

mgr inż. Wiesław HABAJ*
dr inż. Paweł PODGÓRZAK*
dr inż. Marzena FEJDYŚ**
*Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
**Instytut Technologii Bezpieczeństwa MORATEX

ARAMIDOWO - POLIETYLENOWY BALISTYCZNY KOMPOZYT HYBRYDOWY NA PRZYKŁADZIE CZEREPU HELMU WYKONANIE I BADANIA

Streszczenie: W artykule przedstawiono wycinek wyników prac związanych z opracowaniem kuloodłamkoopornego hełmu z czerepem z kompozytu hybrydowego wykonanym na bazie włókien aramidowych TWARON® i polietylenowych DYNEEMA®. Opisano technologię wykonania tego kompozytu na przykładzie czerepu hełmu oraz przedstawiono wyniki badań odporności balistycznej tych czerepów dla różnych rozwiązań materiałowych. Wyniki badań przedstawiono w odniesieniu do siły odrywania w obszarze kompozytu jednorodnego (polietylenowego i aramidowego) oraz na granicy faz kompozyt aramidowy – kompozyt polietylenowy, która jest miarą spójności materiałowej kompozytu hybrydowego. Stopień zrównoważenia struktury kompozytu oceniono za pomocą prędkości ΔV , która jest wyznaczana podczas określania granicy ochrony balistycznej V_{50} i stanowi różnicę najwyższej prędkości odłamka standardowego przy penetracji częściowej pancerza i najniższej prędkości tego odłamka, przy której nastąpiła penetracja całkowita pancerza.

Słowa kluczowe: kompozyt włóknisty, osłona balistyczna, granica ochrony balistycznej V_{50} , odrywanie międzyfazowe, międzywarstwa

ARAMID/POLYETHYLENE BASED HYBRID BALLISTIC COMPOSITE FOR HELMET SPLINTER – FABRICATION AND RESEARCH

Abstract: The article shows part of research results on creating bullet- and fragment-proof helmet made of hybrid composite based on aramide TWARON™ and polyethylene DYNEEMA™ fibers. Production technology as well as results of ballistic tests of different material arrangements are shown. Results are presented in comparison with tensile strength of homogeneous composite (polyethylene and aramid) and on the interface of aramid and polyethylene which is the measure of consistency of materials. Degree of composite structure sustainability was evaluated using ΔV velocity which is set when determining the V_{50} ballistic limit and is the difference between highest velocity of Fragment Simulating Projectile (FSP) for which partial armor penetration has occurred and lowest velocity of that fragment for which complete armor perforation was observed.

Keywords: fiber-based composite, ballistic protected panel, V_{50} ballistic limit, interfacial adhesion

1. WSTĘP

Podstawowymi materiałami stosowanymi obecnie do wykonywania osobistych, kompozytowych osłon balistycznych są włókiennicze struktury na bazie włókien aramidowych KEVLAR®, TWARON® i polietylenowych DYNEEMA® i SPECTRA®. Praktycznie jedy-

nym wyrobem, w którym kompozyt tego rodzaju występuje samoistnie, jako jedyne zabezpieczenie, jest czerep hełmu. We wszystkich innych konstrukcjach osobistych osłon balistycznych, a także osłon pojazdów, kompozyty wzmacniane włóknami stanowią bazę do montażu zasadniczego materiału pancernego np.: ceramiki, stali i innych.

Hełm o właściwościach zapewniających odporność balistyczną na określonym poziomie coraz bardziej przekształca się z jego pierwotnej roli, którą przede wszystkim była ochrona głowy przed zagrożeniami pochodzącymi od pocisków i odłamków do roli platformy, która przy zachowaniu odporności balistycznej, służy do opcjonalnego montażu wyposażenia w postaci noktowizora, elementów łączności, ochronników słuchu, maski przeciwgazowej, sensorów zbierających dane o stanie psychofizycznym użytkownika itp. W konsekwencji tego czerep hełmu sukcesywnie ulega modyfikacjom polegającym przede wszystkim na ograniczeniu powierzchni ochronnej w celu ograniczenia jego masy, co pozwala na zainstalowanie peryferyjnego wyposażenia. Aby nie doprowadzić do nadmiernego wzrostu masy hełmu konieczne wydaje się obniżenie masy czerepu przy niezmięniętej jego odporności balistycznej i zachowaniu wymaganej powierzchni ochrony. Czerep hełmu stanowi ok. 85 % jego masy w wersji podstawowej.

