

dr hab. inż. Bogdan GARBARZ, prof. nzw *

dr inż. Jarosław MARCISZ*

dr Wojciech BURIAN*

prof. dr hab. inż. Adam WIŚNIEWSKI**

* Instytut Metalurgii Żelaza

** Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

MECHANIZMY ODKSZTAŁCENIA DYNAMICZNEGO W ULTRA- WYTRZYMAŁYCH STALACH NANOSTRUKTURALNYCH PRZE- ZNACZONYCH NA PANCERZE

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań morfologii i mikrostruktury obszarów odkształconych dynamicznie w ostrzelanych pociskami płytkach z dwóch nowych gatunków stali nanokrystalicznych. Badania wykonano na próbkach z nanokompozytowej stali bainityczno – austenitycznej (stal NBA) i ultrawytrzymałej stali maraging (stal MAR). Oceniono efekty ostrzału testowych płytek ze stali nanokrystalicznych. W ostrzelanych płytkach z obydwu stali w sąsiedztwie krawędzi krateru stwierdzono strukturalne efekty odkształcenia osnowy. W strefie odkształcenia powstały adiabaticzne pasma ścinania oraz mikropęknięcia. Średnia twardość adiabaticznych pasm ścinania w stali NBA jest wyższa od średniej twardości osnowy tej stali, natomiast w stali MAR stwierdzono efekt odwrotny - średnia twardość adiabaticznych pasm ścinania jest niższa od średniej twardości osnowy tej stali.

THE MECHANISMS OF DYNAMIC DEFORMATION IN ULTRAHIGH- STRENGTH NANOSTRUCTURED STEELS FOR ARMOURS

Abstract: Results of investigation of morphology and microstructure in dynamically deformed areas of fired with projectiles plates made of new grades of nanocrystalline steels have been presented. Investigation was carried out on specimens of nanocomposite bainite – austenite steel (NBA steel) and ultrastrong maraging steel (MAR steel). Effects of firing at test plates of the nanocrystalline steels have been assessed. In the plates of the both steels tested by firing in areas close to edge of the crater structural features of matrix deformation were found. In the deformation areas adiabatic shear bands and microcracks formed. Average hardness of adiabatic shear bands in NBA steel is higher than average hardness of matrix of this steel while in MAR steel an opposite effect was found – average hardness of adiabatic shear bands was lower than average hardness of matrix of this steel.

1. Wstęp

Mechanizmy oddziaływania pocisku na wewnętrzną strukturę materiału pancerza są skomplikowane ze względu na bardzo duże szybkości odkształcenia i znaczną energię oddziaływania. Oddziaływanie dynamiczne na materiał metaliczny powoduje jego pękanie (dezintegrację) i/lub wywołuje znaczne zmiany struktury w obszarze oddziaływania. Zmiany struktury spowodowane są wprowadzeniem odkształcenia o różnym stopniu niejednorodności oraz przemian fazowych zlokalizowanych w wyodrębnionych obszarach materiału. Cechą charakterystyczną odkształcenia dynamicznego w materiałach metalicznych zachodzącego z szyb-

kością większą niż około 10^3s^{-1} jest tworzenie się obszarów o ekstremalnie dużym nagromadzeniu energii odkształcenia, zwanych adiabatycznymi pasmami ścinania (ang.: *adiabatic shear bands*). Zjawisko to wykazuje cechy przemiany adiabatycznej, ponieważ energia odkształcenia dynamicznego generowana w pasmach ścinania zostaje w całości (lub niemal w całości) zużyta na przemiany strukturalne i fazowe w tych obszarach. Morfologia i wewnętrzna struktura adiabatycznych pasm ścinania generowanych w materiałach metalicznych w wyniku dynamicznego odkształcenia były i są nadal przedmiotem wielu badań, np. [1-4]. Na podstawie dotychczasowych badań, adiabatyczne pasma ścinania można podzielić na trzy główne typy:

- - odkształceniowe adiabatyczne pasma ścinania,
- - transformacyjne adiabatyczne pasma ścinania,
- - odkształceniowo – transformacyjne adiabatyczne pasma ścinania.

