

FIZYCZNE SYMULACJE WALCOWANIA BLACH ZE STALI KONSTRUKCYJNEJ ULTRADROBNOZIARNISTEJ Z ZASTOSOWANIEM URZĄDZENIA GLEELE 3800

W pracy przedstawiono wyniki fizycznych symulacji procesu walcowania blach arkuszowych i taśmowych z konstrukcyjnej stali ultradrobnoziarnistej. Celem przeprowadzonych symulacji było określenie wpływu zastosowanego schematu odkształceń i temperatur na uzyskaną strukturę końcową materiału po ochłodzeniu do temperatury otoczenia. W badaniach dla wybranych analizowanych schematów odkształceń, zarówno w warunkach symulacji walcowania blach arkuszowych, jak i taśmowych zastosowano zróżnicowane warunki chłodzenia i określono optymalne parametry procesu, umożliwiające uzyskanie możliwie dużego rozdrobnienia ziarna ferrytu.

Słowa kluczowe: walcowanie blach, symulacja fizyczna, stal ultradrobnoziarnista

PHYSICAL SIMULATIONS OF ULTRA-FINE GRAINED STEEL PLATE ROLLING USING GLEELE 3800 MACHINE

The paper presents the results of physical simulation of the process of plate and strip rolling. The aim of the simulations of rolling of ultra-fine grained steel was to determine the effect of the applied deformation and temperature values flowchart on the final structure of the material obtained after cooling to ambient temperature. For different values of deformation and cooling patterns optimum process parameters were identified to obtain possible large refinement of ferrite grains.

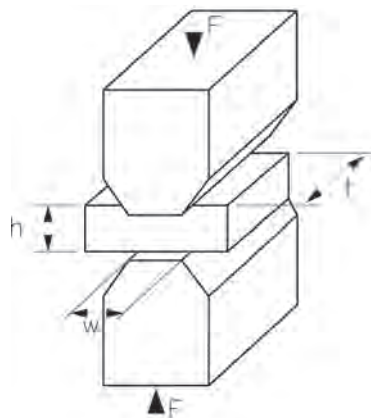
Key words: controlled plates rolling, physical simulation, ultra-fine grained steel

1. WPROWADZENIE

Przeróbka plastyczna materiałów połączona z jednoczesnymi zabiegami obróbki cieplnej nosi nazwę obróbki cieplno-plastycznej i jest obecnie powszechnie stosowaną metodą produkcji wyrobów i półwyrobów metalowych. Szczególnie intensywnie stosowana jest w technologii produkcji blach i prętów charakteryzujących się bardzo wysokimi własnościami wytrzymałościowymi i plastycznymi. 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 własności mechanicznych [1÷4]. Otrzymane wyniki pozwalają na opracowanie wytycznych do technologii produkcji gotowych wyrobów i półwyrobów z badanych gatunków stali.

Symulacje fizyczne, których wyniki przedstawiono w pracy, wykonano w Instytucie Modelowania i Automatykacji Procesów Przeróbki Plastycznej w Politechnice Częstochowskiej za pomocą fizycznego symulatora procesów metalurgicznych Gleele 3800. Testy prowadzono na prostopadłościennych próbkach o wymiarach 10x15x20mm z zastosowaniem kowadeł umożliwiających uzyskanie płaskiego stanu odkształcenia.

W przypadku testu ściskania w płaskim stanie odkształcenia (rys. 1) próbka w kształcie płytki podlega ściskaniu w kierunku grubości (h), którego rezultatem jest wydłużenie płytki w kierunku normalnym do szerokości płytki (kierunek w). Aby zmniejszyć poszerzenie próbki istotnym jest, aby $t \gg w$. W stanie zminimalizowanego rozszerzenia próbki zostają osiągnięte



Rys. 1. Schemat reprezentujący test ściskania w płaskim stanie odkształcenia

Fig. 1. Scheme representing the test in plane strain compression test

warunki testu ściskania w płaskim stanie odkształcenia. Podczas badania próbek o relatywnie dużej wartości stosunku szerokości płytki do jej grubości ($w > h$), jednorodnie odkształcenie występuje w strefie między płaszczyznami kowadeł ściskających. Kiedy stosunek w/h jest mały obserwuje się znaczny udział odkształceń niejednorodnych. Podczas testu ściskania w płaskich kowadłach stosunek w/h wzrasta i przejście z deformacji niejednorodnej do jednorodnej może wystąpić w trakcie wykonywania próby.

