

Jarosław MARCISZ, Bartłomiej WALNIK, Wojciech BURIAN

Instytut Metalurgii Żelaza

Aleksander IWANIAK, Jakub WIECZOREK, Dorota PALUCH

Politechnika Śląska

ODPORNOŚĆ NA ZUŻYCIE EROZYJNE NANOSTRUKTURALNEJ STALI BAINITYCZNO-AUSTENITYCZNEJ

Wykonano badania odporności na zużycie erozyjne nanostrukturalnej stali bainityczno-austenitycznej (NANOS-BA[®]). Wyniki badań wykazały wyższą o ok. 10% odporność stali NANOS-BA[®] na zużycie erozyjne w warunkach oddziaływania cząstek uderzających pod kątami: 30°, 45°, 60° i 90° w porównaniu do komercyjnej stali trudnościeralnej o twardości 600 HV. Opracowane warianty obróbki cieplnej stali bainityczno-austenitycznej umożliwiają zmniejszenie zużycia materiału do 55% w porównaniu do stali trudnościeralnej, dla wybranych kątów padania erodentu. Zrealizowano eksperyment polegający na zastosowaniu mieszadeł wykonanych ze stali NANOS-BA[®] w mieszarce turbinowej. Mieszadła pracowały 700 minut w warunkach oddziaływania ścierny-udarowego twardych cząstek, a wyniki badań potwierdziły wyższą odporność badanych stali na zużycie niż materiałów dotychczas stosowanych. Przeprowadzono analizę możliwości zastosowania stali NANOS-BA[®] na elementy trudnościeralne.

Słowa kluczowe: odporność na zużycie erozyjne, nanostrukturalna stal bainityczno-austenityczna

EROSIVE WEAR RESISTANCE OF NANOSTRUCTURED BAINITE-AUSTENITE STEEL

Examination of erosive wear resistance of nanostructured bainite-austenite steel (NANOS-BA[®]) was conducted. The results show higher erosive wear resistance of steel NANOS-BA[®] by approx. 10% than the commercial wear-resistant steel of hardness 600 HV under conditions of particles impact at angles: 30°, 45°, 60° and 90°. The newly developed variants of heat treatment of NANOS-BA[®] steel cause a reduction of wear to 55% less than that of the wear resistant steel, depending on the angle of erosion particles impact. An experiment of applying stirrers made of NANOS-BA[®] steel installed in a turbine mixer used for mixing fine grained hard materials was carried out. Stirrers worked in aggressive environment under the impact of abrasive hard particles about 700 minutes. The results of investigation confirmed the higher wear resistance of stirrers made of NANOS-BA[®] steel in comparison with materials used so far. Analysis of application possibility of NANOS-BA[®] steel for wear resistant elements was carried out.

Key words: erosive wear resistance, nanostructured bainite-austenite steel

1. WPROWADZENIE

Jednym z kryteriów doboru materiałów przeznaczonych na elementy narażone na zużycie ścierny jest twardość. Zakłada się, że odporność na zużycie ścierny zależy od twardości ściernego materiału, ale tylko do określonego poziomu twardości. W materiałach o zbyt wysokiej twardości może wystąpić zjawisko kruchości pęknięcia, co jest przyczyną zwiększonej intensywności zużycia ściernego. W projektowaniu materiałów trudnościeralnych oprócz mechanizmów ściernia należy wziąć pod uwagę środowisko eksploatacji i charakter obciążenia – np. oddziaływanie obciążeń o charakterze dynamicznym i/lub udarowym. W warunkach użytkowania elementy maszyn i urządzeń poddawane są procesom zużywania warstwy wierzchniej, w wyniku czego 50% z nich zużywa się w procesie ściernia, 15% w wyniku adhezji, a 8% jest efektem erozji [1]. Dla

zapewnienia odpowiedniej trwałości eksploatacyjnej wymagane jest spełnienie następujących warunków: a) wysokiej odporności na ścierny, b) zdolności do przenoszenia zmiennych obciążeń, c) jednorodności właściwości (struktury) na przekroju elementu. Do istotnych wymagań technologicznych należy ponadto podatność do łączenia technikami spawalniczymi. Wymienione aspekty eksploatacji stanowią podstawowe kryteria oceny konkurencyjności stali eksperymentalnej bainityczno-austenitycznej w odniesieniu do gatunków stali o podwyższonej odporności na ścierny i obciążenia udarowe, np.: Hardox lub Weldox czy Armox.

Powszechnie stosowanymi stalami na elementy o podwyższonej odporności na ścierny są m.in. wysokojakościowe stale Hardox. Charakteryzują się one twardością: od 310 HBW (np. Hardox HiTuf) do 640 HBW (np. Hardox 600), wytrzymałością na rozciąganie: od 850 MPa do 2000 MPa oraz udarnościami w zakresie

40÷20 J w temperaturze -40°C. Mikrostrukturę stali trudnościeralnych stanowi średniowęglowy martenzyt odpuszczony. Wśród gatunków stali trudnościeralnych szerokie zastosowanie np. na płyty wykładzin zabudów samochodów ciężarowych oraz zsuwnie żwiru czy zabudowę skrzyni ładunkowej wywrotki itp., znajduje stal Hardox 400 o następujących właściwościach: wytrzymałość na rozciąganie: 1250 MPa; udarność w temperaturze -40°C: 45 J, w temperaturze -20°C: 60 J; wydłużenie (A_5): 10% i twardość 370÷430 HBW.

W ostatnich latach realizowane są prace dotyczące badań i zastosowań stali nanobainitycznych, w tym ich odporności na ścieranie [2–8]. Wyniki dotychczas zrealizowanych prac jednoznacznie wskazują na wyższą odporność stali o strukturze bainityczno-austenitycznej (bainit bezwęglkowy w postaci nanolistew) w odniesieniu do stosowanych obecnie stali trudnościeralnych. Materiał ten z uwagi na szeroki zakres zawartości pierwiastków podstawowych (C, Mn, Si, Cr) oraz parametry wygrzewania izotermicznego posiada możliwość doboru wariantów optymalnych dla konkretnych zastosowań. Mechanizmy zużycia ściernego nanostrukturalnych stali bainityczno-austenitycznych z uwagi na inny niż dotychczas stosowane stale typ mikrostruktury, nie zostały w pełni zbadane.

