



**OPTYMALIZACJA WŁAŚCIWOŚCI BALISTYCZNYCH BLACH ZE STALI  
NANOSTRUKTURALNEJ BAINITYCZNEJ PRZEZNACZONYCH  
NA OPANCERZENIE KONTENERA LOOK**

***OPTIMISATION OF BALLISTIC PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED  
BAINITIC STEEL PLATES FOR CONTAINER ARMOUR SYSTEM***

Jarosław MARCISZ, Bogdan GARBARZ,  
Władysław ZALECKI, Zofia KANIA-PIFCZYK  
Sieć Badawcza ŁUKASIEWICZ Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica  
*ŁUKASIEWICZ Research Network, The Institute of Iron Metallurgy, named after Stanislaw Staszic*

Lech STARCZEWSKI  
Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej  
*Military Institute of Armour and Vehicle Technology*

Marcin GOŁUŃSKI  
Zakłady Mechaniczne „Tarnów” S.A.  
*Mechanical Works „Tarnów” S.A.*

*Author's e-mail address: Jaroslaw.Marcisz@imz.pl; ORCID: 0000-0002-0001-2197*

DOI 10.5604/01.3001.0013.7325

**Streszczenie:** W celu podwyższenia właściwości eksploatacyjnych kontenera obserwacyjno-obronnego LOOK opracowywane jest innowacyjne opancerzenie, którego elementy będą wykonane z blach ze stali nanostrukturalnej bainitycznej, co zapewni poziom 2 ochrony wg STANAG 4569. Z uwagi na odmienne właściwości mechaniczne i technologiczne tych blach w odniesieniu do blach pancernych stosowanych obecnie, modyfikacji uległa konstrukcja opancerzenia kontenera. Artykuł zawiera wyniki badań charakterystyk materiałowych oraz testów ostrzałem blach ze stali nanostrukturalnej wytworzonych w warunkach półprzemysłowych. W celu optymalizacji parametrów obróbki cieplnej blach wykonano badania kinetyki przemian fazowych, a następnie dla różnych wariantów obróbki przeprowadzono pomiary właściwości mechanicznych oraz analizę zmian mikrostruktury i właściwości w miejscach oddziaływań pocisków w trakcie testów ostrzałem. Przedstawione badania poprzedzają uruchomienie procesu produkcji blach arkuszowych z nowego gatunku stali do

**Abstract:** An innovative armour system containing plates made of nanostructured bainite steel is under development to improve operating properties of a light armoured observation-protective container (LAOC) providing the 2nd protection level according to STANAG 4569. Armour system solution of the container has been modified because the new plates have different mechanical and technological properties than currently used armour plates. The paper presents results of investigation of material characteristics and firing tests of plates made of nanostructured steel in the semi-industrial scale. To optimise parameters of heat treatment of the plates the kinetics of phase transformation was examined, and mechanical properties were measured, and changes in microstructure in the area of projectile interaction at firing tests were analysed for different variants of treatment. The reported investigations precede the industrial scale production process for plates made of the new grade steel designed for the armour system of LAOC. Optimisation of mechanical proper-

produkcji systemu opancerzenia kontenera LO-OK. Optymalizację właściwości mechanicznych blach wykonano przez dobór następujących parametrów wytwarzania: składu chemicznego stali, przeróbki plastycznej i wstępnej obróbki cieplnej oraz temperatury i czasu finalnej obróbki cieplnej (wygrzewania izotermicznego). W badaniach zwrócono uwagę na wpływ segregacji pierwiastków stopowych i domieszkowych na właściwości ochronne blach. W wyniku zastosowania temperatury wygrzewania w zakresie 210-225°C (temperatura  $M_s$  = ok. 200°C dla szybkości chłodzenia 1-2 °C/s) i czasu odpowiednio w przedziale 120-70 godzin uzyskano następujące właściwości mechaniczne materiału:  $R_{p0,2}$  1400-1500 MPa,  $R_m$  2000-2150 MPa; A 10-13%; KV (w temp. otoczenia) 10-16 J oraz twardość 590-610 HV10 (53-54 HRC). Mikrostrukturę blach stanowił bezwęglkowy nanobainit listwowy oraz austenit resztkowy w ilości 10-21%. W testach ostrzałem zastosowano blachy o grubości 6,3 i 7,5 mm oraz amunicję 5,56x45 mm M193 i 7,62x51 mm API BZ. Na podstawie wyników tych testów oraz badań mikrostruktury w miejscach ostrzału stwierdzono występowanie zjawisk świadczących o wysokiej skuteczności ochronnej badanych blach, przejawiających się dużą zdolnością do pochłaniania i rozpraszania energii pocisku bez skłonności do pęknięcia. Na podstawie wyników badań właściwości mechanicznych i testów ostrzałem blach eksperymentalnych, opracowano skład chemiczny stali nanostrukturalnej bainitycznej, dostosowany do wykonania w warunkach przemysłowych blach o grubości w zakresie 6 – 8 mm. Przeprowadzono analizę możliwości obniżenia masy opancerzenia kontenera na podstawie wyników badań blach ze stali nanostrukturalnej wytworzonych w warunkach półprzemysłowych. Na podstawie analizy konstrukcji i warunków użytkowania kontenera wskazano obszary newralgiczne z punktu widzenia ochrony balistycznej, które poddane będą testom ostrzałem. Badania balistyczne zostaną wykonane na segmentach kontenera reprezentujących wytypowane obszary newralgiczne.

**Słowa kluczowe:** stal nanostrukturalna, ochrona balistyczna, kontener opancerzony

## 1. Wstęp

Lekki opancerzony kontener obserwacyjno-obronny (LOOK) jest mobilnym ele-

mentem. Wykonanie i testy ostrzałem tych płyt zostało przeprowadzone przez dobór następujących parametrów wytwarzania: składu chemicznego stali, procesu obróbki cieplnej i czasu obróbki cieplnej (wygrzewania izotermicznego). Wpływ segregacji pierwiastków stopowych i domieszkowych na właściwości ochronne płyt jest wskazany. W wyniku zastosowania temperatury wygrzewania w zakresie 210-225°C ( $M_s$  temperatura jest ok. 200°C przy szybkości chłodzenia 1-2°C/s) i czasu odpowiednio w przedziale 120-70 godzin uzyskano następujące właściwości mechaniczne materiału:  $YS_{0,2}$  (wytrzymałość) 1400-1500 MPa; UTS (wytrzymałość ultimate tensile strength) 2000-2150 MPa; TE (całkowite wydłużenie) 10-13%, odporność na uderzenie KV w temperaturze pokojowej 10-16 J oraz twardość 590-610 HV (53-54 HRC). Mikrostruktura płyt składa się z wolframbrytowego nanobainitu i 10-21% (frakcja objętościowa) austenitu. Płyty o grubości 6,3 i 7,5 mm oraz amunicja 5,56x45 mm M193 i 7,62x51 mm API BZ zostały użyte w testach ostrzałem. Na podstawie wyników testów ostrzałem i badania mikrostruktury w miejscach ostrzału zidentyfikowano zjawiska świadczące o wysokiej skuteczności ochrony balistycznej badanych płyt, przejawiających się dużą zdolnością do pochłaniania i rozpraszania energii pocisku bez podatności na pęknięcia. Na podstawie wyników badań właściwości mechanicznych i testów ostrzałem płyt eksperymentalnych, opracowano skład chemiczny stali nanostrukturalnej bainitycznej, dostosowanej do produkcji płyt o grubości w zakresie 6-8 mm. Przeprowadzono analizę możliwości zmniejszenia masy systemu obrony kontenera na podstawie wyników badań płyt ze stali nanostrukturalnej wykonanych w warunkach półprzemysłowych. Na podstawie analizy konstrukcji i warunków użytkowania kontenera wskazano obszary newralgiczne z punktu widzenia ochrony balistycznej, które zostaną poddane testom ostrzałem. Badania balistyczne zostaną wykonane na segmentach kontenera reprezentujących wytypowane obszary newralgiczne.

**Keywords:** nanostructured steel, ballistic protection, armoured container

## 1. Introduction

A light armoured observation-protective container (LAOC) is a mobile component

mentem infrastruktury przeznaczonym do zabezpieczenia i ochrony żołnierzy lub funkcjonariuszy pełniących zadania operacyjne (np. punktów kontrolno-obronnych, baz lub innych obiektów strategicznych, lotnisk) w okresie pokojowym jak i podczas działań wojennych lub stabilizacyjnych. Opancerzenie obecnie wytwarzanych kontenerów stanowią blachy ze stali pancernych martenzytycznych w klasie twardości 500 HB lub wyższej. Aby spełnić wymagania ochronne kontenera, stosuje się blachy o grubości 12 mm zapewniające spełnienie 2 poziomu ochrony zgodnie z NATO STANAG 4569 (NATO, 2016). Zaplanowano wykonanie kontenera spełniającego 2 poziom ochrony balistycznej przy założeniu redukcji masy opancerzenia. W tym celu zaproponowano zastosowanie blach z nanostrukturalnej stali bainitycznej, które charakteryzują się wysoką odpornością na punktowe wysokoenergetyczne oddziaływania udarowe. Proponowane blachy wykazują wysoką skuteczność ochronną oraz niską skłonność do generowania odłamków wtórnych. Innowacyjny gatunek stali nanostrukturalnej bainitycznej charakteryzuje się wysoką zdolnością do pochłaniania i rozpraszania energii udarowej, a zmiany właściwości materiału w miejscu ostrzału zachodzą w bardzo małej objętości, co ma zasadnicze znaczenie przy uderzeniach wielokrotnych.

Wyroby z nanostrukturalnych stali bainitycznych, w tym do zastosowań ochronnych jako blachy pancerne, są przedmiotem badań wielu znanych ośrodków światowych (Bhadeshia i Edmonds, 1979; Bhadeshia i Edmonds, 1983; Bhadeshia i Christian, 1990; Bhadeshia, 2005; Bhadeshia i in. 2010; Wenyan i in., 1997; Caballero i in., 2002; Garcia-Mateo i in, 2003; Caballero i Bhadeshia, 2004, Garcia-Mateo i Caballero, 2005). Ponadto, wciąż poszukiwane są nowe zastosowania tych stali i w związku z tym, technologie ich wytwarzania i przetwarzania są obecnie na etapie opracowywania i udoskonalania. Unikatowy zestaw właściwości użytkowych wyrobów ze stali nanostrukturalnej nie został dotychczas uzyskany w znanych i stosowanych powszechnie gatunkach

of infrastructure designated to provide security and protection for soldiers or servicemen at operational tasks (e.g. checking-defensive posts, bases and other strategic objects, airfields) during the peacetime and also at military or stabilising operations. The armour plates of currently produced containers are made of armour martensite steels on the grade of hardness of 500 HB or higher. In order to comply with the container's protective requirements the plates of 12 mm thickness are used what provides the 2 class of protection according to NATO STANAG 4569 (NATO, 2016). A design of the container complying with the 2 class of ballistic protection at reduced mass of the armour was proposed. For this reason the plates made of nanostructured bainitic steel are proposed, as they are characterised by a high resistance against high-energetic point impacts. The proposed plates provide a high level of protecting efficiency at low tendency for secondary fragmentation. The innovative grade of the nanostructured steel has high capacities for absorption and dissipation of impact energy, and the change of material properties in the point of hitting takes place in very limited volume, what is important at multiple impacts.

