praktycznie nie połączył się z tkaniną. W związku z tym do wstępnych badań wytrzymałościowych wytypowano tkaninę aramidową typu Microflex. Wyniki tego etapu badań zamieszczono w tabeli 4. Przeprowadzone badania wykazały, że kleje Loctite 3038 oraz Scotch Weld 8010 przeznaczone do klejenia polietylenu są klejami specjalistycznymi i nie nadają się do klejenia tkanin aramidowych. Klej Loctite 3038 w kontakcie z tkaniną aramidową i mosiądzem nie utwardził się w ciągu doby, natomiast umieszczony w strzykawce polietylenowej (będący w kontakcie tylko z polietylenem) w tym samym czasie uległ utwardzeniu.

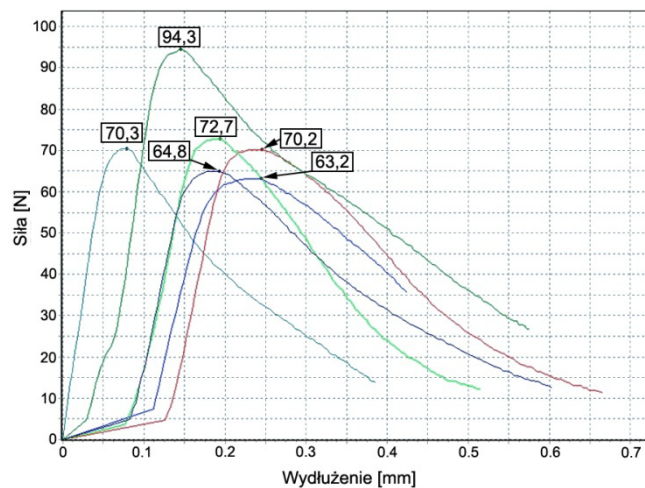
Tabela 4. Wytrzymałość na odrywanie różnych tworzyw adhezyjnych od tkaniny Microflex

Table 4. The pull-off strength of different adhesives from Microflex fabrics

Tworzywa adhezyjne						
Bondix 01	Poxipol	Loctite 3038	Scotch-Weld 8010	Silikon czarny	Terostat M9399	Epidian 57/Z1
Średnia siła niszcząca [N]						
1684±188	2987±187	0*	232	72,5±12	295±28	2018±185
Napężenia [MPa]						
8,38±0,94	14,86±0,93	0*	1,15	0,36±0,06	1,48±0,14	10,04±0,92

* brak utwardzenia kleju w czasie 24 h

Badania potwierdziły niską wytrzymałość na odrywanie Silikonu czarnego oraz Terostatu M9399 wynikającą zarówno ze słabej adhezji do polietylenu i aramidów, jak i z ich niskiej wytrzymałości kohezji. Cechą charakterystyczną tych tworzyw adhezyjnych jest ich elastyczność (gumopodobność) po utwardzeniu (rys. 7).



Rys. 7. Wyniki badań wytrzymałości na odrywanie uszczelnacza Silikon czarny od tkaniny Microflex

Fig. 7. The test results of the pull-off strength with using Silicone Black sealant and Microflex fabric

W dalszych badaniach wykorzystano kleje Bondicx 01 CX80 i Poxipol, ponieważ charakteryzowała je dostatecznie wysoka wytrzymałość na odrywanie przy klejeniu tkaniny Microflex. Wyniki badań przedstawiono w tabelach 5 i 6 oraz na rysunkach 8 i 9.

Tabela 5. Wytrzymałość na odrywanie kleju Bondicx 01 CX80 od tkanin aramidowych

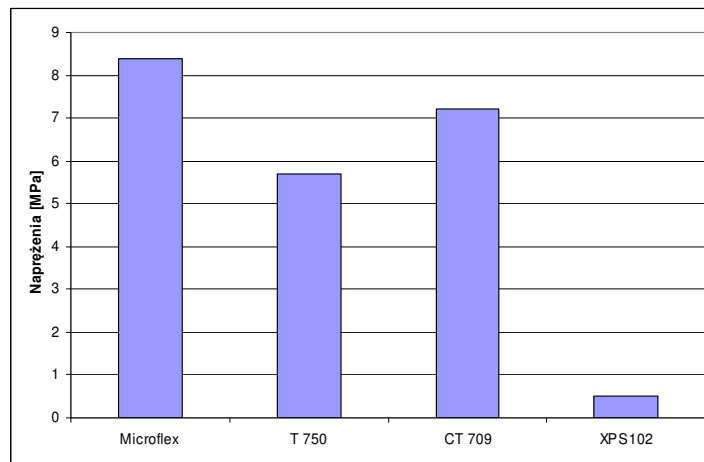
Table 5. The pull-off strength of Bondicx 01 CX80 adhesive from aramid fabrics