Stale bainityczno-austenityczne o ultrawysokiej wytrzymałości są przedmiotem badań w Instytucie Metalurgii Żelaza od kilku lat [9–16]. Dotychczas prowadzone prace dotyczyły zastosowań tego gatunku stali na elementy osłon balistycznych. Dla materiałów do tego typu zastosowań stawiane są wysokie wymagania co do wytrzymałości (twardości) oraz ciągliwości. Stale bainityczno-austenityczne z uwagi na szeroki zakres możliwych do osiągnięcia właściwości mechanicznych metodą obróbki cieplnej, posiadają potencjał do zastosowania w innych dziedzinach gospodarki, poza przemysłem obronnym. Wyniki prowadzonych w Instytucie Metalurgii Żelaza badań stali bainityczno-austenitycznych wskazały na możliwości uzyskania wysokiej odporności na ścieranie z uwagi na poziom twardości w zakresie 500÷650 HV oraz wytrzymałość na rozciąganie od 1600 do 2100 MPa, przy wydłużeniu A_5 12÷20%. Przewiduje

się także korzystny wpływ dwufazowej mikrostruktury stali NANOS-BA[®] w warunkach oddziaływania ścierno-udarowego twardych cząstek.

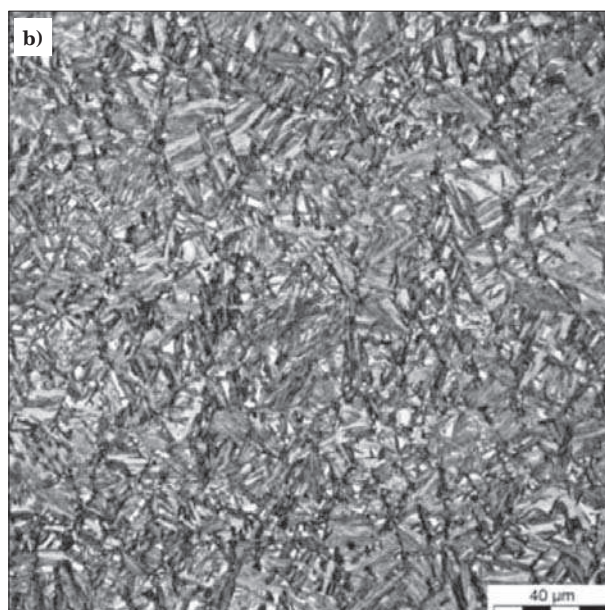
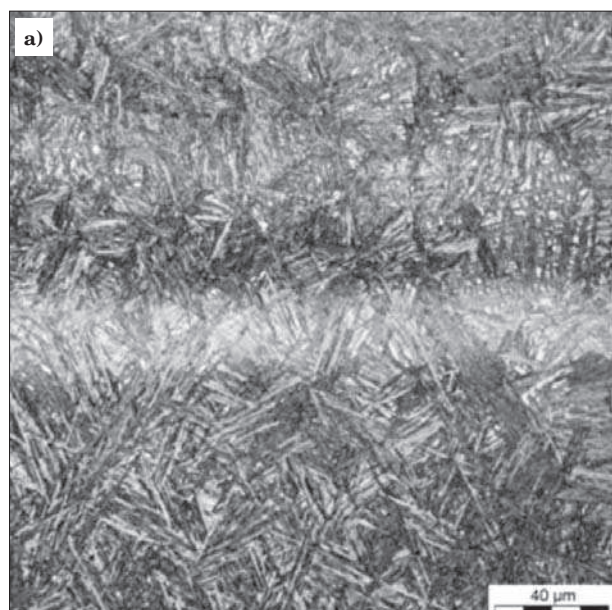
W pracy przeprowadzono ocenę odporności stali NANOS-BA[®] na zużycie erozyjne. Wykonano eksperymenty odporności na działanie strumieniowo-ściernych cząstek Al_2O_3 oraz próby eksploatacyjne mieszadeł wykonanych z eksperymentalnej stali nanobainitycznej, pracujących w komorze mieszarki turbinowej w warunkach oddziaływania ścierno-udarowego twardych cząstek (m.in. tlenków żelaza).

2. MATERIAŁ, ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Materiał do badań odporności na oddziaływanie cząstek ścierniwa stanowiły: eksperymentalna stal nanostrukturalna (NANOS-BA[®]) oraz komercyjna stal trudnościeralna o twardości nominalnej 600 HV i o strukturze martenzytu odpuszczonego (kom600). Stal komercyjna stanowiła materiał odniesienia.

Stale nanobainityczne, w rzeczywistości o strukturze dwufazowej bainityczno-austenitycznej, charakteryzuje mikrostruktura bezwęglkowego bainitu oraz austenitu szczątkowego (Rys. 1). Charakterystyczne główne cechy mikrostruktury stali NANOS-BA[®] to szerokość listew bainitu bezwęglkowego, udział objętościowy austenitu resztkowego i jego postać oraz stabilność austenitu w warunkach eksploatacji (termiczna i mechaniczna). Szerokość listew bainitu wynosi poniżej 100 nm i zależy od parametrów temperaturowo-czasowych przemiany izotermicznej. Austenit, wzbogacony w węgiel, występuje w postaci warstwy pomiędzy listwami bainitu oraz w postaci odrębnych ziarn, a jego ułamek objętościowy może przekraczać 30%.