2. PRZEBIEG BADAŃ I ANALIZA WYNIKÓW

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

Podczas symulacji walcowania blach grubych próbek nagrzewano do temperatury 1000°C z szybkością 5°C/s , po czym wygrzewano w tej temperaturze przez 15 s, dla uzyskania jednorodnej temperatury w odkształcanej części próbki. Następnie próbki chłodzono z szybkością 3°C/s do temperatury odkształcenia. Do badań przyjęto, że odkształcenia zadawane podczas realizacji symulacji fizycznych procesu walcowania będą się kończyły przy trzech różnych temperaturach. Na podstawie wcześniejszych badań [5] określono wartości tych temperatur: $T_{kw1} = 850^\circ\text{C}$, $T_{kw2} = 815^\circ\text{C}$ i $T_{kw3} = 780^\circ\text{C}$. Przyjęcie temperatury końca walcowania wynoszącej 850°C oznacza, że wszystkie odkształcenia zadawane próbkom zachodziły w zakresie temperatur odpowiadających występowaniu w stali austenitu. Przy temperaturze końca walcowania wynoszącej 815°C końcowe przepusty realizowano w temperaturach występowania w stali struktury dwufazowej $\gamma + \alpha$. Natomiast przy temperaturze końca walcowania wynoszącej 780°C prawie

wszystkie gnioły zadawane były w zakresie temperatur występowania w stali struktury $\gamma + \alpha$.

Po odkształceniu próbki chłodzono z szybkością 10°C/s do temperatury 300°C , zadając tym samym warunki przyspieszonego chłodzenia blach po walcowaniu, gdyż w warunkach rzeczywistych, bez urządzeń do przyspieszonego chłodzenia, blachy grube w zależności od grubości stygną z szybkością nie przekraczającą 5°C/s , natomiast blachy cienkie walcowane zazwyczaj w układach ciągłych są zwijane w kręgi i również stygną z małą szybkością. W ramach symulacji walcowania blach zrealizowano 60 symulacji dla różnych warunków odkształceń i temperatur w poszczególnych przepustach.

Po wykonaniu symulacji walcowania wszystkie próbki przecięto zgodnie z płaszczyzną prostopadłą do ich długości. Na powierzchniach przecięcia wykonano zglądy 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 oraz oszacowano wielkości ziarna ferrytu. Pomiarów wielkości ziarna ferrytu dokonano metodą siecznych przypadkowo zorientowanych, wykorzystując w tym celu skalowane zdjęcia ujawnionych struktur.

Z analizy uzyskanych wyników fizycznych symulacji walcowania blach arkuszowych wynika, że zakończenie walcowania w temperaturze 850°C i schłodzenie materiału z szybkością 10°C/s do temperatury 300°C pozwala uzyskać drobnziarnistą strukturę ferrytyczno perlityczną, w której średnia wielkość ziarna ferrytu wynosi około $7,5 \mu\text{m}$. Obniżenie temperatury końca walcowania do 815°C , a następnie do 780°C spowodowało zwiększenie rozdrobnienia ziarna ferrytu, a jego średnia wielkość wynosi odpowiednio około $6 \mu\text{m}$ dla temperatury końca walcowania 815°C i około $5,5 \mu\text{m}$ dla temperatury 780°C . Obniżenie temperatury końca walcowania wpływa jednak na zwiększanie pasmowości struktury. Analizując przebiegi krzywych

Tablica 1. Skład chemiczny badanej stali

Table 1. Chemical composition of investigated steel

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	V	Ti	Al.	Cu
0,13	0,83	0,17	0,012	0,011	<0,02	0,02	<0,01	0,01	0,1	0,024	0,023	0,02

Tablica 2. Optymalne schematy odkształceń; 1 – dla walcowania blach arkuszowych, 2 – dla walcowania blach taśmowych