The articles made of nanostructured bainitic steels, including those designated for protective applications, have been investigated by many renowned world centres (Bhadeshia & Edmonds, 1979; Bhadeshia & Edmonds, 1983; Bhadeshia & Christian, 1990; Bhadeshia, 2005; Bhadeshia et al. 2010; Wenyan et al., 1997; Caballero et al., 2002; Garcia-Mateo et al, 2003; Caballero & Bhadeshia, 2004, Garcia-Mateo & Caballero, 2005). Moreover, technologies of their production and processing have been currently developed and improved as a search for new applications of these steels is continued. A unique combination of useful characteristics for articles made of the nanostructured steel has not been yet reached by the known and commonly used grades of structural steels

stali konstrukcyjnych (Garbarz i Niżnik–Harańczyk, 2015; Garbarz i Burian, 2014, Garbarz i in., 2015; Marcisz i in., 2018). Dodatkowo, wyniki badań mikrostruktury w obszarach oddziaływania udarowego pocisków potwierdziły zdolność nowego materiału o strukturze nanobainitu i austenitu resztkowego do hamowania rozprzestrzeniania się mikropęknięć. Cechą pozytywną stali nanostrukturalnych jest stosunkowo niewielka głębokość warstwy, w której w warunkach ostrzału zachodzą zmiany mikrostruktury (Marcisz i in. 2013, Burian i in., 2014; Marcisz i in. 2014; Marcisz i in., 2015). Powstawanie w stali nanobainitycznej pasm ścinania skłonnych do mikropęknięć jest zjawiskiem typowym i trudnym (w zasadzie niemożliwym) do wyeliminowania, szczególnie dla materiałów wysokowytrzymałych poddanych wysokoenergetycznemu odkształceniu udarowemu (Garbarz i in., 2011, Marcisz i in., 2017).

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych i mikrostruktury stali nanostrukturalnej bainitycznej, dedykowanej dla opancerzenia kontenera. Na podstawie wyników badań właściwości wytypowano i wytworzono materiał do testów ostrzałem. Przeprowadzono testy ostrzałem oraz szczegółowe badania mikrostruktury w miejscach oddziaływania pocisków. Badania te, przeprowadzone na materiale wytworzonym w skali półprzemysłowej, poprzedzają etap produkcji innowacyjnych blach pancernych arkuszowych w skali przemysłowej. Przedstawiono analizę zmian konstrukcji kontenera oraz newralgicznych miejsc z punktu widzenia ochrony balistycznej w związku z zastosowaniem nowego gatunku stali.

## 2. Charakterystyka materiału i zakres badań

Materiał do badań wytworzono w warunkach półprzemysłowych z zastosowaniem urządzeń znajdujących się w Sieci Badawczej ŁUKASIEWICZ Instytucie Metalurgii Żelaza (Ł-IMŻ). Wlewki o masie ok. 70 kg i wymiarach przekroju poprzecz-

(Garbarz i Niżnik–Harańczyk, 2015; Garbarz & Burian, 2014, Garbarz et al., 2015; Marcisz et al., 2018). Additionally, the results of studies on the microstructure of material subjected to the impact of projectile have confirmed the ability of the new material, of the nanobainite and residual austenite structure, in reduction of microcracks propagation. A relatively low depth of the layer where the microstructure is changed at impacts is a positive feature of the nanostructured steels (Marcisz et al. 2013, Burian et al., 2014; Marcisz et al. 2014; Marcisz et al., 2015). Creation of shearing streaks in the nanobainite steel which have a tendency for generation of micro-cracks is a typical effect that is difficult for elimination (it is not possible in fact), especially for the high-strength materials subjected to a high-energetic impact strain (Garbarz et al., 2011, Marcisz et al., 2017).

The paper presents the results of investigations on mechanical properties and on the microstructure of nanostructured bainitic steel dedicated for the container armour. Basing on the results of investigations the material was selected and produced for firing tests. The firing tests were performed together with detailed analyses of the microstructure in places of projectiles impacts. These tests performed for the material produced in a semi-industrial scale precede the full scale industrial production of innovative armour plates. The paper presents the analysis of changes in container's design and its sensitive areas regarding the ballistic protection in connection with the application of the new brand of steel.

## 2. Material Parameters and Scope of Tests

Material to be tested was produced in semi-industrial conditions using equipment owned by the ŁUKASIEWICZ Research Network of the Iron Metallurgy Institute (L-IMI). The slabs having the mass of ca. 70 kg and cross-section di-

nego 150x60 mm oraz o założonym składzie chemicznym wykonano w próżniowym piecu indukcyjnym (rys. 1). Wlewki po odlaniu nie były poddane procesowi ujednorodniania. Walcowanie wlewków zrealizowano w linii do półprzemysłowej symulacji walcowania (LPS/B), z zastosowaniem jednoklatkowej walcarki duo nawrotnej o średnicy walców 550 mm. W wyniku walcowania na gorąco uzyskano płaskowniki o grubości w zakresie 6-12 mm i szerokości ok. 165 mm (rys. 2).

W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny materiału przygotowanego do badań opracowany w oparciu o dotychczasowe doświadczenia w zakresie zastosowań stali nanostrukturalnych stanowiących elementy opancerzenia oraz wyników badań właściwości statycznych i dynamicznych tej grupy gatunkowej stali. Opracowując skład chemiczny, szczególną uwagę zwrócono na następujące zagadnienia dotyczące właściwości użytkowych oraz technologii produkcji blach ze stali nanostrukturalnej dedykowanych dla opancerzenia kontenera:

- uzyskanie wytrzymałości na rozciąganie powyżej 2 GPa przy wydłużeniu w statycznej próbie rozciągania min. 12% i uderności KV w temp. pokojowej min. 12 J dla próbki 10x10x55 mm,
- możliwość chłodzenia blach o grubości w zakresie 6-8 mm od temperatury austenitowania do temperatury przemiany izotermicznej z zachowaniem struktury austenitycznej, swobodnie w powietrzu lub w sposób przyspieszony z użyciem wentylatorów,
- jak najniższa stopowość stali (głównie dotyczy to zawartości Cr i Mo),
- dążenie do maksymalnego skrócenia czasu wygrzewania izotermicznego.

mensions 150x60 mm and accepted chemical composition were made in a vacuum inductive furnace (Fig. 1). After the casting the slabs were not subjected to any homogeneous processing. The slabs were rolled in a mill designed for semi-industrial simulation of slabbing (MSS-B) using one section of duo reversible rolling mill with the diameter of rolls equal to 550 mm. In effect of hot rolling the plates were received in thickness of 6-12 mm and breadth of ca. 165 mm (Fig. 2).

Table 1 shows the chemical composition of the material prepared for testing prepared on the basis of acquired experience on applications of the nanostructured steels for armour system components and on the results of static and dynamic tests of this grade steel family. At preparation of the chemical composition a special attention was paid to following parameters of usability and production technology of nanostructured steel plates dedicated for container armour systems:

- Provision of the tensile strength above 2 GPa at elongation ratio for static tension test min. 12%, and the impact strength KV at room temperature of min. 12 J for the sample 10x10x55 mm,
- Possibility of cooling the sheets of thickness 6-8 mm, from the austenitic phase temperature to the temperature of isothermal transition at preservation of austenitic structure, at free air or at enforced air flow,
- Lowest content of steel alloying components (mainly Cr and Mo),
- Achieving maximal reduction of the isothermal annealing time.

Tabela 1. Skład chemiczny materiału do badań, % masowe

Table 1. Chemical composition of tested material, % - mass percentages

Analiza wytopowa / Casting analysis

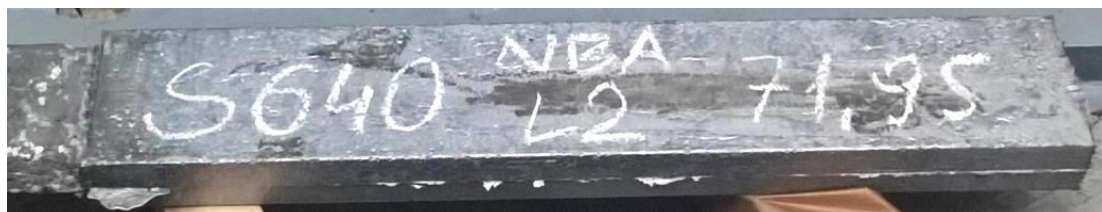
Nr wytopu No. of cast	Materiał badań Tested material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Alc
640	próbka wytopowa Casting sample	0,58	1,69	1,57	0,009	0,008	1,35	0,44	0,039

Analiza kontrolna / Checking analysis

Nr wytopu No. of cast	Nominalna grubość płaskownika, mm Flat bar nominal thickness	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Alc
640	6,0	0,60	1,67	1,61	0,008	0,011	1,33	0,45	0,041
	12,0	0,58	1,65	1,56	0,009	0,009	1,37	0,43	0,035

W celu wyznaczenia temperatur charakterystycznych oraz krzywych CTPc badanego materiału, przeprowadzono badania dylatometryczne. Diagram przemian fazowych zachodzących w trakcie ciągłego chłodzenia stali zamieszczono na rys. 3.

In order to identify the characteristic temperatures and the curves of CTP for tested material the dilatometric tests were carried out. Diagram of phasal transitions occurring at the continuous cooling of the steel is shown in Fig. 3.



