



Stalowo-kompozytowe panele do ochrony przed przebicciem pociskami kumulacyjnymi z zastosowaniem blach z nanokrystalicznej stali bainityczno-austenitycznej

Jarosław MARCISZ^{1*}, Wojciech BURIAN¹, Jerzy STĘPIEŃ¹,
Lech STARCZEWSKI², Małgorzata WNUK³

¹*Instytut Metalurgii Żelaza, ul. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice*

²*Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej,
ul. Okuniewska 1, 05-070 Sulejówek*

³*MIKANIT, ul. Kalinowej Łąki 61, 01-934 Warszawa*

** autor korespondencyjny, e-mail: jmarcisz@imz.pl*

Artykuł wpłynął do redakcji 05.06.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 01.12.2014

DOI: 10.5604/20815891.1149757

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań odporności na przebiccie za pomocą granatnika RPG-7 stalowo-kompozytowych paneli eksperymentalnych zawierających blachy z nanostrukturalnej stali bainityczno-austenitycznej (NANOS-BA[®]). Panele eksperymentalne zostały zmodyfikowane w zakresie blach stalowych co do grubości i gatunku stali oraz rodzaju materiałów kompozytowych. W testach ostrzałem tych paneli za pomocą pocisków PG-7W i PG-7WM stwierdzono wysoką skuteczność ochronną i uzyskano redukcję gęstości powierzchniowej o ok. 20% w odniesieniu do obecnie stosowanych paneli. Dla blach ze stali nanostrukturalnej zastosowanych w panelach, na podstawie wyników badań ostrzałem pociskami przeciwpancernymi wytypowano wariant materiału charakteryzujący się optymalną udarnością przy zachowaniu wysokiej odporności na przebiccie.

W finalnej konstrukcji paneli zaproponowano zastosowanie blach o zróżnicowanych właściwościach w poszczególnych warstwach. W konstrukcji panelu użyte warstwowe i monolityczne materiały laminatowe o gęstości w zakresie $1,0 \div 2,1 \text{ g/cm}^3$.

Słowa kluczowe: inżynieria materiałowa, RPG, ochrona pasywna, stal nanokrystaliczna

1. WSTĘP

Panele ochronne przeciw kumulacyjnym granatom przeciwpancernym PG (ang. *rocket propeller grenade*) i jednocześnie spełniające czwarty poziom ochrony wg dokumentu NATO STANAG 4569 A są wytwarzane w postaci warstwowych układów stalowo-kompozytowych. Stanowią one dodatkowe pasywne elementy opancerzenia pojazdów. Każda z warstw spełnia określoną funkcję w procesie ochrony w przypadku działania strumienia kumulacyjnego oraz rdzeni pocisków przeciwpancernych. Poznanie mechanizmów penetracji pancerzy warstwowych przez strumień kumulacyjny jest aktualnym problemem badawczym. Warstwy laminatów są w głównej mierze odpowiedzialne za osłabienie zdolności penetracyjnej strumienia. Jednym z mechanizmów osłabienia strumienia jest zmiana kierunku penetracji na skutek zmiany gęstości ośrodków znajdujących się na jego drodze. Tę funkcję spełniają materiały laminatowe [1] i odpowiednio dobrane dylatacje. Blachy stalowe spełniają funkcję warstw zapewniających odporność na przebite pociskami oraz stanowią elementy konstrukcji panelu. W trakcie penetracji paneli przez strumień kumulacyjny blachy są poddawane ekstremalnym obciążeniom mechanicznym, dlatego zastosowany gatunek stali powinien charakteryzować się wysoką zdolnością do absorpcji i rozpraszania energii udarowej, powstającej w wyniku mechanicznego i cieplnego oddziaływania strumienia. Preferowane jest optymalne rozwiązanie spełniające wymagania wytrzymałościowe przy zachowaniu jak najwyższej plastyczności, w szczególności w warunkach obciążeń udarowych [2-8].

Oddziaływania udarowe można rozpatrywać m.in. w odniesieniu do wartości energii i sposobu oddziaływania (punktowe, objętościowe). Wiedza w zakresie wpływu właściwości materiałów na zdolność do oddziaływania ze strumieniem kumulacyjnym jest wciąż aktualizowana, aby jak najlepiej przewidzieć skutki ostrzału/wybuchu i wskazać najlepsze rozwiązanie. Jediną metodą sprawdzenia zachowania się blach stalowych i laminatów w panelu jest przeprowadzenie testów ostrzałem za pomocą pocisków PG. Przed tymi eksperymentami zwykle wykonywane są testy odporności na ostrzał wielokrotny amunicją przeciwpancerną, a wyniki tych badań mogą stanowić podstawę do doboru blach i laminatów do paneli warstwowych.

Istotną cechą paneli stanowiących dodatkowe wyposażenie pojazdów opancerzonych jest masa powierzchniowa. Stąd wciąż aktualne jest poszukiwanie coraz lepszych rozwiązań przy zachowaniu wymagań w zakresie właściwości ochronnych paneli.

W artykule przedstawiono wyniki badań odporności na przebiecie pociskiem PG paneli eksperymentalnych o obniżonej masie powierzchniowej w odniesieniu do dotychczas stosowanych rozwiązań. Obniżenie masy uzyskano w wyniku zastosowania blach o mniejszej grubości ze stali nanostrukturalnej [6-10] oraz monolitycznych materiałów laminatowych o wysokiej zdolności do absorpcji energii strumienia kumulacyjnego i cechujących się małą gęstością [1, 3, 11].

2. METODYKA BADAŃ BLACH STALOWYCH STANOWIĄCYCH WARSTWY PANELI

Materiały stosowane w warunkach dynamicznych obciążeń udarowych w pierwszym etapie badań są oceniane w testach statycznych (pomiary twardości, statyczna próba rozciągania itp.). Następnie w warunkach laboratoryjnych wykonywane są badania w celu wyznaczenia dynamicznej granicy plastyczności oraz badania udarowe w testach ostrzałem pociskami o zróżnicowanej energii i sposobie penetracji. Na podstawie wyników testów laboratoryjnych w finalnym etapie doboru materiałów prowadzi się eksperymenty na modelach w konfiguracji materiałowej i skali wymiarowej odpowiadającej rzeczywistym warunkom użytkowania w celu zbadania wpływu właściwej energii udarowej na funkcje ochronne panelu.