Właściwości mechaniczne wyznaczone w statycznej próbie rozciągania, wskazują na możliwości wielu zastosowań tego materiału. Stale nanostrukturalne bainityczno-austenityczne osiągają granicę plastyczności powyżej 1350 MPa, wytrzymałość powyżej 2000



Rys. 1. Mikrostruktura stali bainityczno-austenitycznej. (a) wariant 215/70, (b) wariant 285/96, mikroskop świetlny
Fig. 1. Microstructure of bainite-austenite steel. (a) variant 215/70, (b) variant 285/96, light microscope

Tablica 1. Skład chemiczny materiału badań, % masowe

Table 1. Chemical composition of the examined material, weight %

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	V	Mo	Ti	Al _c	Cu
NANOS-BA®	0,58	1,90	1,82	0,012	0,005	1,32	0,095	0,75	0,010	0,019	0,11
Stal trudnościeralna (twardość nominalna 600 HV)	0,42	0,68	0,26	0,006	<0,003	0,50	0,008	0,34	-	0,046	Ni 2,00

Tablica 2. Właściwości mechaniczne stali NANOS-BA® i stali martenzytycznej trudnościeralnej wybranych do badań zużycia erozyjnego

Table 2. Mechanical properties of NANOS-BA® steel and martensitic wear resistant steel chosen for erosion resistance examinations

Oznaczenie wariantu (parametry wygrzewania izotermicznego: temperatura, °C / czas, godz.)	Granica plastyczności $R_{0,2}$, MPa	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	Wydłużenie całkowite A, %	Twardość, HV10
210/120	1243	2026	15,1	605
215/70	1171	1919	8,0	590
225/70	1354	1940	14,8	598
250/70	1237	1801	15,7	558
275/120	1176	1654	19,2	512
285/96	1083	1649	21,0	498
Stal trudnościeralna martenzytyczna (kom600)	1500	2000	7,0	610

MPa (twardość powyżej 600 HV) przy wydłużeniu całkowitym większym niż 10%. Proces wytwarzania tej grupy gatunkowej stali w finalnym etapie polega na izotermicznym wygrzewaniu po bezpośrednim chłodzeniu z zakresu austenitu. Parametry wygrzewania izotermicznego decydują o rodzaju mikrostruktury, która determinuje finalne właściwości materiału. Dla stali 0,6÷1,0% C-Mn-Si-Cr-Mo stosuje się temperatury przemiany izotermicznej od 200 do 300°C i czas do kilkudziesięciu godzin. Podany zakres parametrów finalnej obróbki cieplnej stwarza możliwości wytworzenia materiału o optymalnym zestawie właściwości mechanicznych i użytkowych. W artykule oznaczenie wariantu obróbki cieplnej stali NANOS-BA® „T/t” określa temperaturę (w °C) i czas (w godzinach) wygrzewania izotermicznego.

Skład chemiczny stali NANOS-BA® i stali martenzytycznej przedstawiono w tablicy 1. W tablicy 2 zamieszczono właściwości mechaniczne wyznaczone w statycznej próbie rozciągania i wyniki pomiarów twardości. Do badań zastosowano materiał o szerokim zakresie właściwości mechanicznych: $R_{0,2}$ od 1100 do 1350 MPa, R_m od 1650 do 2000 MPa, wydłużeniu całkowitym od 8,0 do 21,0% i twardości od 500 do 600 HV.

Wyniki pomiarów austenitu szczątkowego w materiale badań zamieszczono w tablicy 3. Pomiary wykonano za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego Epyrean firmy PANalitical stosując filtrowane promieniowanie kobaltu z detektorem Pixcel. Pomiary wykonano dla dwóch próbek dla każdego wariantu obróbki cieplnej. Zawartość tego składnika strukturalnego wynosiła od 15 do 30% objętości. Austenit szczątkowy w zależności od warunków użytkowania (odkształcenie, temperatura) warunkujących jego stabilność termodynamiczną i mechaniczną może ulec przemianie w martenzyt. Stwierdzenie obecności martenzytu i określenie jego wpływu na odporność ścierną-udarową wymaga odrębnych badań i analiz. W obecnej pracy nie stwierdzono wyraźnej korelacji pomiędzy odpornością erozyjną, a udziałem objętościowym austenitu. Prawdopodobnie warunki testów oraz mechaniczna stabilność austenitu nie wywołały jego przemiany w martenzyt. Osobnym

Tablica 3. Wyniki pomiarów udziału objętościowego austenitu szczątkowego

Table 3. Results of measurements of retained austenite volume fraction

Wariant	Ułamek objętości austenitu, %	Błąd pomiaru, %
210/120	20,3	± 0,9
215/70	15,3	± 0,7
225/70	21,4	± 0,9
250/70	23,3	± 1,0
275/120	29,1	± 1,2
285/96	26,6	± 1,1

zagadnieniem jest wpływ trwałego termodynamicznie i mechanicznie austenitu oraz jego postać morfologiczna na właściwości użytkowe materiału m.in. w warunkach oddziaływania erozyjnego twardej cząstki. W zakresie badań morfologii tej fazy istotna jest znajomość udziału austenitu w postaci warstw (o grubości do 100 nm) pomiędzy listwami bainitu i w postaci odrębnych ziarn.

Badania odporności erozyjnej wykonano w Instytucie Nauki o Materiałach Politechniki Śląskiej. Parametry testów erozyjnych były następujące:

- średnica wewnętrzna dyszy: 1,5 mm ±0,075 mm;
- gaz stosowany do testu: suche powietrze o punkcie rosy -50°C;
- cząstki ścierniwa (erodent): Al₂O₃ o średniej wielkości 50 μm i ostrych krawędziach;
- prędkość cząstek: 30 m/s ±2 m/s;
- czas badania: 10 minut;
- kąty pomiędzy osią dyszy a powierzchnią próbki: 30°, 45°, 60° i 90° (±2°);
- zakres temperatury testów: od 18°C do 28°C;
- ilość cząstek ścierniwa: 2 g/minutę ±0,5 g;
- odległość dyszy od powierzchni próbki: 10 mm ±1 mm.

Nie stwierdzono istotnego wzrostu temperatury próbki podczas testów. Po testach zużycia erozyjnego wykonano badania topografii powierzchni próbek z wykorzystaniem profilometru laserowego 3D. Badania