Klej Bondicx 01				
Tkanina	Microflex	T 750	CT 709	XP S102
Średnia siła [N]	1684±188	1145±142	1452±90	101,2±6,9
Wytrzymałość na odrywanie [MPa]	8,38±0,94	5,70±0,71	7,22±0,45	0,503±0,034

Tabela 6. Wytrzymałość na odrywanie kleju Poxipol od tkanin aramidowych

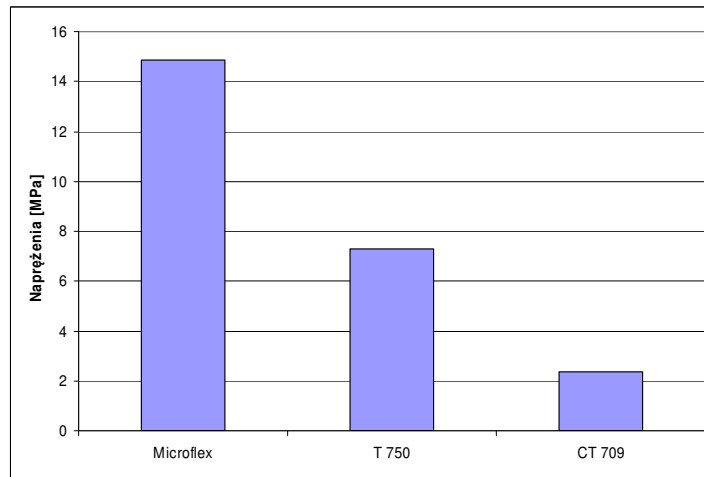
Table 6. The pull-off strength of Poxipol adhesive from aramid fabrics

Klej Poxipol			
Tkanina	Microflex	T 750	CT 709
Średnia siła [N]	2987±187	1466±140	473,3±49,9
Wytrzymałość na odrywanie [MPa]	14,86±0,93	7,29±0,70	2,35±0,25



Rys. 8. Porównanie wytrzymałości na odrywanie połączeń czołowych klejonych klejem Bondicx 01 z przekładkami z różnych tkanin

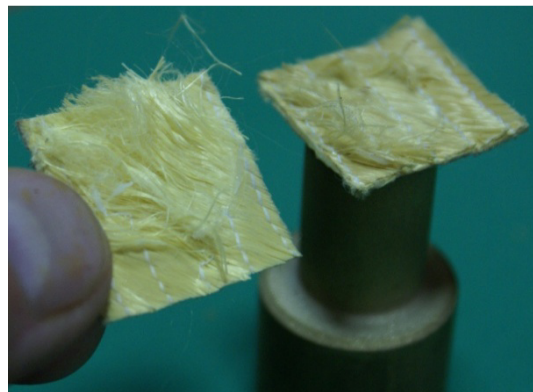
Fig. 8. Comparison of pull-off strength of butt joints bonding Bondicx 01 adhesive (in tests are using different fabrics as plates)



Rys. 9. Porównanie wytrzymałości na odrywanie połączeń klejowych klejem Poxipol z przekładkami z trzech tkanin aramidowych

Fig. 9. Comparison of pull-off strength of butt joints bonding Poxipol adhesive (in tests are using three aramid fabrics as plates)

Klej Bondicx 01 CX80 ze względu na małą lepkość przesycił tkaniny o splotach płóciennych Microflex, T 750 oraz CT 709. Tkanina XP S102 zwilżana była jedynie powierzchniowo, a zniszczenie połączeń czołowych z przekładką z tej tkaniny polegało na rozwarstwianiu tkaniny w płaszczyźnie równoległej do ułożenia włókien przy małych obciążeniach (rys. 10). W związku z tym, próbki z przekładkami wykonanymi z tkaniny XPS102 cechowała niska wytrzymałość.



Rys. 10. Charakter niszczenia tkaniny XP S102 w próbie wytrzymałości na odrywanie

Fig. 10. The nature of the XP S102 fabric failure in the pull-off strength test

Wysoka lepkość kleju Poxipol powodowała, że badane tkaniny nie były właściwie przesypane, a klej tylko łączył się adhezyjnie z powierzchniami metalowych próbek. Zgodnie z oczekiwaniem wynikającym ze wstępnych badań, najgorsze właściwości adhezyjne wykazywała tkanina CT 709. Najlepsze właściwości adhezyjne charakteryzowały tkaninę o najmniejszej gramaturze, tj. Microflex.

