

Marcin KNAPIŃSKI, Anna KAWAŁEK, Marcin KWAPISZ

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej

FIZYCZNE SYMULACJE WALCOWANIA BLACH Z WYSOKOWĘGŁOWEJ STALI BAINITYCZNEJ Z ZASTOSOWANIEM URZĄDZENIA GLEELE 3800

W pracy przedstawiono wyniki fizycznych symulacji procesu walcowania blach z wysokowęglowej stali bainitycznej. W pierwszym etapie badań określono podatność stali do odkształcenia na gorąco. Natomiast w dalszych badaniach analizowano różne schematy walcowania, w celu stwierdzenia, czy materiał w zadanych warunkach odkształca się płynnie plastycznie bez utraty spójności. Przeprowadzono również symulacje chłodzenia po walcowaniu i bezpośredniej niskotemperaturowej obróbki cieplnej. W efekcie uzyskano w stali strukturę bainityczną w postaci cienkich listew bainitu.

Słowa kluczowe: walcowanie blach, symulacja fizyczna, wysokowęglowa stal bainityczna

PHYSICAL SIMULATIONS OF HIGH CARBON BAINITIC STEEL PLATE ROLLING USING GLEELE 3800 MACHINE

The paper presents physical simulation of rolling process of bainitic high carbon steel plates. In the first stage of the work hot ductility of steel was examined. In further stages of the study different rolling patterns were analyzed to determine whether the material in the determined conditions flows plastically without losing coherence. Also simulations of cooling after rolling and direct low-temperature heat treatment were carried out. In consequence of the applied treatments a structure of bainitic steel in the form of thin laths was obtained.

Key words: controlled plates rolling, physical simulation, high carbon bainitic steel

1. WPROWADZENIE

Supertwarda stal bainityczna jest stalą wysokowęglową (powyżej 0,8%C), stopową zawierającą dodatki Si, Mn, Mo, Cr i innych pierwiastków, umożliwiające uzyskanie bardzo wysokiej twardości w przedziale 600÷700 HV w wyrobach o dużych grubościach i wysokiej wytrzymałości do 2,5 GPa, przy dobrych właściwościach plastycznych. Szczególną cechą tej stali jest bardzo duża odporność na oddziaływania udarowe. Mikrostruktura supertwardej stali bainitycznej składa się z bezwęglowego bainitu w postaci listew o grubości nanometrów i austenitu resztkowego wykazującego efekt TRIP w procesie odkształcenia [1, 5]. Finalne właściwości blach ze stali wysokowęglowej bainitycznej uzyskuje się po długotrwałej niskotemperaturowej obróbce izotermicznej.

Symulacje fizyczne umożliwiają odwzorowanie rzeczywistych warunków wytwarzania produktów gotowych w skali laboratoryjnej na próbkach o małej objętości. Przeprowadzenie takich symulacji umożliwia ocenę uzyskanej mikrostruktury materiału po obróbce cieplno-plastycznej oraz ich podstawowych właściwo-

ści mechanicznych. Otrzymane wyniki pozwalają na opracowanie wytycznych do technologii produkcji gotowych wyrobów i półwyrobów z badanych gatunków stali [2÷4]. Symulacje fizyczne, których wyniki przedstawiono w pracy, wykonano w Instytucie Modelowania i Automatyzacji Procesów Przeróbki Plastycznej w Politechniki Częstochowskiej za pomocą fizycznego symulatora procesów metalurgicznych Gleele 3800. Testy prowadzono na prostopadłościennych próbkach o wymiarach 10×15×20 mm z zastosowaniem kowadeł umożliwiających uzyskanie płaskiego stanu odkształcenia w ściskanej próbce.

2. PRZEBIEG BADAŃ I ANALIZA WYNIKÓW

Skład chemiczny stali użytej do badań został opracowany w Instytucie Metalurgii Żelaza. W Instytucie wykonano eksperymentalne wytopy i odlano wlewki o wymiarach 100×100×700 mm. Wyniki analizy składu chemicznego wlewków przedstawiono w tablicy 1.