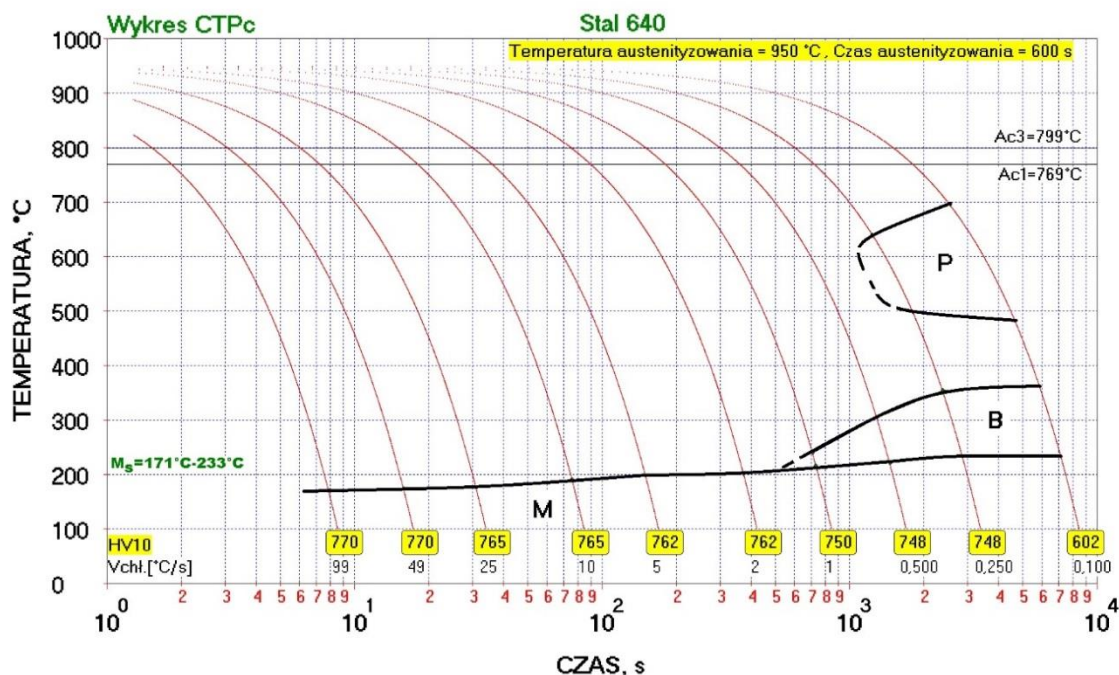
Rys. 1. Fotografia wlewka ze stali nanostrukturalnej

Fig. 1. Picture of a slab made of nanostructured steel



Rys. 2. Fotografia płaskownika o grubości nominalnej 8 mm ze stali nanostrukturalnej

Fig. 2. Picture of a flat bar with nominal thickness of 8 mm made of nanostructured steel



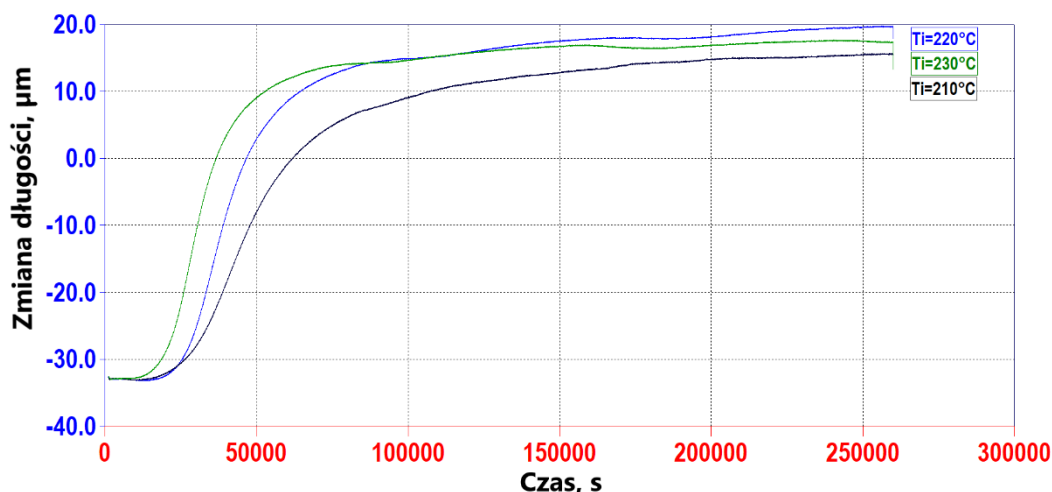
Rys. 3. Diagram przemian fazowych zachodzących w trakcie ciągłego chłodzenia stali nanostrukturalnej bainitycznej – wytop S640

Fig. 3. Diagram of phasal transitions for bainitic nano-structural steel continuous cooling – cast S640

Temperatura austenizowania / The austenitization temperature  
 Czas austenizowania / The austenitization time, Czas / Time

Temperatura  $M_s$  dla zakresu szybkości chłodzenia stosowanego w trakcie procesu finalnej obróbki cieplnej wynosi ok. 200°C. Krytyczna prędkość chłodzenia po austenizowaniu, zapewniająca zachowanie austenitu do temperatury obróbki izotermicznej, wynosi ok. 1°C/s. Przeprowadzono eksperymenty wygrzewania izotermicznego w temperaturach: 210°C, 220°C i 230°C, w wyniku których wyznaczono krzywe kinetyki przemiany izotermicznej (rys. 4). Krzywe kinetyki wskazują, że dla zastosowanego czasu 70 godzin, przemiana zachodzi w znacznym stopniu we wszystkich wymienionych temperaturach. Czas do rozpoczęcia przemiany wynosił dla temperatur 210 i 220°C ok. 4 godziny, a dla temperatury 230°C ok. 2 godziny. W wyniku wygrzewania izotermicznego w temperaturach 210-230°C uzyskano typową mikrostrukturę nanolistwowego bainitu bezwęglkowego oraz austenit reszkowy. Twardość próbek była zbliżona i wynosiła 603-611 HV.

Temperature  $M_s$  for cooling rates used at the final thermal processing is ca. 200°C. The critical rate of cooling after the austenitization, which provides the presence of the austenite to the temperature of the isothermal processing, is ca. 1°C/s. The experimental trials of isothermal annealing were carried out for temperatures 210°C, 220°C and 230°C to establish the curves of isothermal transition kinetics (Fig. 4). The curves of the kinetics indicate that for the applied time of 70 hours the transition takes place in a significant degree at each of the above temperatures. The time needed for the initiation of the transition was ca. 4 hours for temperatures 210 and 220°C, and ca. 2 hours for 230°C. In effect of the isothermal annealing at temperatures 210-230°C the typical microstructure of nano-lathy carbide-free bainite and residual austenite was received. The samples had similar hardness of 603-611 HV.



Rys. 4. Krzywe kinetyki przemiany izotermicznej w temperaturach 210, 220 i 230°C.  
Wytop S640

Fig. 4. Curves of the isothermal transition kinetics at temperatures 210, 220 and 230°C.  
Cast S640

Zmiana długości / Change of length, Czas / Time

### 3. Wyniki badań i analiz

#### 3.1. Wyniki badań właściwości mechanicznych

Na podstawie wyników badań dylatometrycznych przeprowadzono eksperymenty obróbki cieplnej próbek wytrzymałościowych i udarnościowych. Próbkę nagrzewano do temperatury 950°C przez 10 minut i wygrzewano przez 30 minut, a następnie chłodzono w powietrzu do temperatury przemiany izotermicznej i wygrzewano izotermicznie w temperaturach z zakresu 210-225°C w czasie od 70 do 120 godzin. Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych w statycznej próbie rozciągania zamieszczono w tabeli 2, a udarność KV w temperaturze otoczenia w tablicy 3. Biorąc pod uwagę wartości właściwości mechanicznych, charakter krzywych rozciągania w zakresie umocnienia i po przekroczeniu siły maksymalnej (rys. 5), udarność oraz wartość ilorazu  $R_m/R_{p0,2}$ , wytypowano warianty do testów ostrzałem. Założone właściwości mechaniczne:  $R_m$  min. 2000 MPa, A min. 12% i udarność KV min. 12 J w temp. otoczenia zostały spełnione dla większości zastosowanych wariantów obróbki cieplnej. Na rys. 6 zamieszczono przykładowe wyniki badań

### 3. Results of Tests and Analyses

#### 3.1. Results of Mechanical Tests

Basing on the results of dilatometric tests the experiments on thermal processing were carried out for the strength and impact samples. The samples were heated to temperature of 950°C by 10 minutes and kept in the temperature by 30 minutes to be cooled next in the air to the isothermal transition temperature and kept at temperatures 210-225°C within 70 to 120 hours. The results of mechanical characteristics measurements for the static tensile trial are presented in table 2, and for the impact strength KV at the ambient temperature in table 3. Values of mechanical characteristics, the character of tensile curves in the region of strengthening and after crossing the maximal force (Fig. 5), and the impact strength, and the value of the ratio  $R_m/R_{p0,2}$  were considered to select options for firing tests. The accepted mechanical properties for  $R_m$  min. 2000 MPa, A min. 12% and impact strength KV min. 12 J at the ambient temperature were met for most of applied options of thermal processing. Fig. 6 shows exemplary results of



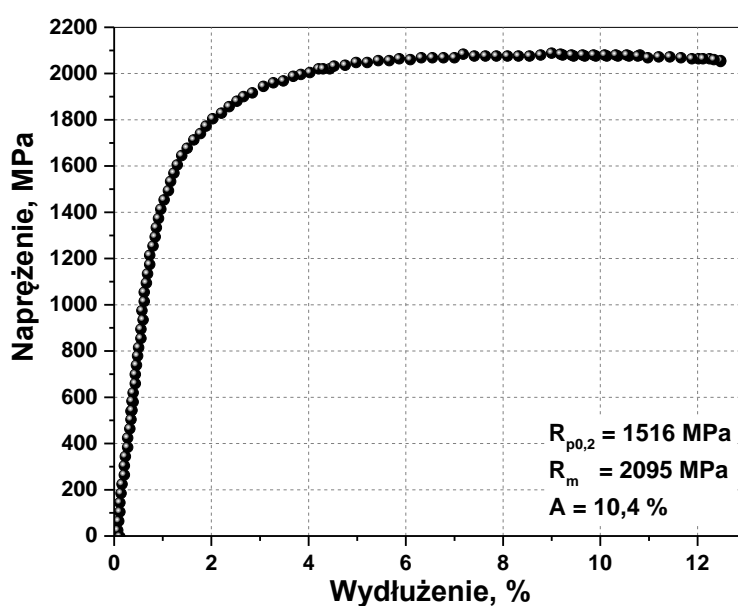
morfologii przełomu próbki uderzeniowej. Wskazują one na brak obszarów o kruchym rodzaju przełomu oraz innych cech mikrostruktury o negatywnym wpływie na ciągliwość stali.

fracture morphology tests for the impact strength sample. They indicate any lack of zones of the frail type fracture, or other features of microstructure having a negative impact into the ductility of the steel.