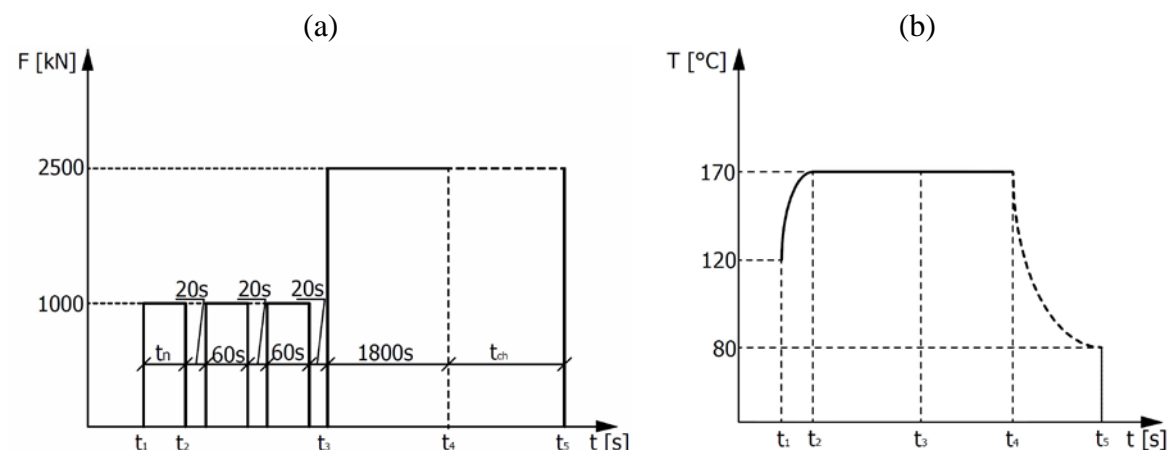
Obniżenie masy czerepu hełmu może odbywać się na drodze zastosowania lekkiego kompozytu polietylenowego lub na połączeniu, w postaci hybrydowej, konstrukcji kompozytu aramidowego i polietylenowego. Za tym drugim rozwiązaniem przemawiają dwa argumenty. Pierwszym jest palność kompozytu polietylenowego, która może zostać wyeliminowana poprzez zastosowanie bariery w postaci kompozytu aramidowego. Jednocześnie, pomimo wyższej odporności balistycznej mierzonej porównawczo z kompozytem aramidowym, biorąc pod uwagę masę powierzchniową kompozytu o ekwiwalentnej odporności balistycznej, kompozyty aramidowe cechują się mniejszą podatnością na dynamiczne ugięcie w miejscu trafienia pociskiem lub odłamkiem. Powiązanie wysokiej odporności balistycznej kompozytów polietylenowych z ograniczonym ugięciem dynamicznym i odpornością balistyczną kompozytów aramidowych oraz ich barierowymi właściwościami termicznymi, skłoniło specjalistów do opracowania technologii wytwarzania hybrydowego, warstwowego kompozytu polietylenowo aramidowego, który łączyłby właściwości tych dwóch materiałów.

2. TECHNOLOGIA KOMPOZYTU ARAMIDOWO - POLIETYLENO- WEGO NA PRZYKŁADZIE CZEREPU HEŁMU

W technologii wykonania hybrydowego kompozytu aramidowo polietylenowego wykorzystano właściwości przetwórcze oraz budowę tych materiałów. Zarówno wykorzystywany materiał polietylenowy DYNEEMA[®] HB 80 oraz TWARON[®] CT 736 występują pod postacią preimpregnatów, czyli konstrukcji włókienniczych powlekanych lepiszczem. W tym przypadku wykorzystano fakt, że materiał aramidowy jest materiałem termoutwardzalnym przetwarzanym w temperaturze 170° C natomiast polietylenowy w temperaturze 127° C i jest materiałem termoplastycznym. Kompozyt hybrydowy uzyskano dzięki wytworzeniu międzywarstwy na powierzchni kompozytu aramidowego w postaci stopu jednej warstwy materiału polietylenowego oraz kleju PVB stanowiącego warstwę klejącą w preimpregnacie aramidowym. Warstwa włókienniczej konstrukcji polietylenowej w temperaturze 170° C przekształcała się w film na powierzchni warstw aramidowych trwale z nimi połączony. Dzięki tej międzywarstwie możliwe było związanie wielowarstwowej konstrukcji aramidowej z wielowarstwową konstrukcją polietylenową.