Odształceniowe adiabatyczne pasma ścinania powstają wyłącznie w wyniku silnej lokalnej deformacji struktury wyjściowej, transformacyjne adiabatyczne pasma ścinania powstają wyłącznie w wyniku zlokalizowanych przemian fazowych, natomiast odkształceniowo – transformacyjne adiabatyczne pasma ścinania powstają z udziałem obydwu tych mechanizmów. Wymiary, morfologia i mikrostruktura adiabatycznych pasm ścinania zależą od struktury i właściwości odkształcanego metalu lub stopu (w tym od składu chemicznego) oraz od energii i szybkości odkształcenia dynamicznego. Powstawanie pierwotnych adiabatycznych pasm ścinania wpływa na mechanizm odkształcenia pancerza i tym samym oddziałuje na jego właściwości ochronne. Istotnym zagadnieniem jest także reakcja pierwotnych adiabatycznych pasm ścinania na powtórne odkształcenie dynamiczne.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań morfologii i struktury wewnętrznej obszarów odkształconych dynamicznie w ostrzelanych próbkach z dwóch nowych gatunków stali nanokrystalicznych przeznaczonych do zastosowania na pancerze: nanokompozytowej stali bainityczno – austenitycznej i ultrawytrzymałej stali maraging. Opracowanie innowacyjnych materiałów na bazie żelaza o strukturze nanokrystalicznej przeznaczonych do konstrukcji warstwowych pancerzy i do innych specjalnych zastosowań jest celem projektu pt. „*Technologie wytwarzania supertwardych materiałów nanostrukturalnych ze stopów żelaza oraz ich zastosowanie w pancerzach pasywnych i pasywno-reaktywnych*”, realizowanego w ramach programu Unii Europejskiej POIG przez Instytut Metalurgii Żelaza IMŻ) i Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia (WITU) [5].

2. Materiały do badań i zastosowana metodyka

2.1. Materiały do badań

Płytki do badań ostrzałem i próbki do badań struktury, właściwości mechanicznych wykonano z dwóch gatunków ultrawytrzymałych stali: ze stali nanokompozytowej bainityczno – austenitycznej (stal NBA) oraz ze stali maraging (stal MAR).

Stal NBA jest gatunkiem wysokowęglowym średniostopowym zawierającym (wszystkie składy podano w % masowych) 0,55-0,85% C, średnio 2,0% Mn i 1,8% Si, dodatki takich pierwiastków jak Mo, Cr i Co regulujące hartowność i kinetykę przemian fazowych oraz kontrolowane ilości pierwiastków domieszkowych. Wytopy ze stali NBA wykonano w próżniowym piecu półprzemysłowym i odlano we wlewki płaskie o masie około 80 kg. Materiał do wykonania próbek odwalcowano na gorąco w postaci pasm o grubości 11,5 mm i o szerokości 240 mm i poddano obróbce cieplnej w półprzemysłowej linii LPS w IMŻ. Skład chemiczny i sposób obróbki cieplnej stali nanokompozytowej bainityczno - martenzytycznej jest przedmiotem zgłoszenia patentowego dokonanego przez IMŻ.

Do badań zastosowano wysokostopowe stale typu maraging w trzech gatunkach różniących się zawartością pierwiastków stopowych, co w połączeniu z zastosowanymi parametrami obróbki cieplnej umożliwia uzyskanie zróżnicowanych właściwości mechanicznych: MS400, MS500 i MS550, o zawartości 8,5-16,0%Ni, 13,5-20,5%Co, 5,0-5,7%Mo, 2,2-5,2%W, 2,0-4,0%V, 0,0-0,9%Ti oraz o kontrolowanej ilości pierwiastków domieszkowych. Liczby w oznaczeniu gatunku stali MAR oznaczają nominalny poziom granicy plastyczności po zastosowaniu optymalnych parametrów starzenia w jednostkach ksi: 400 ksi=2,75 GPa, 500 ksi=3,45GPa i 550 ksi=3,80 GPa. Wytopy ze stali MAR wykonano w próżniowym piecu półprzemysłowym i odlano we wlewki o masie 80 kg i 20 kg. Materiał do wykonania płytek stanowiły płaskowniki o grubości 20 mm odkute z wlewków laboratoryjnych. Finalna obróbka cieplna stali maraging obejmująca przesycającie oraz starzenie umożliwia nadanie zróżnicowanych właściwości mechanicznych. W przypadku materiału przeznaczonego do oceny zdolności ochronnej zastosowano parametry obróbki cieplnej w szerokim zakresie czasów (od 1 godziny do ponad 200 godzin) i temperatur starzenia (od 430°C do 520°C).

2.2. Metodyka prób ostrzałem

Do badań zdolności ochronnej przygotowano płytki o wymiarach 50x50x10 mm oraz 100x100x8÷10 mm ze wszystkich gatunków stali po zastosowaniu zróżnicowanych wariantów obróbki cieplnej. Płytki ze stali NBA i MAR wykonane w opisany sposób poddano ostrzałowemu 12,7 mm pociskami typu B-32 o prędkości $V=817,5$ m/s. Na nieruchomym stendzie zamocowano płytę pancerną Armox500 typu „świadek” o wymiarach 600x600x10 mm, do której przyklejano płytki z badanych stali. Ostrzał wykonano z odległości 3 m pod kątem $\alpha=0^\circ$ od normalnej do płaszczyzny płytki.