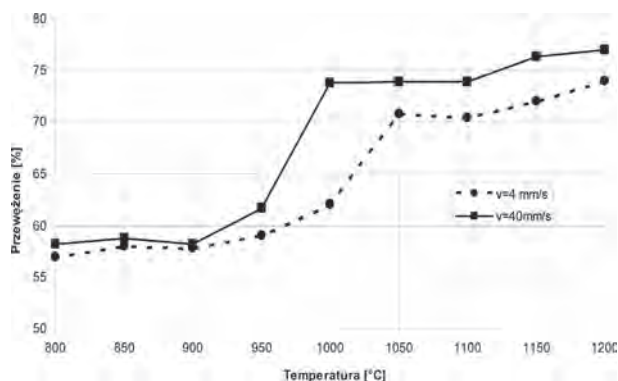
Tablica 1. Skład chemiczny badanej stali

Table 1. Chemical composition of investigated steel

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	V	Al	Ti	Cu
0,82	2,2	1,63	0,008	0,014	0,015	<0,05	0,35	1,62	0,090	0,040	0,002	0,021

W związku z faktem, że badana stal jest materiałem bardzo twardym i wykazuje dużą podatność do utraty ciągłości już podczas procesu odlewania, symulacje przeprowadzono w dwóch etapach. Pierwszym etapem była ocena plastyczności materiału w zakresie temperatur i prędkości odkształcenia odpowiadających walcowaniu blach grubych. Drugim etapem były symulacje fizyczne walcowania blach grubych.

Badania plastyczności wysokowęglowej stali bainitycznej wykonano dla zakresu temperatur 800÷1200°C i dla dwóch prędkości posuwu tłoka. Materiał do prób rozciągania był nagrzewany z szybkością 10°C/s do temperatury odkształcenia i wyżarzany w tej temperaturze przez okres 60 s, następnie rozciągany do zerwania. Próbki po zerwaniu zostały zmierzone i określono wartości przewężenia. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wykres zmian przewężenia w zależności od temperatury

Fig. 1. Relationship between reduction of area at fracture and temperature

Tablica 2. Schemat przepustów dla blachy o grubości 8 mm

Table 2. Scheme of roll passes for plate with thickness of 8 mm

Przepust	Grubość po przepuszczeniu [mm]	Gniot [%]	Prędkość walcowania [m/s]	Długość pasa	Czas walcowania	Czas przerw	Uwagi
wsad	50,00			1,0			
1	40,00	20,0	1	1,2	1,2	5	
2	28,00	30,0	1	1,7	1,7	5	
3	18,50	33,9	1	2,6	2,6	5	cięcie na 0,8 m
4	14,00	24,3	1	1,1	1,1	5	
5	11,00	21,4	1	1,3	1,3	5	chłodzenie do 830°C (gat A) i do 810°C (gat C)
6	9,00	18,2	1	1,6	1,6	5	
7	8,00	11,1	1	1,6	1,8	5	

Tablica 3. Schematy odkształceń przyjęte do symulacji fizycznych

Table 3. Schemes of deformations adopted for physical simulations

Nr próbki	Czas chłodzenia	Przepust 1			Czas chłodzenia	Przepust 2			Czas chłodzenia	Przepust 3			Czas chłodzenia	Przepust 4			Schemat chłodzenia
		ϵ	$\dot{\epsilon}$	T [°C]		ϵ	$\dot{\epsilon}$	T [°C]		ϵ	$\dot{\epsilon}$	T [°C]		ϵ	$\dot{\epsilon}$	T [°C]	
1	32	0,182	2,98	990	5	0,262	4,08	985	5	0,292	5,18	985	40	-	-	925	A
2	32	0,182	2,98	990	5	0,262	4,08	985	5	0,292	5,18	985	40	-	-	925	B + A
3	82	0,218	5,4	925	5	0,194	5,83	920	15	0,167	6,06	810	5	0,105	5,23	805	C
4	82	0,218	5,4	925	5	0,194	5,83	920	15	0,167	6,06	810	5	0,105	5,23	805	A
5	82	0,218	5,4	925	5	0,194	5,83	920	15	0,167	6,06	810	5	0,105	5,23	805	B + A
6	32	0,182	2,98	935	5	0,262	4,08	925	5	0,292	5,18	920	40	-	-	860	A
7	32	0,182	2,98	935	5	0,262	4,08	925	5	0,292	5,18	920	40	-	-	860	B + A
8	32	0,182	2,98	990	5	0,262	4,08	985	5	0,292	5,18	985	-	-	-	-	B + A
9	32	0,182	2,98	990	5	0,262	4,08	985	5	0,292	5,18	985	-	-	-	-	A
10	82	0,218	5,4	925	5	0,194	5,83	920	15	0,167	6,06	810	5	0,105	5,23	805	D
11	82	0,218	5,4	925	5	0,194	5,83	920	15	0,167	6,06	810	5	0,105	5,23	805	E
12	82	0,218	5,4	925	5	0,194	5,83	920	15	0,167	6,06	810	5	0,105	5,23	805	F
13	82	0,218	5,4	925	5	0,194	5,83	920	15	0,167	6,06	810	5	0,105	5,23	805	G
14	82	0,218	5,4	925	5	0,194	5,83	920	15	0,167	6,06	810	5	0,105	5,23	805	H
15	82	0,218	5,4	925	5	0,194	5,83	920	15	0,167	6,06	810	5	0,105	5,23	805	I

