Bogdan GARBARZ, Dariusz WOŹNIAK, Wojciech BURIAN, Barbara NIŻNIK, Rafał PALUS

Instytut Metalurgii Żelaza im. St. Staszica

OPRACOWANIE PODSTAW PRZEMYSŁOWEJ TECHNOLOGII WYTWARZANIA BLACH Z SUPERTWARDEJ WYSOKOWĘGLOWEJ STALI BAINITYCZNEJ Z ZASTOSOWANIEM METODY PÓŁPRZEMYSŁOWEJ SYMULACJI

Metodą symulacji fizycznej w skali półprzemysłowej opracowano przemysłową technologię wytwarzania ultrawytrzymałych blach arkuszowych z nowoopracowanej nanokompozytowej stali o strukturze bainitycznej z udziałem austenitu resztkowego, nazwanej NANOS-BA. Skład chemiczny stali NANOS-BA (0,55–0,59%C, dodatki stopowe Mn, Si, Cr i Mo oraz mikrododatki V, Al i Ti) umożliwia wytworzenie z zastosowaniem obróbki cieplnoplastycznej i obróbki cieplnej wyrobów charakteryzujących się wysoką twardością i wytrzymałością oraz dobrą plastycznością. Eksperymenty w skali półprzemysłowej wykonano w Instytucie Metalurgii Żelaza z zastosowaniem modułu B linii LPS składającego się z elektrycznego pieca grzewczego, zbijacza zgorzeliny, nawrotnej walcarki duo/kwarto, urządzenia do przyspieszonego chłodzenia pasma i pieca elektrycznego do obróbki cieplnej bezpośrednio po walcowaniu. Materiałem wsadowym były półprzemysłowe wlewki z badanej stali NANOS-BA o masie 70–95 kg wytopione i odlane w indukcyjnym piecu próżniowym VSG100S, stanowiącym moduł A1 linii LPS. Do opracowania programu przepustów, przebiegów chłodzenia i parametrów obróbki cieplnej wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych. Technologię przemysłowego wytwarzania ultrawytrzymałych blach arkuszowych ze stali NANOS-BA opracowano w dwóch odmianach: jako proces zintegrowany obejmujący następujące bezpośrednio po sobie wszystkie operacje technologiczne i jako proces etapowy składający się z etapu regulowanego walcowania i z odrębnego etapu finalnej obróbki cieplnej. W wyniku półprzemysłowej symulacji wytworzono blachy ze stali NANOS-BA o grubości w przedziale 4–15 mm, które poddano badaniom strukturalnym i wytrzymałościowym. Ustalono, że struktura blach składa się z nanolistew bezwęglikowego bainitu i austenitu resztkowego w ilości 20–25% obj. Blachy charakteryzują się wysoką twardością z zakresu 600–650HV, granicą plastyczności powyżej 1,3 GPa i dobrą plastycznością, na poziomie 12–20% wydłużenia całkowitego w próbie rozciągania. Wykazano, że półprzemysłowa symulacja jest efektywną metodą opracowywania technologii gotowych do zastosowania przemysłowego.

Słowa kluczowe: symulacja półprzemysłowa, ultrawytrzymała stal nanokompozytowa, blachy stalowe

DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY OF PLATE PRODUCTION FROM ULTRA-HARD HIGH-CARBON BAINITIC STEEL WITH THE USE OF SEMI-INDUSTRIAL SIMULATION METHOD

Technology for production of plates from a novel ultra-high-strength nano-composite bainite-austenite steel (named NANOS-BA) using semi-industrial simulation method was developed. NANOS-BA steel contains 0.55–0.59%C, the additions of Mn, Si, Cr, and Mo and microadditions of V, Al, and Ti, which enables manufacturing steel products with very high hardness and strength as well as good plasticity using thermomechanical processing and heat treatment. Simulation experiments of thermomechanical processing and heat treatment were carried out at the Institute for Ferrous Metallurgy in the semi-industrial line (LPS) comprising: electric reheating furnace, descaler, one-stand reversing hot rolling mill, isothermal panels, equipment for accelerated air and/or water cooling at roller tables and electric furnace for heat treatment. As the charge material for simulation experiments, the semi-industrial 70–95 kg ingots melted and cast in VSG100S induction vacuum furnace (which represents A1 module of the LPS) were used. For elaboration of the rolling schedules, cooling patterns and heat treatment parameters the results of laboratory experiments and numerical modelling were used. Two versions of the technology for production of NANOS-BA steel plates have been developed: as an integrated process comprising all the consecutive technological operations in one line and as a process consisting of thermomechanical rolling and – as a separate stage – heat treatment operations. As a result of the semi-industrial simulation, NANOS-BA steel plates with thickness ranging from 4 to 15 mm were obtained and subject to mechanical testing and structural examination. It has been revealed that structure of the plates consisted of carbideless bainite nanolaths and retained austenite in the quantity of 20–25 vol.% and that their mechanical properties were high and plasticity was good: hardness in the range of 600–650HV, yield stress over 1.3GPa and total elongation in tensile test – 12–20%. The semi-industrial simulation proved to be a very effective method for development of technologies ready for industrial application.

Key words: semi-industrial simulation, ultra-high-strength nano-composite steel, steel plates

1. WPROWADZENIE

Opracowanie i wdrożenie nowej lub znacznie zmodyfikowanej przemysłowej technologii wytwarzania półwyrobów i wyrobów stalowych, w tym technologii walcowania i obróbki cieplnej, wymaga wykonania wyprzedzających badań laboratoryjnych i następnie prób w warunkach procesu przemysłowego. Próby przemysłowe są kosztowne ze względu na dużą skalę eksperymentu oraz z powodu zakłócania bieżącego planu produkcji. Te trudności związane z wprowadzaniem do warunków przemysłowych nowych technologii mogą zostać znacznie zmniejszone w wyniku zastosowania numerycznego i / lub fizycznego modelowania pod warunkiem, że zastosowane modele są wiarygodne i wystarczająco dokładne. Wiarygodność i dokładność modelowania fizycznego można zwiększyć stosując dwustopniowe podejście obejmujące modelowanie fizyczne w skali laboratoryjnej i następnie modelowanie w większej skali, nazwane modelowaniem półprzemysłowym lub symulacją półprzemysłową.