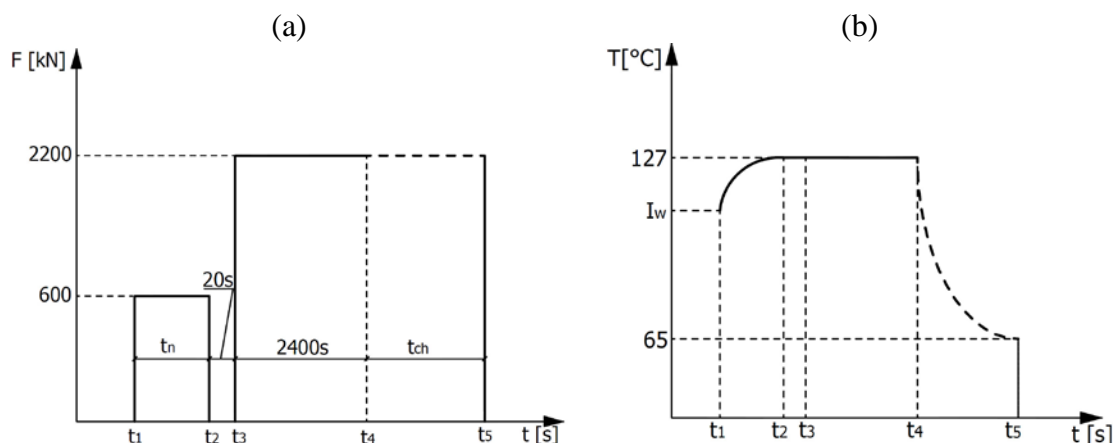
Proces wykonania czerepu hełmu tą metodą odbywał się w dwóch operacjach oraz przy wykorzystaniu dwóch form. Poniżej, na rys. 1 i 2 przedstawiono w postaci wykresów parametry procesu prasowania hybrydowego, kompozytowego czerepu hełmu.

ETAP I – prasowanie czerepu hełmu z kompozytu aramidowego TWARON CT 736 powlekanego warstwą polietylenu DYNEEMA HB 80



Rys. 1. Cykl technologiczny procesu prasowania części czerepu hełmu z kompozytu aramidowego – (a) rozkład siły prasowania w czasie procesu, (b) rozkład temperatury prasowania w czasie procesu
 t_n – czas nagrzewania pakietu wykrojów do temperatury 170° C zależny od liczby wykrojów
 $t_1 - t_3$ – czas prasowania wstępnego
 $t_2 - t_3$ – czas prasowania wstępnego z odgazowaniami
 $t_3 - t_5$ – czas prasowania głównego
 t_{ch} – czas chłodzenia do temperatury 80° C zależny od liczby wykrojów

ETAP II – prasowanie warstwy kompozytu polietylenowego DYNEEMA HB 80 na czerepie wykonanym w etapie I



Rys. 2. Cykl technologiczny procesu prasowania czerepu hełmu o budowie hybrydowej - (a) rozkład siły prasowania w czasie procesu, (b) rozkład temperatury prasowania w czasie procesu
 t_n – czas nagrzewania pakietu wykrojów do temperatury 127° C zależny od liczby i wstępnej temperatury wykrojów T_w czerepu aramidowego – prasowanie wstępne ($t_1 - t_2$)
 $t_2 - t_3$ – czas odgazowania części aramidowej czerepu oraz zastosowania na zewnętrzną warstwę czerepu warstwy preimpregnatu aramidowego. Prasowanie samego kompozytu polietylenowego nie wymaga odgazowania.
 $t_3 - t_5$ – czas prasowania głównego
 t_{ch} – czas chłodzenia pod naciskiem roboczym prasowania głównego zależny od liczby warstw kompozytu polietylenowego