Oznaczenia schematów chłodzenia:

A – 2°C/s do $T_k = 300^\circ\text{C}$;

B – 4°C/s do $T_{k1} = 500^\circ\text{C}$;

C – zamrożenie struktury;

D – Szybkie chłodzenie do temperatury $T_k = 350^\circ\text{C}$ i następne wygrzewanie izotermiczne w temperaturze 280°C przez 6 h;

E – Szybkie chłodzenie do temperatury $T_k = 350^\circ\text{C}$ i następne wygrzewanie izotermiczne w temperaturze 280°C przez 12 h;

F – Szybkie chłodzenie do temperatury $T_k = 350^\circ\text{C}$ i następne wygrzewanie izotermiczne w temperaturze 280°C przez 18 h;

G – Chłodzenie do $T_k = 300^\circ\text{C}$ z prędkością 0,5°C/s;

H – Chłodzenie do $T_k = 300^\circ\text{C}$ z prędkością 0,1°C/s;

I – Chłodzenie do $T_k = 300^\circ\text{C}$ z prędkością 0,1°C/s

Na podstawie danych przedstawionych na rys. 1 można stwierdzić, że większa prędkość posuwu tłoka podczas zrywania próbek powoduje uzyskanie większych wartości przewężenia, co jest szczególnie widoczne powyżej temperatury 1000°C. Można również zaobserwować wzrost wartości przewężenia w zakresie temperatur 1000–1050°C.

Do symulacji fizycznych procesu walcowania blach przyjęto schematy odpowiadające walcowaniu blachy o grubości 8 mm dla warunków półprzemysłowej linii walcowniczej w IMŻ w Gliwicach. Zastosowane schematy przepustów przedstawiono w tabelicy 2.

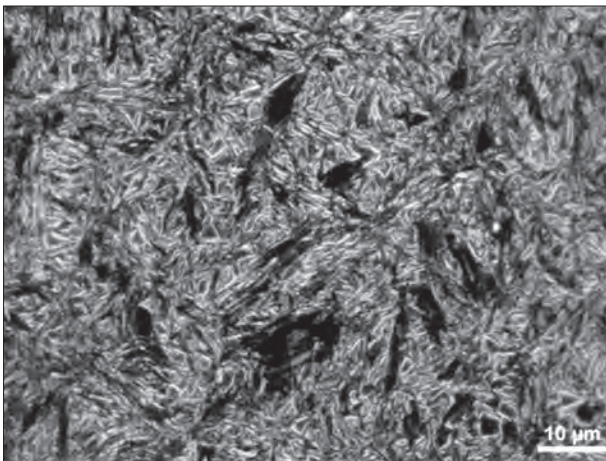
Do symulacji fizycznych przyjęto dwa schematy temperatur odpowiadające walcowaniu środka i krawędzi pasma. Materiał przed walcowaniem był nagrzewany z szybkością 10°C/s do temperatury 1000°C, następnie wygrzewany w tej temperaturze przez 60 s. Po wygrzewaniu materiał chłodzono do temperatury 1 odkształcenia. Poszczególne wartości odkształcenia, temperatur oraz czasów przerw przedstawiono w tabelicy 3.