Do badania zmian właściwości i struktury w obszarach oddziaływania dynamicznego zastosowano ostrzał amunicją kalibru 7,62 mm typu: P80 i APM61. Pociski P80 i APM61 mają rdzeń stalowy o twardości powyżej 60 HRC. W trakcie prób mierzono prędkość pocisku oraz rejestrowano efekty oddziaływania pocisku na płytkę za pomocą kamery. Ostrzał wykonano z odległości 10 m. Próbkę mocowane były w ramce ograniczającej boczne powierzchnie płytek. Dla próbek wytypowanych do badań mikrostruktury i twardości w obszarach zmian wywołanych odkształceniem udarowym zastosowano następujące parametry ostrzału: stal NBA-100x100x9 mm, prędkości 830÷880 m/s; stal MAR-100x100x10 mm, prędkość 830 m/s.

2.3. Metodyka badania właściwości mechanicznych i struktury

Płytki przeznaczone do badań zdolności ochronnej oraz po przeprowadzeniu testów ostrzałem poddano badaniom właściwości i mikrostruktury. Wykonano pomiary twardości metodą HRC oraz HV. Twardość próbek przed ostrzałem kontrolowano wykonując pomiary w każdym narożu płytki. W obszarach oddziaływania dynamicznego dodatkowo wykonano pomiary mikrotwardości HV0,01. Właściwości mechaniczne (R_e , R_m i wydłużenie względne) wyznaczono w próbie statycznego rozciągania oraz w próbach ściskania w temperaturze otoczenia. Dla prób ściskania zastosowano szybkości odkształcenia w zakresie od 0,0003 do 0,01 s⁻¹. Testy jednoosiowego ściskania wykonano na symulatorze Gleeble stosując próbki cylindryczne o wymiarach ϕ 6x7 mm.

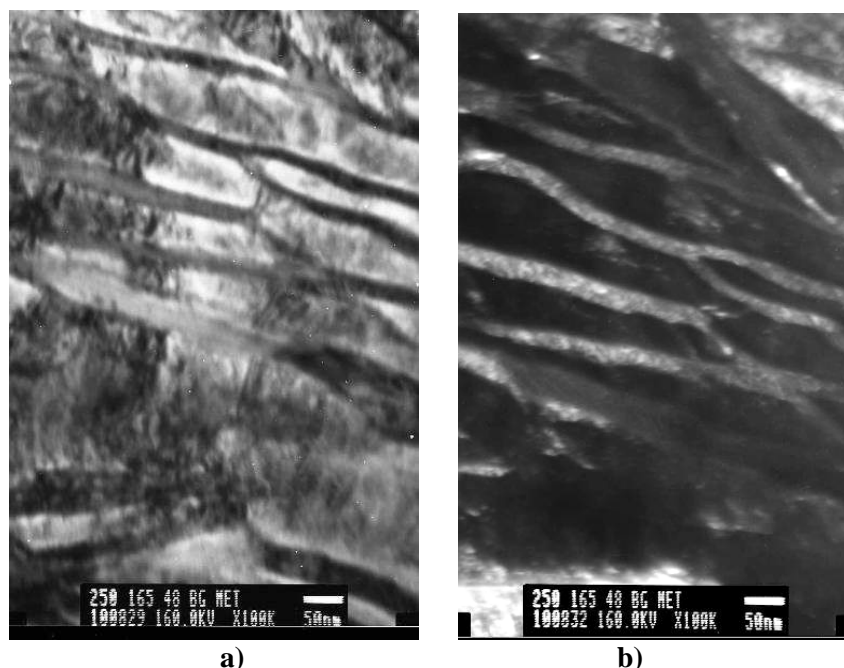
Badania mikrostruktury próbek przed oraz po ostrzale wykonano z zastosowaniem mikroskopu świetlnego (MS), skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) oraz transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM).

3. Wyniki badań

3.1. Właściwości mechaniczne i struktura materiałów przygotowanych do prób ostrzałem

3.1.1. Stal nanokompozytowa bainityczno – austenityczna

Strukturę wytworzoną w obrobionych cieplnie płaskownikach ze stali NBA badano metodami MS, SEM i TEM. Stwierdzono, że rozdzielczość mikroskopu świetlnego jest za mała, aby wyróżnić szczegóły morfologiczne wytworzonej struktury. Elektronowy mikroskop skaningowy stwarza możliwość częściowej identyfikacji substruktury nanokompozytu bainityczno-austenitycznego. Odpowiednie wytrawienie powierzchni próbek pozwala zobrazować nanolistwową budowę pakietów bainityczno-austenitycznych. W celu scharakteryzowania struktury wytworzonej w stali NBA wykonano badania za pomocą TEM techniką cienkich folii. Na podstawie analizy obrazów cienkich folii oraz dyfraktogramów elektronowych i badań z użyciem techniki ciemnego pola stwierdzono, że badane struktury zbudowane są z pakietów nanolistew ferrytu bainitycznego (o szerokości w granicach 10÷100 nm) zawierającego dyslokacje o dużej gęstości i z nanolistew austenitu resztkowego występującego pomiędzy nanolistwami ferrytu bainitycznego (rys. 1). Stwierdzono, że poza austenitem resztkowym w postaci nanolistew, występują także obszary austenitu resztkowego o większych rozmiarach, w granicach 200÷500 nm. W badanych próbkach nie stwierdzono w sposób jednoznaczny występowania węglików.