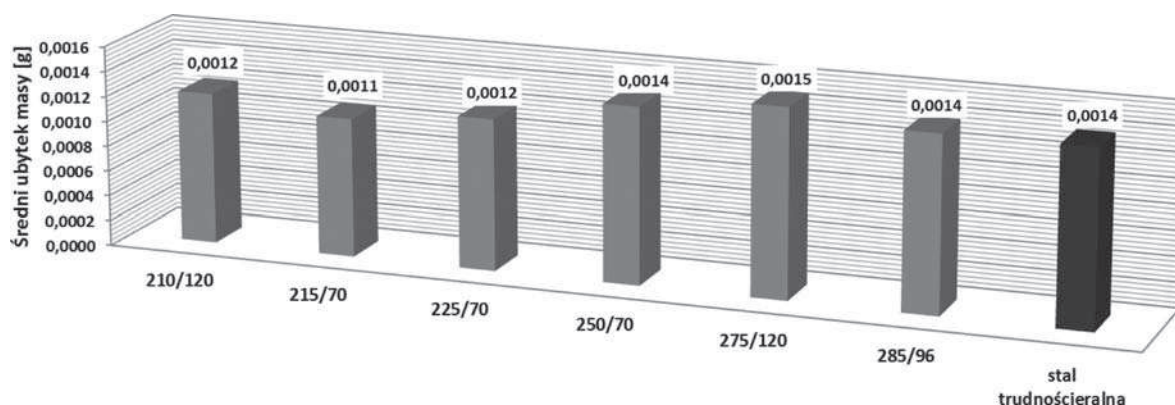
mikrostruktury przeprowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego i skaningowego mikroskopu elektronowego.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI EROZYJNEJ

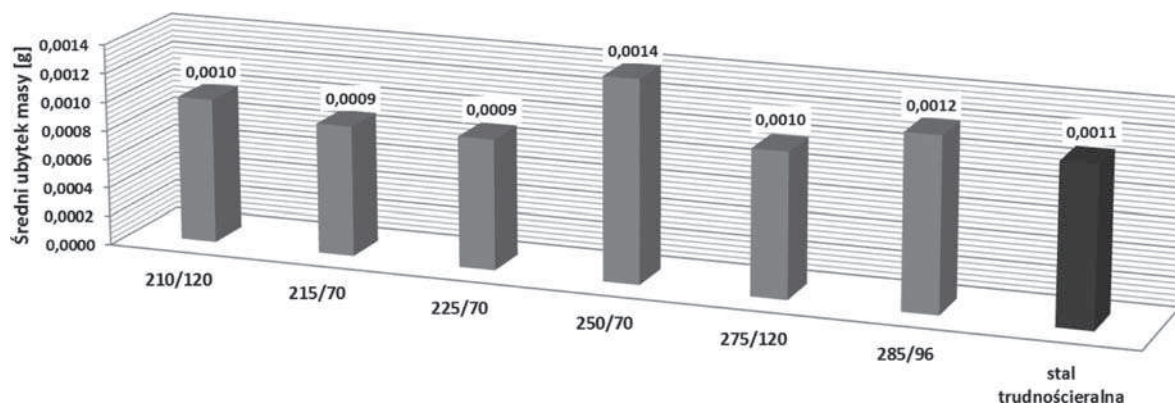
Wyniki badań odporności erozyjnej stali NANOS-BA[®] w odniesieniu do stali trudnościeralnej martenzytycznej (dla której przyjęto poziom „0”) zestawiono w tabelicy 4. Przedstawiono wyniki pomiarów ubytku masy jako procentowy przyrost lub spadek w stosunku do poziomu „0”. Na rysunkach 2–5 zamieszczono

wyniki pomiarów bezwzględnego ubytku masy dla poszczególnych kątów padania erodentu. Stwierdzono wyraźną zależność intensywności zużycia erozyjnego określonego średnim ubytkiem masy od kąta padania strumienia cząstek ścierniwa dla większości wariantów stali bainityczno-austenitycznej. Stal NANOS-BA[®] po wygrzewaniu izotermicznym w temperaturze 210°C przez 120 godzin o twardości ok. 600 HV wykazała wyższą odporność na zużycie, pod wpływem oddziaływania ścierniwa dla wszystkich badanych kątów: 30°, 45°, 60° i 90°, niż stal trudnościeralna o mikrostrukturze martenzytu. Wariant 210/120 wykazał podobny stopień zużycia erozyjnego (ubytek masy próbki) dla badanych kątów w zakresie 30÷90°.



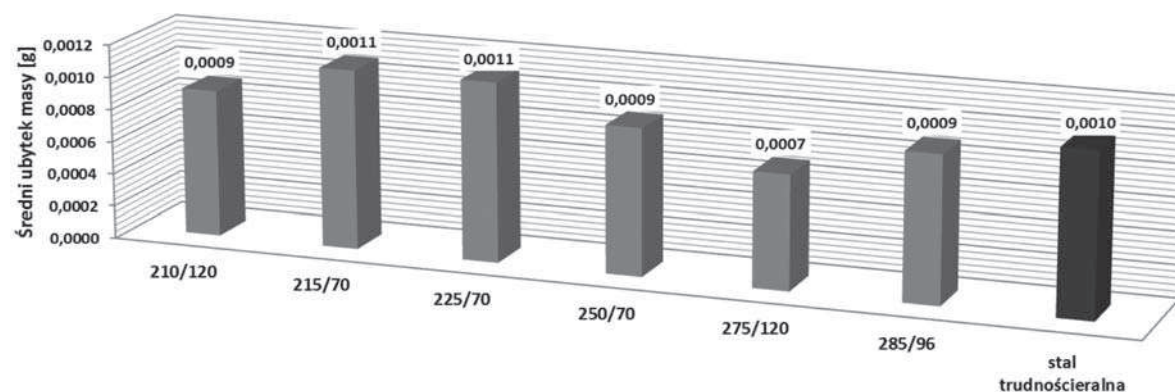
Rys. 2. Średni ubytek masy próbki po teście zużycia erozyjnego dla kąta padania erodentu 30°

Fig. 2. Average mass loss of specimen after erosive wear resistance test at angle of particles impact 30°