Przeprowadzone badania symulacji obróbki cieplnej bezpośrednio po odkształceniu plastycznym i szybkim schłodzeniu wykonano dla próbek odkształcanych w czterech gniotach (ostatnie odkształcenie w tempe-

raturnie 805°C). Próbki po odkształceniu ochłodzono z szybkością około 50°C/s do temperatury około 350°C, a następnie umieszczono w piecu o temperaturze atmosfery wynoszącej 280°C. Próbki wygrzewano w tej temperaturze przez 6, 12 i 18 godz.

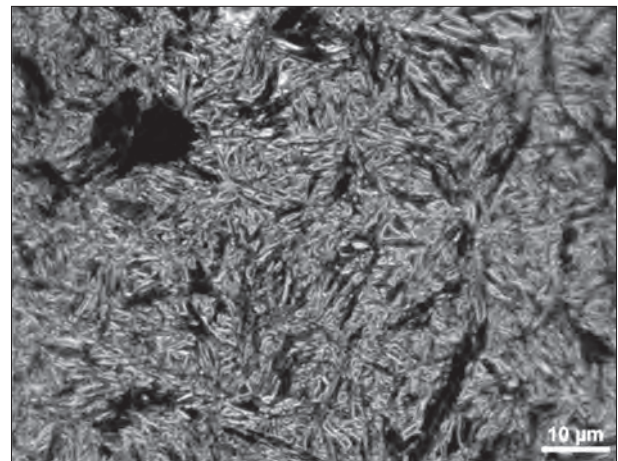
Po wykonaniu symulacji walcowania wszystkie próbki przecięto zgodnie z płaszczyzną prostopadłą do ich długości. Na powierzchniach przecięcia wykonano zgiądy metalograficzne, które wytrawiono nitałem. Ujawnione w taki sposób mikrostruktury poddano obserwacjom pod mikroskopem optycznym przy powiększeniu 1000 razy. Dla każdej z próbek określono rodzaj uzyskanej struktury. Przykładowe obrazy struktur badanej stali uzyskane przy różnych wariantach symulacji procesu walcowania i niskotemperaturowej obróbki cieplnej przedstawiono na rys. 2÷7.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono obrazy struktur uzyskanych w wyniku symulacji walcowania, podczas których wykonano po 4 przepusty, a następnie próbki chłodzono z szybkością 2°C/s do temp. 300°C. W przypadku schematu 1 (rys. 2) ostatni przepust wykonano w temp. 925°C, natomiast dla próbki wg schematu 6 (rys. 3) w temp. 860°C. Uzyskano struktury martenzytyczne, z drobnymi igłami martenzytu. Twardość dla próbek



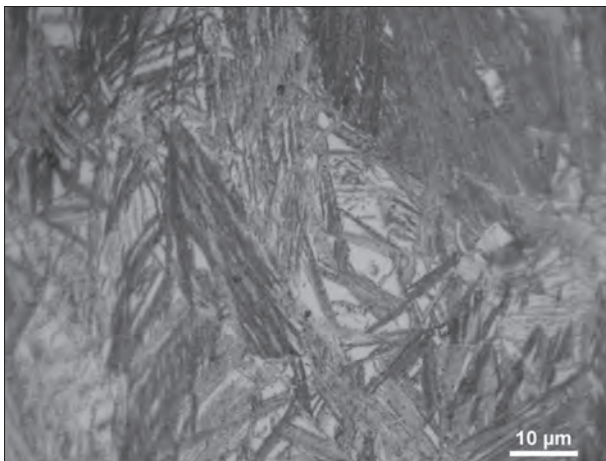
Rys. 2. Mikrostruktura próbki odkształcanej według schematu 1 (tabl. 3)

Fig. 2. Microstructure of sample deformed according to scheme no. 1 (table 3)



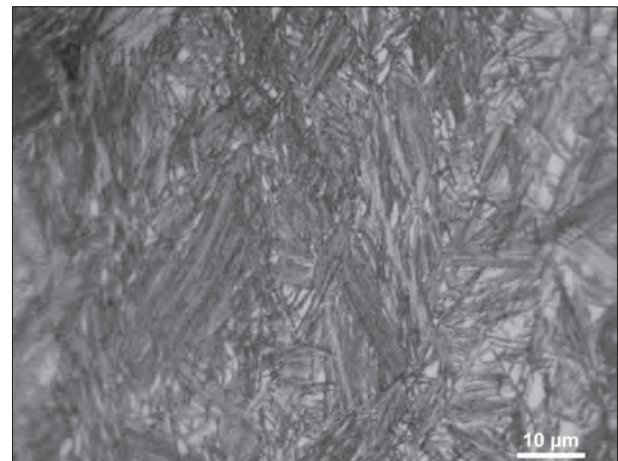
Rys. 3. Mikrostruktura próbki odkształcanej według schematu 6 (tabl. 3)

Fig. 3. Microstructure of sample deformed according to scheme no. 6 (table 3)



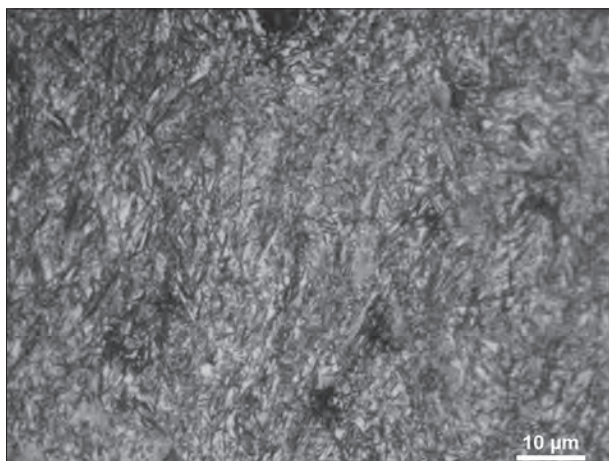
Rys. 4. Mikrostruktura próbki odkształcanej według schematu 10 (tabl. 3)

Fig. 4. Microstructure of sample deformed according to scheme no. 10 (table 3)



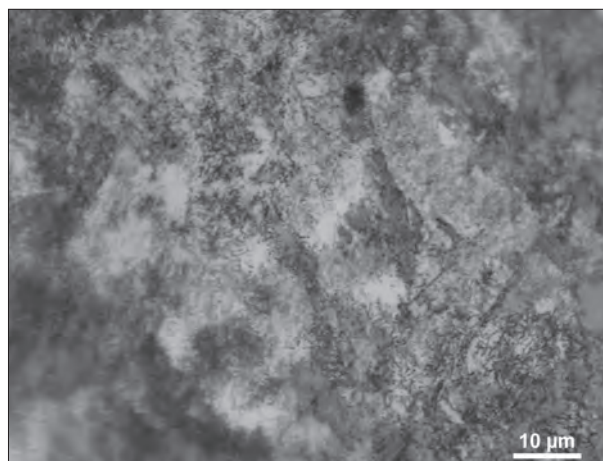
Rys. 5. Mikrostruktura próbki odkształcanej według schematu 12 (tabl. 3)

Fig. 5. Microstructure of sample deformed according to scheme no. 12 (table 3)



Rys. 6. Mikrostruktura próbki odkształcanej według schematu 13 (tabl. 3)

Fig. 6. Microstructure of sample deformed according to scheme no. 13 (table 3)



Rys. 7. Mikrostruktura próbki odkształcanej według schematu 15 (tabl. 3)

Fig. 7. Microstructure of sample deformed according to scheme no. 15 (table 3)

wg schematu pierwszego wynosiła 55HRC, natomiast dla drugiego 61,5 HRC.

Na rys. 4 i 5 przedstawiono obrazy struktur dla próbek po 4 przepustach zakończonych w temperaturze 805°C, które następnie były szybko chłodzone do temperatury 350°C i wygrzewane izotermicznie w temperaturze 280°C przez 6 godzin dla próbki wg schematu 10 (rys. 4) i przez 18 godzin dla próbki wg schematu 12 (rys. 5). W obu przypadkach uzyskano struktury bainitu dolnego różniące się jednak znacznie grubością listew.

Na rys. 6 i 7 przedstawiono przykładowe struktury dla próbek po 4 przepustach zakończonych w temperaturze 805°C, które następnie były powolnie chłodzone do temperatury 300°C z szybkością 0,5°C/s dla próbki wg schematu 13 (rys. 6) i z szybkością 0,07°C/s dla próbki wg schematu 15 (rys. 7). Dla symulacji walcowania wg schematu 13 przy powierzchni próbki uzyskano strukturę martenzytyczną z dużą ilością austenitu szczytkowego, wyraźne widoczne są wydzielenia węglików, natomiast w środku próbki widoczna jest struktura bainityczno-martenzytyczna. W przypadku bardzo powolnego chłodzenia próbki (rys. 7) po ostatnim odkształceniu uzyskano strukturę perlityczną z bardzo drobnym ziarnem perlitu, widoczny jest również perlit drobnopłytkowy charakteryzujący się dużą twardością.

3. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania plastyczności wysokowęglowej stali bainitycznej wykazały, że krzywa plastyczności w funkcji temperatury nie wykazuje lokalnych minimów i można przyjąć, że jej przebieg jest monotonicznie rosnący w miarę wzrostu temperatury odkształcenia. Świadczy to o tym, że badana stal charakteryzuje się dobrą odkształcalnością na gorąco i podczas odkształcenia w zakresie temperatur 800÷1200°C nie powinny powstawać w niej kruche pęknięcia.

Badana stal charakteryzuje się dużą podatnością do odwęglania powierzchni w wysokich temperaturach. W większości badanych próbek stwierdzono sil-

ne odwęglenie powierzchni materiału na głębokość 50÷100 μm.

Skład chemiczny badanej stali powoduje, że można ją zaliczyć do grupy stali samohartujących. Potwierdzają to przeprowadzone badania, na podstawie których wykazano, że niezależnie od przyjętej temperatury końca odkształcenia, zastosowanego schematu gniołów, w warunkach szybkości chłodzenia 0,5÷4°C/s w materiale uzyskiwane są struktury martenzytyczne, ewentualnie mieszane martenzytyczno-bainityczne.

Podczas analizy próbek po odkształceniu, tylko w jednym przypadku stwierdzono pęknięcie propagujące od naroża odkształconego materiału w głąb. Pęknięcie to przebiega wzdłuż linii pierwotnego ziarna austenitu, zatem należy zaliczyć je do pęknięć hartowniczych. W przypadku znacznego spowolnienia chłodzenia po odkształceniu 0,07÷0,1°C/s w materiale uzyskiwane są struktury perlityczne o drobnym ziarnie z perlitem o bardzo małej grubości płytek cementytu i ferrytu. Struktura taka charakteryzuje się dużą twardością wynoszącą około 40HRC.

Szybkie schłodzenie do temperatury 280°C i wygrzewanie w tej temperaturze umożliwiło uzyskanie w stali struktur bainitu dolnego, charakteryzujących się dużą wytrzymałością i twardością, przy dobrych własnościach plastycznych. Z badań nie można jednoznacznie stwierdzić, czy w stali zaszła pełna izotermiczna przemiana bainityczna. Uzyskane struktury pod względem morfologii są bardzo do siebie zbliżone i charakteryzują się podobną twardością wynoszącą około 51÷56HRC.

Publikacja 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” dofinansowanym 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. Knapieński M., Kwapisz M., Frączek T.: Fizyczne symulacje procesu walcowania blach grubych z superdrobnoziarnistej stali konstrukcyjnej, FIMM2009, Fizyczne i matematyczne modelowanie procesów obróbki plastycznej, Prace Naukowe, Mechanika, z.226, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009, ISSN 0137-2335, s. 117-122
2. Markowski J., Knapieński M., Koczurkiewicz B., Frączek T.: Walcowanie normalizujące blach grubych ze stali w gatunkach S355J2G3, GL-E36 i S460NL1, Hutnik Wiadomości Hutnicze 2007 nr 6, ISSN 1230-3534, s.296-300
3. Markowski J., Knapieński M., Dyja H.: The effect of the conditions of the thermo-mechanical treatment on the structure of S460NL1 steel, Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов, Труды международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург Издательство Политехнического университета 2007, ISBN 5-7422-1603-3, pp. 154-160
4. Knapieński M.: Modelowanie mikrostruktury blach grubych ze stali S355J2G3 w procesie walcowania, Metalurgia 2009, Nowe technologie i osiągnięcia, Monografia zbiorowa pod redakcją Henryka Dyi, Seria: Monografie nr1, Częstochowa 2009, ISBN 978-83-87745-13-4, ISSN 2080-2072, s. 33-52
5. Knapieński M., Kwapisz M., Kawalek A.: Analysis of the Plasticity of High-Carbon Alloy Steel in the Conditions of Hot Plastic Working, Solid State Phenomena Vol. 165 (2010), ISSN:1012-0394 (on-line: 1662-9779), pp 85-90