Table 2. Optimal schemes of deformation; 1 – plate rolling, 2 – strip rolling

Lp.	Przepust 1		t_0 [s]	Przepust 2		t_0 [s]	Przepust 3		t_0 [s]
	ϵ	T		ϵ	T		ϵ	T	
1	0,3	912	8	0,3	896	8	0,2	876	8
	Przepust 4		t_0 [s]	Przepust 5		t_0 [s]	Przepust 6		
	ϵ	T		ϵ	T		ϵ	T	
	0,2	852	8	0,15	820	8	0,05	780	
2	Przepust 1		t_0 [s]	Przepust 2		t_0 [s]	Przepust 3		t_0 [s]
	ϵ	T		ϵ	T		ϵ	T	
	0,38	865	4,6	0,34	855	3,15	0,24	845	2
	Przepust 4		t_0 [s]	Przepust 5		t_0 [s]	Przepust 6		
	ϵ	T		ϵ	T		ϵ	T	
0,12	835	1,5	0,09	825	1	0,03	815		

naprężenie – odkształcenie zarejestrowanych podczas symulacji walcowania można stwierdzić, że we wszystkich przypadkach w przerwach pomiędzy kolejnymi odkształceniami następuje zdrowienie struktury, niwelujące skutki umocnienia odkształceniowego. Przy zadawaniu każdego kolejnego gniotu naprężenie w funkcji odkształcenia narasta w podobny sposób, jak w przypadku pierwszego odkształcenia. Zatem prawdopodobnie przyczyną braku możliwości dostatecznie dużego rozdrobnienia ziarna w kolejnych odkształceniach są zbyt długie czasy przerw pomiędzy kolejnymi odkształceniami oraz zbyt mała prędkość odkształcenia w kolejnych zadawanych gniotach.

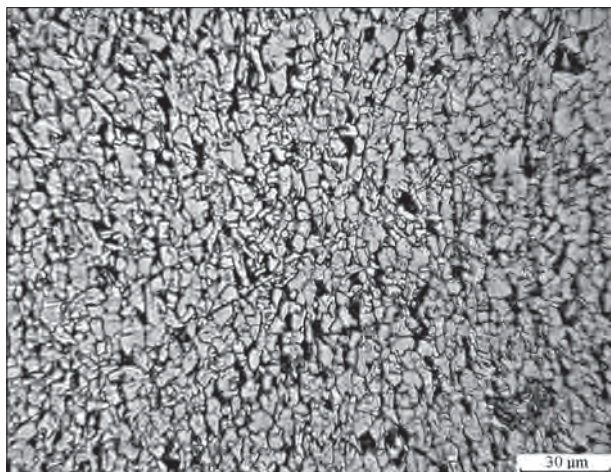
Ze względu na ograniczoną objętość niniejszej pracy przytoczono w niej tylko schematy odkształceń dla blach arkuszowych i taśmowych przyjęte jako optymalne do dalszych badań wpływu warunków chłodzenia na strukturę końcową materiału. Optymalne schematy odkształceń przedstawiono w tablicy 2.

Dla analizowanych schematów odkształceń otrzymano struktury ferrytyczno perlityczne. W przypadku symulacji walcowania blach arkuszowych średnia wielkość ziarna ferrytu wynosiła 5,5 μm i współczynnik

kształtu 0,833. Dla blach taśmowych średnia wielkość ziarna ferrytu wynosiła 4,86 μm i współczynnik kształtu 0,868. Uzyskane obrazy struktur dla schematów odkształceń przedstawionych w tablicy 2 zamieszczono na rys. 2 i 3.

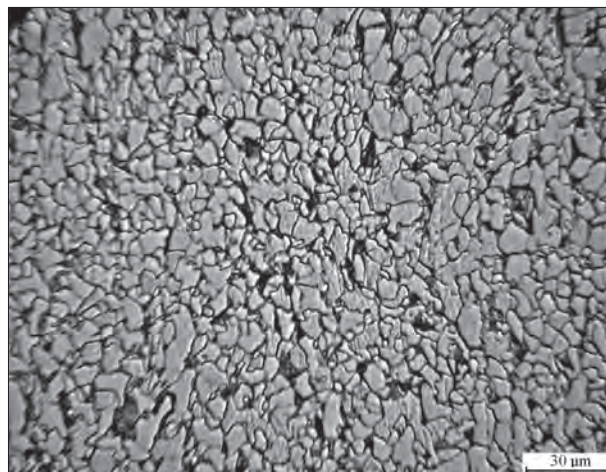
Kolejnym etapem badań były fizyczne symulacje wpływu szybkości chłodzenia po ostatnim odkształceniu. Szybkość chłodzenia dla symulacji walcowania zmieniano w zakresie 3÷50°C/s. Natomiast podczas symulacji chłodzenia blach taśmowych zbadano również skrajne szybkości chłodzenia tj. 100 i 150°C/s. Dla każdego eksperymentu dokonano analizy metalograficznej stali po przeróbce i chłodzeniu.