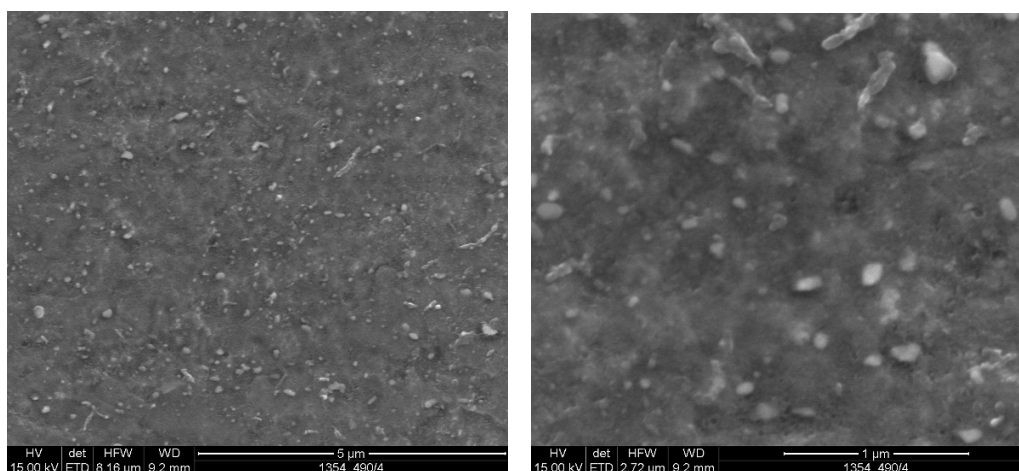


Rys. 1. Mikrofotografie nanokompozytu bainityczno-austenitycznego w stali NBA; cienka folia wykonana w temperaturze minus 35°C; a) jasne pole, b) ciemne pole wykonane w refleksie austenitu, TEM

Właściwości mechaniczne stali NBA w finalnym stanie obróbki cieplnej określono metodami pomiaru twardości oraz w próbach rozciągania i ściskania w temperaturze otoczenia. Twardość płytek i próbek ze stali NBA wynosi 50-53 HRC (580-610 HV), wytrzymałość na rozciąganie $R_m=1820-1830$ MPa, granica plastyczności w próbie rozciągania $R_{p0,2}=1500-1560$ MPa, wydłużenie względne w próbie rozciągania $A_5=12,5-15,0$ % oraz granica plastyczności w próbie ściskania $R_{p0,2}^S=1870-1930$ MPa.

3.1.2. Stal maraging

Badania strukturalne stali MAR przeprowadzono z zastosowaniem SEM na próbkach ze stali w gatunkach MS400 i MS550. Mikrostruktura i właściwości stali maraging silnie zależą od parametrów starzenia. Próbki do badań mikrostruktury poddano przesycaaniu, a następnie starzeniu w temperaturach 460°C i 490°C. Badania strukturalne za pomocą SEM obejmowały także mikroanalizę składu chemicznego wydzieliń o rozmiarach od kilkunastu do kilkuset nanometrów. W wyniku przeprowadzonych obserwacji mikrostruktury dla obu gatunków stali ujawniono występowanie drobnych globularnych wydzieliń faz międzymetalicznych równomiernie rozłożonych w osnowie martenzytu, jak również występowanie pojedynczych cząstek o znacznie większych rozmiarach (rys. 2). Udział obserwowanych wydzieliń w strukturze stali MS400 jest mniejszy w stosunku do MS550, przy czym stal MS550 charakteryzuje się większą niejednorodnością pod względem ich wielkości.



Rys.2. Mikrostruktura stali MS550 po starzeniu w temperaturze 490°C w czasie 4 godz., SEM

Właściwości mechaniczne stali MAR w finalnym stanie obróbki cieplnej określono metodami pomiaru twardości oraz w próbach ściskania w temperaturze otoczenia. Twardość płytek i próbek ze stali MAR w zależności od zastosowanych parametrów obróbki cieplnej wynosi: 56-65 HRC (600-800 HV). Na podstawie krzywych ściskania σ - ϵ wyznaczono granicę plastyczności $R_{p0,2}^S$ stali MAR, która wynosi, w zależności od zastosowanych parametrów obróbki cieplnej, od 1940 do 2730 MPa.