Celem badań było opracowanie z zastosowaniem symulacji fizycznej w skali półprzemysłowej wstępnej przemysłowej technologii wytwarzania ultrawytrzymałych blach arkuszowych z nowoopracowanej nanokompozytowej stali o strukturze bainitycznej z udziałem austenitu resztkowego, nazwanej NANOS-BA. Symulacje fizyczne w skali półprzemysłowej wykonano w Instytucie Metalurgii Żelaza z zastosowaniem modułu B linii LPS składającego się z elektrycznego pieca grzewczego, zbijacza zgorzeliny, nawrotnej walcarki duo/kwarto, urządzenia do przyspieszonego chłodzenia pasma i pieca elektrycznego do obróbki cieplnej bezpośrednio po walcowaniu.

Dane wejściowe do symulacji półprzemysłowej walcowania na gorąco i obróbki cieplnej przygotowano w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych wykonanych metodami dylatometrii, rentgenografii, metalografii i symulacji fizycznej z wykorzystaniem urządzenia Gleeble. Z zastosowaniem opracowanej technologii wytworzono w warunkach półprzemysłowych blachy z nanokompozytowej stali bainityczno-austenitycznej NANOS-BA, charakteryzujące się bardzo wysoką wytrzymałością i dobrą plastycznością. Blachy o takich właściwościach mogą być stosowane np. do konstrukcji pancerzy.

2. PODSTAWOWE ZASADY SYMULACJI PÓŁPRZEMYSŁOWEJ WALCOWANIA BLACH NA GORĄCO I OBRÓBKI CIEPLNEJ PASMA W LINII WALCOWANIA

Celem symulacji w skali półprzemysłowej jest zaprojektowanie takich wartości parametrów procesu rzeczywistego w pełnej skali przemysłowej, które zapewnią – po ewentualnym uściśleniu – otrzymanie oczekiwanych właściwości wyrobu. Istota symulacji półprzemysłowej polega na tym, że eksperymenty wykonywane są z zastosowaniem urządzeń i narzędzi o mniejszych wymiarach od wyposażenia przemysłowego, na materiale o masie znacznie mniejszej od masy materiału wsadowego w procesie przemysłowym, natomiast rodzaj materiału (gatunek stali) i wartości parametrów procesowych są identyczne lub zbliżone do wartości parametrów przemysłowego procesu technologicznego. W rzeczywistości w przypadku procesów i urządzeń o skomplikowanej konstrukcji nie jest możliwe osiągnięcie pełnego podobieństwa geometrycznego i kinematycznego pomiędzy modelem a systemem oryginalnym, tj. zbudowania pomniejszonego modelu z zachowaniem tej samej skali pomniejszenia dla wszystkich parametrów geometrycznych i kinematycznych systemu [1, 2]. Gdy występują różne skale pomniejszenia niektórych parametrów rzeczywistych do parametrów osiąganych w trakcie symulacji, należy zbadać wpływ tej różnicy na wynik symulacji. Najważniejsze jednak dla modelowania fizycznego jest zapewnienie, aby w skali pomniejszonej zjawiska fizyczne przebiegały według tych samych zasad co w układzie rzeczywistym. W przypadku fizycznego modelowania w skali półprzemysłowej procesów walcowania na gorąco i obróbki cieplnej porównywane parametry wpływające istotnie na kształtowanie struktury i właściwości badanego materiału, do których powinno stosować się prawo podobieństwa, są następujące [3]:

– ***Właściwości fizyczne odkształcanego materiału, w tym stan struktury w stanie początkowym:*** można zapewnić identyczność modelu półprzemysłowego z warunkami rzeczywistymi.
– ***Geometria odkształcanego materiału:*** geometryczne podobieństwo pasma modelowego i pasma rzeczywistego jest zachowane w przypadku, gdy stosunki grubości, szerokości i długości pasma modelowego i pasma rzeczywistego są jednakowe, równe skali modelowania. Jeśli przyjąć uproszczenie, że szerokość i długość pasma nie wpływa na wielkość i kierunek odkształcenia w procesie walcowania blach arkuszowych, to parametrem modelowania jest grubość pasma, która w trakcie modelowania półprzemysłowego finalnej fazy walcowania blach może być identyczna z grubością pasma rzeczywistego.
– ***Wielkość odkształcenia:*** jeśli średnią wielkość odkształcenia w przepuście określić wskaźnikiem:

$$\overline{\varphi} = \ln \frac{S_{n-1}}{S_n} \tag{1}$$

gdzie:

$\overline{\varphi}$ – wskaźnik średniego odkształcenia w n-tym przepuście,
S_{n-1} – przekrój pasma przed n-tym przepustem,
S_n – przekrój pasma po n-tym przepuście

i jeśli pominąć poszerzenie w trakcie przepustu, to odkształcenie jest funkcją zmiany grubości pasma, która w procesie modelowania może być identyczna z warunkami rzeczywistymi. W dokładnej analizie należy uwzględnić wpływ poszerzenia walcowanego pasma na wielkość odkształcenia.

– ***Prędkość odkształcenia*** $\dot{\varphi}$ wyliczona z zależności:

$$\dot{\varphi} = \frac{\nu_w}{\sqrt{D_{sr}}} \frac{\Delta h}{h_{n-1}} \tag{2}$$

gdzie:

ν_w – prędkość walcowania,
D_{sr} – średnia średnica walców roboczych,
Δh – gniot bezwzględny w n-tym przepuście,
h_{n-1} – wysokość pasma przed n-tym przepustem,

jest mniejsza w trakcie symulacji półprzemysłowej w stosunku do procesu przemysłowego, ze względu na mniejszą liniową prędkość walcowania ν_w charak-

teryzującą symulację półprzemysłową, nie zrównoważoną wpływem mniejszej średnicy walców D_{sr}.

– ***Temperatura pasma:*** ze względu na znacznie mniejszą masę walcowanego materiału w trakcie symulacji półprzemysłowej w porównaniu z walcowaniem przemysłowym, pasmo modelowe ma tendencję do szybszego stygnięcia. Jednak w trakcie finalnych przepustów, kiedy odprowadzenie ciepła następuje prawie wyłącznie w kierunku prostopadłym do powierzchni walcowania, geometria i masa pasma nie odgrywają decydującej roli w podobieństwie termicznym pasma modelowego i pasma rzeczywistego. Istotny wpływ może mieć czas trwania przepustów oraz temperatura walców i rolek samotoku. W celu zmniejszenia szybkości stygnięcia walcowanego pasma, w LPS zastosowano nad samotokami po obydwu stronach klatki walcowniczej ogrzewane tunele.