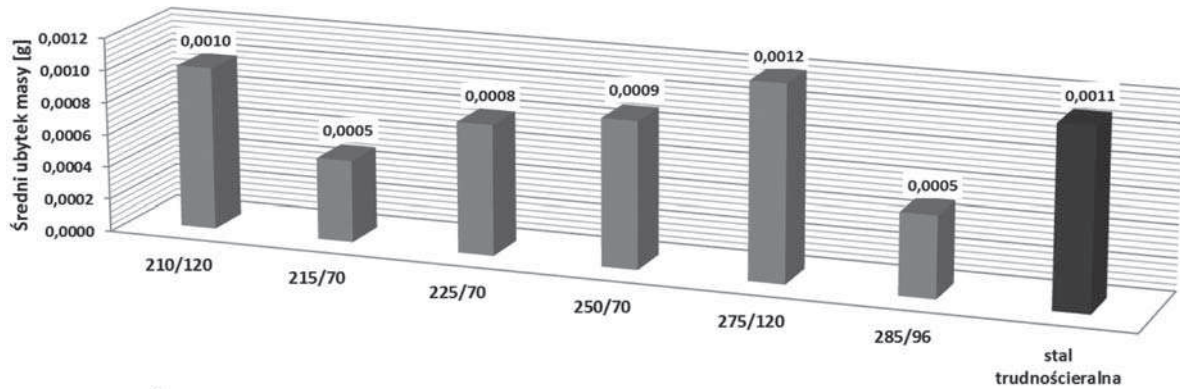
Rys. 3. Średni ubytek masy próbki po teście zużycia erozyjnego dla kąta padania erodentu 45°

Fig. 3. Average mass loss of specimen after erosive wear resistance test at angle of particles impact 45°



Rys. 4. Średni ubytek masy próbki po teście zużycia erozyjnego dla kąta padania erodentu 60°

Fig. 4. Average mass loss of specimen after erosive wear resistance test at angle of particles impact 60°



Rys. 5. Średni ubytek masy próbki po teście zużycia erozyjnego dla kąta padania erodentu 90°

Fig. 5. Average mass loss of specimen after erosive wear resistance test at angle of particles impact 90°

Tablica 4. Wyniki badań odporności na zużycie erozyjne stali NANOS-BA® dla kąta padania ścierniwa w zakresie 30-90°. (% zmiana masy próbki stali NANOS-BA® w odniesieniu do stali trudnościeralnej)

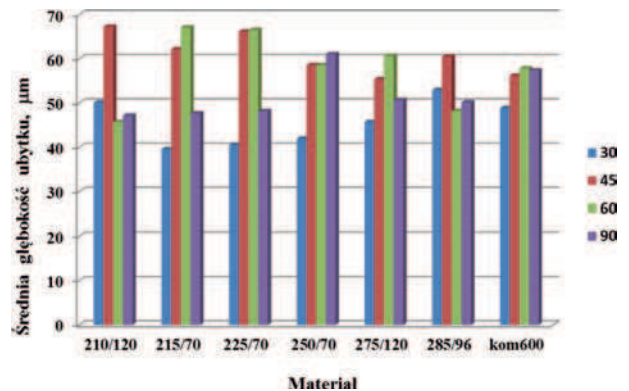
Table 4. Examination results of erosive wear resistance of NANOS-BA® steel at erosion particle impact angle in the range of 30-90°. (change of specimen mass of NANOS-BA® steel in comparison with commercial wear resistant steel, in %)

Kąt °	Wariant obróbki cieplnej stali NANOS-BA®					
	210/120	215/70	225/70	250/70	275/120	285/96
30	-14,3%	-21,4%	-14,3%	0,0%	+7,1%	0,0%
45	-9,1%	-18,2%	-18,2%	+27,3%	-9,1%	+9,1%
60	-10,0%	+10,0%	+10,0%	-10,0%	-30,0%	-10,0%
90	-9,1%	-54,5%	-27,3%	-18,2%	+9,1%	-54,5%

Maksymalną odporność erozyjną uzyskano dla wariantów 215/70 (twardość 590 HV) i 285/96 (twardość 500 HV) dla kąta padania cząstek 90° – ubytek masy był dla tych przypadków niższy o ponad 50% w odniesieniu do stali martenzytycznej. Warianty 215/70 (twardość 590 HV) i 225/70 (twardość 600 HV) charakteryzowała wysoka odporność na zużycie dla kątów 30°, 45° i 90°. Nie stwierdzono zależności odporności erozyjnej od twardości stali nanostrukturanej. Uzyskane dla stali NANOS-BA® pojedyncze wyniki o zbliżonej i/lub niższej odporności na zużycie wymagają dodatkowych analiz oraz wykonania badań większej liczby próbek. Badania te są obecnie kontynuowane.

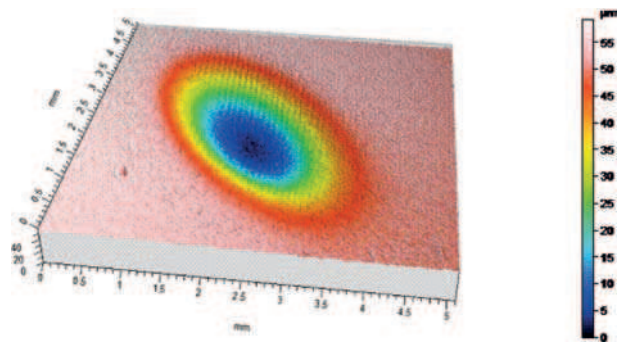
Wyniki wstępnej analizy topografii powierzchni próbek przedstawiono na diagramie na rys. 6. Przykładowe wyniki badań topografii powierzchni próbek w obszarze działania erodentu zamieszczono na rys. 7 i 8. Na podstawie badań powierzchni określono głębokość i kształt śladów zużycia erozyjnego. Głębokość krateru wytworzonego na skutek działania erodentu wynosiła od ok. 40 do 70 µm. Minimalną głębokość ubytku ok. 40 µm stwierdzono dla wariantów stali NANOS-BA® 215/70; 225/70 i 250/70 dla kąta 30°. Dla kąta 60° najmniejszą wartość głębokości ubytku ok. 45 µm wykazał wariant 210/120, a dla 90° najmniejszą głębokością ubytku wynoszącą ok. 48 µm charakteryzowały się warianty 210/120; 215/70 i 225/70.