W przedmiotowym panelu docelowe warunki użytkowania odnoszą się do łącznego oddziaływania udarowego i cieplnego strumienia kumulacyjnego na układ warstwowy blach stalowych i laminatów. Blachy stalowe w panelach są poddawane ekstremalnym obciążeniom mechanicznym skutkującym powstaniem złożonego stanu naprężeń i odkształceń.

W przypadku wysokoenergetycznych oddziaływań dynamicznych trudno wskazać jednoznacznie czynnik lub zestaw właściwości wyznaczonych w próbach statycznych determinujący wysoką skuteczność ochronną. Poza odpowiednim poziomem twardości (wytrzymałości), istotna jest także wartość granicy plastyczności oraz wydłużenie, a szczególnie ciągliwość oraz udarność. Wysoka twardość wydaje się istotna z uwagi na twardość rdzeni pocisków, ale nie jest to regułą, ponieważ obserwuje się znaczący wpływ wartości skumulowanej energii udarowej na jednostkę powierzchni w miejscu uderzenia, która wynika z kształtu i podatności na odkształcenia materiału rdzenia pocisku. Z kolei odpowiednia wartość ilorazu $R_m/R_{0,2}$ teoretycznie tylko zapewnia wyższą zdolność do pochłaniania energii poprzez odkształcenie plastyczne. Dotyczy to niewątpliwie warunków statycznych i oddziaływań dynamicznych charakteryzujących się małą prędkością odkształcenia.

Nie bez znaczenia jest również stan naprężeń i odkształceń laboratoryjnej próbki testowej w odniesieniu do warunków rzeczywistych użytkowania [2].

Uwzględniając te uwarunkowania, zastosowano następujący cykl badań stali nanostrukturalnej w celu wytypowania optymalnego wariantu do zastosowania w konstrukcji paneli. Na etapie wytwarzania blach wykonano pomiary twardości, badania mikrostruktury oraz określono właściwości w statycznej próbie rozciągania i wyznaczono udarność. Następnie przeprowadzono badania w testach ostrzałem przy zastosowaniu amunicji dla poziomu 1 i 2 wg STANAG 4569 A. Stosowane rodzaje amunicji były zróżnicowane pod względem rodzaju materiału rdzenia pocisku (stal twarda, stal miękka, ołów), kształtu i wymiarów rdzenia, masy rdzenia, prędkości i energii kinetycznej. Wymienione cechy charakterystyczne dla pocisków powodują w momencie uderzenia punkowego powstanie wielu trudno przewidywalnych zjawisk związanych z koncentracją energii na jednostkę powierzchni, odkształceniem rdzenia i przekazywaniem energii kinetycznej do małego obszaru blachy. Badane blachy poddano testom ostrzałem wielokrotnym, a następnie wykonano badania mikrostruktury i twardości w miejscach i/lub w pobliżu miejsc uderzenia. Przeprowadzono dużo eksperymentów, w których optymalizowano właściwości blach o grubości 3, 5 i 6 mm. W końcowej fazie badań ustalono warianty finalnej obróbki cieplnej kształtującej właściwości blach dla poszczególnych grubości. Materiał blach w testach ostrzałem amunicją kal. 5,56 i 7,62 mm (1 i 2 poziom ochrony wg STANAG 4569 A) wykazywał dobrą plastyczność objawiającą się brakiem pęknięć oraz zdolnością do odkształcenia plastycznego w miejscach oddziaływania pocisków. W badaniach szczególnie istotne było potwierdzenie wysokiej skuteczności ochronnej blach w testach ostrzałem wielokrotnym. Świadczyło to o dobrej zdolności materiału do hamowania rozprzestrzeniania się mikropęknięć. Potwierdziły to badania mikrostruktury i analizy mechanizmu powstawania adiabatycznych pasm ścinania w miejscu uderzenia pocisku.

3. METODY BADAŃ

Właściwości mechaniczne wyznaczono w statycznej próbie rozciągania na próbkach płaskich z blach o grubości 3-6 mm. Udarność badano metodą Charpy-V na próbkach standardowych o przekroju 10×10 mm w temperaturze pokojowej i w -40°C . Testy zginania statycznego wykonano na próbkach o grubości 6 mm z zastosowaniem trzpienia o średnicy 35 mm. Badania mikrostruktury przeprowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego i skaningowego mikroskopu elektronowego.

W testach balistycznych stosowano następujące typy amunicji wg STANAG 4569 A: poziom 1 – kal. $5,56 \times 45$ mm M193 (rdzeń ołowiany); $7,62 \times 39$ mm PS (rdzeń ze stali miękkiej); $7,62 \times 51$ mm NATO Ball (pociski z rdzeniem ze stali miękkiej); poziom 2 – kal. $7,62 \times 39$ mm API BZ

(przeciwpancerne z rdzeniem ze stali hartowanej o twardości 63÷65 HRC [4]). Arkusze blach o wymiarach 300÷500 × 300÷500 mm mocowano w sposób sztywny za pomocą ścisków do nieruchomej ramy stalowej.

Prędkość pocisku regulowano poprzez zmianę naważki prochowej i mierzono za pomocą chronografu PVM-2008/21 w odległości 3 m od wylotu z lufy balistycznej. Celem badań była ocena zachowania się materiału w warunkach punktowych wysokoenergetycznych obciążeń uderzeniowych w aspekcie powstawania pęknięć i zdolności do odkształcenia plastycznego w pobliżu miejsca uderzenia.

4. WŁAŚCIWOŚCI BLACH ZE STALI NANOSTRUKTURALNYCH STOSOWANYCH W PANELACH EKSPERYMENTALNYCH

Nanostrukturalna stal bainityczno-austenityczna NANOS-BA[®] uzyskuje finalne właściwości użytkowe w wyniku obróbki cieplnej polegającej na austenitzowaniu, regulowanym chłodzeniu i wygrzewaniu w temperaturze przemiany izotermicznej [5-8]. Parametry przemiany izotermicznej stosowane dla gatunku stali będącego przedmiotem badań zawierają się w zakresie: temperatura od 200 do 300°C i czas od 70 do 120 godzin. Wyniki przeprowadzonych badań właściwości mechanicznych i mikrostruktury oraz testów ostrzałem umożliwiły wytypowanie parametrów wytwarzania blach do zastosowań w przedmiotowych panelach [7, 8]. Dla podanego wyżej zakresu parametrów obróbki cieplnej można uzyskać następujące właściwości stali: $R_{0,2}$ od 1000 do 1400 MPa, R_m od 1600 do 2100 MPa i wydłużenie odpowiednio od 25 do 12%.