2. METODYKA BADAŃ

2.1. PÓŁPRZEMYSŁOWA SYMULACJA WYTWARZANIA BLACH METODĄ REGULOWANEGO WALCOWANIA I OBRÓBKI CIEPLNEJ

Badania modelowe walcowania i obróbki cieplnej blach ze stali NANOS-BA wykonano w Instytucie Metalurgii Żelaza z zastosowaniem modułu B linii LPS do półprzemysłowej symulacji. Główne dane techniczne poszczególnych urządzeń wchodzących w skład modułu B-LPS są następujące:

1. Elektryczny oporowy piec do nagrzewania wsadu z wysuwanym trzonem o maksymalnej temperaturze nagrzewania 1400°C i z możliwością zastosowania atmosfery ochronnej w postaci gazu obojętnego
2. Hydrauliczny zbijacz zgorzeliny wytwarzający maksymalne ciśnienie wody równe 25 MPa
3. Panele termoizolacyjne nad samotokami tworzące komory o temperaturze w pustej komorze do 500ºC
4. Jednoklatkowa nawrotna walcarka duo/kwarto do walcowania na gorąco, o długość beczki walców 700 mm i średnicach walców w układzie duo 500–550 mm, o następującej charakterystyce: siła walcowania max. 5 MN, moment walcowania max. 100 kNm, moc głównego silnika 470 kW oraz prędkość walcowania max. 1,5 m/s
5. Gazowo-proszkowy palnik do cięcia pasma
6. Chłodnia natryskowo-nadmuchowa za klatką walcowniczą
7. Elektryczny oporowy piec do regulowanego spowolnionego chłodzenia lub do obróbki cieplnej odcinków pasma, o maksymalnej temperaturze komory 1100°C, z możliwością zastosowania atmosfery ochronnej w postaci gazu obojętnego
8. Zbiornik z wodą do szybkiego schładzania odcinków pasma.

Moduł B-LPS jest wyposażony w system pomiaru i rejestracji następujących parametrów: temperatury powierzchni pasma, grubości pasma w trakcie walcowania, rozstawu walców, siły, momentu, mocy i liniowej prędkości walcowania oraz czasu przepustu i czasu przerw pomiędzy przepustami. Szczegółowy opis LPS i zasady symulacji półprzemysłowej walcowania na gorąco podano w [4].

2.2. MATERIAŁ BADAŃ

Bazując na podstawowych zasadach charakteryzujących mechanizmy i kinetykę przemiany bainitycznej – w szczególności w zakresie niskotemperaturowym [5–7] oraz wykorzystując dane opisujące wpływ pierwiastków stopowych na mikrostrukturę bainitu i na właściwości stali bainitycznych i martenzytycznych [8–11], w oparciu o intensywne badania laboratoryjne i półprzemysłowe wykonane w projekcie PS 0001 [12, 13] na wytopach o składach chemicznych mieszczących się w zakresie podanym w tablicy 1, opracowano w IMŻ nowy gatunek stali nanokompozytowej bainityczno-austenitycznej zawierającej 0,55–0,59% C, 1,95–2,10% Mn, 1,75–1,90% Si, 1,20–1,40% Cr, 0,70–0,80% Mo i mikrododatki V, Al oraz Ti (zawartości pierwiastków podano w całym artykule w % masowych). Skład chemiczny i obróbka cieplna nowego gatunku stali o nazwie NANOS-BA został zgłoszony przez Instytut Metalurgii Żelaza do opatentowania do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej [14].

Do badań symulacyjnych w B-LPS wykonano wytopy ze stali NANOS-BA i odlano wlewki w indukcyjnym próżniowym piecu VSG100S, będącym modułem A1-LPS. Odlano wlewki o masie ok. 95 kg i o przekroju poprzecznym 250 mm × 60 mm oraz wlewki o masie ok. 75 kg i o przekroju poprzecznym 150 mm × 60 mm. Po odcięciu nadlewów wlewki homogenizowano w temperaturze 1200ºC w ciągu 24 godzin. Następnie wlewki przewalcowano w LPS na pasma pośrednie o grubości od 20 mm do 40 mm i pocięto na odcinki, które stanowiły materiał wsadowy do symulacji półprzemysłowej walcowania i obróbki cieplnej.

2.3. METODY BADANIA MIKROSTRUKTURY I POMIARU WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH

Mikrostrukturę próbek pobranych z blach ze stali NANOS-BA walcowanych i obrabianych cieplnie w LPS badano za pomocą mikroskopu świetlnego, skaningowego mikroskopu elektronowego FEI-Inspect F, transmisyjnego mikroskopu elektronowego FEI-Titan 80-300 oraz dyfraktometru rentgenowskiego Philips PW 1140. Obydwa mikroskopy elektronowe są wyposażone w urządzenia do mikroanalizy chemicznej (w tym w EDS). Do badań metodami mikroskopii świetlnej, skaningowej mikroskopii elektronowej i rentgenografii zastosowano zgłady metalograficzne wykonane na

Tablica 1. Zakresy zawartości pierwiastków w badanych w projekcie Nr PS 0001 wytopach eksperymentalnych wysokowęglowych średniostopowych stali bainitycznych, w % masowych; N i O w ppm [12, 13]

Table 1. Range of element content in high-carbon medium alloyed steels investigated in project No PS 0001, in mass %; N and O in ppm [12, 13]

%	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Co	Mo	V	Ti	Al	N	O
Maks.	1,00	2,39	2,00	0,015	0,017	0,44	1,37	1,70	0,80	0,120	0,023	0,800	63	28
Min.	0,49	1,82	1,57	0,008	0,010	0,01	0,01	0,00	0,27	0,086	0,000	0,014	23	6

określonych powierzchniach próbek, natomiast badania metodą transmisyjnej mikroskopii elektronowej wykonano na cienkich foliach. Metodą rentgenograficzną określano skład fazowy próbek, a w szczególności zawartość austenitu resztkowego.

Właściwości mechaniczne blach po obróbce w LPS mierzono na próbkach płaskich wzdłużnych w standardowej próbie rozciągania. Określano wytrzymałość na rozciąganie (R_m), umowną granicę plastyczności ($R_{p0,2}$), wydłużenie całkowite (A_5) i wydłużenie równomierne (A_r). Na powierzchni przekroju poprzecznego blach prostopadłej do kierunku walcowania i do płaszczyzny walcowania wykonano pomiary twardości metodą Vickersa pod obciążeniem 10kG (HV10).

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. USTALENIE WSTĘPNYCH PARAMETRÓW DO WYKONANIA SYMULACJI PÓŁPRZEMYSŁOWEJ NA PODSTAWIE BADAŃ W SKALI LABORATORYJNEJ

Wyniki badań laboratoryjnych stali NANOS-BA w zakresie przemian fazowych, odkształcalności technologicznej i korelacji pomiędzy parametrami obróbki cieplnej a właściwościami mechanicznymi, stanowiły podstawę do opracowania wartości parametrów półprzemysłowej symulacji w LPS. Główne etapy półprzemysłowej symulacji wytwarzania ultrawytrzymałych blach w LPS były następujące:

1. nagrzewanie matriału wsadowego w postaci sztab o grubości z zakresu od 20 mm do 40 mm i o szerokości 150 mm lub 250 mm z szybkością dobraną do gatunku stali i wygrzewanie w temperaturze z zakresu 1150–1200ºC w ciągu 30–60 minut,
2. nawrotne walcowanie na gorąco z zastosowaniem zaprojektowanego planu przepustów i cykli temperaturowo-czasowych, do osiągnięcia wymaganej finalnej grubości blachy,
3. regulowane chłodzenie po walcowaniu: w przypadku technologii zintegrowanej ciągłej – do temperatury bezpośrednio wykonywanej izotermicznej obróbki cieplnej (3a), a w przypadku technologii etapowej – do temperatury otoczenia (3b),
4. w przypadku technologii zintegrowanej ciągłej – załadunek blachy do pieca do obróbki cieplnej i wykonanie izotermicznego wygrzewania w temperaturze T_{PI} równej M_S (temperatura początku przemiany martenzytycznej) + (10÷30ºC) w ciągu 48–100 godzin (4a), a w przypadku technologii etapowej – transport blachy do pieca do re-austenityzowania, po austenityzowaniu regulowane chłodzenie do temperatury izotermicznej obróbki cieplnej, załadunek blachy do pieca do obróbki izotermicznej i wygrzewanie blachy w temperaturze T_{PI} równej M_S (temperatura początku przemiany martenzytycznej) + (10÷30ºC) w ciągu 48–100 godzin (4b).

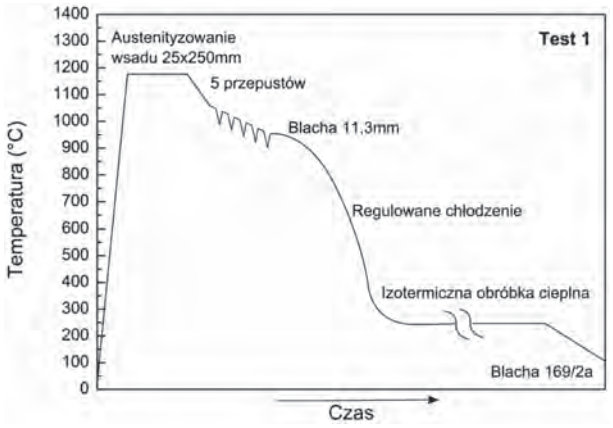
Temperaturę początku przemiany martenzytycznej wytopów ze stali NANOS-BA wyznaczano metodą dylatometryczną lub obliczeniową z zastosowaniem zależności opracowanej na podstawie [15–17]:

$$M_S\ [ºC] = 540 - 425(\%C) - 30(\%Mn) - 12(\%Cr) - 7{,}5(\%Mo+\%Si) \quad (3)$$

Aby ustalić optymalne wartości parametrów testów w LPS prowadzące do otrzymania jak najkorzystniejszych właściwości blach NANOS-BA, wykonano wiele prób stosując różne zestawy wartości parametrów procesowych.

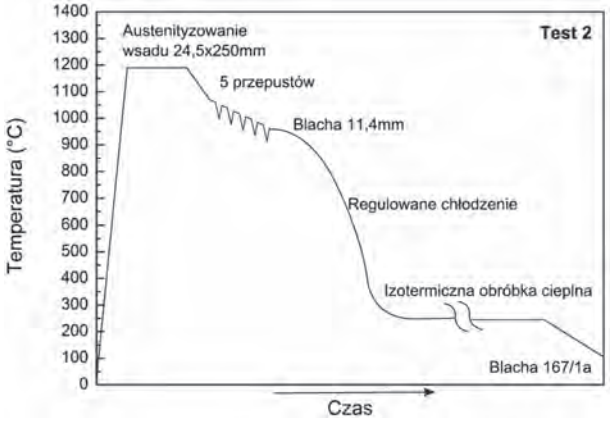
3.2. PÓŁPRZEMYSŁOWA SYMULACJA PROCESU WYTWARZANIA BLACH ZE STALI NANOS-BA

Szczegółowe parametry symulacji w LPS podano dla czterech testów oznaczonych jako: test 1 – S169/2a, test 2 – S167/1a, test 3 – 220/3a oraz test 4 – 219/3b, w wyniku których wytworzono blachy o bardzo wysokiej wytrzymałości i dobrej plastyczności. Materiał do testów S169/2a oraz S1671a wykonano ze stali zawierającej 0,8%C, 2,0%Mn, 1,8%Si oraz dodatki Cr, Co, Mo, V i Ti, a materiał do testów 220/3a oraz 219/3b wykonano ze stali zawierającej 0,6%C, 2,0%Mn, 1,8%Si oraz dodatki Cr, Mo, V i Ti. Na rysunkach 1–4 zamieszczono schematy symulacji, a w tablicach 2–5 podano zarejestrowane lub obliczone wartości parametrów symulacji. Wskaźnik odkształcenia obliczono za pomocą



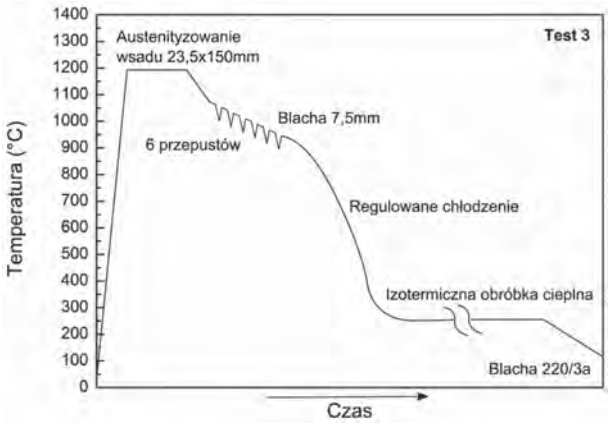
Rys. 1. Schemat ciągłego procesu regulowanego walcowania i obróbki cieplnej blachy ze stali NANOS-BA o grubości 11,3mm wykonanego w LPS – test 1, blacha 169/2a

Fig. 1. Scheme of continuous process of controlled rolling and heat treatment of NANOS-BA steel plates 11.3mm thick carried out in LPS – test no 1, plate 169/2a



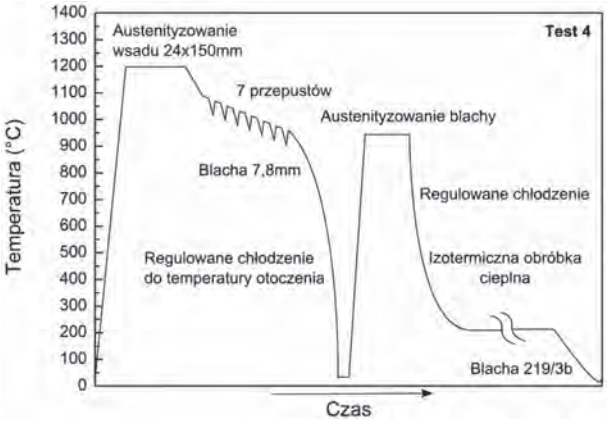
Rys. 2. Schemat ciągłego procesu regulowanego walcowania i obróbki cieplnej blachy ze stali NANOS-BA o grubości 11,4mm wykonanego w LPS – test 2, blacha 167/1a

Fig. 2. Scheme of continuous process of controlled rolling and heat treatment of NANOS-BA steel plates 11.4mm thick carried out in LPS – test no 2, plate 167/1a



Rys. 3. Schemat ciągłego procesu regulowanego walcowania i obróbki cieplnej blachy ze stali NANOS-BA o grubości 7,5 mm wykonanego w LPS – test 3, blacha 220/3a

Fig. 3. Scheme of continuous process of controlled rolling and heat treatment of NANOS-BA steel plates 7.5 mm thick carried out in LPS – test no 3, plate 220/3a



Rys. 4. Schemat etapowego procesu regulowanego walcowania (pierwszy etap) i obróbki cieplnej (drugi etap) blachy ze stali NANOS-BA o grubości 7,8 mm wykonanego w LPS – test 4, blacha 219/3b

Fig. 4. Scheme of two-stage process composed of controlled rolling (stage one) and heat treatment (stage two) of NANOS-BA steel plates 7.8 mm thick carried out in LPS – test no 4, plate 219/3b

zależności (1), a prędkość odkształcenia obliczono za pomocą wzoru (2). Dla porównania, w tablicach 6 i 7 podano wartości parametrów przykładowych procesów finalnego etapu walcowania na gorąco w walcowni przemysłowej blach grubych z wysokowytrzymałych średniostopowych stali konstrukcyjnych.

Z porównania wielkości szczeliny walcowniczej, gniotu, wskaźnika odkształcenia i temperatury pasma dla symulacji walcowania w LPS i rzeczywistego procesu walcowania wynika, że wartości tych parametrów są zbliżone. Największa różnica między wartościami parametrów symulacji w LPS a wartościami parametrów procesu przemysłowego występuje dla liniowej prędkości walcowania, co jest przyczyną istotnej różnicy w wartościach prędkości odkształcenia. Brak podobieństwa wartości prędkości odkształcenia w procesie

Tablica 2. Parametry symulacji w LPS walcowania na gorąco ze wsadu o przekroju 25 mm × 250 mm na blachę o grubości nominalnej 11,5 mm (grubość rzeczywista 11,32 mm) – test nr 1, pasmo S169/2a

Table 2. Parameters of hot rolling simulation in LPS from starting bar with cross section of 25 mm × 250 mm into plate with nominal thickness of 11.5 mm (actual thickness of 11.32 mm) – test no 1, strand no S169/2a

Parametr	Nr przepustu				
	1	2	3	4	5
Szczelina walcownicza, mm	21,63	17,54	14,49	12,44	11,00
Gniot Δh , %	13,5	18,9	17,4	14,1	11,6
Wskaźnik odkształcenia $\overline{\varphi}$	0,14	0,20	0,19	0,15	0,12
Prędkość odkształcenia $\dot{\varphi}$, s^{-1}	1,57	1,99	2,12	2,11	2,06
Temperatura powierzchni po przepuście, °C	998	984	940	931	885
Prędkość walcowania, m/s	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Czas przepustu, s	1,9	2,2	2,6	2,9	3,3
Czas pomiędzy przepustami, s	6	7	6	6	

Tablica 3. Parametry symulacji w LPS walcowania na gorąco ze wsadu o przekroju 24,5 mm × 250 mm na blachę o grubości nominalnej 11,5 mm (grubość rzeczywista 11,35 mm) – test nr 2, pasmo S167/1a

Table 3. Parameters of hot rolling simulation in LPS from starting bar with cross section of 24.5 mm × 250 mm into plate with nominal thickness of 11.5 mm (actual thickness of 11.35 mm) – test no 2, strand no S167/1a

Parametr	Nr przepustu				
	1	2	3	4	5
Szczelina walcownicza, mm	21,08	17,34	14,29	12,23	11,11
Gniot Δh, %	14,0	17,7	17,6	14,4	9,2
Wskaźnik odkształcenia $\overline{\varphi}$	0,15	0,19	0,19	0,15	0,10
Prędkość odkształcenia $\dot{\varphi}$, s^{-1}	2,25	2,74	3,01	3,00	2,58
Temperatura powierzchni po przepuście, °C	1055	1041	1032	991	970
Prędkość walcowania, m/s	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Czas przepustu, s	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6
Czas pomiędzy przepustami, s	7	7	6	6	

Tablica 4. Parametry symulacji w LPS walcowania na gorąco ze wsadu o przekroju 23,5 mm × 150 mm na blachę o grubości nominalnej 7,5 mm (grubość rzeczywista 7,52 mm) – test nr 3, pasmo S220/3a

Table 4. Parameters of hot rolling simulation in LPS from starting bar with cross section of 23.5 mm × 150 mm into plate with nominal thickness of 7.5 mm (actual thickness of 7.52 mm) – test no 3, strand no S220/3a

Parametr	Nr przepustu					
	1	2	3	4	5	6
Szczelina walcownicza, mm	19,43	15,82	12,69	10,26	8,45	7,31
Gniot Δh, %	15,5	18,6	19,8	19,1	17,6	13,4
Wskaźnik odkształcenia $\overline{\varphi}$	0,16	0,20	0,21	0,21	0,19	0,14
Prędkość odkształcenia $\dot{\varphi}$, s^{-1}	3,85	4,59	5,25	5,76	6,15	5,90
Temperatura powierzchni po przepuście, °C	1038	1034	1006	937	859	825
Prędkość walcowania, m/s	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Czas przepustu, s	0,7	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7
Czas pomiędzy przepustami, s	10	17	6	7	7	

Tablica 5. Parametry symulacji w LPS walcowania na gorąco ze wsadu o przekroju 24 mm × 150 mm na blachę o grubości nominalnej 8 mm (grubość rzeczywista 7,82 mm) – test nr 4, pasmo S219/3b

Table 5. Parameters of hot rolling simulation in LPS from starting bar with cross section of 24 mm × 150 mm into plate with nominal thickness of 8 mm (actual thickness of 7.82 mm) – test no 4, strand no S219/3b

Parametr	Nr przepustu						
	1	2	3	4	5	6	7
Szczelina walcownicza, mm	19,93	16,98	14,19	11,83	9,89	8,36	7,30
Gniot Δh, %	17,0	14,8	16,4	16,6	16,4	15,5	12,7
Wskaźnik odkształcenia $\overline{\varphi}$	0,18	0,15	0,17	0,18	0,18	0,17	13,0
Prędkość odkształcenia $\dot{\varphi}$, s^{-1}	2,51	2,57	2,94	3,23	3,51	3,73	3,68
Temperatura powierzchni po przepuście, °C	1039	1027	989	932	916	871	814
Prędkość walcowania, m/s	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Czas przepustu, s	1,3	1,4	1,7	1,9	2,2	2,5	2,8
Czas pomiędzy przepustami, s	19	12	9	8	8	7	

Tablica 6. Parametry wykańczającego walcowania w walcowni przemysłowej pasma pośredniego o grubości 25 mm na blachę o grubości 8 mm

Table 6. Parameters of finishing rolling in industrial mill of transfer strand with thickness of 25 mm into plate with thickness of 8 mm

Parametr	Nr przepustu						
	1	2	3	4	5	6	7
Szczelina walcownicza, mm	21,0	17,8	15,0	12,6	10,7	9,2	8,0
Gniot Δh, %	16,0	15,2	15,7	16,0	15,1	14,0	13,0
Wskaźnik odkształcenia $\overline{\varphi}$	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	14,0
Prędkość odkształcenia $\dot{\varphi}$, s^{-1}	7,67	8,16	9,01	9,90	10,48	10,97	11,41
Temperatura powierzchni po przepuście, °C	968	942	915	889	866	854	828
Prędkość walcowania, m/s	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

Tablica 7. Parametry wykańczającego walcowania w walcowni przemysłowej pasma pośredniego o grubości 25 mm blachę o grubości 12 mm

Table 7. Parameters of finishing rolling in industrial mill of transfer strand with thickness of 25 mm into plate with thickness of 12 mm

Parametr	Nr przepustu				
	1	2	3	4	5
Szczelina walcownicza, mm	21,5	18,0	15,2	13,0	12,0
Gniot Δh, %	17,5	16,6	15,6	14,5	7,4
Wskaźnik odkształcenia $\overline{\varphi}$	0,19	0,18	0,17	0,16	0,08
Prędkość odkształcenia $\dot{\varphi}$, s^{-1}	7,85	8,42	8,94	9,36	7,25
Temperatura powierzchni po przepuście, °C	984	966	945	923	898
Prędkość walcowania, m/s	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

modelowym i w procesie rzeczywistym należy uwzględnić w interpretacji wyników, w szczególności należy przeanalizować czułość zmian mikrostruktury badanej stali na prędkość odkształcenia. Różnice między wielkością szczeliny walcowniczej w ostatnim przepuście a grubością finalną blachy walcowanej w LPS wynikają z ugięcia sprężystego klatki walcowniczej.

3.3. MIKROSTRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI BLACH NANOS-BA WYTWORZONYCH W PROCESIE PÓŁPRZEMYSŁOWYM

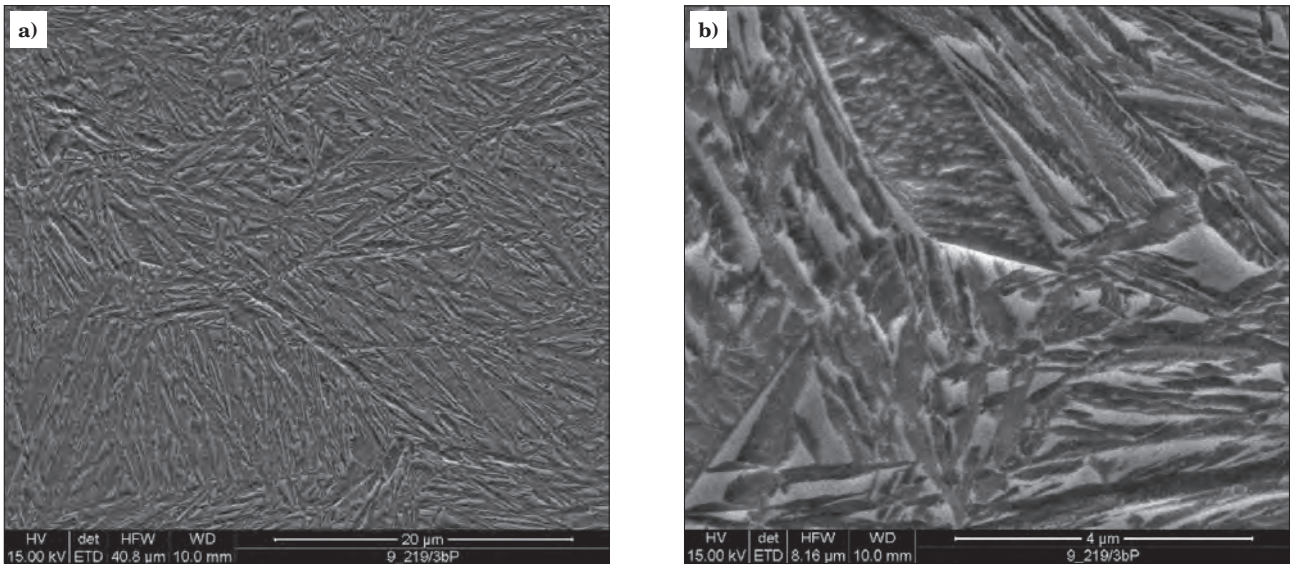
Na podstawie badań mikrostruktury za pomocą metod opisanych w rozdziale 2.3 stwierdzono, że mikrostruktura blach finalnych wytworzonych w LPS ze stali NANOS-BA składa się z nanolistew bezwęglikowego bainitu o dużej gęstości dyslokacji oraz nanolistew i nanoziarn austenitu resztkowego, którego ilość określono na 20–25% objętościowych. Na rysunku 5 zamieszczono typowe mikrofotografie struktury nanokompozytowej bainityczno-austenitycznej wykonane za pomocą mikroskopu skaningowego

Zestaw standardowych parametrów charakteryzujących właściwości mechaniczne blach ze stali NANOS-BA walcowanych i obrobionych cieplnie w LPS podano w tablicy 8, a na rysunkach 6 i 7 zamieszczono diagramy charakteryzujące rozkład twardości na przekroju poprzecznym przykładowych blach ze stali NANOS-BA. Otrzymane właściwości przewyższają znacznie właściwości stalowych wysokowytrzymałych blach produkowanych obecnie w warunkach przemysłowych.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Proces wdrażania w warunkach przemysłowych nowych technologii może zostać znacznie przyspieszony i potaniony w wyniku zastosowania numerycznego i/lub fizycznego modelowania pod warunkiem, że modele są wiarygodne i wystarczająco dokładne. Wiarygodność i dokładność modelowania fizycznego można zwiększyć stosując dwustopniowe podejście obejmujące modelowanie fizyczne w skali laboratoryjnej i następnie modelowanie w większej skali, nazwane modelowaniem półprzemysłowym lub symulacją półprzemysłową.

Badania modelowe walcowania i obróbki cieplnej blach ze stali NANOS-BA wykonano z zastosowaniem modułu B linii LPS do półprzemysłowej symulacji. Istota symulacji półprzemysłowej polega na tym, że eksperymenty wykonywane są z zastosowaniem urządzeń i narzędzi o mniejszych wymiarach od wyposażenia przemysłowego i materiału o masie znacznie mniejszej od masy materiału wsadowego w procesie przemysłowym, natomiast rodzaj materiału (gatunek stali) i wartości parametrów procesowych są identyczne lub zbliżone do wartości parametrów przemysłowego procesu technologicznego. Najważniejsze w modelowaniu fizycznym jest zapewnienie, aby w skali pomniejszonej zjawiska fizyczne przebiegały według tych samych zasad co w układzie rzeczywistym. Największa różnica między wartościami parametrów symulacji w LPS a wartościami parametrów przemysłowego

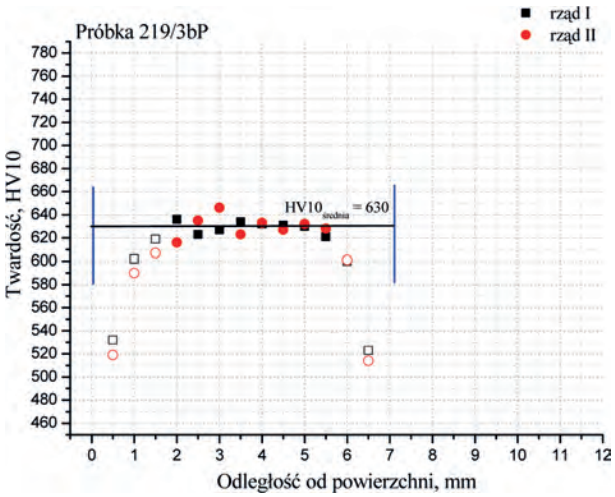


Rys. 5. Typowa mikrostruktura nanokompozytu bainityczno-austenitycznego sfotografowana za pomocą mikroskopu skaningowego – blacha 219/3b; (a) pow. 2 000×, (b) pow. 10 000×

Fig. 5. Typical microstructure of bainite-austenite nanocomposite taken by scanning electron microscope – plate 219/3b; (a) mag. 2000×, (b) mag. 10000×

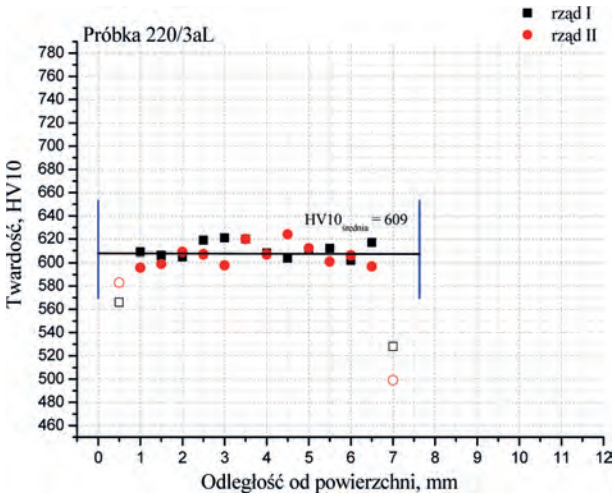
Tablica 8. Właściwości mechaniczne blach ze stali NANOS-BA otrzymanych w wyniku walcowania i obróbki w LPS
Table 8. Mechanical properties of NANOS-BA steel plates hot rolled and heat treated in LPS

Materiał	Średnie wartości z pomiarów na trzech odcinkach blachy				
	R_m, GPa	$R_{p0,2}$, GPa	Twardość, HV10	A_5, %	A_r, %
S167/1a	2,0	1,6	630	3,0	-
S169/2a	1,8	1,5	580	13	-
S219/3b	2,0	1,3	630	12	10
S220/3a	1,8	1,3	609	17	10



Rys. 6. Rozkład twardości na przekroju poprzecznym blachy 219/3b ze stali NANOS-BA

Fig. 6. Hardness distribution over cross section of NANOS-BA steel plate 219/3b



Rys. 7. Rozkład twardości na przekroju poprzecznym blachy 220/3a ze stali NANOS-BA

Fig. 7. Hardness distribution over cross section of NANOS-BA steel plate 220/3a

walcowania na gorąco występuje dla liniowej prędkości walcowania, co jest przyczyną istotnej różnicy w wartościach prędkości odkształcenia. Tę różnicę pomiędzy procesem modelowym a rzeczywistym należy uwzględnić w interpretacji wyników, w szczególności należy przeanalizować czułość zmian mikrostruktury badanej stali na prędkość odkształcenia. Zaplanowano wykonać badania mające na celu ustalenie współczynników korekcyjnych uwzględniających różne wartości prędkości odkształcenia typowe dla symulacji w LPS i typowe dla walcowni przemysłowych.

Metodą symulacji półprzemysłowej z zastosowaniem LPS opracowano technologię przemysłowego wytwarzania ultrawytrzymałych blach arkuszowych ze stali NANOS-BA w dwóch odmianach: jako proces ciągły zintegrowany, obejmujący następujące bezpośrednio po sobie wszystkie operacje technologiczne i jako proces etapowy składający się z etapu regulowanego walcowania i z odrębnego etapu finalnej obróbki cieplnej. Technologia ta jest przygotowana do szybkiego wdrożenia w warunkach przemysłowych, po niezbędnym dostosowaniu do parametrów technicznych konkretnych urządzeń przemysłowych.

Z zastosowaniem opracowanej technologii wytworzono w warunkach półprzemysłowych blachy z nanokompozytowej stali bainityczno-austenitycznej NANOS-BA, charakteryzujące się bardzo wysoką wytrzymałością i dobrą plastycznością: twardością powyżej 600 HV, wytrzymałością powyżej 1,8GPa, granicą plastyczności powyżej 1,3GPa i wydłużeniem całkowitym w próbie rozciągania na poziomie 12–20%.

Publikacja została opracowana na podstawie pracy wykonanej w projekcie badawczym rozwojowym nr N R07 0008 04 pt. „Opracowanie podstaw przemysłowych technologii kształtowania struktury i właściwości wyrobów z metali i stopów z wykorzystaniem symulacji fizycznej i numerycznej" finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, realizowanym przez Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach (koordynator), Akademię Górniczo-Hutniczą, Politechnikę Częstochowską, Politechnikę Śląską i Politechnikę Warszawską.

LITERATURA

1. Wong S.F., Hodgson P.D., Chong C.J., Thomson P.F.: Physical modelling with application to metal working, especially to hot rolling. Journal of Materials Processing Technology, t.62, 1996, s.260-274
2. Gama M.A., Mahfouf M.: Integration of Systems Engineering-based Paradigms for the Scheduling and Control of an Experimental Hot-rolling Mill. ISIJ International, t. 49, 2009, nr 1, s. 64-73
3. Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E.: Przeróbka plastyczna – Podstawy teoretyczne. Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1986
4. Woźniak D., Gawor J., Adamczyk M., Palus R.: Opracowanie metodyki półprzemysłowej symulacji walcowania na gorąco i obróbki cieplnoplastycznej blach i prętów z zastosowaniem modułu B-LPS obejmującego jednoklatkową walcarkę nawrotną oraz urządzenia pomocnicze i sterująco-rejestrujące. Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, t. 64, 2012, nr 1, s. 110-117
5. Edwards H.R., Kennon N.F.: The Morphology and Mechanical Properties of Bainite from Deformed Austenite. Metallurgical Transaction A, t. 9A, 1978, s.1801-1809
6. International Conference on Bainite. Metallurgical Transaction A, t. 21A, 1990, 767-893
7. Bhadeshia H.K.D.H.: Bainite in Steels – Transformations, Microstructure and Properties. The Institute of Materials, London, 1992
8. Garbarz B., Bołd T.: Influence of austenite substructure on structure and properties of low alloy steels quenched directly from hot deformation temperature. Metal Science, t.18, 1984, s.357-361
9. Garcia-Mateo C., Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H.: Development of Hard Bainite. ISIJ International, t.43, 2003, s.1238-1243

10. Garcia-Mateo C., Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H.: Acceleration of Low-temperature Bainite. ISIJ International, t.43, 2003, s.1821-1825
11. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H.: Very strong bainite. Current Opinion in Solid State & Materials Science, t.8, 2004, s.251-257
12. Garbarz B., Burian W.: Sprawozdanie z pracy badawczej IMŻ nr PS-0001-02-02-01 pt. „Opracowanie optymalnego składu chemicznego oraz parametrów wytapiania i odlewania wysokowęglowej stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej". Projekt POIG.01.03.01-00-042/08-00, grudzień 2009
13. Garbarz B., Burian W.: Sprawozdanie z pracy badawczej IMŻ nr PS-0001-02-02-02 pt. „Wykonanie wytopów próbnych i badania otrzymanych wlewków z wysokowęglowej stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej". Projekt POIG.01.03.01-00-042/08-00, czerwiec 2010
14. Zgłoszenia patentowe Instytutu Metalurgii Żelaza do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej: Nr P.394037 – Stal bainityczno-austenityczna i sposób wytwarzania z tej stali blach, Nr P.396431 – Sposób obróbki cieplnej stali bainityczno-austenitycznej
15. Andrews K.W.: Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures. JISI, July, 1965, s.721-727
16. Kung C.Y., Rayment J.J.: An Examination of the Validity of Existing Empirical Formulae for the Calculation of Ms temperature. Metallurgical Transaction A, t.13A, 1982, s.328-331
17. Li M.V., Niebuhr D.V., Meekisho L.L., Atteridge D.G.: A Computational Model for the Prediction of Steel Hardenability. Metallurgical and Mater. Trans., t.29B, 1998, s.661-672