Analiza uzyskanych wyników wpływu prędkości chłodzenia po ostatnim odkształceniu na własności struktury badanej stali pozwoliła na stwierdzenie, że zmiana prędkości chłodzenia nie ma istotnego znaczenia dla uzyskiwanej wielkości ziarna ferrytu, natomiast znacząco wpływa na rodzaj uzyskiwanej struktury. W miarę wzrostu prędkości chłodzenia morfologia struktury zmienia się z ferrytycznej poprzez ferrytyczno-perlityczną, aż do ferrytyczno-bainitycznej. Przykładowe obrazy struktur dla próbek po przyspieszonym chło-



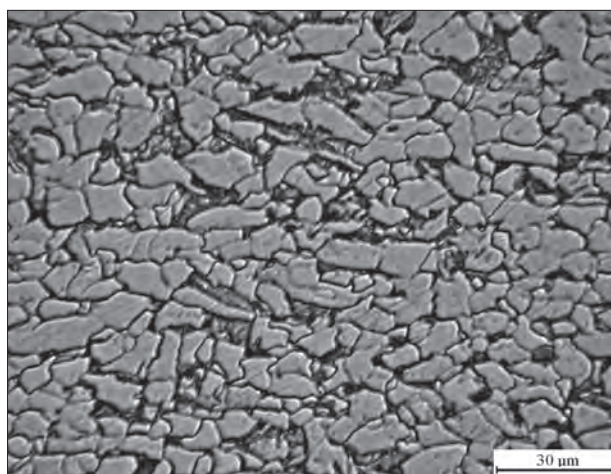
Rys. 2. Mikrostruktura próbki odkształcanej według schematu 1 (tabl. 2)

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



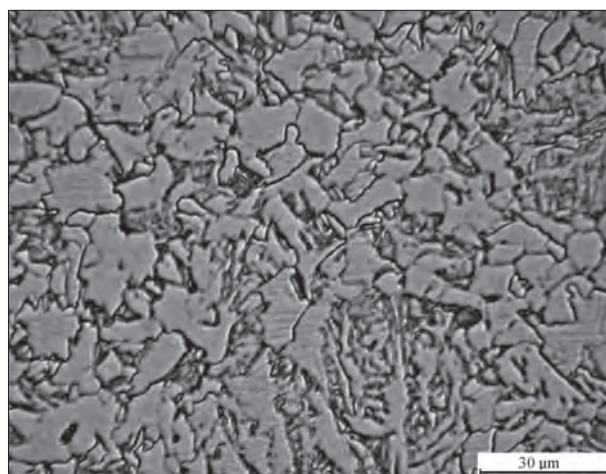
Rys. 3. Mikrostruktura próbki odkształcanej według schematu 2 (tabl. 2)

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



Rys. 4. Struktura próbki po przyspieszonym chłodzeniu z szybkością 30°C/s do temperatury 300°C

Fig. 4. Microstructure of sample after accelerated cooling at rate of 30°C/s to temperature 300°C



Rys. 5. Struktura próbki po przyspieszonym chłodzeniu z szybkością 40°C/s do temperatury 300°C

Fig. 5. Microstructure of sample after accelerated cooling at rate of 40°C/s to temperature 300°C

dzeniu dla blach arkuszowych przedstawiono na rys. 4, a dla blach taśmowych na rys. 5.