Technologia wykonania międzywarstwy w postaci polietylenowego filmu z konstrukcji włókienniczej DYNEEMA HB 80 wymaga zastosowania przekładki z warstw tkaniny aramidowej. Podyktowane było to koniecznością oddzielenia warstwy polietylenu od powierzchni formującej matrycy formy oraz skompensowania grubości gniazda formującego do wymaganego stopnia wypełnienia. Film polietylenowy w trakcie prasowania kompozytu aramidowego w 1 etapie wymaga chłodzenia do temperatury zeszklenia (ok. 80° C). W trakcie prasowania wielowarstwowego kompozytu aramidowego, w temperaturze 170° C, polietylenowa konstrukcja włókiennicza ulega płynięciu. Dzięki zastosowaniu technologicznej międzywarstwy aramidowej film polietylenowy zostaje równomiernie, zgodnie z pierwotnym układem konstrukcji włókienniczej, rozłożony na powierzchni lepiszcza PVB, którym powleczona jest tkanina aramidowa preimpregnatu i trwale z nim połączony. Faktura warstwy technologicznej tkaniny aramidowej powoduje zatrzymanie uplastycznionego polietylenu w miejscu prasowania. Usunięcie przekładki aramidowej nie przedstawiało problemu, ponieważ zeszkłony polietylen nie łączył się z nią, a na powierzchni wielowarstwowej wypraski kompozytu aramidowego pozostawała powłoka polietylenu w postaci stopu z klejem PVB. Rolą filmu polietylenowego było stworzenie warstwy adhezyjnej dla kompozytu polietylenowego. Na fotografii, na rys. 3 przedstawiono wypraskę czerepu hełmu po 1 etapie prasowania.



Rys. 3. Czerep z kompozytu aramidowego powleczony warstwą polietylenu, wykonany z zastosowaniem aramidowej warstwy pośredniej

Tak wykonany czerep przenoszono na stempel drugiej formy, w której prasowano wielowarstwową powłokę kompozytu polietylenowego. Przekrój gotowego czerepu hełmu o budowie hybrydowej przedstawiono na fotografii, na rys. 5.



Rys. 4. Przekrój czerepu hełmu o budowie hybrydowej – aramidowo – polietylenowej

3. WYNIKI BADAŃ ODPORNOSCI BALISTYCZNEJ I SPÓJNOŚCI MATERIAŁOWEJ POLIETYLENOWO - ARAMIDOWEGO KOMPOZYTU HYBRYDOWEGO CZEREPU HEŁMU

Badaniom poddano 14 czerepów hełmów wykonanych z kompozytu polietylenowo - aramidowego. Badania odporności balistycznej polegały na określeniu granicy ochrony balistycznej V_{50} oraz ugięcia dynamicznego w miejscu trafienia odłamka standardowego. Badania prowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-V-87001:2011. Ocenę spójności materiałowej kompozytu oceniano poprzez badania siły odrywania międzyfazowego (kompozyt aramidowy – kompozyt polietylenowy) oraz międzywarstwowego (kompozyt aramidowy – kompozyt aramidowy, kompozyt polietylenowy – kompozyt polietylenowy). Siłę odrywania odpowiednich warstw kompozytu hybrydowego porównano z poziomem odporności balistycznej oraz ugięciem dynamicznym kompozytu. Na rys. 5 określono występujące w czerepie strefy poddane badaniom.



Rys. 5. Budowa czerepu hełmu z kompozytu hybrydowego: PE - wielowarstwowy kompozyt polietylenowy DYNEEMA HB 80, A - wielowarstwowy kompozyt aramidowy TWARON CT 736

Próbki do badań pozyskiwano w każdym przypadku z tej samej strefy czerepu hełmu. Był nią naddatek technologiczny w przedniej strefie czerepu. Szerokość pomiarowa każdej próbki wynosiła 7 cm. Każda z nich była przecinana na dwie części – prawą i lewą w stosunku do położenia „roboczego” czerepu hełmu. Na fotografii, na rys. 6 przedstawiono przykładowe próbki kompozytów wykorzystywane w badaniach.



Rys. 6. Próbki kompozytu do badań siły odrywania warstw kompozytowego czerepu hełmu kulo- i odłamkoodpornego

Podczas badań siły odrywania, realizowanych na próbkach pobranych z czerepu hełmu, rejestrowano maksymalną siłę odrywania. Należy zaznaczyć, że w wielu przypadkach zaob-

serwowano bardzo znaczne, miejscowe spadki siły odrywania, które sięgały nawet 50 ÷ 70 % siły maksymalnej. Na fotografii na rys. 8 przedstawiono jedną z prób pomiaru siły odrywania.



Rys. 8. Próbką kompozytu hybrydowego pochodząca z czerepu helmu poddana próbie odrywania – w tym przypadku międzyfazowego

Znaczne wahania siły odrywania były wynikiem wewnętrznych zafałdowań występujących w strukturze kompozytu, a przez to nierównomiernego rozkładu ciśnienia prasowania. Wynika to z nierównomiernego rozkładu prasowanego materiału, co jest nie do uniknięcia w przypadku kształtowania materiału o ograniczonej możliwości odkształcenia. Międzywarstwową, powierzchniową fakturę kompozytu aramidowego w czerepie helmu przedstawiono na fotografii na rys. 9.



Rys. 9. Międzywarstwowa faktura powierzchniowa kompozytu aramidowego w czerepie helmu

Spośród wszystkich zbadanych czerepów hełmów i pochodzących z nich próbek do badań siły odrywającej do analizy wybrano jedynie te, które spełniały wymagania odporności balistycznej w klasie odłamkoodporności O3 wg PN-V-87001:2011. Tabela 1 przedstawia budowę tych czerepów. Natomiast w tabeli 2 zamieszczono wyniki badań ich odporności balistycznej oraz siły odrywającej międzyfazowej i międzywarstwowej w próbkach pobranych z tych czerepów.

Tabela 1. Budowa czerepów hełmów, które spełniły wymagania odporności balistycznej w klasie odłamkoodporności O3 wg PN-V-87001:2011.

Nr Czerepu	Liczba warstw			
	A	Owal A*	PE	Owal PE*
HP-4	15	-	9	6
HP-10	8	2	15	3
HP-13	12	3	16	3
HP-14	13	3	15	-
HP-15	13	3	12	-

* - warstwy o owalnym kształcie dokładane na szczycie czerepu

Tabela. 2. Wyniki badań siły odrywania (F) międzywarstwowego i międzyfazowego oraz odporności balistycznej hybrydowego kompozytu aramidowo - polietenowego pochodzące z czerepów hełmów (badania optymalizacyjne).

Nr hełmu	PE – PE				PE - A				A - A				V ₅₀ [m/s]	ΔV [m/s]	U _g [mm]	Masa Czerepu [g]
	F [N]		~ΔF [%]	F _{śr} [N]	F [N]		~ΔF [%]	F _{śr} [N]	F [N]		~ΔF [%]	F _{śr} [N]				
	L*	P*			L	P			L	P						
HP 4	115	110	4	112,5	140	230	39	185	190	140	26	165	664	39	20	1002,8
HP 10	50	50	0	50	20	20	0	20	60	80	25	70	602	36	20	815,0
HP 13	10	15	35	12,5	40	105	62	72,5	150	90	40	120	683	25	17	1063,9
HP 14	85	130	35	107,5	90	210	57	150	155	145	6	150	729	14	20	990,8
HP 15	90	150	40	120	65	120	46	92,5	150	150	0	150	686	17	19	940,8