Przy kącie padania cząstek erodentu 45° stwierdzono dla wszystkich badanych wariantów oraz dla stali kom600 największe wartości głębokości ubytku zawierające się w przedziale od 55 do 67 µm. Warianty 250/70; 275/120 i 285/96 o twardości od 500 do 560 HV wykazały zbliżoną charakterystykę zużycia określoną głębokością ubytku, w stosunku do stali komercyjnej



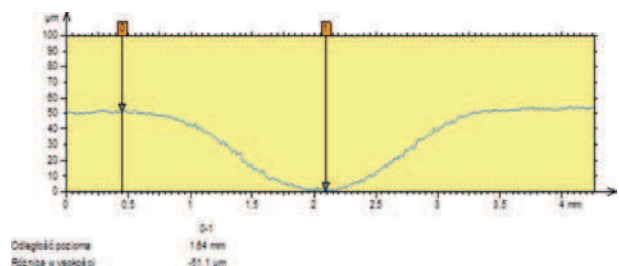
Rys. 6. Średnia głębokość ubytku w obszarze zużycia erozyjnego

Fig. 6. Average loss depth in the area of erosive wear



Rys. 7. Topografia 3D powierzchni próbki w obszarze zużycia erozyjnego. Stal NANOS-BA®, wariant 210/120, kąt uderzania cząstek 30°

Fig. 7. 3D surface topography of specimen in the area of erosive wear. NANOS-BA® steel, variant 210/120, particles' impact angle 30°



Rys. 8. Przekrój poprzeczny krateru erozyjnego. Stal NANOS-BA®, wariant 210/120, kąt uderzania cząstek 30°

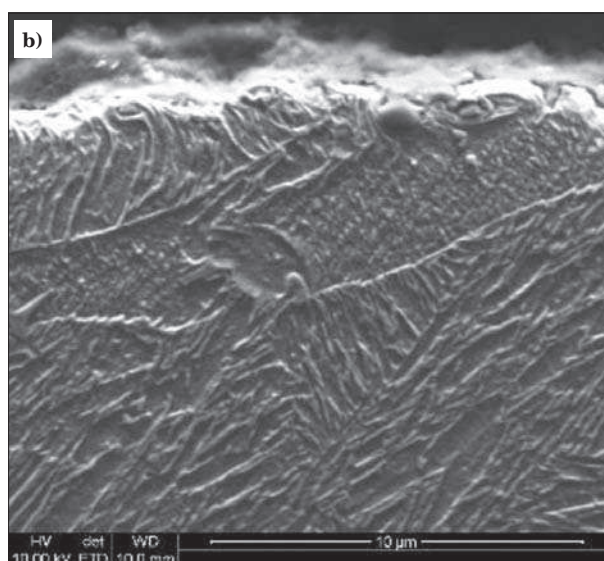
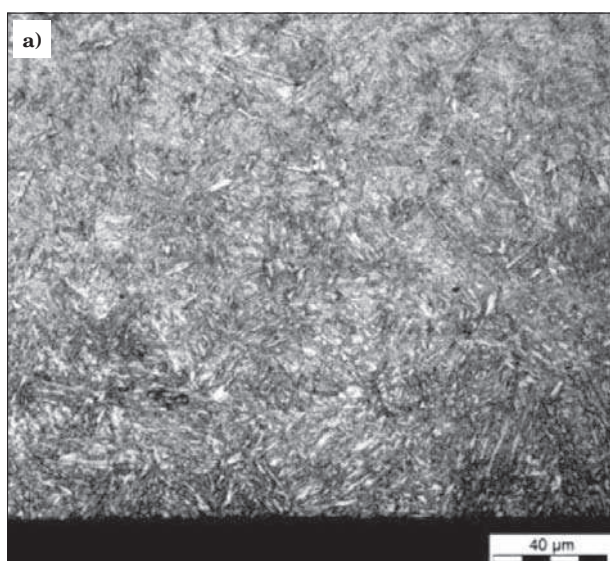
Fig. 8. Cross section of erosive crater. NANOS-BA® steel, variant 210/120, particles' impact angle 30°

trudnościeralnej. Wyznaczone parametry topografii powierzchni w obszarze działania erodentu będą przedmiotem szczegółowej odrębnej analizy.

4. MIKROSTRUKTURA W OBSZARACH BADAŃ ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIĘ EROZYJNE

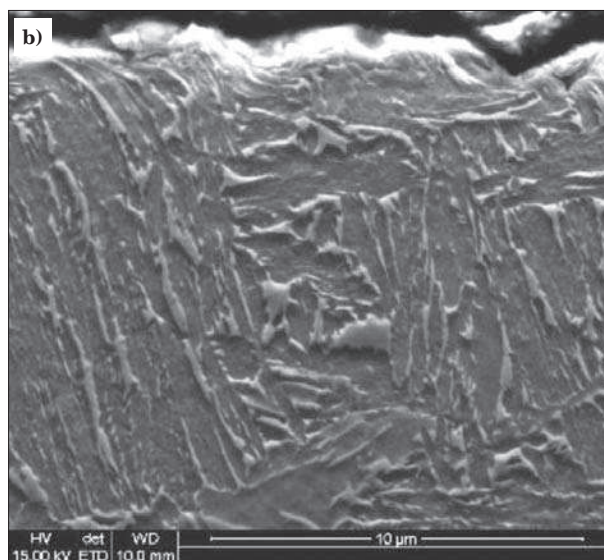
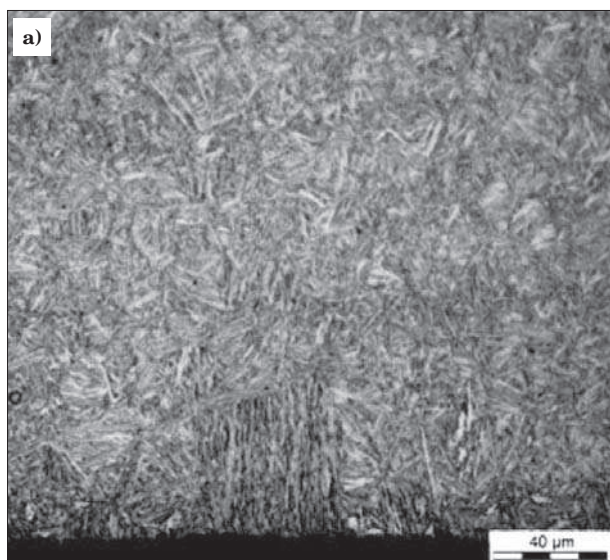
Badania mikrostruktury wykonano na zglądach po przeprowadzonych próbach odporności na zużycie erozyjne. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rys. 9 i 10. Badaniom poddano obszar przypowierzchniowy na przekroju poprzecznym próbek, ze szczególnym uwzględnieniem miejsc oddziaływania cząstek erodentu oraz obszar w środku grubości blach. Wyniki obserwacji wskazały jednoznacznie, że badania zużycia

erozyjnego wykonano w obszarze przypowierzchniowym charakteryzującym się nieznacznie innym typem mikrostruktury niż osnowa (materiał rodzimy). Dotyczy to zarówno stali NANOS-BA[®] jak i stali martenzytycznej trudnościeralnej. Dla stali NANOS-BA[®] w testach erozyjnych osiągnięto głębokość, na której występuje mikrostruktura nanolistowego bainitu bezwęglowego. Z uwagi na odwęglenie warstwy przypowierzchniowej morfologia bainitu różniła się nieznacznie od materiału o średniej zawartości węgla w stali. Testy wykonano na materiale o rozkładzie mikrostruktury na przekroju poprzecznym zbliżonym do blach wytwarzanych w warunkach przemysłowych. Obserwacje mikrostruktury za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego wykazały nieznaczne odkształcenie plastyczne w warstwie powierzchniowej wywołane dynamicznym oddziaływaniem cząstek ścierniwa.



Rys. 9. Mikrostruktura w obszarze przypowierzchniowym próbki poddanej badaniom odporności na zużycie erozyjne. Stal NANOS-BA[®], wariant 210/120, a) mikroskop świetlny, b) skaningowy mikroskop elektronowy

Fig. 9. Microstructure in the near-to-surface layer of specimen subjected to the erosive wear resistance test. NANOS-BA[®] steel, variant 210/120, a) light microscope, b) scanning electron microscope



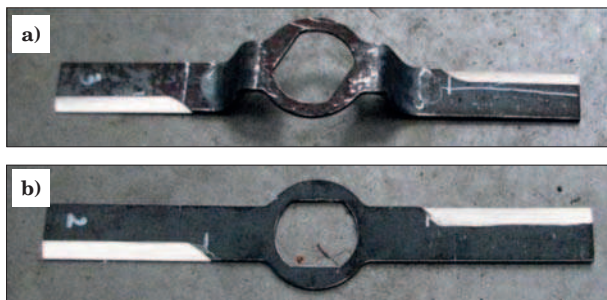
Rys. 10. Mikrostruktura obszaru przypowierzchniowego próbki poddanej badaniom odporności na zużycie erozyjne. Stal NANOS-BA[®], wariant 285/96, a) mikroskop świetlny, b) skaningowy mikroskop elektronowy

Fig. 10. Microstructure of the near-to-surface layer of specimen subjected to the erosive wear resistance test. NANOS-BA[®] steel, variant 285/96, a) light microscope, b) scanning electron microscope

5. WYNIKI EKSPERYMENTÓW ZASTOSOWANIA MIESZADEŁ ZE STALI NANOS-BA[®] W MIESZARCE TURBINOWEJ

Eksperyment polegający na zastosowaniu prototypowych mieszadeł ze stali NANOS-BA[®] przeprowadzono w Instytucie Metalurgii Żelaza w Zakładzie Badań Surowcowych wykorzystując mieszarkę turbinową. Urządzenie przeznaczone jest do mieszania i grudkowania materiałów drobnoziarnistych tj. pyłów, mułów, żużli, rud, ich koncentratów, itp. w szerokim zakresie ziarnowym. W warunkach użytkowania mieszadła poddawane są zużyciu na skutek kontaktu z twardymi materiałami drobnoziarnistymi (np. z tlenkami żelaza). W trakcie pracy, mieszadła zużywają się przez ścieranie, połączone z uderzeniami twardych cząstek.

Do testów wykonano mieszadła ze stali NANOS-BA[®], które poddano następującej finalnej obróbce cieplnej: austenitowanie w temperaturze 950°C przez 30 minut z następnym chłodzeniem w powietrzu i bezpośrednim wygrzewaniem izotermicznym w temperaturze 210°C przez 120 godzin. Czas ekspozycji mieszadeł eksperymentalnych wyniósł ok. 700 minut. Zastosowany materiał wykazał zdecydowanie wyższą odporność na zużycie niż dotychczas stosowane. W tabelicy 5 zamieszczono wymiary i masę przygotowanych mieszadeł eksperymentalnych.



Rys. 11. Fotografie mieszadeł eksperymentalnych ze stali NANOS-BA[®] przed testem odporności na zużycie. a) mieszadło kształtowane; b) mieszadło płaskie

Fig. 11. Photography of experimental stirrers made of NANOS-BA[®] steel before wear resistance test. a) formed stirrer, b) flat stirrer

Tablica 5. Wymiary mieszadeł wykonanych ze stali NANOS-BA[®] przed eksperymentem użytkowania

Table 5. Dimensions of stirrers made of NANOS-BA[®] steel before exploitation experiment

Nr mieszadła	Długość mm	Szerokość mm	Grubość mm	Masa g
1	403	42	6,01	600
2	402	41	5,73	600
3	401	40	5,81	690
4	402	41	5,78	650

Tablica 6. Wymiary oraz wyniki pomiarów ubytku masy mieszadeł eksperymentalnych po testach na zużycie (stal NANOS-BA[®], wariant 210/120)

Table 6. Dimensions and results of mass loss measurements of experimental stirrers after wear tests (NANOS-BA[®] steel, variant 210/120)

Nr mieszadła	Długość mm	Szerokość mm	Grubość mm	Masa g	Ubytek masy %	Inne informacje
1	385	35	5,90	513	14,5	Mieszadło płaskie
4	335	40	4,50	425	34,6	Mieszadło kształtowane (najtrudniejsze warunki użytkowania)



Rys. 12. Fotografie mieszadeł eksperymentalnych ze stali NANOS-BA[®] po teście odporności na zużycie. a) mieszadło kształtowane, b) mieszadło płaskie

Fig. 12. Photography of experimental stirrers made of NANOS-BA[®] steel after wear resistance test. a) formed stirrer, b) flat stirrer

Fotografie mieszadeł zamieszczono na rys. 11. W tabelicy 6 zestawiono wyniki pomiarów masy i wymiarów mieszadeł po 700 minutach (ok. 12 godzinach) użytkowania. Ubytek masy mieszadła kształtowanego pracującego w najtrudniejszych warunkach wyniósł ok. 34%. Fotografie mieszadeł po testach użytkowania zamieszczono na rys. 12.