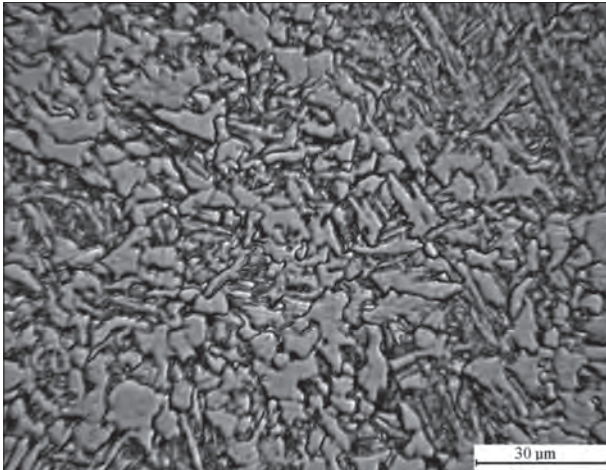
Następnym etapem badań było określenie czasu przerwy pomiędzy końcem walcowania i początkiem przyspieszonego chłodzenia. Czasy przerw dla blach arkuszowych przyjęto w zakresie 4÷20 s, natomiast dla blach taśmowych 4÷15 s. Przykładowe struktury uzyskane dla symulacji czasu przerwy wynoszącym 4 s i przyjętych prędkości chłodzenia 30°C/s dla blach arkuszowych i 40°C/s dla blach taśmowych przedstawiono na rys. 6 i 7.

Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że dla badanej stali bez względu na realizowany schemat odkształceń wprowadzenie czasu przerwy przed rozpoczęciem przyspieszonego chłodzenia powoduje uzyskanie większego ziarna ferrytu.

W kolejnym etapie badań określono wpływ temperatury końca przyspieszonego chłodzenia na uzyskiwaną strukturę i własności mechaniczne badanej stali. W tym celu przeprowadzono szereg kolejnych eksperymentów polegających na odkształcaniu próbki z zadaniem schematem gniotów, następnie chłodzeniu ze zwiększoną szybkością odprowadzania ciepła do ściśle określonej

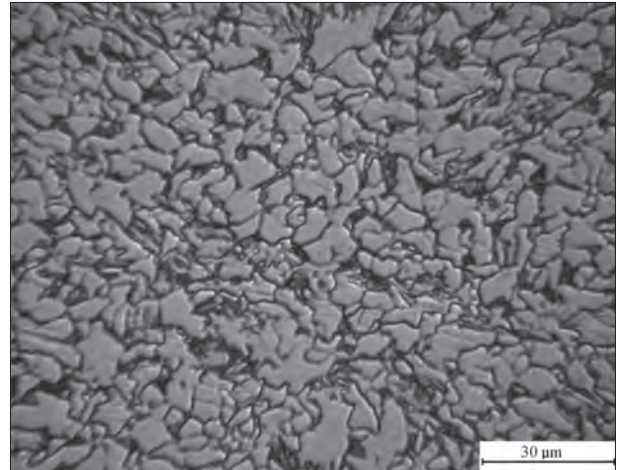
temperatury i następnym spowolnieniu chłodzenia do szybkości występującej w warunkach rzeczywistych podczas studzenia wyrobów w powietrzu. W oparciu o wcześniej opisane wyniki eksperymentów do badań zastosowano schematy gniotów umieszczone w tablicy 2. Temperatury końca przyspieszonego chłodzenia przyjęto z zakresu 650÷300°C. Przykładowe obrazy struktur uzyskanych dla blach arkuszowych po przyspieszonym chłodzeniu do temp 350°C przedstawiono na rys. 8, natomiast dla blach taśmowych po przyspieszonym chłodzeniem do 600°C przedstawiono na rys. 9.

Przeprowadzona analiza wpływu temperatury końca przyspieszonego chłodzenia na własności struktury materiału po walcowaniu wykazała, że w przypadku blach arkuszowych zatrzymanie przyspieszonego chłodzenia w temperaturze z przedziału 400÷600°C i spowolnienie go do szybkości 1,5°C/s prowadzi do powstawania w stali struktur ferrytyczno perlitycznych z dużymi ilościami wydzielen ferrytu iglastego. Struktury takie są niepożądane ze względu na dużą anizotropię własności mechanicznych, jak również na zmniejszenie własności wytrzymałościowych.