3.2. Wyniki ostrzału testowych płytek z badanych materiałów

Badania płytek po ostrzale obejmowały: ocenę skuteczności ochrony płyty „świadek” – ze stali Armox500 (przebiecie lub brak penetracji), obserwację i badania śladów na płycie „świadek” (opis morfologii śladów i pomiary efektów po ostrzale), badania przełomów pękniętych lub zdeintegrowanych próbek z badanych stali NBA i MAR oraz badania mikrostruktury i twardości próbek ze stali NBA i MAR w obszarze odkształcenia dynamicznego.

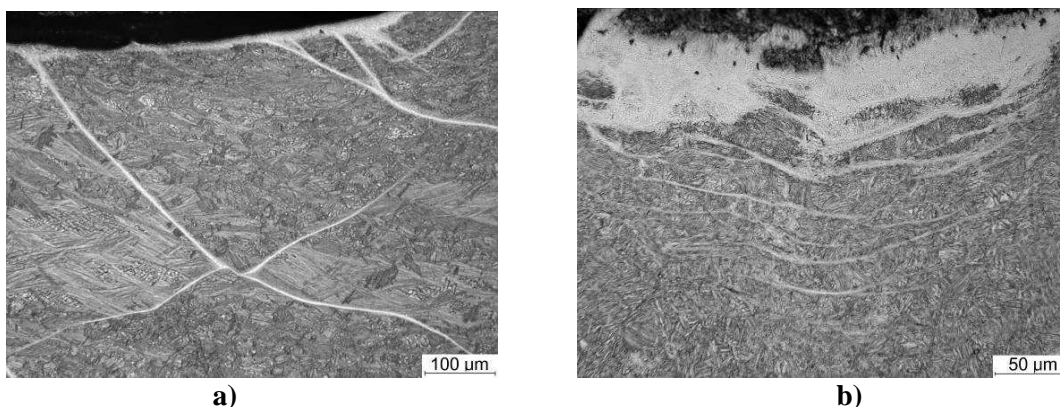
Wszystkie wykonane testy ostrzału płytek ze stali MAR amunicją kalibru 12,7 mm spełniły pozytywnie próbę ochrony płyty „świadek”. Płytki te w wyniku ostrzału uległy fragmentacji. Badania przełomów fragmentów płytek wykazały w większości przypadków mieszany plastyczno-kruchy charakter powierzchni pęknięcia. Na podstawie pomiarów efektów ostrzału oraz obserwacji śladów ostrzału na płycie „świadek” wytypowano warianty stali MAR do kolejnych eksperymentów. Dla stali MAR stwierdzono następujące efekty na płycie „świadek” (szczegóły metodyki podano w [5]): głębokość wgłębienia 1,1÷4,0 mm; średnica wgłębienia 19÷31 mm; wysokość wybruszenia 0,7÷2,6 mm i średnica wybruszenia 17÷41 mm.

Dla stali NBA określono minimalny poziom twardości zapewniający ochronę płyty „świadek” wynoszący 47 HRC. Wszystkie próbki ze stali NBA o twardości powyżej 47 HRC spełniły pozytywnie testy ostrzału, ochraniając płytę „świadek”. Dodatkowo w przypadku płytek 100x100x9 mm stwierdzono brak ich dezintegracji oraz zatrzymanie pocisku w płytce. Ustalono na obecnym etapie badań, że jest to wariant optymalny w zakresie wytrzymałości, plastyczności i mikrostruktury z punktu widzenia zdolności ochronnej. Dla stali NBA stwierdzono następujące efekty na płycie „świadek” (szczegóły metodyki podano w [5]): głębokość wgłębienia 1,1÷5,2 mm; średnica wgłębienia 21÷31,5 mm; wysokość wybrzuszenia 0,4÷2,3 mm i średnica wybrzuszenia 20÷38 mm.

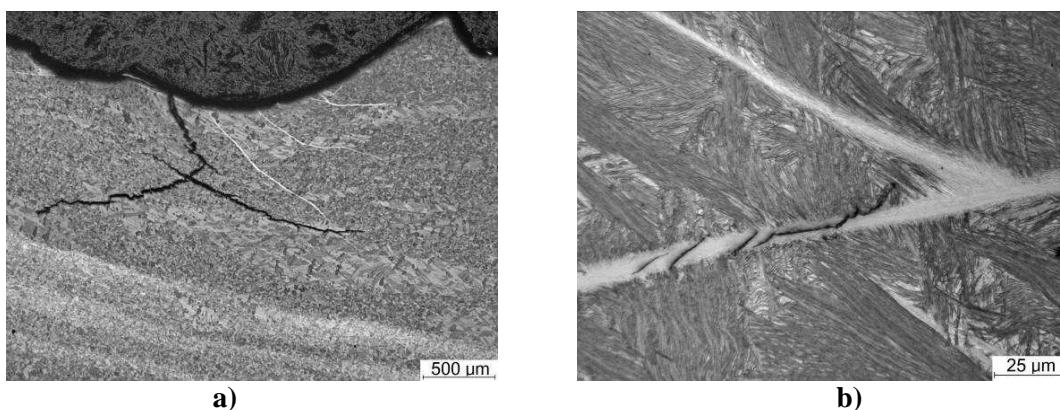
3.3. Zmiany właściwości i mikrostruktury badanych stali w obszarach oddziaływania dynamicznego