4.3. Wyniki badań próbek nr 3

Celem prowadzonych badań było uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy ceramikę Al_2O_3 i SiC cechują porównywalne właściwości adhezyjne. W tym celu próbki nr 3 klejono czołowo poprzez jedną warstwę tkaniny Microflex klejami Bondicx oraz Poxipol, a wyniki badań zaprezentowano w tabeli 7.

Tabela 7. Porównanie wytrzymałości na odrywanie próbek nr 3, przygotowanych na bazie ceramiki SiC i Al_2O_3 (tkanina Microflex)

Table 7. Comparison of pull-off strength of specimens 3, which are prepared on basis of SiC and Al_2O_3 ceramics (Microflex fabrics)

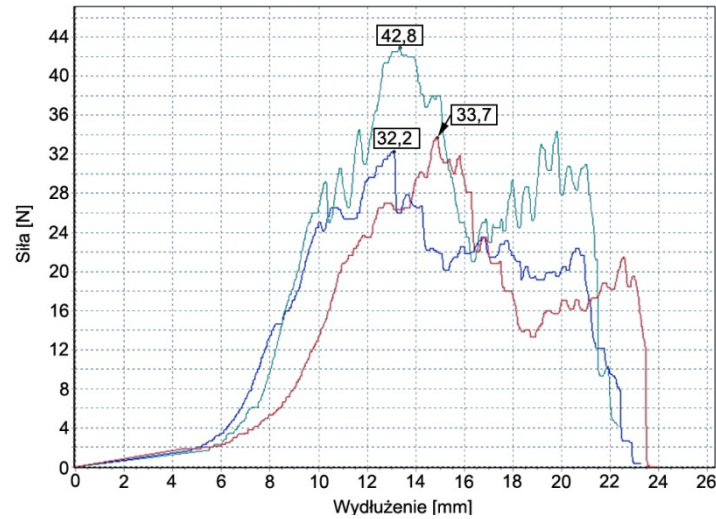
Klej Bondicx 01 CX80		Klej Poxipol	
SiC	Al_2O_3	SiC	Al_2O_3
Siła niszcząca [N]			
2522,5*	1994±540	1860±91	2585±548
Napężenia [MPa] ($A = 346,4 \text{ mm}^2$)			
7,28	5,76±1,56	5,37±0,27	7,46±1,58

* zniszczenie czterech z pięciu badanych próbek wystąpiło na powierzchni pomiędzy stalową próbką a ceramiką SiC klejoną Epidianem 57/Z1. W związku z tym wytrzymałość oszacowano na podstawie dwóch pomiarów o największej wartości siły niszczącej.

Klej Bondicx 01 CX80 wykazał lepszą adhezję do ceramiki SiC, a klej Poxipol – do ceramiki Al_2O_3 . Stwierdzono również, że klej epoksydowy Epidian 57/Z1 cechowała lepsza adhezja do ceramiki Al_2O_3 .

4.4. Wyniki badań próbek nr 4

Badania wykonywane z wykorzystaniem próbek nr 4 dotyczyły ceramiki SiC i Al_2O_3 oraz tkaniny Microflex i dwóch klejów: Bondicx 01 i Poxipol. Ponieważ spoiny połączeń obciążone były na oddzieranie, rejestrowano przebieg zmiany sił w funkcji przemieszczenia trawersy maszyny (rys. 11) i porównywano wartości maksymalnych sił uzyskiwanych w próbach. Wyniki badań zamieszczono w tabeli 8.



Rys. 11. Przykładowe wyniki trzech pomiarów wytrzymałości na oddzieranie tkaniny Microflex od ceramiki Al_2O_3 łączonych klejem Bondicx 01 (wartości sił maksymalnych 32, 43 i 34 N)

Fig. 11. Examples of three pull-off strength tests with using Microflex fabric and Al_2O_3 ceramic bonding Bondicx 01 adhesive (maximum force values 32, 43 and 34 N)

Tabela 8. Wytrzymałość na oddzieranie połączeń klejowych łączących tkaninę Microflex z ceramiką

Table 8. The peel strength of adhesive joints bonding Microflex fabrics with the ceramic

Klej Bondicx 01		Klej Poxipol	
SiC	Al_2O_3	SiC	Al_2O_3
Maksymalna siła niszcząca [N]			
34,75±10,31	34,22±5,38	18,8±1,62	24,2±4,6

Połączenia, w których zastosowano klej Bondicx 01, niezależnie od rodzaju ceramiki cechowała większa wytrzymałość w porównaniu z połączeniami powstałymi na bazie kleju Poxipol.

5. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Badane tkaniny polietylenowe oraz tkanina aramidowa XPS102 nie nadają się do adhezyjnego łączenia ich z płytkami ceramicznymi ze względu na ich strukturę (składają się one z cienkich warstw materiału słabo połączonych ze sobą, co skutkuje rozwarstwianiem się tkanin przy niewielkich obciążeniach rozciągających prostopadłych do ich powierzchni) oraz brak podatności do przesycania.
2. Kleje Loctite 3038 oraz Scotch Weld 8010 przeznaczone do klejenia polietylenu są klejami specjalistycznymi i nie nadają się do klejenia tkanin aramidowych. Silikon czarny oraz Terostat M9399 cechuje niska wytrzymałość kohezyjna, co powoduje ich nieprzydatność do łączenia ceramiki z tkaninami.
3. Największą wytrzymałość na odrywanie rzędu 14 MPa uzyskano, łącząc tkaninę Microflex z metalową próbką klejem Poxipol 01.
4. Klej Bondicx 01 wykazuje lepszą adhezję do ceramiki SiC, a klej Poxipol – do ceramiki Al₂O₃. Wytrzymałość na odrywanie tych klejów od ceramik jest rzędu 7 MPa.
5. Wydaje się, że ze wszystkich badanych próbek, próbki nr 4 najlepiej odwzorowują obciążenie płytek ceramicznych przyklejonych do tkanin, z których wykonywane są kamizelki kuloodporne. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem takich próbek wykazały, że klej Bondicx 01 bardziej nadaje się do takich zastosowań niż klej Poxipol.

LITERATURA

- [1] Grabowska Grażyna, Joanna Błaszczuk, Iwona Kucińska. 2009. „Resistance to bullets, knives, stabs and needles according to current standards, Procedures and users' expectations”. *Techniczne Wroby Włókiennicze XVII* (2-3) : 90-95,
- [2] Gonçaves D.P., F.C.L. de Melo, Aloísio Nelmo Klein, Hazim Ali Al-Qureshi. 2004. „Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal, composite armour”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 : 307-316.
- [3] Juskowiak Ewa, Radosław Rybczyński, Janusz Kurowski, Krzysztof Jamroziak. 2012. „Koncepcja osobistej osłony balistycznej z wykorzystaniem tkanin aramidowych i węglików spiekanych”. *Przetwórstwo Tworzyw* 3 : 217-221.
- [4] Hazell Paul John. 2006. *Ceramic Armour: Design and Defeat Mechanisms*. Canberra: Argos Press.

- [5] Senderski Juliusz, Bartłomiej Płonka, Andrzej Wiśniewski, Zenon Witkowski. 2011. „Wielowarstwowe metalowo-ceramiczne pasywne pancerze dla helikopterów i pojazdów specjalnych”. *Problemy Techniki Uzbrojenia* 40 (118) : 57-64.
- [6] Grujicic Mica, W.C. Bell, Bhaskar Pandurangan. 2012. „Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems”. *Materials and Design* 34 : 808-819.
- [7] Formanek Bolesław, Stanisław Józwiak, Bożena Szczucka-Lasota, Anna Dolata-Groszc, Zbigniew Bojar. 2005. „Intermetallic alloys with oxide particles and technological concept for high loaded materials”. *Journal of Materials Processing Technology* 01 (162) : 46-51.
- [8] Cegła Marcin, Wiesław Habaj, Paweł Podgórzak. 2014. „Development of lightweight bulletproof vest inserts with increased protection capability”. *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa* 5 (3) : 23-33.

Adhesive Joints Testing of Ceramic and Anti-Ballistic Fabrics

Jan GODZIMIRSKI, Roman GIELETA, Marek ROŚKOWICZ

Abstract. The research results of adhesive joints used in the manufacture of bulletproof vests were presented. The joints were prepared on the basis of polyethylene and aramid fabrics and ceramic tiles of SiC and Al₂O₃ types. For joining the materials, the following adhesives dedicated to bonding polymeric materials were used: BONDICX 01 CX-80, Poxipol 10 min, LOCTITE 3038, Scotch-Weld 8010, Professional Silicone Black, and Terostat M9399. It was found that the polyethylene fabrics HB50 and HB26 401184C ROLL ROLL 401400B, due to their low interlaminar strength and lack of compliance to supersaturation, are not suitable for their adhesive bonding with the tiles. On the basis of research, the test specimens were proposed which in the best way represent the loading of ceramic tiles which are bonded to the fabric. Tests with using such specimens demonstrated that the adhesive BONDICX 01 is the best solution for such applications.

Keywords: mechanics, strength of adhesive joints, bulletproof vests, woven aramid polymer, ceramic materials