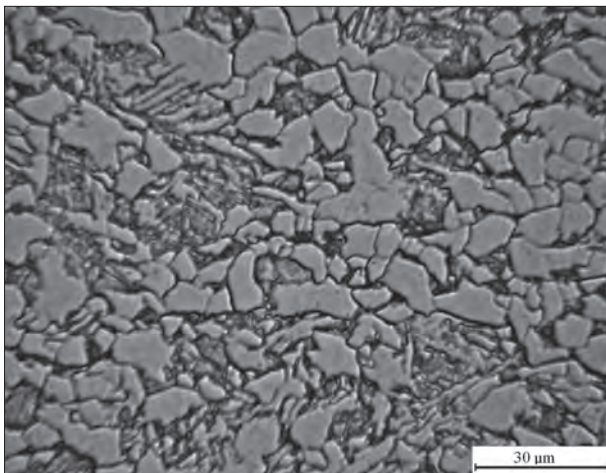
Rys. 6. Struktura próbki po zastosowaniu czasu przerwy i przyspieszonym chłodzeniu dla blach arkuszowych

Fig. 6. Microstructure of sample after holding-up and accelerated cooling of plate



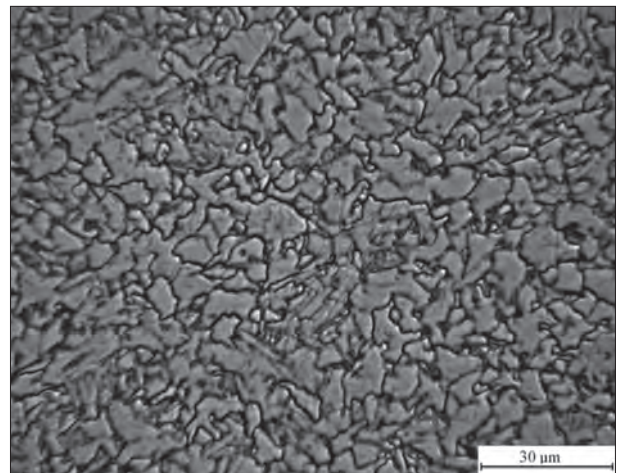
Rys. 7. Struktura próbki po zastosowaniu czasu przerwy i przyspieszonym chłodzeniu dla blach taśmowych

Fig. 7. Microstructure of sample after holding-up and accelerated cooling of strip



Rys. 8. Struktura próbki po przyspieszonym chłodzeniu do temperatury 350°C dla blach arkuszowych

Fig. 8. Microstructure of sample after accelerated cooling to temperature 350°C of plate



Rys. 9. Struktura próbki po przyspieszonym chłodzeniu do temperatury 600°C dla blach taśmowych

Fig. 9. Microstructure of sample after accelerated cooling to temperature 600°C of strip

Podobnych obserwacji dokonano podczas analizy próbek z symulacji walcowania blach taśmowych. Jednak w tych warunkach odkształceń struktury z dużą ilością wydzieleni ferrytu iglastego pojawiają się przy zatrzymaniu przyspieszonego chłodzenia w temperaturach z zakresu: 500÷550°C, natomiast w pozostałych wypadkach otrzymano drobnoziarniste struktury ferrytyczno-perlityczne.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych fizycznych symulacji procesu walcowania blach z badanej stali konstrukcyjnej ultradrobnoziarnistej można stwierdzić, że:

a) dla walcowania blach arkuszowych należy:

- walcowanie zakończyć przy temperaturze około 780°C;
- nie stosować przerwy pomiędzy końcem walcowania i początkiem przyspieszonego chłodzenia;
- zastosować przyspieszone chłodzenie z szybkością 30°C/s do możliwie niskiej temperatury, zbliżonej do temperatury otoczenia;

b) dla walcowania blach taśmowych należy:

- walcowanie zakończyć przy temperaturze około 815°C;
- nie stosować przerwy pomiędzy końcem walcowania i początkiem przyspieszonego chłodzenia;
- zastosować przyspieszone chłodzenie z szybkością 40°C/s do temperatury około 600°C;
- oraz dalsze chłodzenie na powietrzu do temperatury otoczenia.

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. Knapiński 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., Knapiński 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., Knapiński 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. Knapiński 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. Snopek J., Knapiński M., Koczurkiewicz B.: Phase Changes in Super Fine-Grained Steel During Continuous Cooling Process, Hutnik.Wiadomości Hutnicze, R.77, nr 5, 2010, ISSN: 1230-3534, s. 230-232