Badania zmian właściwości i mikrostruktury w obszarach oddziaływania dynamicznego wykonano po ostrzale płytek testowych ze stali NBA (płytką 100x100x9mm o twardości średniej 52 HRC) i ze stali MAR (płytką 100x100x10 mm z gatunku MS400 o twardości 61 HRC) amunicją kal. 7,62 mm AP o prędkości 830 m/s (wariant 1) i o prędkości 880 m/s (wariant 2), na płaszczyznach przecięcia krateru powstałego w wyniku oddziaływania z pociskiem przeprowadzonych równoległe do kierunku ostrzału (płaszczyzna R) i prostopadle do kierunku ostrzału (płaszczyzna P).

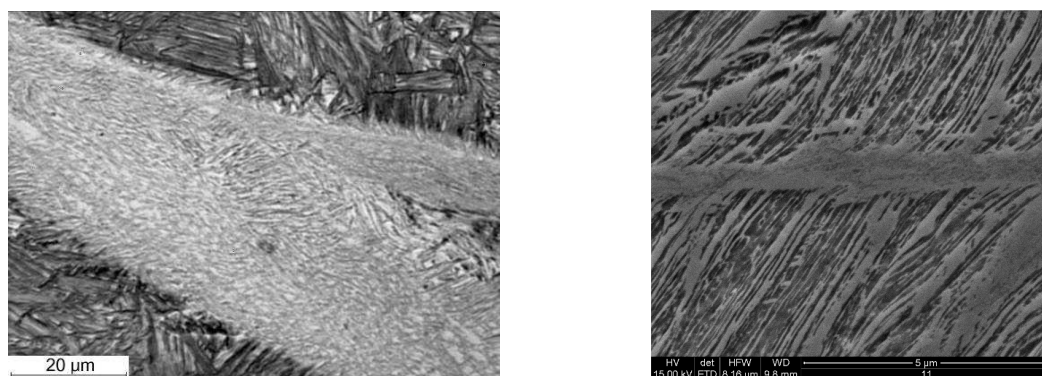
W stali NBA w sąsiedztwie krawędzi krateru powstały strefy odkształcenia osnowy o nasileniu zmniejszającym się ze wzrostem odległości od krateru. W strefie odkształcenia powstały adiabatyczne pasma ścinania wyróżniające się na tle wytrawionej struktury jako białe krzywoliniowe i często rozgałęziające się pasma o zmiennej szerokości od kilku do około 25 μm . Zasięg strefy pasm ścinania od krawędzi krateru w głąb materiału wynosi około 1,5 mm. Stwierdzono także powstanie białej warstwy bezpośrednio przylegającej do krawędzi krateru (rys. 3a,b). W strefie odkształcenia dynamicznego powstały mikropęknięcia przebiegające w osnowie (rys. 4a) i powstające w pasmach ścinania (rys. 4b). Obserwacja substruktury adiabatycznych pasm ścinania za pomocą MS i SEM nie dała jednoznacznej odpowiedzi, czy w obszarach pasm zaszła przemiana fazowa, częściowa lub całkowita, $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha'$ (rys. 5a, b). Morfologia zbliżona do struktury drobnopłytkowego wysokowęglowego martenzytu wskazywała by na transformacyjny typ adiabatycznych pasm ścinania. W celu jednoznacznego określenia substruktury adiabatycznych pasm ścinania należy wykonać badania na cienkich foliach za pomocą TEM. W obszarach adiabatycznych pasm ścinania wykonano pomiary mikrotwardości (HV0,01). Ze względu na małą szerokość pasm pomiary obejmują częściowo także osnowę. W wyniku tego dla pasm o wyższej twardości niż osnowa zmierzona twardość pasm jest zaniżona, a w przypadku pasm o twardości niższej niż osnowa ich twardość jest wyższa od rzeczywistej. Z pomiarów mikrotwardości wynika, że średnia twardość osnowy stali NBA poza obszarem pasm wynosi 630-660 HV, a średnia twardość adiabatycznych pasm ścinania wynosi ok. 810 HV.