Przy doborze wariantu dla paneli kierowano się głównie poziomem plastyczności wyznaczonej w statycznej próbie rozciągania (wydłużenie), w testach zginania i wartością udarności w temperaturze pokojowej i w -40°C przy wymaganej twardości i wytrzymałości. Ponadto uwzględniono wyniki testów ostrzałem w odniesieniu do charakteru przestrzelenia i cech obszaru w miejscu oddziaływania z pociskiem.

4.1. Wyniki pomiarów twardości, właściwości mechanicznych (statycznych), udarności oraz badań mikrostruktury

W tabeli 1 zamieszczono parametry wygrzewania izotermicznego oraz wyniki pomiarów twardości i właściwości mechanicznych stali nanostrukturalnej ze wskazaniem grubości blachy stanowiącej warstwę panelu.

Wyniki badań właściwości statycznych wskazują, że dla blach o grubości 3-6 mm przewidzianych do zastosowania w panelach korzystne są warianty charakteryzujące się wysoką plastycznością przy obniżonym poziomie wytrzymałości. Do paneli eksperymentalnych wytypowano materiał o wartości $R_{0,2}$ 1000-1400 MPa, R_m 1600-1900 MPa i wydłużeniu całkowitym 16-24%.

Tabela 1. Parametry obróbki cieplnej i właściwości mechaniczne stali nanostrukturalnej

Table 1. Parameters of heat treatment and mechanical properties of nanostructured steel

Wariant	Parametry wygrzewania izotermicznego		Twardość	$R_{0,2}$	R_m	$R_m / R_{0,2}$	A	Grubość blachy
	Temperatura °C	Czas godz.	HV10	MPa	MPa	-	%	mm
250/70	250	70	570	1300	1800	1,38	16	3,0
225/96	225	96	610	1400	1920	1,37	14	5,0 / 6,0
275/120	275	120	540	1250	1700	1,36	19	3,0 – 6,0
285/96	285	96	520	1200	1650	1,38	24	5,0 / 6,0
300/72	300	72	500	1020	1630	1,60	25	3,0

Wyniki badań udarności stali nanostrukturalnej w temperaturze pokojowej i w -40°C zawiera tabela 2. Do badań udarności wytypowano warianty przewidziane do wytwarzania blach stanowiących warstwy paneli. Udarność stali nanostrukturalnej w temperaturze pokojowej dla badanych wariantów obróbki cieplnej zawiera się w przedziale 24-32 J. W temperaturze -40°C udarność obniża się do ok. 12 J. Wartości udarności spełniają minimalne wymagania stawiane obecnie stosowanym gatunkom stali pancernych w klasie twardości 500-550 HB.

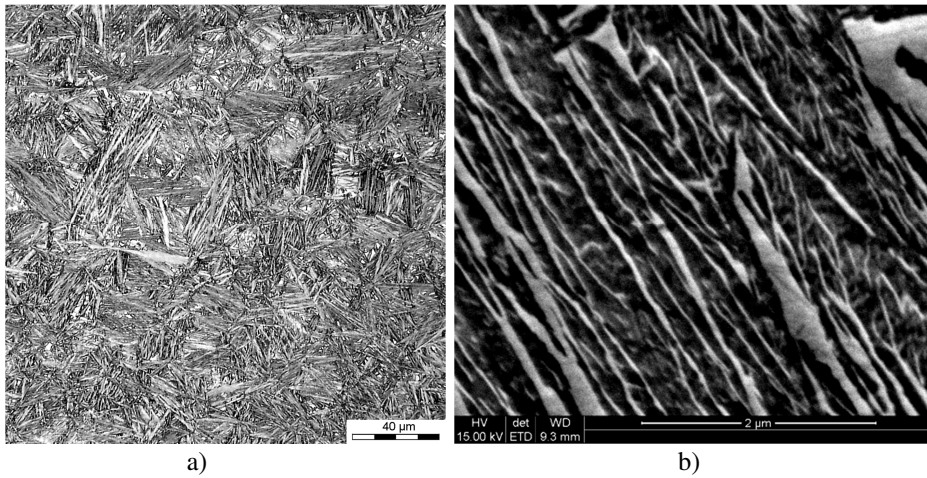
Tabela 2. Wyniki pomiarów udarności Charpy-V dla wybranych wariantów obróbki cieplnej stali nanostrukturalnej

Table 2. Results of notch impact toughness (Charpy-V) for chosen variants of heat treatments of nanostructured steel

Wariant	Energia łamania, J		Grubość blachy
	+20°C	-40°C	mm
250/70	24	12	3,0
275/120	24	13	3,0 – 6,0
285/96	32	12	5,0 / 6,0

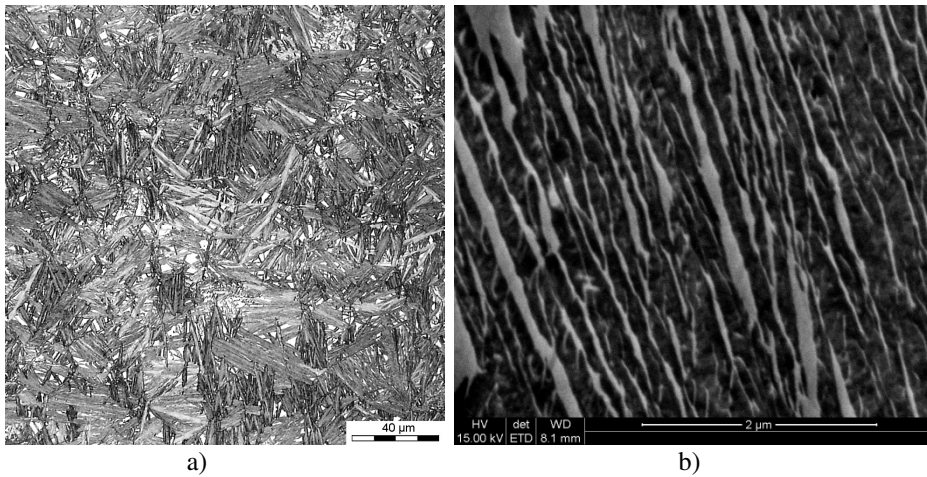
Przykładowe mikrostruktury blach ze stali nanostrukturalnych zamieszczono na rysunkach 1 i 2. Mikrostrukturę stanowi bezwęglkowy bainit dolny listwowy oraz austenit szczątkowy.

Charakterystyczne pakiety listew bainitu bezwęglikowego zamieszczono na mikrofotografiach ze skaningowego mikroskopu elektronowego (rys. 1b i 2b).



Rys. 1. Mikrostruktura blach ze stali nanostrukturalnej – wariant 275/120:
a) mikroskop świetlny, b) skaningowy mikroskop elektronowy

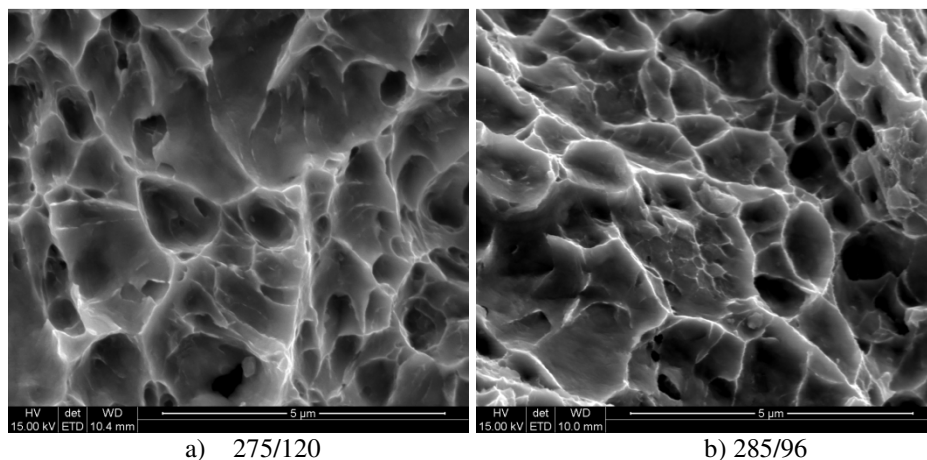
Fig. 1. Microstructure of sheets made of nanostructured steel – variant 275/120:
a) light microscope, b) scanning electron microscope



Rys. 2. Mikrostruktura blach ze stali nanostrukturalnej – wariant 285/96:
a) mikroskop świetlny, b) skaningowy mikroskop elektronowy

Fig. 2. Microstructure of sheets made of nanostructured steel – variant 285/96:
a) light microscope, b) scanning electron microscope

Charakter powierzchni zerwania próbek wytrzymałościowych oceniano, wykorzystując skaningowy mikroskop elektronowy. Stwierdzono ciągłe cechy materiału i brak wydzielań. Przykładowe mikrografie powierzchni zerwania zamieszczono na rysunku 3.



Rys. 3. Morfologia płaszczyzn zerwania próbek wytrzymałościowych

Fig. 3. Tear planes morphology of specimens after static tensile test

Testy zginania

Eksperymenty zginania przeprowadzono do uzyskania kąta 180° . Fotografie próbek ze stali nanostrukturalnej po testach zginania zamieszczono na rysunku 4. Testy wykazały wysoką zdolność materiału do odkształcenia plastycznego w warunkach zginania statycznego na zimno. Dla wariantów 275/120 i 285/96 uzyskano kąt zgięcia 180° , a w miejscu zginania nie stwierdzono obecności pęknięć powierzchniowych. Dodatkowo wykonano z wynikiem pozytywnym próbę odginania (prostowania) dla wariantu 285/96.



Rys. 4. Fotografie próbek poddanych zginaniu statycznemu

Fig. 4. Photography of specimens put to the static bending test

Określenie zawartości austenitu

Udział objętościowy austenitu, morfologia oraz zachowanie się tego składnika fazowego podczas odkształcenia plastycznego w warunkach obciążeń dynamicznych to istotna cecha materiałów stosowanych w osłonach antyudarowych. Blachy ze stali nanostrukturalnej do zastosowań w konstrukcji paneli kompozytowych charakteryzowały się zawartością austenitu od ok. 20 do ponad 30% objętości. W tabeli 3 zamieszczono wyniki badań ilościowych austenitu dla wariantów obróbki cieplnej blach wytypowanych do paneli. Dla wariantu o wysokiej udarności i plastyczności w warunkach ostrzału (275/120) udział objętościowy austenitu wynosił ponad 30%.

Tabela 3. Wyniki pomiarów ułamka objętości austenitu szczątkowego

Table 3. Results of volume fraction of retained austenite measurements

Wariant obróbki cieplnej	Ułamek objętości austenitu, %
250/70	19,8 ± 0,5
225/96	23,6 ± 1,1
275/120	31,5 ± 0,4
285/96	29,7 ± 0,2

5. WYNIKI TESTÓW OSTRZAŁEM BLACH

W tabeli 4 zestawiono wyniki testów ostrzałem blach o grubości nominalnej 3 mm. Obróbkę cieplną tych blach prowadzono w celu otrzymania wyższej odporności na pękanie w warunkach obciążeń udarowych kosztem niższych właściwości wytrzymałościowych. Blachy o grubości 3 mm są stosowane głównie w układach przestrzennych i ich zadaniem jest pochłonięcie możliwie jak największej ilości energii pocisku i/lub zaburzenie jego toru lotu. Stanowią one elementy konstrukcji modułu złożonego z warstw laminatów. Na podstawie wyników prób ostrzałem przedstawionych w tabeli 4 ustalono następujące optymalne parametry obróbki cieplnej dla blach o grubości około 3 mm: temperatura 250-285°C i czas 70-120 godzin. Wyniki badań wskazują, że dla powyższych parametrów obróbki cieplnej materiał charakteryzuje się zdolnością do odkształceń plastycznych bez pęknięć w obszarze oddziaływania z pociskiem podczas testu ostrzału wielokrotnego (rys. 5).

Tabela 4. Wyniki testów ostrzałem blach o grubości nominalnej 3,0 mm (wariant 250/70) amunicją kal. 7,62 × 39 mm PS

Table 4. Firing tests results of sheets of thickness 3.0 mm (variant 250/70) using cal. 7.62 × 39 mm PS ammunition

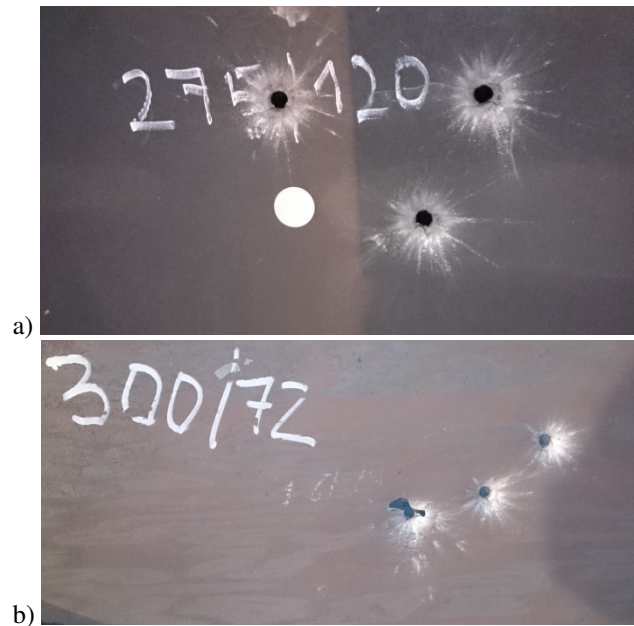
Lp.	Prędkość pocisku, m/s	Wynik próby (P-przebite, NP-brak przebitcia)
1	756,4	P
2	753,4	P
3	752,2	P
4	752,5	P
5	749,1	P
6	755,3	P
7	757,6	P



Rys. 5. Fotografia miejsc przebitcia blach o grubości nominalnej 3,0 mm pociskiem kal. 7,62 × 39 mm PS (wariant 250/70)

Fig. 5. Photography of perforations of sheet of nominal thickness 3.0 mm using cal. 7.62 × 39 mm PS (variant 250/70)

Dla blach o grubości 3 mm dla wariantów 275/120, 285/96 i 300/72 wykonano ostrzał amunicją 7,62 × 39 mm PS. Wariant 275/120 wykazywał najwyższą plastyczność objawiającą się brakiem pęknięć w obszarze przestrzeliny oraz pomiędzy przestrzelinami (rys. 6a). Wariant 300/72 charakteryzowała niższa plastyczność w warunkach ostrzału objawiająca się fragmentacją blachy w pobliżu przestrzeliny (rys. 6b). Podobne efekty związane z niższą plastycznością w warunkach obciążeń udarowych obserwowano dla wariantu 285/96. Na podstawie wyników tych testów wytypowano wariant 275/120 dla blach do zastosowań w panelach eksperymentalnych.



Rys. 6. Fotografie miejsc ostrzału amunicją kal. 7,62 × 39 mm PS blach o grubości 3,0 mm: a) wariant 275/120, b) wariant 300/72

Fig. 6. Photographs of perforations of sheets of thickness 3.0 mm using cal. 7.62 × 39 mm PS ammunition: a) variant 275/120, b) variant 300/72

W tabeli 5 przedstawiono wyniki prób przestrzeleniowych blach o grubości 5,8 mm z zastosowaniem pocisku kal. 7,62 × 51 mm NATO Ball i 5,56 × 45 mm M193. Wyniki testów wykazały, że w przypadku blach o grubościach od 5 do 6 mm najlepszą skuteczność ochronną uzyskuje się przy zastosowaniu wygrzewania izotermicznego w temperaturze 225°C w czasie 96 godzin. Skuteczność ochronna stali w warunkach ostrzału wielokrotnego objawiała się m.in. brakiem pęknięć, w szczególności w pobliżu miejsca uderzenia pocisku (rys. 7). Świadczy to o zdolności materiału do pochłaniania i rozpraszania energii udarowej przy zachowaniu odporności na pękanie. Dla badanego zakresu grubości blach wykonano również testy dla wariantu 285/96. Blachy w trakcie testu nie wykazywały skłonności do pękania.

Tabela 5. Wyniki testów ostrzałem blach o grubości 5,8 mm (wariant 225/96) amunicją kal. 7,62 × 51 mm NATO Ball oraz 5,56 × 45 mm M193

Table 5. Firing tests results of sheets of thickness 5.8 mm (variant 225/96) using cal. 7.62 × 51 mm NATO Ball and 5.56 × 45 mm M193 ammunitions

Lp.	Prędkość pocisku, m/s	Wynik próby (P – przebicie, NP – brak przebicia)
1	847,4	NP
2	845,6	NP
3	852,9	NP
4	850,8	NP
5	848,8	NP
6	850,9	NP
7	851,6	NP
8	874,0	NP
9	853,7	NP
10	856,1	NP
M1	915,4	NP (M193)
M2	975,3	P (M193)
M3	958,2	P (M193)



Rys. 7. Fotografia miejsc ostrzału blachy o grubości 5,8 mm pociskiem NATO Ball i M193 (wariant 225/96)

Fig. 7. Photography of firing spots on sheet of thickness 5.8 mm using NATO Ball and M193 ammunition (variant 225/96)

6. MODYFIKACJA PANELI W ZAKRESIE DOBORU MATERIAŁÓW LAMINATOWYCH

Jednym z zagadnień dotyczących konstruowania ochronnych pancerzy pasywnych odpornych na przebiccie pociskami kumulacyjnymi jest niepowtarzalność długości strumienia generowanego przez te pociski. Powoduje to, że stosowane w postaci dodatkowych osłon konstrukcje przestrzennych układów warstwowych powinny uwzględniać skrajne wartości długości strumienia. Przyjmuje się, że zdolność penetracji litego pancerza stalowego RHA przez strumień kumulacyjny pocisku PG-7 wynosi od 330 do 420 mm przy działaniu prostopadłym strumienia do powierzchni ostrzału. Dodatkowym utrudnieniem zwiększającym masę pancerza jest wymóg spełnienia jednocześnie wysokiej odporności na penetrację strumienia pocisku PG-7 i wysokiego poziomu ochrony przed pociskami przeciwpancernymi np. poziomu 4 wg STANAG 4569 A.

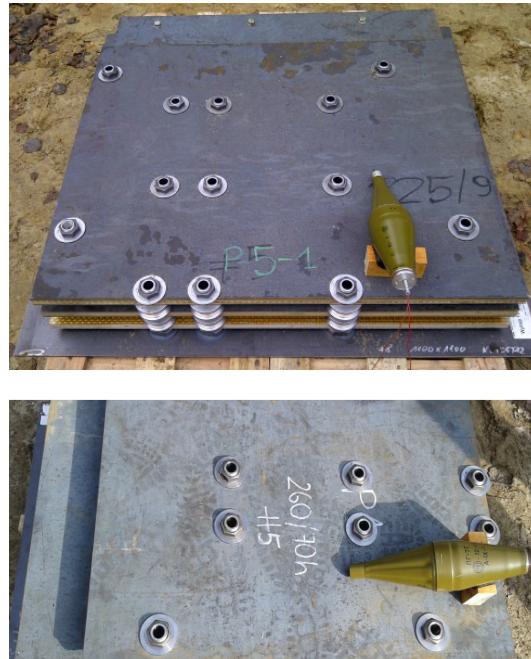
Chroniony patentem przedmiotowy panel ma konstrukcję warstwową stalowo-laminatową z przerwami dylatacyjnymi [11]. W znanych dotychczas rozwiązaniach materiałowych stosuje się warstwowe układy składające się z blach stalowych o podwyższonej twardości o strukturze martenzytycznej i z materiałów laminatowych. Wynika to z odmiennych mechanizmów niszczenia poszczególnych warstw pancerza przez pocisk przeciwpancerny i strumień kumulacyjny. Interesującym zagadnieniem było zbadanie zachowania się cieńszych blach stalowych o strukturze nanobainitu.

W eksperymentalnych panelach stosowano laminaty warstwowe oraz monolityczne. Gęstość stosowanych materiałów zawierała się w zakresie od 1,0 do 2,1 g/cm³. W finalnej konstrukcji w wyniku testów ostrzałem za pomocą granatnika RPG zastosowano laminat monolityczny [11].

7. WYNIKI BADANIA ODPORNOŚCI PANELI KOMPOZYTOWYCH NA ODDZIAŁYWANIE STRUMIENIA KUMULACYJNEGO

Testy odporności paneli eksperymentalnych wykonano dla modeli układów warstwowych analogicznych do wytwarzanych obecnie oraz na modelach mniejszych o wymiarach 530 × 900 mm. W układzie warstwowym stalowo-kompozytowym występują przerwy dylatacyjne. Całkowita wysokość (grubość) panelu wynosiła 135 mm. Panel eksperymentalny o wymiarach 530 × 900 mm stanowił fragment rzeczywistego panelu. Zachowano układ podpór i mocowań tak jak w oryginalnym rozwiązaniu. Jego wymiary umożliwiały wykonanie dwóch testów dla jednej próbki badawczej. Panel eksperymentalny w trakcie testu był usytuowany na blasze o grubości 8 mm ze stali pancernej 30PM symulującej korpus pojazdu. Pozytywny wynik testu oznaczał brak przebiccia blachy „świadek” odzwierciedlającej korpus.

W przypadku pozytywnego testu z zastosowaniem granatu PG-7W w kolejnym stosowano granat o większej mocy i zdolności penetracji PG-7WM. Badania przeprowadzono w warunkach przyłożenia granatu do powierzchni zewnętrznej blachy panelu pod kątem $18,5^\circ$. Metodyka badań była zgodna z procedurą odbiorową paneli u wytwórcy pojazdów opancerzonych. Kąt przyłożenia granatu wynika z usytuowania panelu na pojeździe (przednia część), co wskazuje prawdopodobny kąt ostrzału. Przykładowe fotografie paneli przed ostrzałem zamieszczono na rysunku 8.



Rys. 8. Fotografia paneli eksperymentalnych przed testem ostrzałem za pomocą granatu PG-7W

Fig. 8. Photography of experimental panels before firing test using PG-7W grenade

W tabeli 6 podano wyniki testów ostrzałem paneli. Pierwszy układ eksperymentalny przeszedł pozytywnie test w zakresie ochrony przed przebiciem, ale blachy stalowe wykazały zbyt niski poziom plastyczności. Następny panel po ostrzale granatem PG-7W przeszedł pozytywnie test i w związku z tym wykonano kolejny, stosując granat PG-7WM. Wynik po drugim ostrzale był także pozytywny w zakresie ochrony przed przebiciem oraz zachowania się zewnętrznej blachy o grubości 5 mm. Blachy o grubości 3 mm wykazały nieznaczne pęknięcia m.in. w obszarze otworów montażowych.

W kolejnych testach zmodyfikowano wariant technologii wytwarzania dla blach o grubości 3 mm na podstawie m.in. wyników badań właściwości mechanicznych i testów ostrzałem amunicją dla 1 poziomu STANAG 4569A. Na podstawie wyników badań rozwiązań konstrukcyjnych paneli różniących się wariantami obróbki cieplnej blach wytypowano optymalne rozwiązania dla poszczególnych warstw panelu. Wyniki badań wskazują, że zewnętrzna warstwa wykazuje największą zdolność do absorpcji energii strumienia bez pęknięć po zastosowaniu wariantu 275/120, 250/70 lub 285/96. Warstwy wewnętrzne wykazują prawidłowe zachowanie się w warunkach ostrzału pociskami PG po zastosowaniu wariantu 275/120 lub 250/70.

Tabela 6. Wyniki testów ostrzałem paneli eksperymentalnych pociskami PG

Table 6. Firing tests results of experimental panels using PG grenades

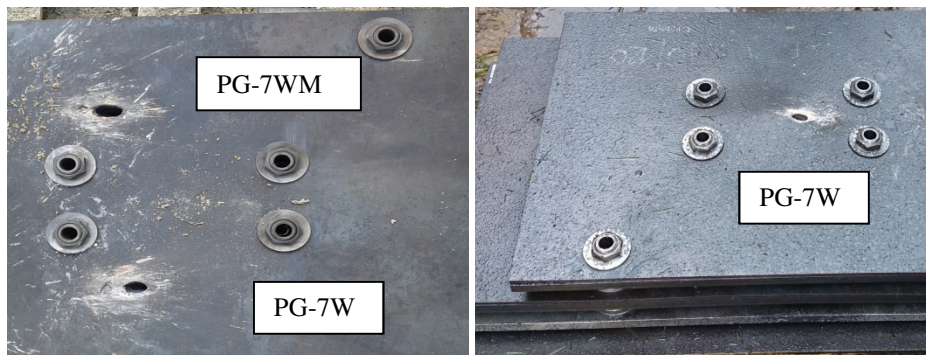
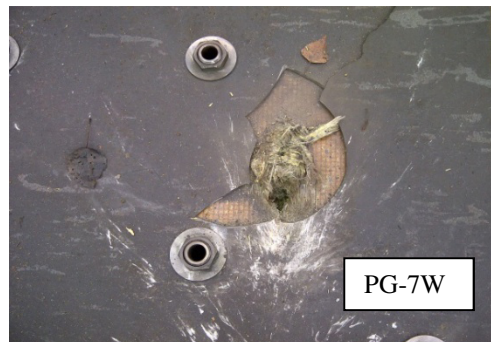
Oznaczenie panelu eksperymentalnego	Konstrukcja panelu (materiały poszczególnych warstw)	Rodzaj granatu / wynik testu P – pozytywny – brak przebiccia N – negatywny – przebiccie	Inne informacje
Panel nr 1 (wymiary rzeczywiste)	Podstawa blacha Al o gr. 20 mm Blachy o gr. 3 mm: 250/70 HM – 3 szt. Blacha o gr. 5 mm: 225/96 HM – 1 szt. Laminaty: PGR 20 – 2 szt. Gęstość pow. 207 kg/m ² Grubość panelu: 137 mm	1) PG-7W / P 2) PG-7WM / P	Pęknięcia blach
Panel nr 2 (wymiary rzeczywiste)	Podstawa blacha Al o gr. 20 mm Blachy o gr. 3 mm: 250/70 HM – 3 szt. Blacha o gr. 5 mm: 225/96 HM – 1 szt. Laminaty: PGR 20 – 3 szt. Gęstość pow. 228 kg/m ² Grubość panelu: 137 mm	1) PG-7W / P 2) PG-7WM / P	Pęknięcia blach
Panel nr 3 (wymiary rzeczywiste)	Podstawa blacha Al o gr. 20 mm Blachy o gr. 3 mm: 250/70 HM – 3 szt. Blacha o gr. 5 mm: 225/96 HM – 1 szt. Laminaty: PW – 2 szt. Gęstość pow. 195 kg/m ² Grubość panelu: 135 mm	1) PG-7W / P 2) PG-7W / P	Pęknięcia blach

<p>Panel nr 1 (P1) (530 × 900)</p>	<p>Podstawa blacha Al o gr. 20 mm Blachy o grubości 3 mm: 260/70 – 3 szt. Blacha o grubości 5 mm: 260/70 – 1 szt. Laminaty: PW – 2 szt. Gęstość pow. 195 kg/m² Grubość panelu: 135 mm</p>	<p>1) PG-7W / P</p>	<p>Pęknięcia blach</p>
<p>Panel nr 2 (P2) (530 × 900)</p>	<p>Podstawa blacha Al o gr. 20 mm Blachy o grubości 3 mm: 285/96 – 3 szt. Blacha o grubości 6 mm: 285/96 – 1 szt. Laminaty: PW – 2 szt. Gęstość pow. 203 kg/m² Grubość panelu: 136 mm</p>	<p>1) PG-7W / P 2) PG-7WM / P</p>	<p>Brak pęknięć blachy zewnętrznej w obszarze przebicia</p>
<p>Panel nr 3 (P3) (530 × 900)</p>	<p>Podstawa blacha Al o gr. 20 mm Blachy o gr. 3 mm: 260/70 – 3 szt. Blacha o gr. 6 mm: 275/120 – 1 szt. Laminaty: PW – 2 szt. Gęstość pow. 203 kg/m² Grubość panelu: 136 mm</p>	<p>1) PG-7W / P</p>	<p>Brak pęknięć blachy zewnętrznej w obszarze przebicia</p>
<p>Panel nr 4 (P4) (530 × 900)</p>	<p>Podstawa blacha Al o gr. 20 mm Blachy o gr. 3 mm: 250/70 – 3 szt. Blacha o gr. 6 mm: 250/70 – 1 szt. Laminaty: PW – 2 szt. Gęstość pow. 203 kg/m² Grubość panelu: 136 mm</p>	<p>1) PG-7W / P</p>	<p>Brak pęknięć blachy zewnętrznej w obszarze przebicia</p>
<p>Panel nr 5 (P5) (530 × 900)</p>	<p>Podstawa blacha Al o gr. 20 mm Blachy o gr. 3 mm: 285/96 – 3 szt. Blacha o gr. 6 mm: 285/96 – 1 szt. Laminaty: PW – 2 szt. Gęstość pow. 203 kg/m² Grubość panelu: 136 mm</p>	<p>1) PG-7W / P</p>	<p>Pęknięcia blach w obszarze przebicia i warstw wewnętrznych</p>

Panel nr 6 (P6) (530 × 900)	Podstawa blacha Al o gr. 20 mm Blachy o gr. 3 mm: 275/120 – 3 szt. Blacha o gr. 6 mm: 275/120 – 1 szt. Laminaty: PW – 2 szt. Gęstość pow. 203 kg/m ² Grubość panelu: 136 mm	1) PG-7W / P	Brak znaczących pęknięć blachy zewnętrznej w obszarze przebiccia i pozytywne zachowanie się blach w warstwach wewnętrznych
--	---	--------------	--

P – brak przebiccia płyty stalowej „świadek” o grubości 8 mm ze stali 30PM, na której usytuowano panel eksperymentalny; odległość panelu od płyty wynosiła ok. 20 mm,

N – przebiccie płyty „świadek”.