Tabela 2. Wyniki badań właściwości mechanicznych w statycznej próbie rozciągania i pomiarów twardości próbek poddanych różnym wariantom obróbki cieplnej (oc). Wytop S640

Table 2. Results of mechanical tests for static tensile trial and measurements of hardness for the samples subjected to various options of thermal treatment (TT). Cast S640

Oznaczenie wariantu oc: temp. w °C/czas w h <i>Designation of TT option Temp. in °C/time in h</i>	R <sub>p0,2</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A <sub>5</sub> , %	A <sub>gt</sub> , %	A <sub>5</sub> -A <sub>gt</sub> , %	R <sub>m</sub> /R <sub>0,2</sub>	Twardość HV10/HRC <i>Hardness</i>
210/116	1470	2072	11,5	8,7	2,8	1,41	612 / 55
	1467	2097	12,5	9,0	3,5	1,43	
210/120	1497	2109	8,0	7,7	0,3	1,41	604 / 53
	1451	2107	12,2	8,3	3,9	1,45	
215/96	1455	2068	11,7	8,3	3,4	1,42	610 / 55
	1457	2091	12,5	8,6	3,9	1,44	
220/72	1436	2132	11,6	8,2	3,4	1,48	610 / 54
220/94	1516	2095	10,4	9,1	1,3	1,38	606 / 54
	1533	2112	10,7	8,6	2,1	1,38	
220/96	1485	2081	13,1	8,0	5,1	1,40	612 / 54
	1535	2106	12,2	8,1	4,1	1,37	
225/70	1502	1997	13,5	8,2	5,3	1,33	597 / 54
	1532	1989	13,2	7,6	5,6	1,30	



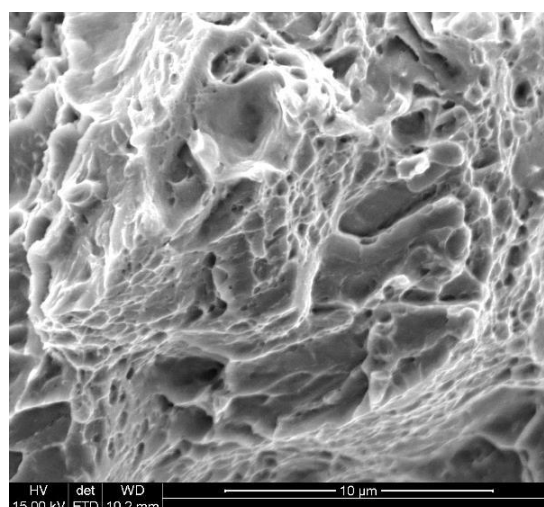
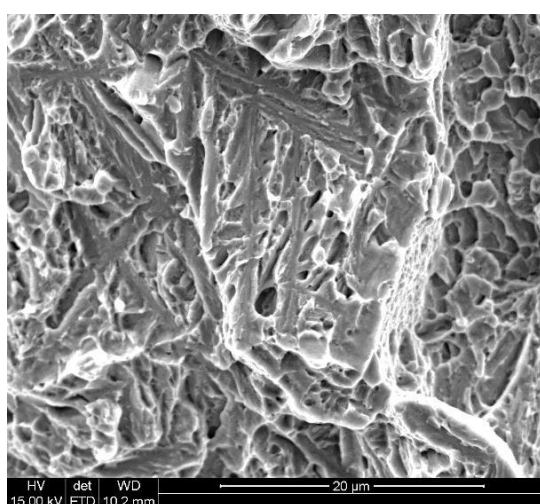
**Rys. 5. Krzywa rozciągania statycznego stali nanostrukturalnej bainitycznej. Wytop 640, wariant 220°C/94 h**

**Fig. 5. Curve of static tension for bainitic nanostructured steel. Cast 640, option 220°C/94 h**  
 Napężenie / Stress,  
 Wydłużenie / Elongation

Wariant <i>Option</i>	Energia łamania, J <i>Energy of breaking, J</i>
210/116	12
	15
210/120	12
	15
215/96	11
	11
220/96	10
	12
225/96	16
	13

Tabela 3. Wyniki pomiarów udarności Charpy-V w temperaturze otoczenia. Stal nanostrukturalna bainityczna, wytop nr 640, wymiary próbki 10x10x55 mm (temperatura badania 22°C)

*Table 3. Results of measurements of Charpy-V impact strength at ambient temperature. Bainitic nanostructured steel, cast nr 640, size of sample 10x10x55 mm (testing temperature*



Rys. 6. Mikrofotografie przełomu próbki udarnościowej po OC wg wariantu 220°C/96 godzin. Energia łamania 10-12 J

*Fig. 6. Microphotography pictures of the fracture for impact sample after TT acc. to option 220°C/96 hours. Energy of breaking 10-12 J*

## 1.2. Wyniki badań mikrostruktury i pomiarów ułamka objętości austenitu resztkowego

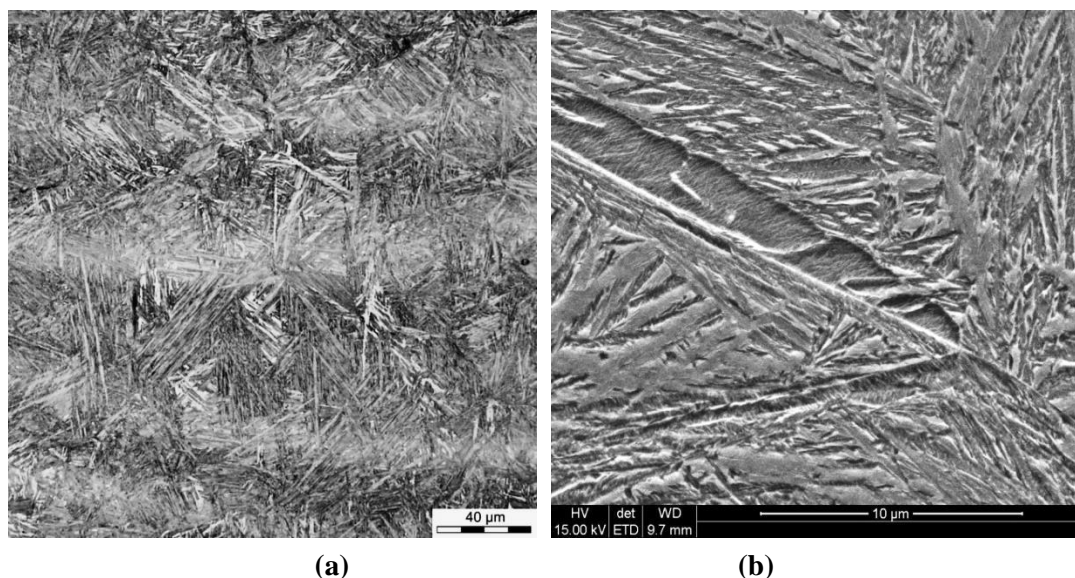
Obserwacje mikrostruktury z zastosowaniem mikroskopu świetlnego wykazały obecność pakietów bainitu dolnego (rys. 7a). W elektronowym mikroskopie skaningowym stwierdzono listwowy bainit dolny oraz brak wydzieleni węglików (rys. 7b). Z użyciem metody EBSD wyznaczono ułamek objętości blokowego austenitu resztkowego ( $A_B$ ) oraz jego rozmieszczenie i morfologię (rys. 8). Zawartość  $A_B$  była zależna od temperatury i czasu izotermicznej obróbki cieplnej i wynosiła od kilku do kilkunastu % objętości.

## 3.2. Results of Microstructure Tests and Residual Austenite Fraction Measurements

Observations of microstructure by optical microscope have indicated the presence of clusters of bottom bainite (Fig. 7a). Electron scanning microscope shows the presence of lathy bottom bainite and the lack of carbides (Fig. 7b). Using the EBSD method a fraction of volume of block residual austenite ( $A_B$ ) was determined with its location and morphology (Fig. 8). Content of  $A_B$  depends on temperature and time of isothermal processing and is from a few to a dozen of volume percentage.

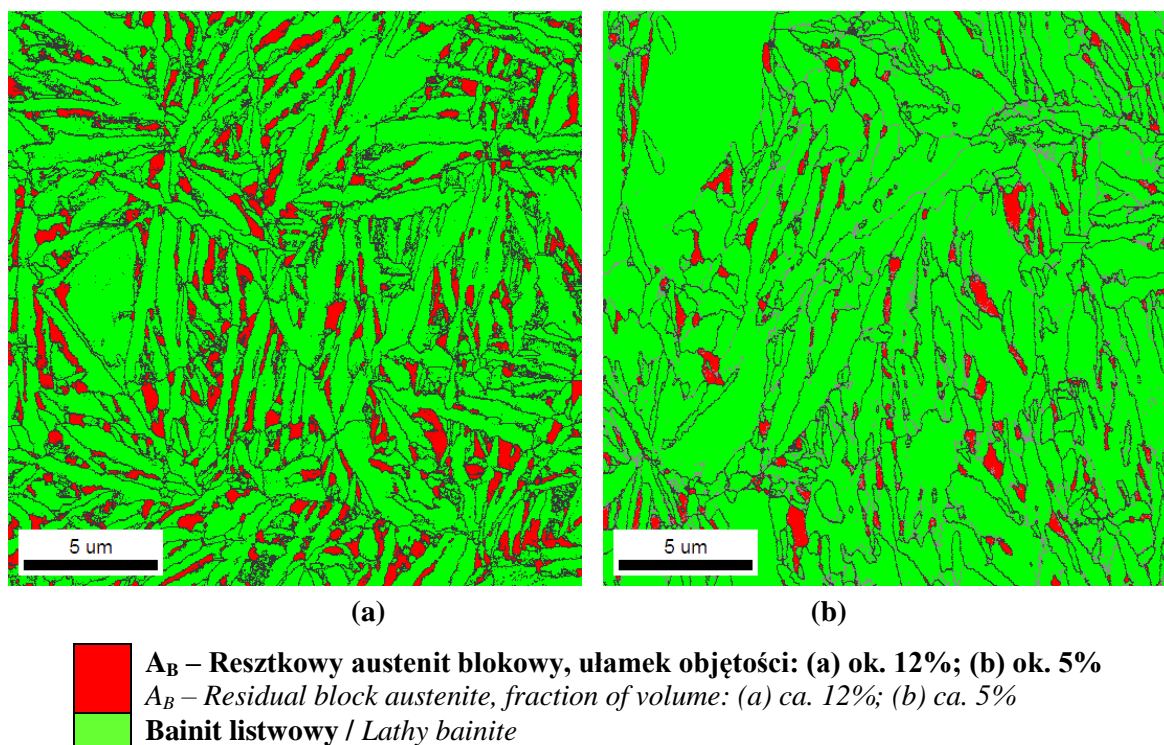
Dodatkowo, pomiary zawartości austenitu wykonano z wykorzystaniem dyfraktometru rentgenowskiego stosując filtrowane promieniowanie kobaltu w konfiguracji z detektorem Pixcel. Tą metodą wyznacza się zawartość wszystkich frakcji austenitu resztkowego: blokowego i listwowego, który usytuowany jest pomiędzy listwami bainitu bezwęglowego. Wyniki pomiarów zawartości austenitu dla poszczególnych wariantów obróbki cieplnej zamieszczono w tabeli 4. Zawartość austenitu była zróżnicowana i wynosiła od ok. 10 do ok. 21%. Wstępna analiza korelacyjna zawartości austenitu i właściwości mechanicznych oraz użytkowych materiału wskazuje, że optymalny ułamek objętości austenitu resztkowego nie powinien przekraczać 20%, a najlepiej mieścić się w zakresie 10-15%. Odrębnym pozostaje zagadnienie zawartości w materiale poszczególnych frakcji austenitu (blokowego oraz listwowego). Dla wybranych wariantów obróbki cieplnej wyznaczono ułamek objętości austenitu blokowego i dla tych wariantów można określić udział frakcji austenitu resztkowego listwowego (tabela 4). Ustalenie korelacji pomiędzy udziałem austenitu resztkowego, w tym poszczególnych frakcji tej fazy oraz właściwościami mechanicznymi, w szczególności w warunkach obciążeń dynamicznych, wymaga kontynuacji badań w tym zakresie.