Rys. 3. Mikrostruktura obszaru krateru po uderzeniu pocisku: a – stal NBA, płaszczyzna (R), b – stal NBA, płaszczyzna (P)- MS



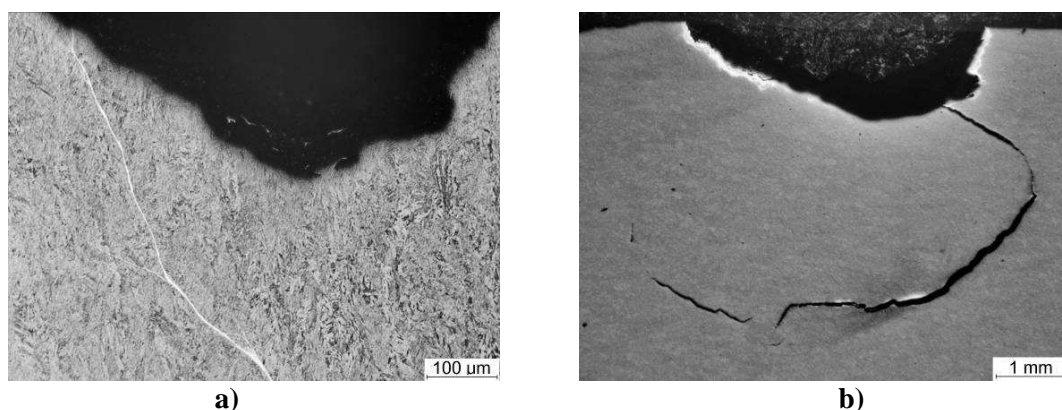
Rys. 4. Mikrostruktura obszaru krateru po uderzeniu pocisku: a – stal NBA, płaszczyzna (R), zasięg strefy oddziaływania dynamicznego, b – stal NBA, płaszczyzna (R), mikropeknięcia w pasmach - MS



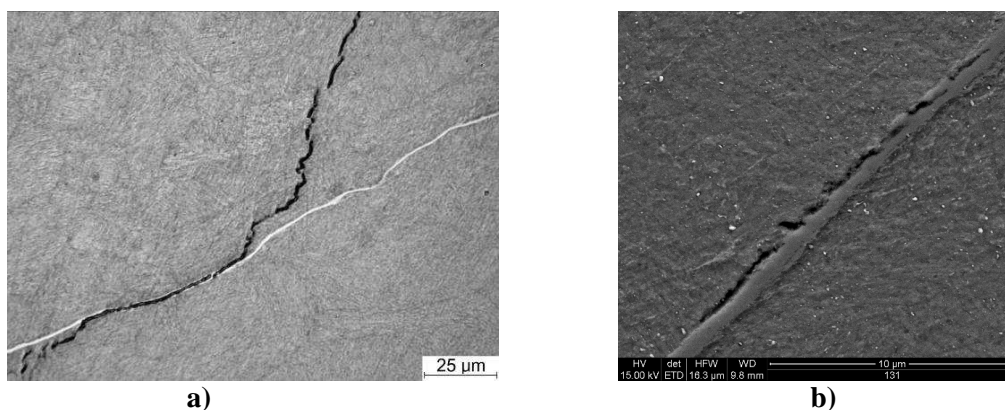
Rys. 5. Mikrostruktura adiabaticznych pasm ścinania w stali NBA obserwowana na płaszczyźnie badania (P): a – mikroskop świetlny, b – SEM

Z oceny morfologii oraz gęstości adiabaticznych pasm ścinania powstających w strefie dynamicznego odkształcenia w obszarze sąsiadującym z kraterem w płytkach ze stali MAR wynika, że stale te są mniej podatne do powstawania adiabaticznych pasm ścinania niż stal NBA. W sąsiedztwie krawędzi krateru stwierdzono powstanie strefy odkształcenia osnowy o nasileniu zmniejszającym się ze wzrostem odległości od krateru. W strefie odkształcenia powstały adiabaticzne pasma ścinania wyróżniające się na tle wytrawionej struktury jako białe krzywoliniowe i rozgałęziające się pasma o zmiennej szerokości od dziesiątych części μm do kilku μm , czyli znacznie węższe niż w stali NBA (rys. 6a). Zasięg strefy pasm ścinania od krawędzi krateru w głąb materiału wynosi około 3 mm. Stwierdzono także powstanie białej

warstwy bezpośrednio przylegającej do krawędzi krateru (rys. 6b). W strefie odkształcenia dynamicznego powstały mikropęknięcia przebiegające w osnowie, przebiegające wzdłuż pasm w ich wnętrzu i na granicy pasmo – osnowa (rys. 7a,b). Obserwacja substrukтуры adiabatycznych pasm ścinania za pomocą MS i SEM nie dała jednoznacznej odpowiedzi, czy w obszarach pasm zaszła przemiana fazowa, częściowa lub całkowita, $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha'$. W celu jednoznacznego określenia substrukтуры adiabatycznych pasm ścinania należy wykonać badania na cienkich foliach za pomocą TEM. W obszarach adiabatycznych pasm ścinania wykonano pomiary mikrotwardości (HV0,01). Ze względu na małą szerokość pasm pomiary obejmują częściowo także osnowę. Wyniki pomiarów mikrotwardości dla stali MS400 są następujące: twardość osnowy w obszarze oddalonym od pasm wynosi ok. 750 HV, a średnia twardość pasm 620 HV. Z pomiarów mikrotwardości osnowy i adiabatycznych pasm ścinania wynika, że twardość pasm w stali MAR jest niższa niż twardość osnowy, tj. przeciwnie niż w przypadku stali NBA.