Rys. 9. Fotografie miejsc ostrzału paneli eksperymentalnych granatami PG-7W i PG-7WM

Fig. 9. Photography of firing spots of experimental panels using PG-7W and PG-7WM grenades

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie wyników badań balistycznych blach o grubościach od 3,0 do 6,0 mm wykonanych z innowacyjnego gatunku stali bainityczno-austenitycznej NANOS-BA[®] stwierdzono, że opracowane parametry obróbki cieplnej umożliwiają wytworzenie materiału o właściwościach mechanicznych wymaganych dla zastosowania tych blach do konstrukcji przestrzennego warstwowego panelu ochronnego. Blachy w panelach stalowo-kompozytowych powinny charakteryzować się wysoką odpornością na pękanie, ponieważ stanowią jednocześnie elementy konstrukcji. Do paneli wytypowano materiał o wytrzymałości 1600-1700 MPa, o wysokiej plastyczności określonej wydłużeniem min. 20% w statycznej próbie rozciągania i udarnością w temperaturze minus 40°C min. 12 J.

Modyfikacja konstrukcji paneli ochronnych w zakresie materiałów laminatowych o niższej gęstości doprowadziła do uzyskania mniejszej od obecnie stosowanej masy elementu ochronnego przy pozytywnym wyniku testów odporności na przebicie.

Dla paneli nowej generacji uzyskano pozytywne wyniki testów ostrzałem za pomocą granatów PG-7W i PG-7WM przy redukcji masy powierzchniowej o ok. 20% (z ok. 250 do 200 kg/m²). Redukcja masy wynika jednocześnie z zastosowania cieńszych blach stalowych oraz materiałów laminatowych o mniejszej gęstości od stosowanych dotychczas.

Przedstawione wyniki badań właściwości blach ze stali nanostrukturalnej wykazały brak jednoznacznej korelacji pomiędzy wynikami eksperymentów statycznych a wynikami testów ostrzałem. W statycznej próbie rozciągania uzyskano wysoki poziom wydłużenia przekraczający 20% przy wytrzymałości powyżej 1600 MPa.

Materiał o optymalnym zestawie mechanicznych właściwości statycznych (np. wysoka wytrzymałość i wartość ilorazu $R_m/R_{0,2}$) i wysokiej odporności na przebicie pociskami przeciwpancernymi nie zawsze wykazywał wymaganą odporność na pękanie w warunkach obciążeń dynamicznych podczas oddziaływania z udarową energią strumienia kumulacyjnego. Potwierdza to tezę, że niezbędne jest wykonywanie testów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych w odniesieniu do sposobu i rodzaju naprężeń oraz odkształceń (wywołanych przez strumień kumulacyjny), a także wymiarów próbek (zbliżone do wymiarów panelu ok. 1 × 1 m²).



Praca dofinansowana ze środków NCBiR w ramach programu „INNOTECH” w ścieżce programowej IN-TECH (projekt nr 150443 pt.: „Opracowanie nowoczesnej konstrukcji modułu pancierza odpornego na udarowe oddziaływanie strumienia kumulacyjnego i pocisków”).

LITERATURA

- [1] Dąbrowski H., *Strukturalno-statystyczne kryterium wyężenia materiałów wielofazowych na przykładzie polimerowych kompozytów włóknistych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.
- [2] Askeland R., *The Science and Engineering of Materials*, PWS-Kent Publishing Company, Boston, 1984.
- [3] Kaczorowski M., Krzyńska A., *Konstrukcyjne materiały metalowe, ceramiczne i kompozytowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2008.
- [4] Starczewski L., Szczęch S., Tudyka D., *Badania stali pancernych w aspekcie ich skuteczności ochronnej*, *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, nr 1, s. 110-117, 2010.
- [5] Bhadeshia H., *Hard bainite*, *TMS-The Minerals, Metals and Materials Society*, vol. 1, pp. 469-484, 2005.
- [6] Marcisz J., Garbarz B., Burian W., Adamczyk M., Wiśniewski A., *New generation maraging steel and high-carbon bainitic steel for armours*, *Proceedings of the 26th International Symposium on Ballistics*, Miami, USA, pp. 1595-1606, 2011.
- [7] Marcisz J., Garbarz B., Burian W., Stępień J. and Starczewski L., *Ballistic testing of nano-precipitation hardened and nano-duplex steels*, *Proceedings of the 27th International Symposium on Ballistics*, 22-26 April 2013, Freiburg, Germany, pp. 1834-1845, 2013.
- [8] Marcisz J., Garbarz B., Burian W., Stępień J., Starczewski L., Nyc R., *Badania balistyczne blach wykonanych z innowacyjnego gatunku stali bainitycznej NANOS-BA[®]*, *Materiały XIX Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej: Problemy Rozwoju, Produkcji i Eksploatacji Techniki Uzbrojenia, UZBROJENIE 2013*, Jachranka, 11-14.06.2013, p. 84, 2013.
- [9] Garbarz B., Woźniak D., Burian W., Niżnik B., Palus R., *Development of industrial technology of plate production from ultra-hard high-carbon bainitic steel with the use of semi-industrial simulation method*, *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 64, nr 1, s. 129-137, 2012.
- [10] Starczewski L., *Ballistic Testing of High – Carbon Bainitic Steel and Assessment of Application of this Steel for Construction of Armours*, praca niepublikowana, WITPiS, październik 2011.
- [11] MIKANIT – Małgorzata Wnuk, *Zgłoszenie patentowe nr WN/37/P.392969 pn. Moduł pancerza ochronnego*, 17.11.2010.

Steel-Composite Armour Panels Against RPG with the Use of Nanostructured Bainite-Austenite Steel Plates

Jarosław MARCISZ, Wojciech BURIAN, Jerzy STĘPIEŃ,
Lech STARCZEWSKI, Małgorzata WNUK

Abstract. Test results of perforation resistance of experimental steel-composite panels containing nanostructured bainite-austenite (NANOS-BA[®]) steel plates against RPG grenade are presented. Experimental panels were modified in the range of thickness of plates and grade of steel and in a type of composite materials. In firing tests with PG-7W and PG-7WM grenades, the high protection efficiency at about 20% reduction in areal density in comparison with panels used at present were achieved. On the basis of firing test results of steel plates used in experimental panels, proper level of toughness and strength at high resistance to piercing was selected. For the final design of experimental panels, different properties of steel plates for particular layers of the panel were proposed. Laminated materials of density in the range of 1.0÷2.1 g/cm³ were used for experimental steel composite panels.

Keywords: materials science, RPG grenade, passive armour, nanostructured steel