(*) – lewa L i prawa P strona czerepu hełmu w położeniu roboczym

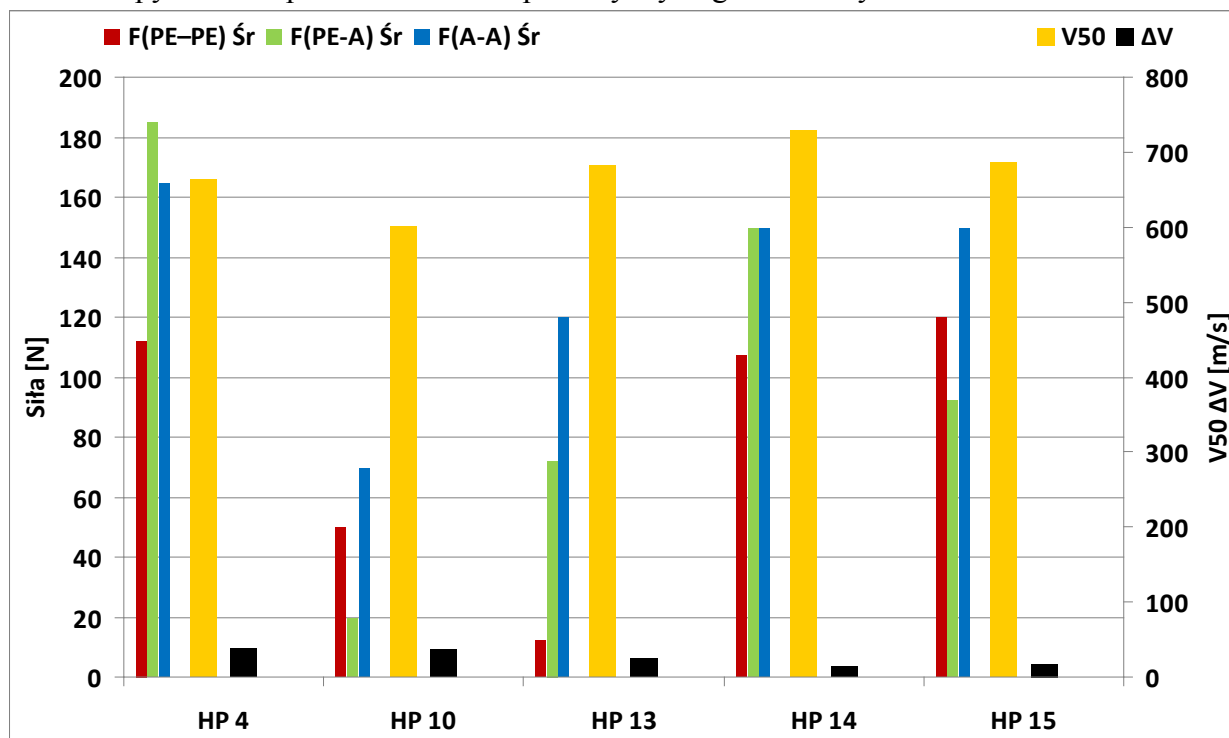
ΔF – względna wartość różnicy siły odrywającej wyrażona w [%]

U_g – ugięcie dynamiczne w miejscu uderzenia odłamka standardowego w czerep hełmu

Wykonanie kompozytowych czerepów hełmów o zoptymalizowanej masie i odporności balistycznej podlegało obiektywnym ograniczeniom. Polegały one na tym, że grubość gniazda formującego w formie do kształtowania czerepu aramidowego, a następnie w drugiej formie do końcowego kształtowania czerepu polietylenowo – aramidowego, były stałe i wynosiły odpowiednio 6 mm i 8 mm. Stąd sterowanie udziałem materiału aramidowego i polietylenowego w czerepie hełmu wymagało takiego postępowania, aby spełniony był warunek wypełnienia gniazda formującego gwarantujący odpowiednie sprasowanie materiału. Realizowano to poprzez zastosowania wielowarstwowej wkładki kompensującej grubość gniazda formującego, wykonanej z tkaniny aramidowej. Pozyskanie próbek do badań siły odrywania w kompozycie hybrydowym z rzeczywistego wyrobu pozwoliło, przy uwzględnieniu ich niedoskonałości, na ocenę wpływu spójności materiałowej kompozytu na odporność balistyczną czerepu hełmu.

Odporność balistyczna czerepu jest scharakteryzowana w tabeli 2 przez granicę ochrony balistycznej V_{50} , dynamiczne ugięcie w miejscu trafienia odłamka U_g oraz pośrednio poprzez parametr ΔV , który jest różnicą minimalnej prędkości odłamka, przy której nastąpiła całkowita penetracja czerepu i maksymalnej jego prędkości, przy której nastąpiła częściowa penetracja odłamka. Jest to „de facto” miara jednorodności struktury materiału kompozytowego. Bardzo ważnym parametrem optymalizującym budowę kompozytu hybrydowego w czerepie hełmu jest również masa czerepu. Przy stałych wymiarach gniazd formujących obydwu form charakteryzowała ona stopień zagęszczenia materiału kompozytowego w wyrobie.

Na wykresie słupkowym na rys. 10 przedstawiono wartości siły odrywania międzywarstwowego i międzyfazowego warstw kompozytu hybrydowego w czerepie hełmu w odniesieniu do jego odporności balistycznej oraz jednorodności struktury kompozytu, której miarą jest ΔV . Czerepy hełmów poddane analizie spełniały wymagania normy PN-V-87001:2011.