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki badań odporności na zużycie erozyjne stali nanostrukturalnej bainityczno-austenitycznej NANOS-BA[®]. Do badań wytypowano kilka wariantów tego gatunku stali zróżnicowanych pod względem zastosowanych parametrów finalnej obróbki cieplnej, która determinuje powstanie określonego typu mikrostruktury przez co wpływa bezpośrednio na uzyskanie kombinacji wytrzymałości i plastyczności. Wykonano eksperymenty odporności na działanie strumieniowo-ściernych cząstek Al₂O₃. Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano następujące wnioski:

- Stal bainityczno-austenityczna (NANOS-BA[®]) – wariant 210/120 o twardości 600 HV – może stanowić alternatywę dla obecnie stosowanych stali trudnościeralnych. Wyniki badań wykazały niższy ubytek masy próbki w warunkach zużycia erozyjnego dla kątów: 30°, 45°, 60° i 90° o ok. 10% w porównaniu do komercyjnej stali trudnościeralnej o twardości 600 HV.
- Opracowano warianty obróbki cieplnej stali NANOS-BA[®] o odporności na zużycie erozyjne do 55% wyższej niż stal komercyjna trudnościeralna, w zależności od kąta padania erodentu.
- Nie stwierdzono zależności odporności erozyjnej od twardości stali bainityczno-austenitycznej w zakresie 500÷600 HV oraz od ułamka objętości austenitu szczątkowego w zakresie 15÷30%.
- Eksperyment polegający na zastosowaniu mieszadeł wykonanych ze stali NANOS-BA[®], w wariantcie

210/120 o twardości 600 HV potwierdził wysoką odporność na zużycie tych elementów w warunkach oddziaływania ścierno-udarowego twardych cząstek (m.in. tlenków żelaza).

Na podstawie wstępnej analizy wyników badań topografii powierzchni w obszarach oddziaływania cząstek erodentu wskazano warianty stali NANOS-BA® o mniejszej głębokości ubytku w porównaniu do stali komercyjnej trudnościeralnej.

LITERATURA

1. Adamiec P., Lalik S.: Wpływ struktury napoin na zużycie ściernie napawanych części maszyn, *Inżynieria Materiałowa*, nr 3, 1989, s. 80
2. DasBakshi S., Leiro A., Prakash B., Bhadeshia H.K.D.H.: Dry rolling/sliding wear of nanostructured bainite, *Wear*, 316, 2014, s. 70
3. Solano-Alvarez W., Pickering E.J., Bhadeshia H.K.D.H.: Degradation of nanostructured bainitic steel under rolling contact fatigue, *Materials Science&Engineering A*, 617, 2014, s. 156
4. DasBakshi S., Shipway P.H., Bhadeshia H.K.D.H.: Three-body abrasive wear of fine pearlite, nanostructured bainite and martensite, *Wear*, 308, 2013, s. 46
5. Leiro A., Vuorinen E., Sundin K.G., Prakash B., Sourmail T., Smanio V., Caballero F.G., Garcia-Mateo C., Elvira R.: Wear of nano-structured carbide-free bainitic steels under dry rolling-sliding conditions, *Wear*, 298–299, 2013, s. 42
6. Sourmail T., Caballero F.G., Garcia-Mateo C., Smanio V., Ziegler C., Kuntz M., Elvira R., Leiro A., Vuorinen E. and Teeri T.: Evaluation of potential of high Si high C steel nano-structured bainite for wear and fatigue applications, *Materials Science and Technology*, 2013, Vol. 29, No 10, s. 1166
7. Novel nanostructured bainitic steel grades to answer the need for high-performance steel components (NANOBAIN) – projekt zrealizowany w latach 2008-2011 z funduszy RFCS
8. Novel nano-structured bainitic steels for enhanced durability of wear resistant components – projekt realizowany z funduszy RFCS (data zakończenia projektu 31.12.2017)
9. Patenty IMŻ na podstawie: zgłoszenia nr P. 394037 (UP RP) z dnia 25.02.2011: Stal bainityczno-austenityczna i sposób wytwarzania z tej stali blach, zgłoszenia nr P. 396431 (UP RP) z dnia 26.09.2011: Sposób obróbki cieplnej stali bainityczno-austenitycznej. Zgłoszenie patentowe IMŻ nr P.407091 (UP RP) z dnia 6.02.2014: Sposób obróbki cieplnej wyrobów z utrwartyżymałej stali średniostopowej, Prawo ochronne UP RP na znak towarowy NANOS-BA®, udzielone od dnia 14.11.2011 (klasa towarowa: 06 blachy stalowe – blachy stalowe o dużej wytrzymałości i plastyczności)
10. Garbarz B., Marcisz J., Adamczyk M., Wiśniewski A.: Ultra-high-strength nanostructured steels for armours, *Problemy Mechatroniki, Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*. 1 (3), 2011, s. 25
11. Garbarz B., Marcisz J., Burian W., Wiśniewski A.: Mechanizmy odkształcenia dynamicznego w ultrawytrzymałych stalach nanostrukturalnych przeznaczonych na pancerze, *Problemy Techniki Uzbrojenia. Biuletyn Naukowy Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, Zeszyt 118*, nr 2/2011, s. 41
12. Marcisz J., Garbarz B., Burian W., Wiśniewski A.: New Generation Maraging Steel and High-Carbon Bainitic Steel for Armours, 26th International Symposium on Ballistics, 12-16 September 2011, Miami-Florida, USA, s. 1595
13. Garbarz B., Burian W., Marcisz J., Wiśniewski A.: The nano-duplex NANOS-BA steel for application in construction of armours, *Problemy Mechatroniki, Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa (Problems of Mechatronics. Armament, Aviation, Safety Engineering)*, 4 (10), 2012, s. 7
14. Marcisz J., Garbarz B., Burian W., Stępień J. and Starczewski L.: Ballistic testing of nano-precipitation hardened and nano-duplex steels, 27th International Symposium on Ballistics, 22-26 April 2013, Freiburg, Germany, s. 1834
15. Burian W., Marcisz J., Garbarz B., Starczewski L.: Nano-structured bainite-austenite steel for armours construction, *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 59, no 3, 2014, s. 1211
16. 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, 2014 Atlanta, USA, s. 1348