Additionally, the content of austenite was measured by the X-ray diffractometer using the filtered cobalt radiation in configuration with Pixcel detector. This method is used to determine all fractions of residual austenite: block and lathy ones, placed between laths of the carbide-free bainite. Results of measurements on austenite content for particular options of thermal treatment are presented in table 4. The content of austenite was changeable from ca. 10 to ca. 21%. Initial correlative analysis between the content of austenite and the material mechanical and usability properties indicates that optimal fraction of volume of the residual austenite has to be below 20%, preferably of 10-15%. A separate question remains for the content of particular fractions of austenite (block or lathy). The volume fraction of block austenite was determined for selected options of thermal treatment, and for these options the share of the residual lathy austenite fraction may be also determined (table 4). Finding a correlation between the content of the residual austenite, including particular fractions of this phase, and the mechanical properties, especially in conditions of dynamical loads, requires the investigations on it to be continued.



**Rys. 7. Mikrostruktura stali bainitycznej nanostrukturalnej. Wytop 640, wariant 220/96, (a) mikroskop świetlny, (b) skaningowy mikroskop elektronowy**

**Fig. 7. Microstructure of nanostructured bainitic steel. Cast 640, option 220/96, (a) optical microscope, (b) scanning electron microscope**



**Rys. 8. Rozkład i morfologia blokowego austenitu resztkowego. Obrazowanie z zastosowaniem metody EBSD, skaningowy mikroskop elektronowy. (a) 215/96, (b) 220/94**  
**Fig. 8. Location and morphology of block residual austenite. Image received by EBSD method, scanning electron microscope. (a) 215/96, (b) 220/94**

Tabela 4. Wyniki pomiarów zawartości austenitu resztkowego metodą rentgenowską (XRD) oraz metodą EBSD przy powiększeniu 3000x

Table 4. Results of measurements for contents of residual austenite by X-ray method (XRD) and by EBSD method at magnification 3000x

Oznaczenie próbki (wariant obróbki cieplnej) <i>Designation of sample (option of thermal treatment)</i>	Ułamek objętości austenitu resztkowego-XRD, % <i>Fraction of volume for residual austenite - XRD</i>	Ułamek objętości austenitu resztkowego blokowego -EBSD, % <i>Fraction of volume for residual block austenite - EBSD</i>
210/116	13,0	-
210/120	15,2	8,7 (11,6*)
	13,9	
215/96	10,4	7,7 (12,1*)
220/72	21,0	3,6 (4,3*)
	17,5	
220/94	13,7	3,0 (4,7*)
	13,8	
220/96	12,1	-
	15,3	-
225/70	17,8	-

\*) wartości wyznaczone dla powiększenia 5000x / Values established at magnification of 5000x

### 1.3. Wyniki testów ostrzałem

Testy ostrzałem materiału ze stali nanobainitycznej wytworzonego w warunkach półprzemysłowych przeprowadzono w WITPiS. Biorąc pod uwagę planowane w projekcie nominalne grubości blach w ścianach bocznych kontenera (7,0 i 8,0 mm) i w dachu (6,0 mm) wykonano testy ostrzałem przy kącie  $0^\circ$  dla blach o rzeczywistej grubości 7,5 mm i przy kącie  $30^\circ$  dla blach o grubości 6,3 mm. Z uwagi na wymiary próbek do badań nie prowadzono badań ostrzałem wielokrotnym (multi-hit). Badania tego typu będą wykonane na pełnowymiarowych blachach z produkcji przemysłowej. Zestawienie blach do testów ostrzałem zamieszczono w tabeli 5, a wyniki tych testów w tabeli 6. Na podstawie obserwacji blach bezpośrednio po ostrzałem nie stwierdzono pęknięć. Zakres prędkości wymagany do spełnienia 2 poziomu STANAG 4569 dla amunicji BZ wynosi 675-715 m/s. Amunicję M193 (z I poziomu STANAG 4569-prędkość w zakresie 917-957 m/s) zastosowano dodatkowo z uwagi na jej wysoką zdolność do penetracji blach stalowych.

Blacha w wariancie 215/96 spełniła testy ostrzałem za pomocą amunicji BZ przy prędkościach 714 i 718 m/s oraz za pomocą amunicji M193 dla zakresu 940-949 m/s. Dla prędkości 713 m/s wynik testu był negatywny. Blachy w wariantach 220/94 i 210/116 spełniły test ostrzałem amunicją BZ dla prędkości wyższej od 700 m/s. Wystąpiły pojedyncze testy negatywne dla ww. zakresu prędkości. Przyczynami mogła być nieznaczna niejednorodność właściwości i struktury materiału oraz nierównomierność grubości blachy. Na podstawie wyników testów ostrzałem blach o grubości 7,5 mm przyjęto, że blachy o nominalnej grubości 8,0 mm wytworzone w warunkach przemysłowych spełnią stawiane wymagania. Materiał z produkcji przemysłowej będzie charakteryzował się znacznie większym stopniem przerobu plastycznego oraz będzie poddany wyżarzaniu ujednorodniającemu, co istotnie wpłynie na

### 3.3. Results of Firing Tests

The material made of the nanobainitic steel produced at semi-industrial conditions was subjected to firing tests in the Military Institute of Armour and Vehicle Technology (MIAVT). As the thickness of plates planned in the project for the side walls of the container is (7.0 and 8.0 mm) and for the roof (6.0 mm), then the firing tests were performed at incidence angle  $0^\circ$  for the plates having the real thickness of 7.5 mm and at angle of  $30^\circ$  for the plates of 6.3 mm thickness. Due to the size of investigated samples the multi-hit firing tests were not conducted. Such tests will be carried out on full size plates from the industrial production. Table 5 compares tested plates, and table 6 the results. Visual inspection of plates directly after firing has not indicated any cracks. Range of velocities demanded to meet 2 level of STANAG 4569 for ammunition BZ is 675-715 m/s. Ammunition M193 (from the 1 level of STANAG 4569- range of velocities 917-957 m/s) was additionally applied due to its high capacity for penetration of steel plates.

The plate of option 215/96 passed firing tests by BZ ammunition at velocities 714 and 718 m/s and by ammunition M193 for velocities 940-949 m/s. For velocity 713 m/s the result of test was negative. Plates of options 220/94 and 210/116 passed the firing tests by ammunition BZ for velocities above 700 m/s. There were some negative results for the above velocities. They would be caused by inhomogeneity of material properties and structure, and by an unequal thickness of the plate. Basing on the results of firing tests for the plates with 7.5 mm thickness, it was accepted that the plates with nominal thickness 8.0 mm of industrial production shall meet the specifications. Material received from the industrial production will be characterised by a greater degree of a plastic processing and will be subjected to a normalising

jednorodność struktury i właściwości. Blachy o grubości 6,3 mm spełniły testy ostrzałem pod kątem 30° - zgodnie z wymaganiami NATO. Wszystkie badane blachy o grubości 7,5 mm oraz 6,3 mm spełniły testy ostrzałem amunicją M193, w przedziale prędkości 917-957 m/s określonym dla pierwszego poziomu STANAG 4569.

annealing, affecting the homogeneity of structure and properties. The plates of 6.3 mm thickness failed to meet NATO 30° firing tests. Every tested plate with thickness 7.5 mm and 6.3 mm passed the firing tests for M193 ammunition, and for the velocities 917-957 m/s specified for the first level of STANAG 4569.

Tabela 5. Oznaczenie i wymiary próbek ze stali nanostrukturalnej bainitycznej - wytop 640. Testy ostrzałem przeprowadzono w WITPiS

Table 5. Designation and sizes of samples made of nanostructured bainitic steel - cast 640. The firing tests were carried out in the MIAVT

Temperatura (°C) / czas (godz.) wygrzewania izotermicznego <i>Temperature (°C) / time (hours) of isothermal annealing</i>	Grubość blachy, mm <i>Thickness of plate</i>	Długość x szerokość blachy, mm <i>Length x width of plate</i>	Opis wykonania procesu: (temp. (°C) / czas austenitowania (min.); sposób chłodzenia) / <i>Process description: (temp. (°C) / austenisation time (min.); way of cooling)</i>
210/116	7,5	150x250	950/40 wentylator / <i>fan</i>
215/96	7,5	150x300	950/40 wentylator
220/96	7,5	150x300	950/40 wentylator
220/94	7,5	150x300	950/40 wentylator
220/71	6,3	150x300	950/40 wentylator
225/70	7,5	150x300	950/40 wentylator

### 3.4 Wyniki badań mikrostruktury po ostrzałe

Po testach ostrzałem wykonano badania mikrostruktury w miejscach oddziaływania pocisków. Obszar wokół pocisku wstępnie wycięto metodą laserową, a następnie precyzyjnie w osi miejsca uderzenia wykonano cięcie tarczą z zastosowaniem chłodzenia wodnego. W ten sposób przygotowano zgląd równoległy do normalnej do powierzchni blachy w osi obszaru uderzenia pocisku. Celem badań była m.in. ocena stopnia degradacji i głębokości penetracji na podstawie zmian makro- i mikrostruktury. Przeprowadzono analizę porównawczą badanych wariantów w aspekcie odporności na przebicie m.in. w zakresie intensywności powstawania pasm ścinania, makro- i mikropełnięć, czy głębokości wnikania rdzenia pocisku lub

### 3.4. After Firing Microstructure Analysis Results

The microstructure of projectiles impact places was analysed. The zone around a projectile was cut out by laser beam and next cut through the axis of incidence by a water cooled disc. In such way a fine plane, parallel to the normal against the plate's surface at projectile hitting point, was received. The investigation is aimed to evaluate a degree of degradation and the depth of penetration on the basis of changes in the macro- and microstructure. The comparative analysis of investigated options was made in connection to resistance against penetration, and concerning above all the intensity of creation of shearing streaks and macro- and microcracks, or the penetration depth of the projectile core, or formation of

Tabela 6. Wyniki testów ostrzałem blach ze stali nanostrukturalnej, kąt ostrzału 0°  
 Table 6. Results of firing tests for nanostructured steel plates, angle of incidence 0°





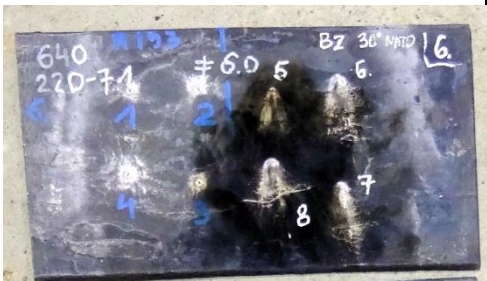
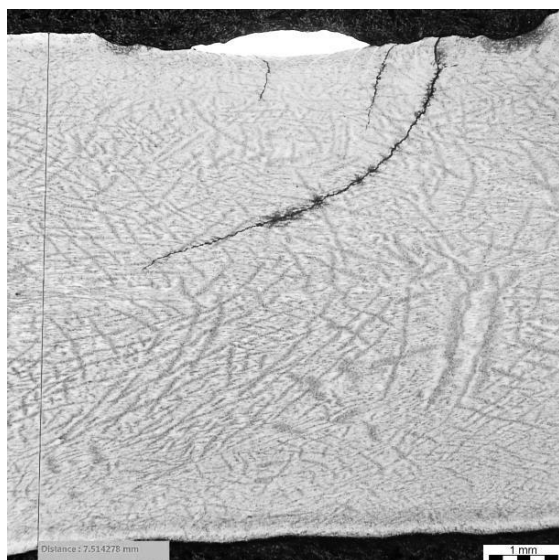
Oznaczenie próbki, grubość blachy Sample designation, plate thickness	Amunicja Ammunition	Numer testu Number of a test	Prędkość pocisku $V_U$ [m/s] Projectile's velocity	Widok miejsc trafienia Picture of hitting pattern	Wynik Result
640-220/94 # 7,5 mm	7,62x39mm API BZ	1	705,6		Brak przebicia Lack of penetration
		2	700,5		Przebicie Penetration
		3	705,7		Brak przebicia
	5,56x45mm M193	4	940,8		Brak przebicia
		5	998,7		Przebicie
		6	961,1		Brak przebicia
640-210/116 # 7,5 mm	7,62x39mm API BZ	1	707,4		Brak przebicia
		2	707,4		Przebicie
		3	708,5		Brak przebicia
		4	707,0		Brak przebicia
640-215/96 # 7,5 mm	7,62x39mm API BZ	1	718,2		Brak przebicia
		2	713,1		Przebicie
		3	714,1		Brak przebicia
	5,56x45mm M193	4	943,6		Brak przebicia
		5	940,2		Brak przebicia
		6	949,2		Brak przebicia
640-225/70 # 7,5 mm	7,62x39mm API BZ	1	700,1		Przebicie
		2	705,6		Przebicie

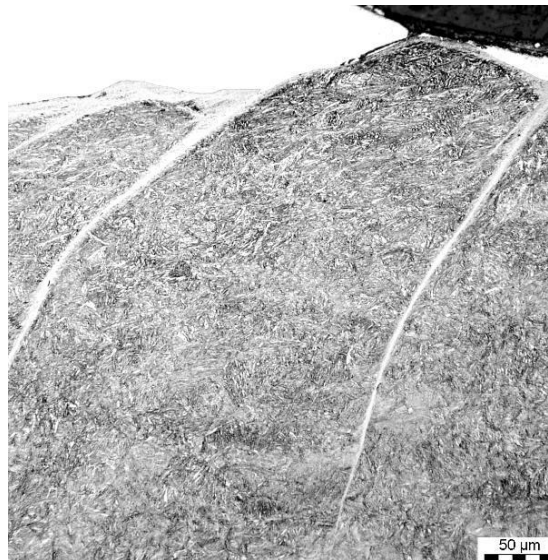
Tabela 7. Wyniki testów ostrzałem blachy ze stali nanostrukturalnej, kąt ostrzału 30°

Table 7. Results of firing tests for nanostructured steel plates, angle of incidence 30°

Oznaczenie próbki Grubość blachy Sample designation, plate thickness	Amunicja Ammunition	Numer testu Number of a test	Prędkość pocisku $V_U$ [m/s] Projectile's velocity	Widok miejsc trafienia Picture of hitting pattern	Wynik Result
640-220/71 # 6,3 mm	5,56x45mm M193	1	934,8		Brak przebicia Lack of penetration
		2	946,2		Brak przebicia
		3	939,2		Brak przebicia
		4	931,7		Brak przebicia
	7,62x39mm API BZ	5	707,7		Brak przebicia
		6	706,1		Brak przebicia
		7	710,8		Brak przebicia
		8	703,4		Brak przebicia



(a)



(b)

Rys. 9. Mikrostruktura w miejscach ostrzału blach o grubości 7,5 mm za pomocą amunicji kal. 5,56x45 mm M193. Wariant 220/94, prędkość 961,1 m/s

Fig. 9. Microstructure at hitting points for plates with thickness of 7.5 mm fired by 5.56x45 mm M193 rounds. Option 220/94, velocity 961.1 m/s



stopnia wybicia „korka” (także skłonności do powstawania odłamków wtórnych). Wyniki badań makrostruktury i mikrostruktury w obszarze działania rdzenia pocisku zamieszczono na rys. 9 i 10.

Obserwowano dwa mechanizmy penetracji: ścinanie adiabatyczne dla pocisku typu M193 (rys. 9a), które nie wystąpiło w postaci zjawiska całkowitego „wybicia korka” oraz erozję dla pocisku BZ (rys. 10a,b). Ocena stopnia degradacji miejsc ostrzału została wykorzystana w finalnym etapie doboru składu chemicznego i parametrów wytwarzania blach w skali przemysłowej. Wyniki badań wskazały m.in. na znaczący wpływ segregacji powstałej w trakcie krzepnięcia - i w jej konsekwencji pasmowości mikrostruktury - na odporność na przebicie blach. Wysoki stopień segregacji wpływa negatywnie na zdolności ochronne blach. Badania miejsc ostrzału pozwoliły na dokładniejszą ocenę zachowania się blach ze stali nanostrukturalnej w odniesieniu do standardowej oceny blachy okiem nieuzbrojonym. W miejscach oddziaływania uderowego stwierdzono występowanie adiabatycznych pasm ścinania. Intensywność powstawania tych niejednorodności odkształcenia jest znacząco większa w próbkach poddanych ostrzałowi za pomocą amunicji BZ, ale kierunkowość tych pasm jest zróżnicowana (rys. 10d). W przypadku mechanizmu działania miękkiego rdzenia amunicji M193, pasma adiabatyczne powstają równoległe do kierunku lotu pocisku (prostopadle do płaszczyzny ostrzału) powodując w ten sposób „wybicie korka” przez ścinanie (ang. „adiabatic plugging”).

W badanym materiale powstałe pasma ścinania nie osiągnęły długości krytycznej w odniesieniu do grubości blachy i zjawisko penetracji całkowitej nie wystąpiło (rys. 9a).

### **3.5. Analiza konstrukcji kontenera w aspekcie zastosowania innowacyjnych blach pancernych ze stali nanostrukturalnej bainitycznej**

Na podstawie wyników badań właściwości mechanicznych i testów ostrzałem blach

the “plugging” effect (and also the ability for formation of secondary fragments). Results of investigations on macrostructure and microstructure in the area of projectile’s core action are shown in Fig. 9 and 10.

Two following mechanisms of penetration were observed: the adiabatic shearing for projectile of M193 type (Fig. 9a) which have not ended in a complete “plugging” effect, and the erosion for BZ projectile (Fig. 10a,b). The evaluation of degradation extension for the shot pattern was made at the final stage of selecting the chemical composition and industrial scale production parameters for the plates. Results of tests indicated above all the important influence of segregation at the solidification – and its consequence in microstructure streakiness – on plates resistance against penetration. A high level of segregation has a negative influence on plate protective capacities. The investigations of shot pattern points provided more accurate assessment of the nanostructured steel plates than a typical one made by an unarmed eye. In places of impact action the existence of adiabatic shearing streaks was observed. The intensity of presence for these straining inhomogeneities is significantly greater in the samples fired with BZ ammunition, but directions of these streaks are different (Fig. 10d). In the case of action of a soft core mechanism for ammunition M193, the adiabatic streaks are created in parallel direction to the projectile flight (perpendicularly to the fired plane) causing the “adiabatic plugging” due to the shearing.

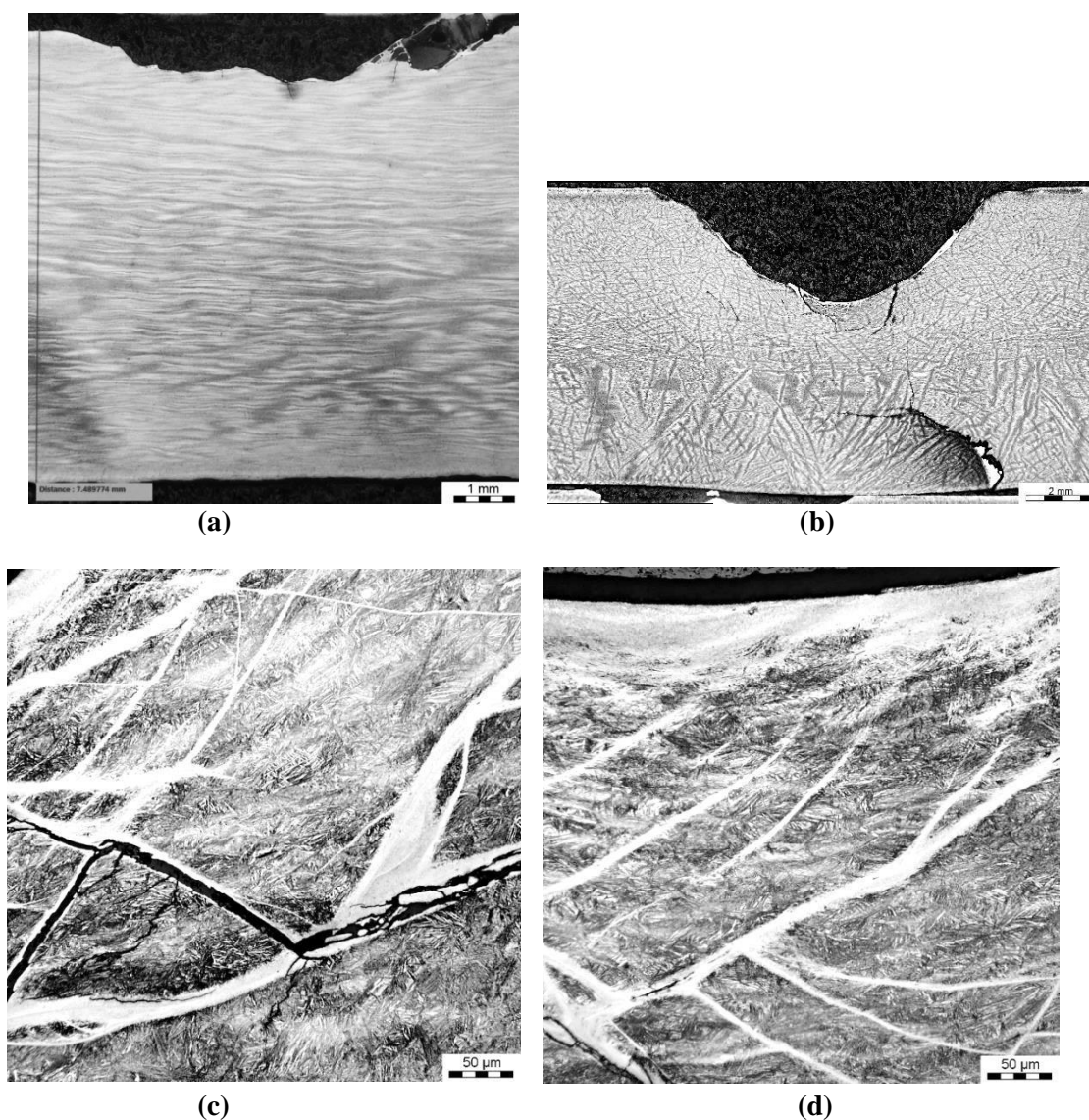
The shearing streaks created in the investigated material have not reached a critical length for the plate thickness and the effect of complete penetration has not occurred (Fig. 9a).

### **3.5. Analysis of Application of Nanostructured Bainitic Steel Innovative Armour Plates for Container Design**

On the grounds of mechanical and firing tests results the plates of nominal thick-

eksperymentalnych, dla opancerzenia ścian kontenera dobrano blachy o grubości nominalnej 8,0 mm oraz ewentualnie 7,0 mm, a dla dachu i podłogi kontenera o grubości 6,0 mm. Przeprowadzono analizę konstrukcji w aspekcie obniżenia masy opancerzenia kontenera. Założono rzeczywistą grubość blach wynoszącą 8,5 mm, 7,5 mm oraz 6,5 mm. W wyniku zastosowania blach o ww. grubościach masa opancerzenia kontenera ulegnie redukcji o około 32-37% przy spełnieniu poziomu ochrony 2 wg STANAG 4569 (tabela 8).

ness 8.0 mm, or possibly 7.0 mm, were taken for container's side walls armour, whereas for the floor and roof of 6.0 mm thickness. The design was studied regarding the reduction of container mass. The assumption was made for real plate thicknesses of 8.5 mm, 7.5 mm and 6.5 mm. In effect of application of the mentioned plates the mass of container armour will be reduced by ca. 32-37% and the compliance with the protection level 2 according to STANAG 4569 will be provided (table 8).



**Rys. 10. Mikrostruktura w miejscach ostrzału blach o grubości 7,5 mm za pomocą amunicji kal. 7,62x39 mm API BZ:** a) Wariant 210/116, prędkość 707,0 m/s, b) Wariant 215/96, prędkość 718,2 m/s, c) Wariant 210/116, prędkość 707,4 m/s, d) Wariant 215/96, prędkość 718,2 m/s  
**Fig. 10. Microstructure at hitting points for plates with thickness of 7.5 mm fired by 7.62x39 mm API BZ rounds:** a) Option 210/116, velocity 707.0 m/s, b) Option 215/96, velocity 718.2 m/s, c) Option 210/116, velocity 707.4 m/s, d) Option 215/96, velocity 718.2 m/s

Tabela 8. Szacunkowa redukcja masy opancerzenia przy zachowaniu poziomu ochrony balistycznej  
 Table 8. Estimated armour mass reduction without deterioration of the ballistic protection level

Rodzaj kontenera <i>Type of container</i>	Obszar opancerzenia <i>Armoured area</i>	Grubość blach, mm <i>Thickness of plates</i>	Masa opancerzenia, kg <i>Mass of the armour</i>		Redukcja masy, % <i>Mass reduction</i>
			Obszaru <i>Partial</i>	Całkowita <i>Total</i>	
Referencyjny LOOK (blacha pancerna 500 HB) <i>Referential LAOC</i> (armour sheet 500 HB)	ściany boczne <i>Side walls</i>	12,0	3380	5074	-
	Sufit <i>Roof</i>	10,0	890		
	Podłoga <i>Floor</i>	8,0	804		
N-LOOK 1 (blacha ze stali nanobainitycznej w wersji 8 mm) <i>N-LAOC 1 (8 mm nano-bainitic steel plate)</i>	ściany boczne <i>Side walls</i>	8,5	2394	3462	32
	Sufit <i>Roof</i>	6,5	578		
	Podłoga <i>Floor</i>	6,5	490		
N-LOOK 2 (blacha ze stali nanobainitycznej w wersji 7 mm) <i>N-LAOC 2 (7 mm nano-bainitic steel plate)</i>	ściany boczne <i>Side walls</i>	7,5	2112	3180	37
	Sufit <i>Roof</i>	6,5	578		
	Podłoga <i>Floor</i>	6,5	490		

Na podstawie analizy konstrukcji i warunków użytkowania kontenera wskazano obszary newralgiczne z punktu widzenia ochrony balistycznej, które poddane będą testom ostrzałem. Badania balistyczne zostaną wykonane na segmentach kontenera reprezentujących te obszary. Szczególna uwaga poświęcona zostanie badaniom strzelaniem w miejscach połączeń paneli balistycznych z elementami będącymi na podstawowym wyposażeniu każdego kontenera takimi, jak: pancerne drzwi wejściowe, okna z kuloodpornymi szybami, naroża kontenerów. Badaniom poddane zostanie poszycie kontenera poprzez ostrzelanie panelu imitującego opancerzenie dachu z zachowaniem kątów ostrzału wynoszących do 30° w elewacji.

Na rys. 11 są schematy elementów konstrukcyjnych kontenera w obszarach ściany i naroża.

Redukcja masy opancerzonego kontenera przy jednoczesnym zapewnieniu poziomu ochrony 2 wg STANAG 4569 ma decydujące znaczenie w przypadku wykorzystywania transportu lotniczego w procesach logistycz-

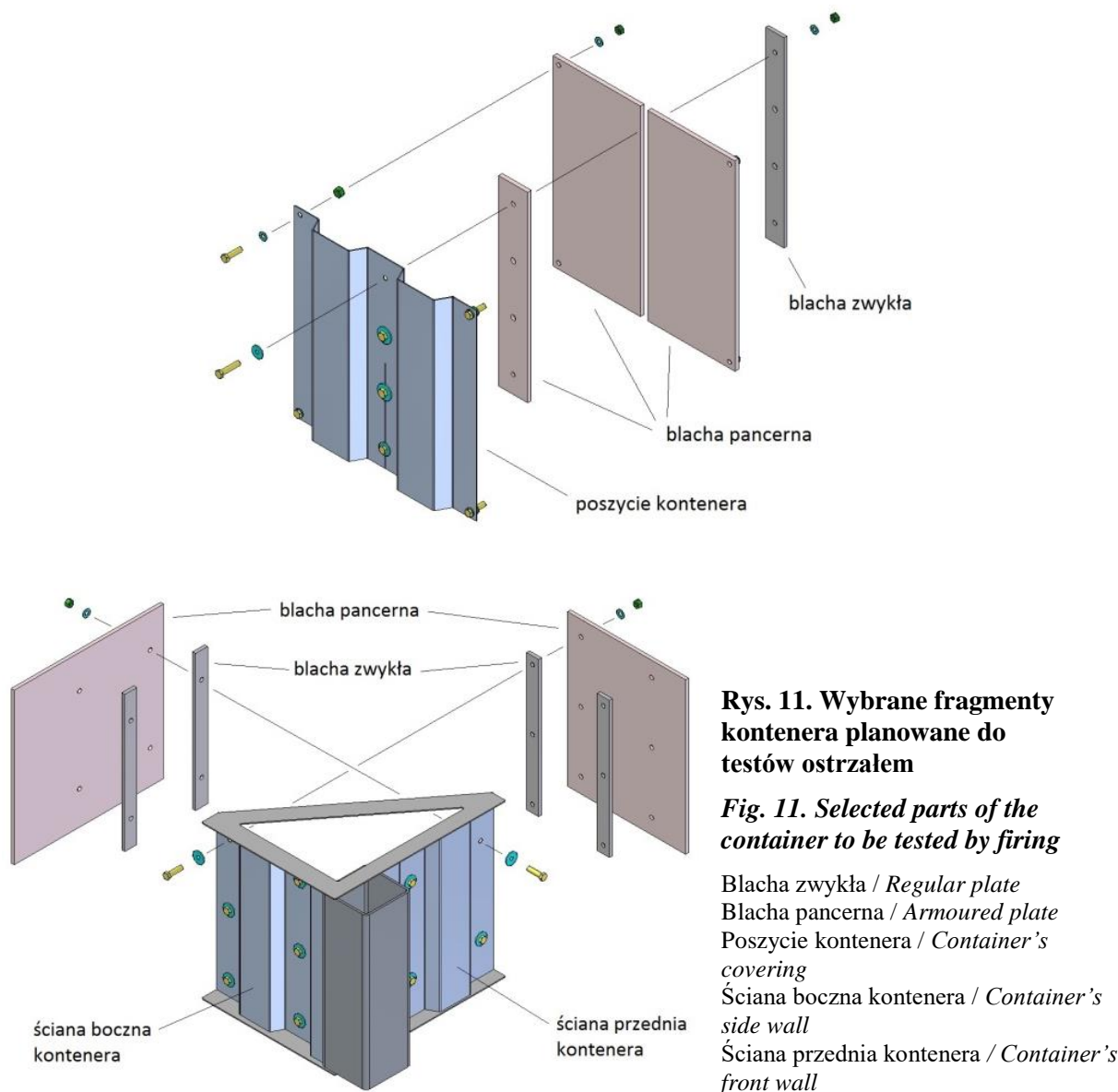
The design and conditions of the container deployment were analysed to find sensitive areas for the ballistic protection which have to be tested by firing. The ballistic tests will be performed for segments of the container representing these areas. Special attention will be paid for firing tests of connections between the ballistic panels and for components which belong to basic equipment of every container such as armoured entering doors, windows with bulletproof glass, and corners of containers. The covering of the container will be also tested by firing a panel simulating the armoured roof for the angles of shots incidence up to 30° in elevation.

Fig. 11 shows layouts of container design components on walls and corners.

Reduction of the armoured container mass, and provision of the protection level 2 according to STANAG 4569 at the same time, has crucial meaning at using the air cargo for the logistic processes of the article and may be useful to add on some ex-

nych wyrobu oraz może umożliwić doposażenie kontenerów o dodatkowe systemy uzbrojenia i urządzenia oczekiwane przez klienta bez ryzyka przekroczenia dopuszczalnej nośności konstrukcji kontenera.

tra weapon systems and facilities expected by the customer without any risk for exceeding the permissible loading capacity of container's structure.



**Rys. 11. Wybrane fragmenty kontenera planowane do testów ostrzałem**

*Fig. 11. Selected parts of the container to be tested by firing*

Blacha zwykła / Regular plate  
 Blacha pancerna / Armoured plate  
 Poszycie kontenera / Container's covering  
 Ściana boczna kontenera / Container's side wall  
 Ściana przednia kontenera / Container's front wall

Dla obecnie stosowanego opancerzenia ze stali martenzytycznej klasy 500, konstrukcję kontenera zaprojektowano tak, aby umożliwić montaż opancerzenia poprzez spawanie jego elementów z konstrukcją nośną kontenera. Z uwagi na niespawalność nowego opancerzenia ze stali nanobainitycznej klasycznymi metodami oraz ze względu na konieczność poprawy podatności obsługowej i serwisowania kontenerów, zmianie uległa konstrukcja kontenera i jego opancerzenia,

The container using present armour systems made of martensite steel grade 500 has a design enabling the integration of their components to the container's chassis. Regarding the lack of weldability of the new armour components, made of the nano-bainitic steel, by classical methods, and a need for improving the handling and servicing of the containers, the design of the container's chassis and armour system was changed, especially concerning the as-

w szczególności w zakresie montażu. Opracowana nowa konstrukcja uwzględniająca modułowe rozwiązania montażu paneli balistycznych znacząco usprawni procesy serwisowania wyrobu, w szczególności umożliwi wymianę opancerzenia bezpośrednio u klienta bez konieczności transportu kontenera do zakładu produkcyjnego.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań właściwości mechanicznych, mikrostruktury i testów ostrzałem poprzedzają uruchomienie w skali przemysłowej produkcji blach arkuszowych z nowego gatunku stali nanostrukturalnej bainitycznej (nanobainitycznej) do systemu opancerzenia kontenera LOOK. Optymalizację właściwości mechanicznych blach wykonano przez dobór następujących parametrów procesu wytwarzania: składu chemicznego stali, przeróbki plastycznej i wstępnej obróbki cieplnej oraz temperatury i czasu finalnej obróbki cieplnej (wygrzewania izotermicznego). W wyniku zastosowania temperatury wygrzewania w zakresie 210-225°C (temperatura  $M_S$  = ok. 200°C dla szybkości chłodzenia 1-2 °C/s) i czasu odpowiednio w przedziale 120-70 godzin uzyskano następujące właściwości mechaniczne:  $R_{p0,2}$  1400-1500 MPa,  $R_m$  2000-2150 MPa; A 10-13%; KV (w temp. otoczenia) 10-16 J oraz twardość 590-610 HV10 (53-54 HRC). Mikrostrukturę blach stanowił bezwęglkowy nanobainit listwowy oraz austenit resztkowy w ilości 10-21%.

W testach ostrzałem zastosowano blachy o grubości 6,3 i 7,5 mm oraz amunicję kal. 5,56x45 mm M193 i kal. 7,62x39 mm API BZ. Na podstawie wyników tych testów oraz badań mikrostruktury w miejscach ostrzału stwierdzono występowanie zjawisk świadczących o wysokiej skuteczności ochronnej badanych blach, przejawiających się dużą zdolnością do pochłaniania i rozpraszania energii pocisku bez skłonności do pęknięcia.

Na podstawie wyników badań właściwości mechanicznych i testów ostrzałem blach eksperymentalnych, opracowano skład chemiczny stali nanostrukturalnej bainitycz-

sembling process. New chassis was developed to count the modular solutions for assembling ballistic panels and improve the servicing processes of the article, especially including the replacement of the armour system segments directly in the customer's site without any necessity for shipping the container to the manufacturer.

#### 4. Summary

Presented results of mechanical, microstructural, and firing tests precede the launching of industrial production of sheet steel plates made of the new grade of nanostructured bainitic (nano-bainitic) steel for the LAOC armour system. The mechanical properties of plates were optimised by selection of following production parameters: chemical composition of the steel, and its plastic processing, initial thermal processing, and the time of final thermal processing (isothermal annealing). Following mechanical properties were received:  $R_{p0,2}$  1400-1500 MPa,  $R_m$  2000-2150 MPa; A 10-13%; KV (at room temperature) 10-16 J and hardness 590-610 HV10 (53-54 HRC) for the annealing temperature of 210-225°C (temperature  $M_S$  = ca. 200°C, at cooling rate 1-2 °C/s) and time respectively on the range of 120-70 hours. The microstructure of the plate was created by carbide-free lathed bainite and the residual austenite in amount of 10-21%.

The plates of thickness 6.3 and 7.5 mm were used to be fired by rounds 5.56x45 mm M193 and 7.62x39 mm API BZ. On the basis of results of these tests and the investigations over the microstructure at the projectile impact places, there were observed some effects proving that tested plates have high protective efficiency represented by the high ability for absorption and dissipation of projectile energy without tendency for cracking.

Basing on the results of mechanical and firing tests for the experimental plates the chemical composition of nanostructured bainitic steel was developed and

nej dostosowany do wykonania w warunkach przemysłowych blach o grubości w zakresie 6 – 8 mm.

Przeprowadzono analizę możliwości optymalizacji konstrukcji opancerzenia kontenera wykorzystującą wyniki badań blach ze stali nanostrukturalnej wytworzonych w warunkach półprzemysłowych. Oszacowano redukcję masy opancerzenia w zakresie 32-37% w wyniku zastosowania innowacyjnego gatunku stali. Na podstawie analizy konstrukcji i warunków użytkowania kontenera wskazano obszary newralgiczne z punktu widzenia ochrony balistycznej, których modele wykonane ze stali nanobainitycznej poddane będą testom ostrzałem.

matched for industrial production of sheet plates with thickness of 6 – 8 mm.

The possibilities for optimisation of the container armour system design were studied by employing the results of investigations for the plates made of nano-structural steel produced in semi-industrial conditions. The reduction of the armour system mass was estimated to 32-37% due to the use of the innovative grade of steel. On the basis of studies on the container design and on conditions of using, the crucial areas were indicated, regarding the questions of ballistic protection, to prepare their models made from the nano-bainitic steel for firing tests.

### Literatura / Literature

- Bhadeshia H.K.D.H. and Edmonds D. V., The Bainite Transformation in a Silicon Steel, *Metallurgical Transactions A*, V. 10A, 895-907, 1979.
- Bhadeshia H.K.D.H. and Edmonds D. V., Bainite in Silicon Steels: New Composition; Property Approach Part 1, *Met. Sci.*, V. 17, (9), 411-419, 1983.
- Bhadeshia H.K.D.H., Christian J.W., Bainite in Steels, *Metallurgical Transactions A*, V. 21, Issue 3, 767-797, 1990.
- Bhadeshia H.K.D.H., Bulk Nanocrystalline Steel, *Ironmaking & Steelmaking*, V. 32, Issue 5, 405-410, 2005.
- Bhadeshia H.K.D.H., Brown P. and Garcia-Mateo C., Bainite Steel and Methods of Manufacture Therof, *Patent GB2462197*, 2010.
- Burian W., Marcisz J., Garbarz B., Starczewski L., Nanostructured Bainite-austenite Steel for Armours Construction, *Archives of Metallurgy and Materials*, V. 59, no 3, 1211-1216, 2014.
- Caballero F. G., Bhadeshia H.K.D.H., Mawella K.J.A. and Jones D. G. and Brown P., Very Strong Low Temperature Bainite, *Materials Science and Technology*, Vol. 18, 279-284, 2002.
- Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H., Very Strong Bainite, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, V. 8, 251-257, 2004.
- Garbarz B. & Niżnik-Harańczyk B., Modification of Microstructure to Increase Impact Toughness of Nanostructured Bainite-austenite Steel, *Materials Science and Technology*, V. 31, no 7, 773-780, 2015.
- Garbarz B. and Burian W., Microstructure and Properties of Nanoduplex Bainite-Austenite Steel for Ultra-High-Strength Plates, *Steel Research int.*, V. 85, No. 12, 1620-1628, 2014.
- Garbarz B., Marcisz J., Burian W., Technological Peculiarities of Manufacturing Nanobainitic Steel Plates, *METEC*, Düsseldorf, 15-19 czerwca 2015.

- Garbarz B., Marcisz J., Burian W., Wiśniewski A., Mechanizmy odkształcenia dynamicznego w ultra-wytrzymałych stalach nanostrukturalnych przeznaczonych na pancerze, *Problemy Techniki Uzbrojenia. Biuletyn Naukowy Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, Zeszyt 118, nr 2, 41-49, 2011.*
- Garcia-Mateo C., Caballero F. G. and Bhadeshia H. K. D. H., Development of Hard Bainite, *ISIJ International*, V. 43, No. 8, 1238-1243, 2003.
- Garcia-Mateo C. and Caballero F. G., Ultra-high-strength Bainitic Steels, *ISIJ International*, V. 45, No. 11, 17361-1740, 2005.
- Marcisz J., Walnik B., Gazdowicz J., Burian W., Wybrane właściwości mechaniczne i technologiczne wysokowytrzymałych nanostrukturalnych stali bainitycznych, *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, t. 70, nr 1, 12-19, 2018.
- Marcisz J., Garbarz B., Burian W., Stępień J. and Starczewski L., Ballistic Testing of Nano-precipitation Hardened and Dano-duplex Steels, *27th International Symposium on Ballistics*, Freiburg, Germany, 1834-1845, 2013.
- Marcisz J., Burian W., Stępień J. and Starczewski L., Wnuk M., Janiszewski J., Static, Dynamic and Ballistic Properties of Bainite-austenite Steel for Armours, *28th International Symposium on Ballistics*, Atlanta, USA, 1348-1361, 2014.
- Marcisz J., Janiszewski J., Burian W., Garbarz B., Stępień J., Starczewski L., Badania właściwości dynamicznych wysokowytrzymałej stali nanostrukturalnej, *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, t. 67, nr 2, 96-105, 2015.
- Marcisz J., Burian W., Janiszewski J., Rozmus R., Microstructural Changes of the Nanostructured Bainitic Steel Induced by Quasi-static and Dynamic Deformation, *Archives of Metallurgy and Materials*, V. 62, no 4, 2317-2329, 2017.
- NATO Standardization Agreement STANAG 4569
- Wenyan L., Jingxin Q., Hersheng S., Fatigue Crack Growth Behaviour of a Si-Mn Steel with Carbide-free Lathy Bainite, *Journal of Materials Science*, V. 32, 427- 430, 1997.



Rzeczpospolita  
Polska



Narodowe Centrum  
Badań i Rozwoju

Unia Europejska  
Europejski Fundusz  
Rozwoju Regionalnego



*Artykuł zawiera wyniki badań zrealizowanych w ramach projektu finansowanego z funduszy strukturalnych POIR 4.1.4.-00-0047/16 pt.: Opracowanie technologii produkcji lekkiego kontenera obserwacyjno-obronnego (LOOK) ze stali nanostrukturalnych ultrawytrzymałych*

*The paper contains the results of investigations made in the frame of the project POIR 4.1.4.-00-0047/16 financed by the structural funds and titled: Development of production technology for a light observation-protective container (LOPC) from the nanostructured steels of ultrahigh strength*