Rys.10. Właściwości kompozytowych czerepów hełmów o budowie hybrydowej (polietylenowo - aramidowe)

Z wykresu wynika, że czerep hełmu HP 14 wykazuje najwyższą odporność balistyczną, przy jednocześnie najniższej wartości ΔV . Czerep tego hełmu wykazuje ponadto najbardziej zrównoważoną i wysoką spójność materiałową kompozytu hybrydowego, której miarą jest

siła odrywania międzywarstwowego i międzyfazowego. Należy zaznaczyć że najwyższa odporność balistyczna skutkuje koniecznością badania ugięcia dynamicznego przy najwyższej prędkości odłamka, która wg normy PN-V-87001:2011 wynosi $0,9V_{50}$. Przy niewielkich różnicach w liczbie warstw kompozytu (Tabela 1) wysoka prędkość odłamka podczas badania ugięcia dynamicznego mogłaby doprowadzić do przekroczenia granicznej dopuszczalnej jego wartości wynoszącej 20 mm. Dzięki odpowiednim proporcjom udziału materiału aramidowego i polietylenowego oraz optymalnemu wypełnieniu gniazda formującego możliwe było utrzymanie ugięcia dynamicznego na wymaganym poziomie przy bardzo wysokiej wartości V_{50} i jednocześnie zachowaniu masy czerepu poniżej 1000 g.

3. WNIOSKI

Wnioski z przeprowadzonych prac technologicznych i badawczych są następujące:

1. Opracowanie termiczno – ciśnieniowej metody trwałego łączenia warstw polimerowego hybrydowego, aramidowo - polietylenowego kompozytu włóknistego pozwala na bezpośrednie łączenie tych materiałów bez wykorzystania obcych spoiw.
2. Technologia łączenia warstw kompozytu, poprzez wykorzystanie właściwości przetwórczych preimpregnatu aramidowego oraz polietylenowego, pozwala na sterowanie właściwościami kompozytu w kierunku ich optymalizacji pod względem kosztu wykonania oraz odporności balistycznej.
3. Parametry technologiczne wytwarzania kompozytu hybrydowego są uzależnione od udziału materiału aramidowego i polietylenowego w strukturze kompozytu i należy je dobierać indywidualnie dla danego rozwiązania konstrukcyjnego.
4. Najwyższą odporność balistyczną uzyskano przy najbardziej zrównoważonej strukturze kompozytu, charakteryzującej się minimalną wartością ΔV (HP 14, $\Delta V = 14$ m/s) oraz wysokimi, zbliżonymi wartościami siły odrywania międzywarstwowego i międzyfazowego.
5. Zastosowanie polietylenowej międzywarstwy w postaci stopu z żywicą PVB (lepiszcze preimpregnatu aramidowego) pozwala na wykonanie pancerza ceramiczno - kompozytowego, gdzie warstwą do której jest mocowana ceramika jest warstwa kompozytu aramidowego, bardziej podatnego na klejenie. Pozostałe warstwy podkładu kompozytowego mogą być wykonane z wymaganej liczby warstw kompozytu polietylenowego.
6. Z uwagi na cechę palności kompozytu polietylenowego zastosowanie technologii łączenia warstw za pomocą stopu polietylenu i żywicy PVB stwarza możliwość wykonania bariery termicznej ograniczającej możliwość zapłonu zasadniczej warstwy pancernej wykonanej z kompozytu polietylenowego.
7. Technika trwałego łączenia materiału aramidowego i polietylenu balistycznego może być, poza osłonami osobistymi, wykorzystana w konstrukcji lekkich opancerzeń środków transportu.
8. Rozwiązanie technologiczne wykonania kompozytu hybrydowego jest przedmiotem zgłoszenia patentowego nr P. 398745 z dnia 05.04.2012 r. pt.: „Sposób wykonania kompozytowego czerepu hełmu balistycznego”.

*Artykuł opracowano na podstawie wyników prac prowadzonych w ramach projektu
Nr POIG.01.03.01-10-005/08 pt.: „Nowoczesne balistyczne ochrony osobiste
oraz zabezpieczenia środków transportu i obiektów stałych wykonane na bazie kompozytów
włóknistych”*