Rys. 6. Mikrostruktura obszaru krateru po uderzeniu pocisku: a – stal MS400, płaszczyzna (R), zasięg strefy oddziaływania dynamicznego, b – stal MS400, płaszczyzna (P), pęknięcia w obszarze krateru - MS



Rys. 7. Mikrostruktura w obszarze adiabatycznych pasm ścinania: a – stal MS400, płaszczyzna (P), MS, b – stal MS400, płaszczyzna (P), SEM

4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań struktury i twardości w strefie odkształcenia dynamicznego powstałego w wyniku oddziaływania pocisku na testowe płytki ze stali nanokompozytowej bainityczno – austenitycznej (stal NBA) i ze stali typu maraging (stal MAR) wynikają następujące główne wnioski:

1. W obydwu stalach (NBA i MAR) w sąsiedztwie krawędzi krateru powstały strefy odkształcenia osnowy o nasileniu zmniejszającym się ze wzrostem odległości od krateru. W strefie odkształcenia powstały adiabatyczne pasma ścinania wyróżniające się na tle wytrawionej struktury jako białe krzywoliniowe i rozgałęziające się pasma o zmiennej szerokości – w stali NBA od kilku do około 25 μm , a w stali MAR od dziesiątych części μm do kilku μm . Stal MAR jest mniej podatna do powstawania adiabatycznych pasm ścinania niż stal NBA.
2. W strefie odkształcenia dynamicznego stwierdzono mikropęknięcia - w stali NBA powstające w osnowie i wewnątrz pasm ścinania, a w stali MAR powstające w osnowie, przebiegające wzdłuż pasm w ich wnętrzu i na granicy pasmo – osnowa.
3. Obserwacja substruktury adiabatycznych pasm ścinania nie dała jednoznacznej odpowiedzi, czy w obszarach pasm zaszła przemiana fazowa $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha'$. W przypadku stali NBA morfologia zbliżona do struktury drobnopłytkowego wysokowęglowego martenzytu wskazywałaby na transformacyjny typ adiabatycznych pasm ścinania. W celu jednoznacznego określenia substruktury adiabatycznych pasm ścinania należy wykonać badania na cienkich foliach za pomocą TEM.
4. Z pomiarów mikrotwardości wynika, że średnia twardość adiabatycznych pasm ścinania w stali NBA jest wyższa od średniej twardości osnowy tej stali, natomiast w stali MAR stwierdzono efekt odwrotny - średnia twardość adiabatycznych pasm ścinania jest niższa od średniej twardości osnowy tej stali.
5. Wykonane dotychczas badania struktury dynamicznie odkształconej strefy w stalach nanostrukturalnych, nie pozwalają jeszcze na zaproponowanie kompleksowego opisu mechanizmów zmian struktury w tej strefie. Istotnym problemem w ocenie przydatności badanych stali nanostrukturalnych do zastosowania na panczerze jest zachowanie się dynamicznie odkształconej strefy materiału, w tym adiabatycznych pasm ścinania, w trakcie powtórnego dynamicznego oddziaływania. Wyjaśnienie tych problemów wymaga kontynuowania badań.

Literatura

- [1] D. R. Leuser, C. K. Syn, O.D. Sherby, *Severe plastic deformation through adiabatic shear banding in Fe-C steels*, Materials Science and Engineering, A 410-411, 2005, pp. 222÷225.
- [2] Q. Wei, L. Kecskes, T. Jiao, K.T. Hartwig, K. T. Ramesh, E. Ma, *Adiabatic shear banding In ultrafine-grained Fe processed by severe plastic deformation*, Acta Materialia, 52, 2004, pp. 1859÷1869.
- [3] E. Lach, G. Koerber, M. Scharf, A. Bohmann, *Comparison of nitrogen alloyed austenitic steels and high strength armour steels impacted at high velocity*, International Journal of Impact Engineering, 23, 1999, pp. 509÷517.
- [4] H. Nahme, E. Lach, *Dynamic behavior of high strength armour steels*, J. Phys IV France, 7, 1997 (C3), pp. 373÷378.
- [5] B. Garbarz, J. Marcisz, M. Adamczyk, A. Wiśniewski, *Ultrahigh-strength nanostructured steels for armours*, Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, 3, 2011 (1), s. 25-36.

Artykuł zawiera częściowe wyniki projektu finansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego ("Technologie wytwarzania supertwardych materiałów nanostrukturalnych ze stopów żelaza oraz ich zastosowanie w pancierzach pasywnych i pasywno-reaktywnych" Nr umowy UDA-POIG.01.03.01-00-042/08-00) realizowanego przez konsorcjum obejmujące Instytut Metalurgii Żelaza i Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia.